건설교통연구 기획보고서

R&D / 2012-연구기획-O-01

Land Transport and Maritime R&D Report

청정지하저수지 개발기술 기획연구보고서

2012. 10. 31.

주관연구기관 / 동아대학교
협동연구기관 / 국민대학교
협동연구기관 / 금호산업
협동연구기관 / 경남대학교
협동연구기관 / 부경대학교

국 토 해 양 부
한국건설교통기술평가원

2012-연구기획-O-01

대규모 청정지하저수지 개발기술기획연구

2012

국토해양부
한국건설교통기술평가원

주 의

1. 이 보고서는 국토해양부에서 시행한 건설교통연구기획사업의 연구보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토해양부에서 시행한 건설교통연구기획사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 아니됩니다.

제 출 문

국토해양부장관(한국건설교통기술평가원장) 귀하

이 보고서를 “ 청정지하저수지 개발기술기획연구”의 보고서로 제출합니다.

2012. 10. 31

주관연구기관명 : 동아대학교
주관연구책임자 : 박남식
연구원 : 김혜정
연구원 : 최뢰
연구원 : 레녹스글라덴
협동연구기관명 : 국민대학교
협동연구책임자 : 양정석
협동연구기관명 : 금호산업
협동연구책임자 : 윤여복
협동연구기관명 : 경남대학교
협동연구책임자 : 정우창
협동연구기관명 : 부경대학교
협동연구책임자 : 정상용

3. 보고서 요약서

보고서 요약서

<table>
<tr><td>과제고유번호</td><td>2012-연구기획-O-01</td><td>해 당 단 계
연 구 기 간</td><td>2012.4.13-
2012.10.31</td><td>단 계 구 분</td><td>총 단 계</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연 구 사 업 명</td><td>중 사 업 명</td><td colspan="4">건설교통연구기획사업</td></tr>
<tr><td>세부사업명</td><td colspan="4"></td></tr>
<tr><td rowspan="2">연 구 과 제 명</td><td>대 과 제 명</td><td colspan="4"></td></tr>
<tr><td>세부과제명</td><td colspan="4">청정지하저수지 개발기술 기획</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연 구 책 임 자</td><td rowspan="2">박남식</td><td>해당단계
참 여
연구원수</td><td>총 : 17 명
내부 : 4 명
외부 :13명</td><td>해당단계
연 구 비
(천 원)</td><td>정부: 50,000
기업: 10,000
계: 60,000</td></tr>
<tr><td>총연구기간
참 여
연구원수</td><td>총 : 17명
내부 : 4 명
외부 : 13명</td><td>총연구비
(천 원)</td><td>정부: 50,000
기업: 10,000
계: 60,000</td></tr>
<tr><td>연구기관명 및
소 속 부 서 명</td><td colspan="2">동아대학교 토목공학과</td><td>참여기업명</td><td colspan="2"></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">요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자 이내)</td><td>보고서면수</td><td>340</td></tr>
<tr><td colspan="6">• 본 연구는 기후변화, 재난, 수질사고 또는 범죄 등으로부터 보호될 수 있으며, 수질 자연정화기능과 저수량을 갖춘 청정 지하저수지의 설계, 구축, 운영 및 유지관리에 대한 핵심 원천기술 개발과 검증을 위한 국가 연구개발 사업을 도출하기 위한 연구 기획과제임.

• 객관성 있는 기획결과를 위하여 특허조사와 사전타당성 조사를 각 각 외부기관에 의뢰하였으며, 과제 도출을 위하여 관련 분야 관・산・학・연 전문가의 자문을 수행하였음.

• 기획결과 다음의 4개 중점 분야가 도출되었음.
- 대하천 하구 퇴적층에서 저수량 1,000만㎥ 확보를 위한 최적설계 기술
- 청정지하저수지 운영 및 유지관리 기술
- 청정용수 공급을 위한 수질관리 및 활용기술
- 건기에 30일 이상 - 50m^3/d 이상 생산능력의 지하저수지 기술 개발

• 상기 중점 분야에서 18개의 연구과제를 도출하였음.</td></tr>
<tr><td rowspan="2">색 인 어
(각 5개 이상)</td><td>한 글</td><td colspan="4">지하저수지, 저수량, 수질자연정화, 지표수-지하수 연계활용, 물산업</td></tr>
<tr><td>영 어</td><td colspan="4">subsurface reservoir, storage, natural attenuation, conjunctive use of surface water-groundwater, water industry</td></tr>
</table>

4. 요약문

요 약 문

I. 제 목

청정 지하저수지 통합개발 기술

II. 기 술 의 정 의 및 필 요 성

■ 기술의 정의

▌청정 지하저수지의 정의

▪ 인공적인 방법을 이용하여 지표수를 대수층에 함양시키고 일정한 기간 저장시키거나 유하시킨 후 양수하여 사용할 목적으로 활용되는 대수층과 일련의 시설을 가리킴. 본 연구에서는 비용이 많이 소요되는 터널, 지하댐 등의 인공 구조물을 지양하고 대수층의 자연 상태를 활용함. 지하저수지는 주입/함양 및 양수시설, 관망, 전후처리 시설, 시스템 감시 및 운영 시스템 등의 시설과 시스템 엔지니어링 기술, IT, BT, ET 등의 융복합 기술로 구성됨.

▌청정지하저수지의 핵심 기술은 다음과 같음

▪ 청정 지하저수지 시스템은 관정을 이용하여 대수층에 지표수를 주입하고, 일정 기간 유하시킨 후 수질이 자연 정화된 양질의 물을 하류에서 양수하는 시설로 관련 설비 (관정과 연결 관망 등, 지하댐 등 구조물 없음)와 운영체제로 구성됨. 목표 저수량과 일정 수준 이상 수질의 일생산량을 제공할 수 있어야함.

▪ 토탈솔루션 기술은 설계, 구축, 운영 및 유지관리 등 지하저수지 관련 HW 및 SW 기술을 가리킴.

▪ 지하저수지 최적설계 기술은 최소의 설비로 목표 수량 (저수량과 일생산량)과 생산수의 수질 목표를 충족시킬 수 있는 설비를 설계하는 기술임. 관정, 관망, 펌프 등이 핵심 대상이며 모의모델과 최적화기법의 활용이 포함됨.

▪ 지하저수지 최적 운영 및 유지관리 기술은 평상시에 지하저수지의 성능 감시와 평가, 그리고 요소 설비들의 기능 유지를 위한 기술을 포함함. 또한 비상시에도 목표 수질을 유지하면서 일생산량을 최대한으로 달성하기 위한 운영 기술과 음용수 신뢰성 확보를 위한 수질 위해요소 사전관리 기술 등이 포함됨.

▪ 수질관리 및 운영기술은 주입수가 양수정으로 흐르는 동안 생물학적, 물리적, 지구화학적 작용으로 수질의 자연정화 기작 (mechanism), 대수층내 오염물의 자연저감 기작, 관정 주변의 폐색 기작 등의 규명과 평가 기술을 포함함. 또한 BT 기술을 이용한 대수층의 자연정화 기능 제고 기술과 최적 수처리 기술도 포함됨.

■ 기술의 필요성

▪ 최근 들어 개선되고 있는 추세이나 국민들의 수돗물에 대한 불신은 여전히 높아 수돗물을 음용하는 비율은 아직도 매우 낮음. 이러한 불신의 가장 큰 원인으로는 원수의 나쁜 수질이 꼽힘. 따라서 지하저수지의 자연정화방법에 의한 원수의 수질개선을 통하여 점진적으로 수자원

및 수돗물에 대한 신뢰성 향상을 이끌 수 있음.

- 기후변화로 더욱 심화될 것으로 예상되는 가뭄의 강도와 빈도, 하천의 수질 사고, 인근 국가의 원전 사고, 지진 해일 등 각종 위협에 직접 노출된 다른 수원에 비하여 지하저수지에 저장된 수자원은 상대적으로 안전하게 보호받음. 따라서 물 안보 차원에서도 지하저수지의 구축이 필요함.
- 지하저수지에 대한 토탈솔루션 기술을 확보하면 해외의 지하저수지 시장에서 독보적인 경쟁력을 갖추고 시장 진출에 유리한 위치확보가 가능함. 이는 정부의 물산업 육성정책에도 부합됨.
- 지하저수지는 지표저수지나, 강변여과수, 인공습지 등의 전통적 방법이나 최근 도입되고 있는 대체 수자원에 비하여 수질과 수량 측면에서 많은 장점이 있음.

III. 국내외 동향 및 환경 분석

■ 정책동향

▌하천법 제23조에 따라 수립되는 수자원 관련 국가 최상위 계획인 『수자원 장기종합계획(2006~2020)』은 국토종합계획(2006~2020)의 목표인 “균형국토, 개방국토, 복지국토, 녹색국토 및 통일국토” 실험을 위한 이용·개발·보전에 관한 국가사업의 기본전략임.

▌2006년 2월 건설교통부(현 국토해양부), 산업자원부(현 지식경제부), 환경부가 합동으로 “물 산업 육성방안”을 국무회의에 보고하였음.

- 용수공급시설의 수출 산업화를 통하여 2015년까지 세계적인 물 기업을 육성하고, 수출을 통하여 20조원의 부가가치를 가진 사업으로 육성하고자 함.
- 이는 용수공급 기반시설의 구축과 개선사업의 지속적인 확대를 목적으로 추진하며, 물 산업의 촉진을 위해 원천기술을 개발하거나 확보하는데 주력하여 지능적 수처리 기술, 유비쿼터스 기반의 수도운영관리 기술 그리고 에너지 완전 순환형 수처리 기술 등을 집중 육성하며, 동남아, 남미 등의 개도국 시장 진출을 위하여 맞춤형 기술 개발 사업을 추진함.

▌국토해양부(2008. 12)는 2009년 업무 보고에서 ‘물과 함께하는 국토 재창조’ 등 『3대 핵심 정책 과제』와 공기업·민간 투자 유발효과가 커서 내수 진작 효과가 높은 프로젝트를 “한국형 뉴딜 10대 프로젝트”로 제시함.

▌정부는 2009년 11월 17일 1년여의 논의 끝에 2020년 온실가스 감축 목표를 2020년 온실가스 배출 전망치 대비 30%를 감축 목표로 설정하고 국내총생산(GDP)의 2%를 녹색성장에 투자할 계획을 발표함(청와대 정책소식, 2009, 11).

■ 시장현황 및 전망

▌GWI(2010)은 세계 ASR 시장과 관련하여 현재 ASR 용량이 10억 갤런/일에서 2020년에는 50억 갤런/일로 5배 이상 성장할 것으로 예상함.

▌맥킨지와 컴퍼니(2009)에서는 최근까지 상하수도 중심의 물 산업이 주로 진행되어 왔다면, 향후에는 수자원 확보 관점에서의 물 산업이 활성화 될 것이라고 전망하고 있음.

▌영국의 물 전문 리서치기관인 GWI(Global Water Intelligence)에 따르면 세계 물 시장 규모가 2007년에는 3,620억 달러에서 2025년에는 8,650억 달러로 성장할 것으로 전망함

▌각국의 지속적인 물 수요 증가에 따른 물 시장 확대 추세임.

- KOTRA 보고서(2009)에 의하면, 싱가포르, 독일, 스페인 등의 국가에서는 자국에서의 경험을 활용하면서 국가정책의 일환으로 세계시장을 공략하는 움직임이 가속화되고 있음.
- 일본의 경우, 2025년까지 세계 물시장 점유율을 6%(1조8000억원 규모)까지 끌어올리기 위해 물 산업에 집중적인 투자 지원 중, 해외기업과의 합작기업 설립, 물 처리 기업 인수 등 지원.
- 국내 물산업의 경우, '물산업 육성 전략'의 정책적 기반과 2020년까지 3조 6,409억원의 투자를 통하여 2020년 8개의 세계적인 물기업 육성을 계획함.

■ 기술동향 분석

- 특허분석의 경우 관련 기술에 대한 국내 출원사례가 적어 지하저수지 기술을 이용하는데 법적 장애가 낮은 것으로 평가되었으며, 또한 기존 특허를 구성요소를 치환하거나 부가하여 새로운 특허를 창출하는데 매우 용이한 것으로 평가됨.
- 논문분석을 통하여 지하저수지 기술의 수준 및 동향을 확인한 결과, 국내 수처리 분야 경쟁력은 세계 10위권 이내로 기술경쟁력을 갖춘 것으로 판단되나 지하저수지 구축 및 운영 · 유지관리 부분은 상대적으로 낮은 경쟁력을 나타내고 있음.

Ⅳ. 연 구 의 범 위 및 내 용

■ 연구단 비전 · 목표 제시, 연구내용 및 추진전략 수립

- 연구 추진방안, 연구성과 달성방안 및 계획수립
- 타당성 조사 및 분석(기술적, 정책적, 경제적 타당성 분석)
- 연구단 공모 RFP 설정

■ 세부과제별 연구개발사업 제안서(RFP) 제시

- 주요 세부과제, 세부연구내용 및 주요 요소기술 도출
- 세부과제별 로드맵 제시
- 연구 목표 설정, 추진전략, 연구수행 방법, 주요연구내용 등 제시

Ⅴ. 연 구 단 의 비 전 및 목 표

■ 비전

- 국민들이 믿을 수 있는 청정 수도 원수 공급 및 세계 최고 수준의 지하저수지 토탈솔루션 기술 확보

■ 연구단의 목표

- 천만m^3 이상 규모의 저수량과 십만m^3/일 단위의 청정 용수를 생산하는 청정 지하 저수지 최적 설계 · 구축 · 운영 및 유지관리를 포함한 토탈솔루션 기술 개발
- 백만m^3 규모의 저수량과 2,000m^3/일 규모의 시험시설을 통한 기술의 검증 · 보완 및 개선
- 건기에 30일간 50m^3/일 이상 생산 가능한 우기주입-건기회수 지하저수지 설계 · 구축 · 운영 및 유지관리 기술개발

Ⅵ. 연 구 개 발 과 제 구 성 및 추 진 전 략

■ 연 구 개 발 과 제 의 구 성

세부과제	추진전략	세부연구내용
총 괄	세부과제 연구간의 유기적 통합 및 시험시설 검증 보완	• 청정 지하저수지 구축을 위한 통합기술개발 • 시험설비 구축 및 운영 • 지하저수지 관련 법, 제도 및 경제성 연구
1세부: 대하천 하구 퇴적층에서 저수량 1,000만㎥ 확보를 위한 최적 설계기술	대수층의 불확실성을 고려한 탄력적 시스템 설계	• 대하천 하구 퇴적층 부지 특성 평가 기술 • 주입 및 양수 시스템 최적 설계기술 • 지하저수지 모니터링 시스템 설계기술 • 주입수 거동 및 수질 평가 기술
2세부: 청정지하저수지 운영 및 유지관리 기술	정상 시와 다양한 시나리오의 비상시에 대비한 운영 및 유지관리 기술 개발	• 지하 저수지 통합 운영 기술 • 비상 시 지하 저수지 운영 기술 • 시스템 유지관리 기술 • 지반변형 해석 및 방지(저감) 기술
3세부: 청정용수 공급을 위한 수질관리 및 활용기술	BT와 IT 등 기술을 활용하여 수질 자연정화기능 해석, 예측, 그리고 기능 강화방안 연구	• 음용수로서의 신뢰도 확보를 위한 청정 지하저수지의 수질위해요소 사전관리 기술 • 청정 지하저수지의 지속가능한 운영을 위한 주입수 전처리 기술 • 먹는물 공급을 위한 플랜트 최적 설계 · 운영 · 유지관리 통합 기술 • 물리 · 지화학적 대수층 수질의 개선 특성 평가 기술 • 대수층 수질의 생물학적 개선특성 평가 기술
4세부: 건기에 30일 이상 - 50m^3/d 이상 생산능력의 지하저수지 기술	해안 및 도서 등 낙후지역의 물복지 실현	• 우기주입-건기회수 지하저수지 설계 기술 • 소규모 지하저수지 운영 및 유지관리 기술

Ⅶ. 사 전 타 당 성 검 토

■ 정책적 타당성 (정부 지원의 타당성)

▪ 수자원은 단순한 공공재가 아니라 경제재로 인식되고 있어 물 산업분야는 기업의 수준을 넘어 국가 경쟁으로 치열하게 성장 중이다. 이에 2006년 2월 국토해양부, 지식경제부, 환경부가 합동으로 “물 산업 육성방안”을 수립하였음. 방안의 골자는 용수공급시설의 수출 산업화를 통하여 세계적인 물 기업을 육성하고, 수출을 통하여 20조원의 부가가치를 가진 사업으로 육성하

는 것임.

- 수자원 분야의 최상위 계획인 수자원 장기종합계획을 따르면 “신규 수자원확보”를 위하여 지하수개발과 강변여과수와 같은 대체수자원 개발에 대한 중요도가 높았으며, 수자원 조사·연구 및 기술개발 계획으로 물부족, 홍수, 수질오염 등을 해결할 수 있는 R&D 투자가 필요하며 이러한 미래 기술수요를 고려하여 선진국 대비 90% 이상의 기술수준을 달성하는 것을 계획하고 있음.

■ 기술적 타당성

- 청정 지하 저수지 기술은 기존의 취수원들과 대안들에 비하여 많은 장점을 가지는 혁신적 대안임. 지하 저수지는 지표댐의 수몰지역, 증발손실, 홍수 시 탁도, 여름 철 조류발생 등의 문제가 없으며 광역상수도에 비하여 장대관로도 필요 없음. 또한 규모에 따라 지역 내에 설치가 가능하여 사회적 문제도 적음. 그리고 기존의 지하 대수층을 이용한 강변여과수 등의 기술이 가진 장점을 취하고 단점은 보완한 청정 지하 저수지의 설계, 구축, 운영 및 유지관리 기술을 모두 포함하는 토탈솔루션 기술 개발을 통하여 지속가능하고 친환경적인 용수공급을 수행할 수 있게 함.
- 지하 저수지 개발 부분은 세계 최초로 기술 개발되는 부분으로 향후 원천기술 및 설계분야, 유지관리 분야의 기술개발 및 특허출원이 크게 증가될 것으로 예상되며 따라서 향후 기존 기술과 차별화된 본 기술을 통하여 세계 물시장에서 경쟁력을 확보가 가능할 것으로 예상됨.

■ 경제적 타당성

- GWI(Global Water Intelligence)에 따르면 2010년 4,280억 달러 규모로 추정되는 세계 물시장이 2025년에는 8,650억 달러에 이를 것으로 예측됨. 이와 같은 규모는 반도체 산업이나 조선산업보다 큰 것으로 예상되며, 동아시아와 중동, 중국, 북아프리카 지역의 10% 이상의 물산업 고성장에 기인된 것으로 분석됨. 특히 지표수 중심의 취수가 아닌 미래 공공수요를 대응하고 지속가능한 지하 저수지 개발과 같은 대체 수자원 분야의 국내·외 미래 성장이 크게 증가 될 것으로 예상됨.
- 수요, 비용, 그리고 편익의 추정, 비용·편익분석 등을 통하여 청정 지하저수지의 경제적 타당성 분석을 수행하였음. 편익 분석을 수행하기 위하여 10만m^3/일 규모의 청정 지하저수지 구축을 가정하여 지하저수지 및 수처리 시설 공사비, 유지관리비등을 비용으로 산정하였으며, 이때 총 비용은 595.6억원이였음. 편익으로는 고도정수처리 시설 및 운영비 저감, 기존 취·정수장 가동 중지에 따른 원가절감 편익, 원수 수질개선에 따른 소비자 편익 등으로 구분될 수 있었으며, 이를 현재 화폐가치로 계량화한 총 편익은 1,649.6억원으로 추정되었음. 비용편익 분석결과 B/C 비율은 2.77로 나타나 순편익이 발생되어 경제적 타당성을 확보 한 것으로 평가됨.

■ 과학기술적 파급효과

- 대규모 청정 지하저수지 개발 기술은 국내에서는 처음이고 외국에서도 시작단계에 있으므로, 사회적 및 경제적으로 뿐만 아니라, 과학기술적으로도 그 파급효과가 매우 큼. 본 연구를 통하여 지표수와 지하수 연계활용의 고도화 기술 개발과 ASR, ASTR 기술분야에서 국제경쟁력을 제고할 수 있음. 또한 도서 산간지역에 대하여 기후변화 대응 수자원 확보 기술 수준과 마을 상수도 등 소규모 수도 시설관리 기술의 향상을 도모할 수 있음.

▪ 대규모 청정 지하저수지는 대하천 하구에 두께 60~80m로 발달된 충적 피압대수층에서 개발되므로, 이 연구를 통하여 충적대수층의 수리적 특성을 평가하는 수리지질학적 인자(유효공극율, 투수계수, 저류계수, 분산지수 등) 산출기술 개발, 지하수 함양량 평가기술 개발, 충적대수층(미고결 퇴적층) 샘플링 기술 개발 등 아직 국내외적으로 완성되지 못한 중요한 기술을 개발할 수 있음. 또한 본 연구를 통하여 다수의 주입정과 양수정이 결합된 상시 용수공급 시스템 운영기술, 주입 및 양수 장치에 대한 모니터링 시스템과 모바일 시스템을 결합한 상시용수 공급장치 원격모니터링 및 제어 시스템 기술, 청정 지하저수지의 지속가능한 운영을 위한 주입수 전처리 기술, 먹는물 공급을 위한 플랜트 최적 설계 · 운영 · 유지관리 통합 기술, 대수층 수질의 생물학적 개선특성 평가 기술 등을 개발할 수 있음.

Ⅷ. 연 구 결 과 의 활 용 방 안

■ 본 연구결과는 청정 지하저수지 개발 연구단의 과제 공모를 위한 지침서로 활용

목 차

제 1 장 기술의 정의 및 필요성 ····· 1
제 1 절 기술의 정의 ····· 1
1. 지하저수지의 정의 ····· 1
2. 지하저수지의 필요성 ····· 6
3. 세부과제별 기술정의 ····· 8
제 2 절 기술 분류 및 내용 ····· 10
1. 기술 분류 ····· 10
2. 기술 내용 ····· 11

제 2 장 국내·외 동향 및 환경 분석 ····· 16
제 1 절 국내·외 정책동향 ····· 16
1. 국내 정책 동향 ····· 16
2. 국외 정책·제도 동향 ····· 24
제 2 절 국내·외 시장현황 및 전망 ····· 37
1. 국외 인공함양 시장 현황 및 전망 ····· 37
2. 국외 물 산업 시장 현황 및 전망 ····· 42
3. 국내 시장 현황 및 전망 ····· 50
제 3 절 기술동향분석 ····· 55
1. 기술 분류 및 정의 ····· 55
2. 특허동향 분석 ····· 56
3. 논문동향 분석 ····· 66
제 4 절 연구개발 인프라 분석종합분석 ····· 110
제 5 절 종합분석 ····· 114
1. 국내외 정책 및 시장 분석 ····· 114
2. 기술개발 동향 및 인프라 종합분석 ····· 116
3. 동향조사 종합 결론 ····· 117

제 3 장 연구개발과제 구성 및 추진전략 ····· 119
제 1 절 비전 및 목표 ····· 119
1. 비 전 ····· 119
2. 연구의 목표 ····· 119
3. 연구의 목적 ····· 120
제 2 절 기술개발에 따른 미래상 ····· 121
1. 현황 및 미래상 ····· 121
2. 기술개발 전략 및 효과 ····· 123
제 3 절 연구개발과제 구성 ····· 126
제 4 절 세부과제별 주요내용 및 추진전략 ····· 129
1. 총괄과제 (청정 지하저수지 통합개발 기술) ····· 129
2. 1세부과제 ····· 136
3. 2세부과제 ····· 143
4. 3세부과제 ····· 153
5. 4세부과제 ····· 169
제 5 절 세부과제 간 연계관계 ····· 174
제 6 절 과제별·연차별 기술로드맵 및 성과로드맵 ····· 175
1. 총괄과제 기술 및 성과 로드맵 ····· 175
2. 1세부과제 기술 및 성과 로드맵 ····· 175

3. 2세부과제 기술 및 성과 로드맵 ····· 176
4. 3세부과제 기술 및 성과 로드맵 ····· 176
5. 4세부과제 기술 및 성과 로드맵 ····· 177
제 7 절 성과의 활용방안 ····· 178
1. 정책적 활용 ····· 178
2. 경제적 활용 ····· 179
3. 기술수요처 ····· 180
제 8 절 추진체계 ····· 181
제 9 절 최종평가 의견을 반영한 과제구성안 ····· 182

제 4 장 사전타당성 검토 ····· 183
제 1 절 정책적 타당성 ····· 183
1. 상위계획과의 부합성 ····· 183
제 2 절 기술적 타당성 ····· 192
1. 기존 연구기술 개발 사업과의 중복성 ····· 192
2. 기술 개발 계획의 우수성 ····· 205
3. 보유 기술 수준 및 개발성공 가능성 ····· 207
제 3 절 경제적 타당성 ····· 209
1. 분석 개요 및 기본가정 ····· 209
2. 경제성 분석 ····· 215
3. 편익분석 ····· 218
4. 비용-편익 분석 ····· 220
5. 경제사회적 파급효과 ····· 220
6. 도서지역 물 공급 대안별 경제성 및 안정성 분석 ····· 223
제 4절 과학기술적 파급효과 ····· 225
제 5 절 기술개발의 필요성 ····· 227
1. 지속가능한 친환경 기술 ····· 227
2. 물부족 현상의 대응 ····· 227
3. 물산업 성장 동력 ····· 228
제 6 절 정부지원의 타당성 ····· 237
제 7 절 종합평가 및 결론 ····· 240
1. 종합평가 ····· 240
2. 결론 ····· 242

제 5 장 인력투입계획 및 소요예산 산정 ····· 243
제 1 절 연구일정에 따른 전체사업 및 세부과제별 인력투입계획 ····· 243
제 2 절 소요예산 산정 ····· 244
1. 전체사업 소요예산 ····· 244
2. 세부과제별 소요예산 ····· 245

제 6 장 과제 제안요구서(RFP) ····· 251
제 1 절 과제 제안요구서 ····· 251
1. 연구단 RFP ····· 251
2. 세부과제별 RFP ····· 270
제 2 절 평가기준 ····· 309
제 3 절 최종평가 의견을 반영한 연구단 RFP ····· 310

참고문헌 ····· 321

제 1 장 기술의 정의 및 필요성

제 1 절 기술의 정의

1. 지하저수지의 정의

▌지하저수지

지하저수지란 주입관정(우물)이나 함양지(연못) 등의 인공적인 방법을 이용하여 지표수를 대수층에 충진시키고 일정 기간 저장시키거나 유하시킨 후 양수하여 사용하기 위한 목적으로 활용되는 대수층과 일련의 시설을 가리킴. 이러한 시설에는 주입/함양 및 양수 시설, 관망, 전후처리 시설, 시스템 감시 및 운영 시스템 등이 포함됨. 본 연구에서 추구하는 지하 저수지는 비용이 많이 소요되는 터널, 지하저류조, 또는 지하댐 등의 인공 구조물에 의존하지 않고 대수층의 자연 상태를 활용하여 구축될 수 있음.

본 연구에서 목표로 하는 청정 지하저수지는 대수층의 저장 공간과 대수층의 자연 수질개선 능력을 활용하는 친환경 기술임.

▌지하저수지의 개념

'청정 지하 저수지' 기술이란 지표수의 인공 주입을 통하여 대수층에 수질과 수량을 형성시키고 활용하는 기술임. 그러므로 청정 지하 저수지의 기본 개념은 지표수와 지하수의 장단점을 상호 보완하는 적극적이며 능동적인 연계 활용에 있음. 이는 지표수 문제 발생 시 지하수를 개발하는 소극적이고 수동적인 통상의 지표수-지하수 연계활용과 차별화됨.

▌지하저수지의 종류 및 특징

지하저수지는 상시주입-상시양수 형식과 우기주입-건기양수 형식으로 구분될 수 있으며, 각 형식에 대한 설명은 다음과 같음.

- **상시주입-상시양수 형식**의 지하저수지는 주입과 양수가 연중 이루어지는 형식으로 수질은 불량해도 주입할 수 있는 지표수가 연중 확보될 수 있는 지역에 설치될 수 있으며, 대하천 하구에서 나타날 수 있는 삼각주[1]는 상시주입-상시양수 지하저수지의 좋은 후보지가 될 수 있음. 지하저수지의 규모는 삼각주의 규모 및 수리지질 특성에 의하여 결정되므로 삼각주의 규모에 따라 대규모 지하저수지가 조성될 수 있음.

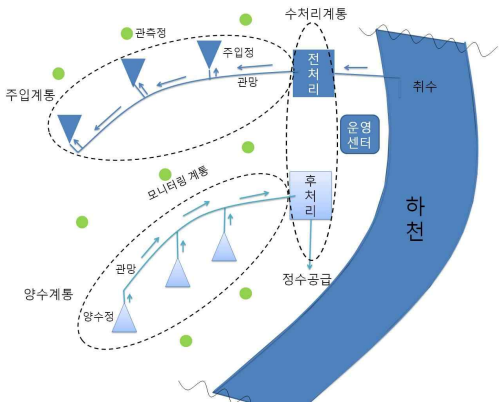
1) 삼각주(delta): 하천이 바다로 유입할 때, 유속이 감소함에 따라 운반해온 물질을 하구에 퇴적시켜 형성되는 평야 (한국지리-총론편, 국토해양부 국토지리정보원, 2008)

■ 삼각주에서 점토와 실트층과 같은 난투수성 지층은 상부에, 모래와 자갈층과 같은 투수성 지층(대수층)은 하부에 나타나는 경우가 많음. 이 자갈층은 퇴적층 하부의 암반층과 시간적으로 많은 공백을 갖는 부정합(Unconformity)의 관계가 있음. 예를 들면, 낙동강 하구 삼각주의 경우 퇴적층은 신생대 제 4기 홍적세(Pleistocene Epoch) 시기 말인 최소 1만년전에 퇴적되었으며, 퇴적층 하부의 암반층은 중생대 백악기 불국사 화성활동에 의하여 형성된 암석임. 따라서 퇴적층과 암반층 사이의 시간 간격은 6,500만년 정도가 됨(류춘길, 2003; 류춘길 등, 2005; 류춘길 등, 2011).

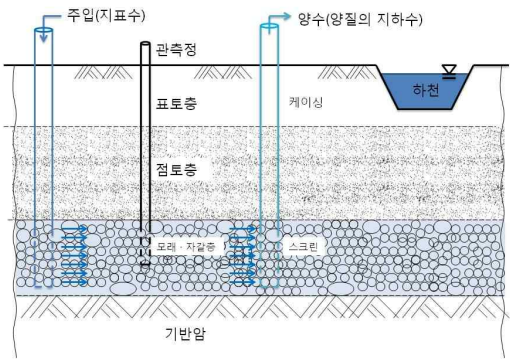
▪ 난투수성 지층 하부에 대수층이 발달되어 있는 경우 지표면의 오염물로부터 보호될 수 있음. 삼각주는 형성 이력에 따라 대수층에 염도가 높은 지하수가 존재할 수 있음. 이러한 경우 지하저수지 조성을 위해서는 주입된 담수로 염지하수를 치환해야하는 기술이 추가적으로 필요하지만, 기득 지하수 수리권이 존재하지 않으므로 저수지 조성에 더 유리한 측면도 있음.

▪ 그림 1.1과 1.2는 상시주입-상시양수 지하저수지의 개념을 평면도와 연직단면도로 도시한 것임. 하천에서 취수된 지표수는 전처리 과정을 거쳐 관망을 통하여 주입정으로 도수되고 대수층으로 주입됨. 유하과정을 거쳐 수질이 개선된 주입수는 양수정에서 양수되어 약간의 후처리 후 (소독 등) 정수로 공급될 수 있으며, 대수층에는 일정 규모의 저수량이 확보됨. 배경지하수가 염지하수인 경우 주입수와 배경수 사이에 염도가 변하는 천이대가 존재함.

▪ 여기서 지하저수지의 성능을 결정하는 저수량, 주입량 및 양수량 (일생산량), 수질개선 정도 등이 설계에 의하여 결정되며, 저수량은 대수층의 두께 및 분포 면적 그리고 유효공극율 등에 의하여 결정됨. 예를 들어, 두께 15m, 면적이 4km^2, 그리고 유효공극율이 0.2(모래/자갈층)인 경우 저수량이 약 1,200백만m^{3}이 됨. 주입량과 양수량은 대수층의 투수계수와 저류계수 등의 수리지질 특성과 관정특성 및 지하저수지 운영방식 등에 의하여 결정됨. 지하저수지는 자연재난, 대형사고 또는 시스템의 고장으로 인하여 주입이 불가능한 비상시에도 저수량을 이용하여 일정기간 양수가 지속될 수 있음. 이러한 비상시 양수량 및 양수기간도 설계 요소로 결정됨.

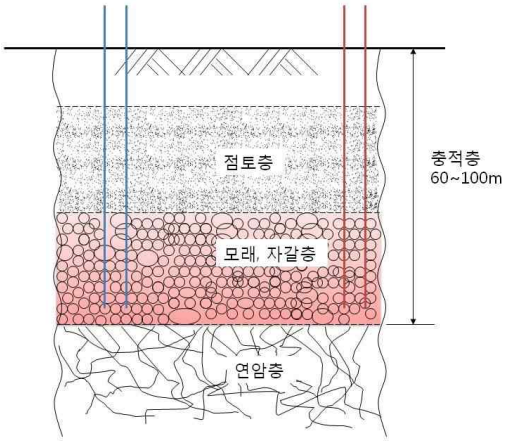


▌그림 1.1 (상시주입-상시양수) 지하저수지의 개념도 (평면)

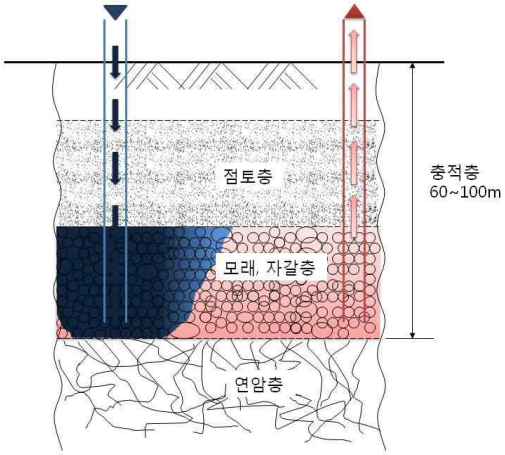


▌그림 1.2 (상시주입-상시양수) 지하저수지의 개념도 (단면)

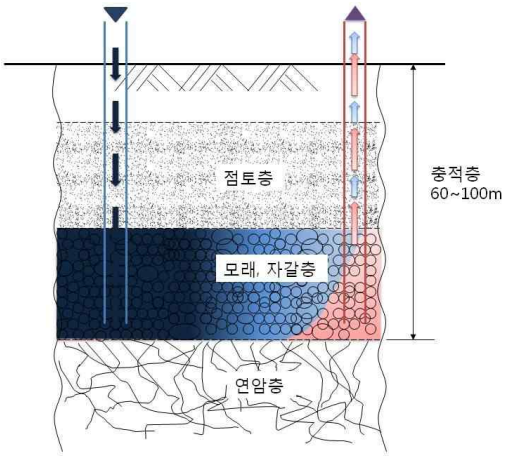
▪ 그림 1.3 ~ 그림 1.6은 대수층에 존재하는 원 지하수가 염수인 경우 지하저수지 조성 초기에 염수가 치환되는 과정에 대한 모식도를 나타낸 것임. 자연 상태의 하구 대수층에 염수가 존재하는 경우 담수 주입과 양수가 동시에 시작되며, 양수정에서 초기에는 염수가 나옴. 일정 기간 후 양수정의 염도는 낮아지기 시작하며 최종적으로 수질이 개선된 주입수 (담수)가 나오면서 지하저수지의 정상 가동이 시작됨.



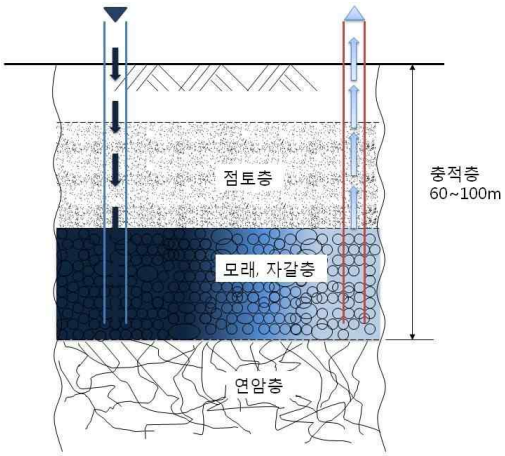
▌그림 1.3 자연상태 (염수 등 부존)



▌그림 1.4 하천수 주입 개시 후



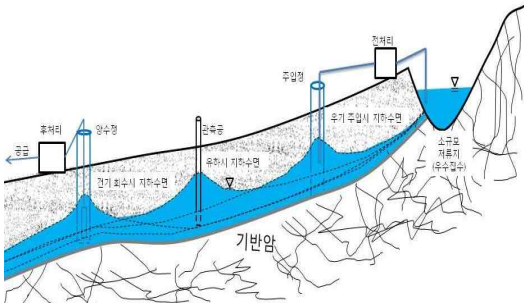
▌그림 1.5 정화된 주입수 양수정 도달



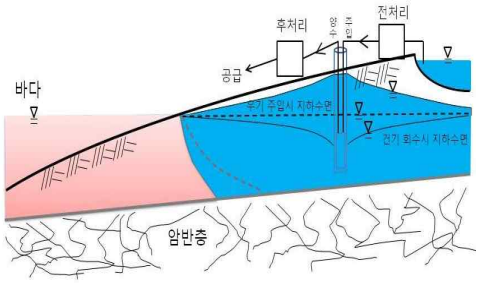
▌그림 1.6 지하저수지 정상가동 상태

▪ **우기주입-건기회수 형식**의 지하저수지는 수자원이 부족하여 우기 (장마, 태풍 등 시즌)에는 주입할 수 있는 잉여 지표수가 있으나 건기에는 지표수의 수량이 부족할 수 있는 지역을 대상으로 함. 하천 발달이 빈약한 산간, 도서 및 해안 지역이 주로 대상이 되며 이러한 지역에서는 대수층의 수평 및 연직방향 규모가 빈약한 경우가 많기 때문에 소규모 지하저수지로 규모가 제한될 수 있음. 여기서도 해안 및 도서지역의 후보 대수층에는 염도가 높은 지하수가 존재할 수 있음.

▪ 그림 1.7과 1.8은 우기주입-건기회수 (소규모) 지하저수지가 해안 및 도서지역 또는 산간 지역에 설치된 경우의 개념도를 제시한 것임. 산간 지역의 경우 통상 지하수 동수경사가 크므로 우기 주입시설의 위치는 저장기간 동안의 유하거리를 고려하여 양수정의 상류에 설치해야 함. 해안지역의 경우 지하수의 동수경사가 낮으면 단일 관정에서 주입과 회수가 시행될 수 있으나 동수경사가 큰 경우에는 주입시설과 양수정을 구분해야할 필요가 있음.

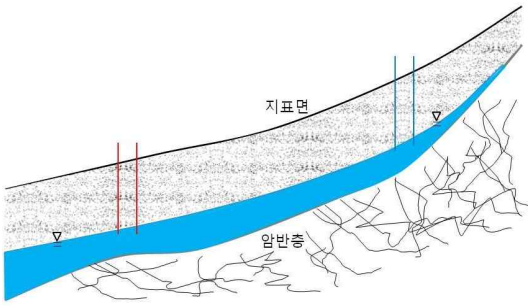


▌그림 1.7 산간 지역 소규모 지하저수지 개념도 (연직 단면)

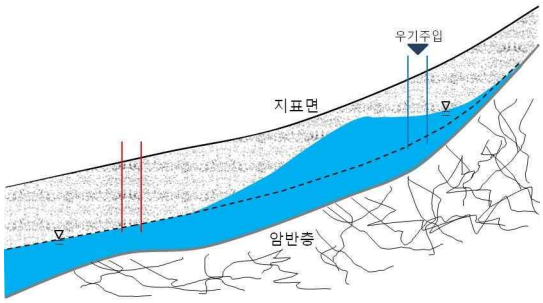


▌그림 1.8 해안지역 소규모 지하저수지 개념도 (연직 단면)

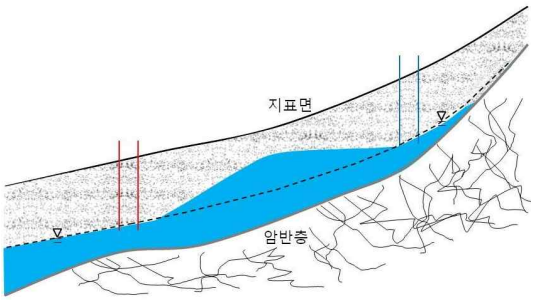
▪ 그림 1.9 ~ 그림 1.12에는 산간지역의 우기-유하기-회수기에 대한 주입수의 시간별 거동을 도시하였음.



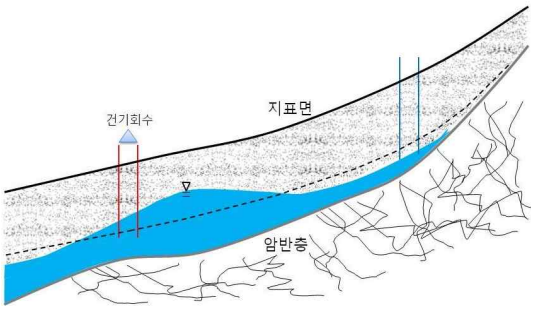
▌그림 1.9 산지의 지하수 자연상태



▌그림 1.10 우기에 잉여지표수 주입



▌그림 1.11 우기와 건기 사이 기간

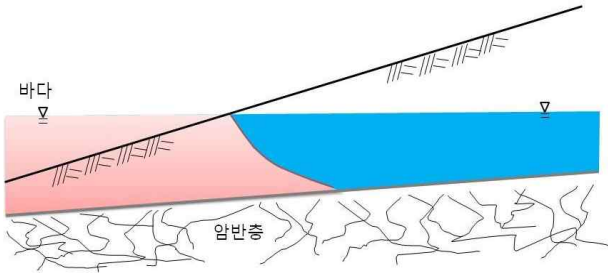


▌그림 1.12 건기에 하류 양수정에서 취수

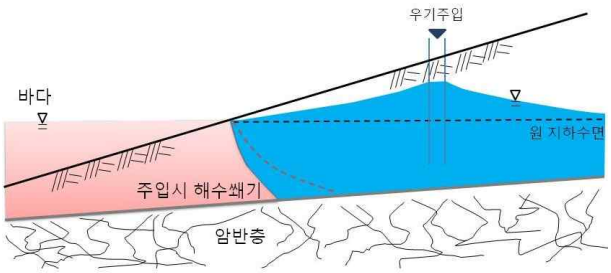
▪ 우기에 관정이나 함양지를 통하여 대수층으로 충진된 지표수는 암반 층 상부에 지하수 마운드를 형성함. 우기가 끝나면 마운드는 사면 경사를 따라 흘러내림. 건기에 하류의 양수정에

도달한 마운드에서 지하수를 취수하는 시스템이 우기주입-건기양수 형식의 지하저수지임. 산간 지역의 지하저수지는 주입량, 주입기간, 유하기간, 양수량, 양수기간 등에 따라 양수정과 주입정/함양지를 설계되어야 함. 이때 주입정과 양수정 사이의 간격은 유하기간과 대수층의 수리수문지질특성에 의하여 결정됨. 강변여과의 경우 하천변 50~100m 정도의 거리를 유하하는 데 50일 이상이 소요되는 것으로 조사된 바 있음. 따라서 우기와 건기 사이를 6개월이라 하면 양수정과 주입정 간 거리가 500m 정도면 우기의 주입수를 건기에 하류에서 취수할 수 있을 것으로 판단됨. 물론 정확한 제원은 지역 특성에 따라 결정되어야함.

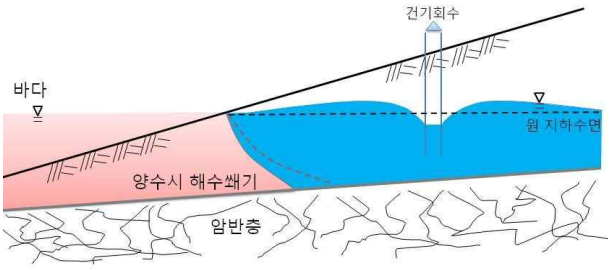
- 그림 1.13 ~ 그림 1.15는 해안지역에서 단일 관정을 이용한 경우의 우기주입-건기회수 소규모지하저수지에 대한 주입수의 시간별 거동을 도시한 것임.



▌그림 1.13 해안지역 지하수의 자연 상태



▌그림 1.14 우기 잉여 지표수 주입



▌그림 1.15 동일 관정에서 건기 취수

- 지하수 동수경사가 작은 해안 지역 등에서는 한 개의 관정을 이용하여 주입 및 양수를 시행하는 우기주입-건기회수 형식이 적용될 수 있음. 이 형식의 지하저수지는 우기에 형성된 지하수 마운드가 저장기간 동안 그다지 멀리 이동하지 않는 조건일 때 적용될 수 있음.

▌지하저수지의 목적

▪ 지하저수지는 저수량 확보 및 양질의 용수 공급이라는 수량과 수질 측면에 대해 다음과 같은 목적을 가짐.

- **상시주입-상시양수 지하저수지의 목적**은 평상시에는 저수량의 감소 없이 일정 량 이상의 깨끗한 용수를 지속적으로 생산하는 것이며, 비상 시에는 저수량을 이용하여 일정 기간 동안 용수를 공급하는 것임. 여기서 평상 시란 정상적으로 주입이 가능한 시기를 의미하고, 비상 시란 하천이 자연 재난 (홍수, 가뭄, 조류, 지진해일 등)이나 사고 (기름, 독극물, 방사능 등 오염 또는 지하저수지 주입 시스템 오작동 등)로 인하여 정상적으로 인공주입이 이루어질 수 없는 시기를 가리킴.

- **우기주입-건기회수 지하저수지의 목적**은 물이 부족한 건기에 일정 기간 동안 일정량 이상의 양질의 용수를 공급하는 것임.

▪ 두 가지 형식의 지하저수지에서는 공통적으로 대수층의 자정능력에 의한 수질 개선을 기대할 수 있음. 수질이 별로 좋지 않은 지표수(하천수 또는 빗물)를 대수층에서 저장하거나 유하시켜 대수층의 물리적, 지화학적, 생물학적 자정능력으로 일정 비율 이상 수질을 개선시키는 것이 수질 측면의 목적임. 또한 공학적 방법으로 대수층의 자연 수질개선 능력을 제고시키는 것도 목적에 포함됨.

▌본 연구의 주요 내용

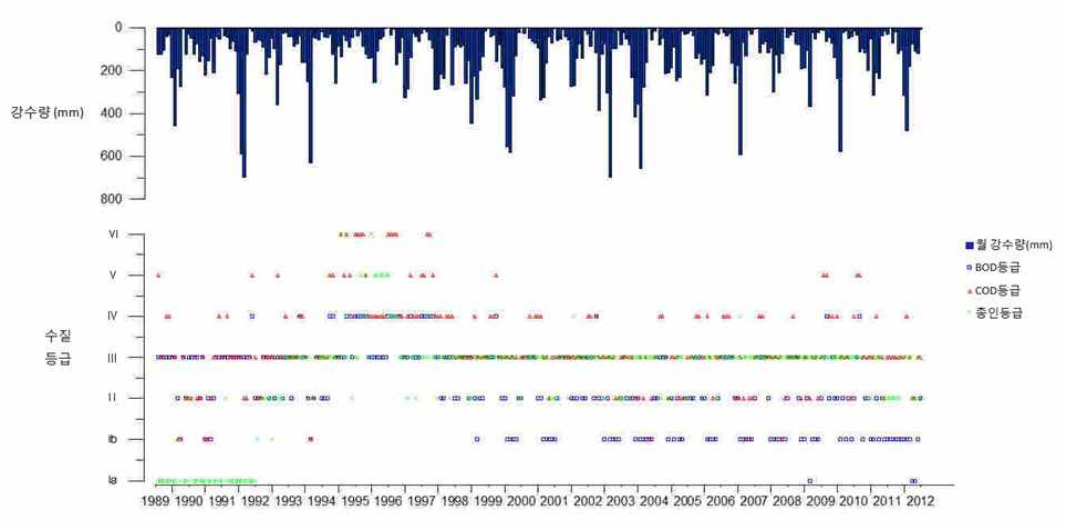
▪ 주입 하천수를 이용한 배후 지하수의 치환, 저수량 확보, 일 생산량 확보, 수질 자연정화를 달성하는 시스템 기술 개발임.

▪ 핵심기술 분야는 주입정과 양수정의 최적 설계, 지하저수지 운영 및 유지관리 기술, 그리고 수질관리임.

2. 지하저수지의 필요성

▌우리나라 대부분의 대도시들은 댐수를 기반하여 취수하고 있는 반면 대구 및 부산의 경우는 하천 표류수 의존도가 무척 높음.

▪ 부산시의 경우 하천 의존도가 94%를 초과하여 상류지역 오염 시 대처가 어려운 지리적 취약점과 강수량 감소 시 취수 자체가 어려워 안정적인 취수가 불가능해지는 단점을 가지고 있음. 표 1.1은 우리나라 7대 도시 상수원의 취수 현황을 나타낸 것임.



▌그림 1.16 낙동강 물금 지점의 89년부터 13년간 월평균 수질

▌표 1.1 7대 도시 상수원 취수 현황

구분	부산	서울	대구	인천	광주	대전	울산
하천 표류수	94.3%	0.0%	73.9%	0.0%	0.0%	5.0%	36.9%
댐	5.7%	100.0%	26.1%	99.5%	100.0%	95.0%	63.1%
댐 명	회동	팔당	가창·공산·운문	팔당	주암	대청	회야

▌부산광역시의 취수장이 있는 낙동강 물금 지점의 89년부터 13년간 월평균 수질을 BOD, COD, 총 인등의 3개 지표별로 구분하면 3급수가 가장 빈번하며, 4급수를 초과하는 수질(특히 COD 농도)도 빈발하는 것으로 나타남(그림 1.16).

- 주목할 부분은 95년-97년 사이의 가뭄 시에 모든 지표가 3급수 이하의 나쁜 수질을 보였다는 점임. 향후 기후변화로 심화될 것으로 예상되는 가뭄은 낙동강 하류의 수질에 심각한 악영향을 끼칠 것으로 예상됨. 따라서 양질의 원수를 확보할 수 있는 방안이 시급한 실정임.

▌지방의 군소 도시나 도서지방에서는 수질은 차치하고, 수량마저도 부족한 실정임.

- 우리나라는 대수층 발달이 빈약하지만 우기의 잉여 지표수를 주입하고 건기에 회수하는 소규모 지하저수지는 다수 설치될 수 있을 것으로 판단됨. 따라서 대수층 수질개선 효과를 얻을 수 있으며 다양한 규모의 저수량을 확보할 수 있는 지하 저수지는 국민에 대한 양질의 물 공급과 국가 물 안보 차원에서도 추진되어야 함.

▌물의 가치는 경제발전, 기후변화 등의 사유로 증가하고 있음. 지하저수지 연구가 성공하면 물과 관련된 다음과 같은 문제점들을 해소할 수 있으므로 본 제안 연구는 매우 중요함.

- 지역 간 물 이전으로 야기되는 갈등 (예: 부산광역시와 경상남도)
- 악화되는 지표수 수질과 수질 사고 등으로 인한 국민의 불안 및 불만

- 비상시 (극한 가뭄, 지표수 수질사고) 심화되는 수질 및 수량 문제
- 약간의 가뭄에도 발생하는 군소 지방 도시 (예: 태백 시)나 도서지역의 물 부족 사태

3. 세부과제별 기술정의

▌본 연구에서 개발되는 기술은 다음과 같이 크게 총괄, 청정 지하저수지 최적 설계기술, 청정 지하 저수지의 효율적인 운영 및 관리를 위한 기반 기술 구축, 청정지하저수지 수질관리 기술, 그리고 우기주입-건기회수 기술로 나누어짐.

- 중점추진기술과 이에 대한 정의를 표 1.2에 제시하였음.

▌표 1.2 중점추진기술 및 정의

구분	중점추진기술	정 의
1	주입정-양수정 최적설계 기술	목표 생산량과 저수량을 최소한 개수의 관정으로 달성할 수 있는 관정의 위치 및 가동량 (주입량 및 양수량)의 최적 조합을 설계함.
2	에너지 소비량 저감형 시스템 설계기술	관로-펌프-관정 복합 시스템의 운영에 최소한의 에너지를 사용하는 시스템을 설계함.
3	최적 모니터링 네트웍 설계 기술	수량 및 수질 측면의 지하저수지의 성능을 높은 신뢰도로 감시할 수 있는 시스템설계기술. 센서, 전송부, 전원, 수신부, 그리고 DB 관리시스템을 포함함. 센서에는 지하수 센서, 수압센서, 유량계, 밸브개도측정기 등이 포함함.
4	최적 운영시스템 설계 기술	다수의 주입정과 양수정 그리고 연결 관망을 유기적으로 운전하여 지하저수지의 성능을 최선의 상태로 유지시키는 운영시스템 설계 기술. 관정 수중펌프, 취수정의 도수 펌프, 관로 밸브 등의 조작을 포함함.
5	시험시설	지하저수지 관련 제 기술의 검증 및 보완을 위해 설치하는 시설. 다수의 주입정, 양수정, 연결관망, 수처리시설 등의 hardware와 운영 및 제어시스템의 software로 구성되어야함. 기술의 검증에는 목표 저수량과 일생산량의 달성도 포함됨.
6	우기주입-건기회수 기술	우기에 잉여 지표수를 대수층에 주입하고 물이 부족한 건기에 회수하는 기술. 주입 지표수가 배후 지하수와 혼합, 유하, 그리고 수질변화 등에 대한 고려가 필요함.
7	지하저수지 통합기술	지하저수지의 설계, 구축, 운영 및 유지관리 등 설계부터 운영에 필요한 일체의 기술임.
8	대하천 하구 퇴적층 부지특성 평가 기술	청정 지하저수지 개발 부지에 대한 지질학적, 수문학적 및 수리학적 특성을 분석하여 부지의 적합성을 평가하는 기술임.
9	3-D 수리지질 특성 평가	지구통계기법과 수치모델링을 이용하여 대수층의 3-D 구조와 지하수의 3-D 유동 상태를 분석하는 기술임.
10	주입 및 양수 시스템 최적 설계기술	청정지하수 생산을 위한 주입정 및 양수정의 개수와 배열형태, 펌프의 유량조절, 그리고 관로를 효율적으로 연결하여 에너지를 최소화하면서 청정 지하수를 최대로 양수하는 최적 시스템을 설계하는 기술. 이 기술에는 시험설비 가동을 통한 기술검증과 보완을 포함함.

11	운전장치 모니터링 및 원격제어 시스템 설계기술	주입정, 양수정, 관측정 및 하천수의 수위와 수질, 조석변동 및 지반변위에 대한 총괄적인 모티터링 시스템 구축을 위한 설계 기술과 이 모니터링 시스템을 원격으로 제어하는 설계 기술. 이 기술에는 오작동시 및 비상시 대처방안 기술을 포함함.
12	주입수 거동 및 수질 평가 기술	수리학적 및 수리지화학적 연구를 통하여, 배경 지하수내에서 주입수의 거동과 수질변화, 양수시 포획구간 및 영향범위를 분석하는 기술임.
13	음용수로서의 신뢰도 확보를 위한 청정 지하저수지의 수질위해요소 사전관리 기술개발	주입과 양수과정에서 발생·혼입 가능한 생물학적/화학적/물리적 위해요소를 파악·분석하여 위해요소를 예방·제거 또는 허용가능수준 이하로 감소시킴으로써 먹는물 안전 확보 기술 및 수질관리 가이드라인 개발함.
14	청정 지하저수지의 지속가능한 운영을 위한 주입수 전처리 기술개발	지속가능한 인공주입 시설 운영을 목적으로 지하저수지 시험설비 운영을 통한 주입수 용량별 전처리 운영 및 설계기준 도출을 위한 기술임.
15	먹는물 공급을 위한 플랜트 최적 설계·운영·유지관리 통합 기술개발	지하저수지 시험설비를 통하여 십만m^3/일 이상의 용량의 안정적인 처리 및 음용수 수질기준에 만족하는 용수처리통합시설 설계 및 운영기술임.
16	물리·지화학적 대수층 수질의 개선 특성 평가 기술개발	대수층 내 오염물 측정자료 및 대수층의 특성평가를 기반으로 물리·화학적 오염물 거동의 모델링 기술임.
17	대수층 수질의 생물학적 개선특성 평가기술개발	컬럼 및 현장실험 등의 실증실험 자료를 기반으로 대수층 내 미생물에 의한 오염물 저감을 예측 평가하는 기술임.
18	자동자료수집 및 모니터링시스템 운영 및 유지관리 기술 개발	관측정, 주입정, 양수정, 그리고 관망시스템에 설치된 센서로부터 무선으로 송신된 자료에 대한 자동수집 및 분석모듈 개발과 자료에 대한 실시간 모니터링 및 목표생산량을 지속적으로 유지시키는 자동(및 수동) 운영 및 제어시스템을 개발함.
19	실시간 모바일 기반 모니터링 시스템 개발 및 운영 기술 개발	관측정, 주입정, 양수정, 그리고 관망시스템으로부터 수집된 자료의 모바일기반 실시간 모니터링시스템 개발과 운영 및 제어시스템을 개발함.
20	비상시 지하저수지운영기술 개발	System malfunction, 수량 및 수질문제, 그리고 재난상황 시 지하저수지 시스템 비상운영 가이드라인을 제시함.
21	주입정 유지관리 기술개 발	주입정 폐색 요인분석과 저감방안 및 모니터링 시스템을 개발하고 주입정 최적운영 및 유지관리 프로그램을 개발함.
22	지반변형 해석 및 방지(저감) 기술 개발	지하수 양수에 의한 지반변형 예측 및 분석 기술과 지반변형 저감을 위한 구조적, 비구조적 기술 개발 그리고 지반변형 상황 모니터링 시스템 개발함.

제 2 절 기술 분류 및 내용

1. 기술 분류

▌본 기획과제에서 추진하고 있는 연구의 기술 분류를 표로 나타내면 다음과 같음.



▌그림 1.17 본 기획과제에서 추진하는 기술 분류

2. 기술 내용

가. 총 괄

▌총괄과제에서는 청정 지하저수지에 대한 통합기술을 개발하고 시험설비를 운영하며 지하저수지 적용을 위한 법, 제도분석 및 개선방안에 대해서 다루게 됨.

(1) 청정 지하저수지에 대한 통합기술 개발

▌시스템 통합 기술 개발

- 세부과제에서 개발된 요소 기술들의 집적을 통한 통합기술 개발
- 청정 지하저수지 구축 및 운전 매뉴얼 작성

▌통합 기술 검증

- 실험실 수리모형 구축 및 예비 평가
- 시험설비 기술 통합 검증 및 보완 연구 관리
- 설계저수량 및 생산량 평가

▌실용화 방안

- 연구성과의 실용화
- 개발기술의 부가가치 극대화 방안
- 경제적, 사회적, 문화적 효과 분석 및 극대화 방안

▌연구단 운영

- 세부과제 진행 상황 평가 및 연계
- 연구단의 세부과제 별 연구 상황 모니터링 및 관리
- 성과 홍보
- 자문위원회 및 기획위원회 운영
- workshop 및 conference 개최
- 연구목표의 연차별 단계별 달성 점검

(2) 시험설비 운영

▌시험설비 구축 운영

- 부지 선정 및 조사
- 시험설비 인허가
- 세부과제 기술 검증 업무 지원
- 시험설비 운영
- 시험설비 성능 분석

▌홍보시설 운영 (수리모형 설치)

- 본 연구에서 개발될 기술들의 현장 적용성 검증과 보완을 위하여 시험설비에서의 기술 검증
- 수리모형 설치
- 홍보 동영상 제작
- 대민, 대관, 대언론 홍보 전략 수립

(3) 지하저수지 적용을 위한 법, 제도 분석 및 개선방안 연구

- 지하저수지 적용을 위한 법 및 제도 분석 및 개선방안 도출
- 지하 저수지 보급을 위한 정책적 제안 사항 연구
- 지하 저수지 보급을 위한 관련 법규 개선방안 연구
- 지하 저수지의 경제성 정밀 분석
- 지하 저수지 해외 수출을 위한 시장 및 현지 여건 조사

나. 대하천 하구 퇴적층에서 저수량 1,000만㎥ 확보를 위한 최적설계 기술

▌1세부과제의 주제는 청정 지하저수지 최적 설계기술 개발을 목표로 하고 있으며, 부지 특성 평가 기술, 주입 및 양수 시스템 최적 설계기술, 운전장치 모니터링 및 원격제어 시스템 설계기술, 그리고 주입수 거동 및 수질 평가 기술에 대한 연구를 수행함.

(1) 대하천 하구 퇴적층 부지 특성 평가 기술

- 대하천 하구 퇴적층의 형성과정 분석 기술 개발
- 대하천 하구 퇴적층의 수문학적 특성 평가 기술 개발
- 대하천 하구 퇴적층의 수리지질학적 특성 평가 기술 개발
- 부지특성 평가 매뉴얼 작성

(2) 주입 및 양수 시스템 최적 설계 기술

- 상시주입-상시양수 지하저수지 주입계통과 양수계통의 최적 설계모델 개발
- 운전장치 효율적 원격제어 시스템 설계기술 개발
- 실험실 수리모형 기술 검증 및 보완
- 시험설비 기술 검증 및 보완
- 최적 설계 매뉴얼 작성

(3) 지하저수지 모니터링 시스템 설계기술

- 주입정, 양수정, 관로, 펌프 등 시설 모니터링 시스템 설계기술
- 대수층 수질 및 수위, 지반 변형 감시 기술
- 오작동 및 이상 징후 감시 및 판단 기술
- 최적설계 매뉴얼 작성

(4) 주입수 거동 및 수질 평가 기술

- 대수층의 광물학적 특성 및 배경 지하수의 수지구화학적 특성분석 기술
- 주입수 거동 및 수질변화 분석 기술
- 주입수-배경지하수-지질매체 지화학 상호작용 분석 기술
- 매뉴얼 작성

다. 청정 지하 저수지 운영 및 유지관리 기술

▌2세부과제에서는 중단 없이 지속적으로 용수공급이 가능한 청정 지하 저수지의 효율적인 운영 및 관리를 위한 기반 기술 구축을 위해 지하 저수지 통합 운영 기술 개발, 비상 시 지하 저수지 운영 기술 개발, 시스템 유지관리 기술 개발 그리고 지반변형 해석 및 방지(저감) 기술 개발에 대한 연구를 수행하게 됨.

(1) 지하 저수지 통합 운영 기술 개발

- 시스템 전반적 운영 및 관리기술 개발
- 무선자동자료수집 및 모니터링시스템 운영 및 유지관리 기술 개발
- 실시간 모바일 기반 모니터링 시스템 개발 및 운영 기술 개발

(2) 비상 시 지하 저수지 운영 기술 개발

- 시스템 오작동(System malfunction) 시 대처 및 운영 방안 확립
- 수량 및 수질 문제로 인한 비상운영방안 확립
- 주입중단 상황(재난상황) 시 비상운영 기술 개발

(3) 시스템 유지관리 기술 개발

- 주입정 및 양수정 폐색 저감 기술 개발
- 주입정 및 양수정 폐색 상황 모니터링 방안
- 물리적, 화학적, 생물학적 주입정 및 양수정 폐색 요인 분석 및 대책 연구

(4) 지반변형 해석 및 방지(저감) 기술 개발

- 주입 및 양수에 의한 지반변형 예측 및 분석 기술 개발
- 주입 및 양수에 의한 지반변형 저감을 위한 기술 개발
- 지반변형 상황 모니터링 방안

라. 청정용수 공급을 위한 수질관리 및 활용기술

▌3세부과제에서는 청정용수 공급을 위한 수질관리 및 활용기술의 개발을 위해서 음용수로서의 신뢰도 확보를 위한 청정 지하저수지의 수질위해요소 사전관리 기술개발, 청정 지하저수지의 지속가능한 운영을 위한 주입수 전처리 기술개발, 물리·지화학적 대수층 수질의 개선 특성 평가 기술개발, 그리고 대수층 수질의 생물학적 개선특성 평가 기술에 대한 연구를 수행함.

(1) 음용수로서의 신뢰도 확보를 위한 청정 지하저수지의 수질위해요소 사전관리 기술개발

- 지하저수지 잠재 위해요소 분석
- 모니터링을 통한 위해요소 예방 및 추적 기술 개발
- 운영·관리 가이드라인 구축

(2) 청정 지하저수지의 지속가능한 운영을 위한 주입수 전처리 기술개발

- 주입수의 수질 및 지층 특성에 적합한 전처리 공정 도출
- 고효율 전처리 시스템 개발을 위한 최적 설계, 운영, 유지관리 기술 도출

(3) 먹는물 공급을 위한 플랜트 최적 설계 · 운영 · 유지관리 통합 기술개발 (후처리 기술)

- 음용수 수준의 용수공급이 항시 가능하고 안정적으로 계획 공급수량을 처리할 수 있는 용수처리공정 도출
- 고효율 용수처리 시스템 개발을 위한 최적 설계, 운영, 유지관리 기술 도출

(4) 물리 · 지화학적 대수층 수질의 개선 특성 평가 기술개발

- 주입수와 배경지하수 수질차이, 대수층 구성물질에 따른 clogging 발생 특성 평가 및 예측기술
- 인공주입수의 수질개선효과에 미치는 영향인자 규명 및 수질 예측기술 개발

(5) 대수층 수질의 생물학적 개선특성 평가 기술개발

- 대수층의 생물학적 수질 개선특성조사
- 대수층 미생물 모니터링 기술개발
- 지하저수지의 biofouling 제어 기술개발

마. 건기에 30일 이상-50m^3/d 이상 생산능력의 지하저수지 기술

▌4세부과제에서는 우기주입-건기회수 기술 개발을 위해서 한국형 소규모 지하저수지 설계 기술과 소규모 지하저수지 운영 및 유지관리 기술관리 기술 개발에 대한 연구를 수행함.

(1) 우기주입-건기회수 지하저수지 설계 기술

▌주입할 지표수가 연중 충분치 않은 지역에서는 건기에 물 부족을 겪을 수 있다. 이러한 경우에는 우기에 잉여 지표수를 주입하고 건기에 회수하는 방법으로 건기의 물 부족을 완화시킬 수 있음.

▌한국형 소규모 지하저수지 기술 개발

- 암반 대수층 또는 소규모 충적층의 지하저수지 포텐셜 해석기술
- 주입 기간 및 주입량 설계 기술
- 대수층 저장 기간 해석 기술
- 회수 기간 및 회수량 해석 기술
- 수질 변화특성 분석 기술
- 시범설계 및 개발 가능 지역 평가

▌실험실 수리모형 기술 검증

- 실험실 수리모형 설계 및 구축
- 다양한 시나리오 도출
- 실험 검증을 통한 기술의 완성도 제고

▌한국형 소규모 지하저수지 설계, 운영 및 유지관리 매뉴얼 개발

(2) 소규모 지하저수지 운영 및 유지관리 기술

▌소규모 지하저수지 최적 운영기술

- 지역별 건기의 지속기간 및 물 부족 실태 조사
- 지역별 우기 강수량 패턴 분석을 통한 주입 기간 도출
- 우기 잉여 지표수 확보 방안 및 주입 방안 도출
- 배후 지하수의 흐름 특성 분석
- 회수율 극대화 방안

▌단일공 주입-양수 성능 시간변화 평가 기술

- 주입 기간 및 주입량 설계 기술
- 대수층 저장 기간 해석 기술

▌관정 유지관리 기술

- 주입량 및 양수량 지속을 위한 유지관리 기술
- 관정 폐색 원인 분석 및 대책 수립

제 2 장 국내·외 동향 및 환경 분석

제 1 절 국내·외 정책동향

1. 국내 정책 동향

가. 수자원 정책 현황

▌하천법 제23조[2]에 따라 수립되는 수자원 관련 국가 최상위 계획인 『수자원 장기종합계획(2006~2020)』은 국토종합계획(2006~2020)의 목표인 "균형국토, 개방국토, 복지국토, 녹색국토 및 통일국토" 실현을 위한 이용·개발·보전에 관한 국가사업의 기본전략임.

■ 2020 녹색국토를 위한 물 강국 실현이라는 비전으로 『수자원 장기종합계획』에서 수립된 기본전략은 표 2.1과 같음.

▌표 2.1 수자원 장기종합계획 중점사항 및 중점내용

중점사항	중점내용
물이용 종합계획	□ 하천유량 복원을 통한 하천 생태계 및 수질보전 □ 지역적 물이용 형평성·안정성 확보 □ 지역특성과 경제효율성에 적합한 수자원 개발 □ 극한가뭄 대비 위기대처 능력 증대 □ 지하수의 효율적 활용과 보전
치수종합계획	□ 구조물적 대책의 다양화 및 활성화 □ 선택적 방어 개념의 도입 □ 유역 중심의 치수대책 수립 □ 예방사업 위주의 투자정책 □ 이상홍수에 대비한 비구조적인 홍수대책 활성화 □ 홍수터 관리계획 수립
하천환경계획	□ 하천환경 보전 및 복원강화 □ 하천환경관리 제도적·행정적 체계 정비 □ 지역주민과 함께하는 하천문화 및 공간 창출 □ 하천환경계획 수립방법 개선
수자원 조사·연구계획	□ 수자원 정보의 혁신기술 개발 □ 홍수 위험 극복 지역사회 기반 구축기술 개발 □ 자연형 하천복원 및 관리기술 개발

■ 수자원의 안정정인 확보와 하천의 효율적인 이용·개발 및 보전을 위한 20년 단위로 수립하며, 현행 계획은 2001년에 수립된 제4차 계획임.

2) 하천법 제23조(수자원장기종합계획의 수립) ① 국토해양부장관은 대통령령으로 정하는 바에 따라 수자원의 안정적인 확보와 하천의 효율적인 이용·개발 및 보전을 위한 20년 단위의 수자원장기종합계획(이하 "수자원장기종합계획"이라 한다)을 수립하여야 한다.

■ 수립된 날부터 5년마다 그 타당성 여부를 검토하여 필요한 경우에는 계획을 변경함. 2006년 1차 수정한 『수자원 장기종합계획(2006~2020)』에 대해 기후변화, 사회·경제·환경적 여건 변화, 물 관련 정책변화, 최근의 물 현안 등을 반영하여 2011년 2차 수정되었음.

▌2006년 2월 국토해양부, 지식경제부, 환경부가 합동으로 "물 산업 육성방안"을 국무회의에 보고하였음.

■ 용수공급시설의 수출 산업화를 통하여 2015년까지 세계적인 물 기업을 육성하고, 수출을 통하여 20조원의 부가가치를 가진 사업으로 육성하고자 함.

■ 이는 용수공급 기반시설의 구축과 개선사업의 지속적인 확대를 목적으로 추진하며, 물 산업의 촉진을 위해 원천기술을 개발하거나 확보하는데 주력하여 지능적 수처리 기술, 유비쿼터스 기반의 수도운영관리 기술 그리고 에너지 완전 순환형 수처리 기술 등을 집중 육성하며, 동남아, 남미 등의 개도국 시장 진출을 위하여 맞춤형 기술 개발 사업을 추진함.

▌포스트 교토체제(~2012년) 형성을 위해 새로운 무역규제와 인센티브 도입 추진, 정부는 21세기 전 세계적 자원·환경 위기 및 초고령 사회에 대비한 미래준비와 녹색성장의 본격 추진하기 위해 『신성장동력 비전 및 발전전략』(2009.1.13)과 녹색성장 국가전략 5개년 계획 발표하였음(2009.7.6.).

[기후변화 협약]

□ 우리나라는 기후변화 대응 온실가스 감축의무 대상국은 아니나, 포스터 교토협약이 임박하여 감축의무대상국에 포함될 가능성이 높고, 이는 국내 산업에 큰 영향

기후변화 대응 글로벌 동향과 한국경제에의 영향



* 삼성경제연구소, CEO Information 「기후변화협약 위기인가 기회인가」 2009.7.29

[3대 분야 17개 신성장동력 육성]

□ 미래 성장의 바탕이 되고 기후변화·자원위기에 대한 해결능력이 큰 녹색기술분야

□ 세계시장규모와 우리 기술 역량(IT분야)이 높고, 융합을 통해 기존 산업고도화와 신산업 창출이 가능한 첨단산업

□ 일자리 창출 잠재력이 크고, 기존 서비스업에 경제적 측면을 보강하여 고부가가치 창출이 가능한 분야

3대 분야	17개 신성장동력
녹색기술 산업	**신재생에너지**, 탄소저감에너지, **고도 물처리**, LED 응용, 그린수송시스템, 첨단 그린도시
첨단융합 산업	방송통신융합산업, IT융합시스템, 로봇응용, 신소재·나노 융합, 바이오제약(자원)·의료기기, 고부가 식품산업
고부가서비스산업	글로벌 헬스케어, 글로벌 교육서비스, 녹색금융, 콘텐츠·소프트웨어, MICE·관광

■ 상기 17개 신성장 동력 중에서 수자원 및 이수(利水)관련 신성장 동력으로 녹색기술의 일환인 "고도물처리산업"을 들 수 있음

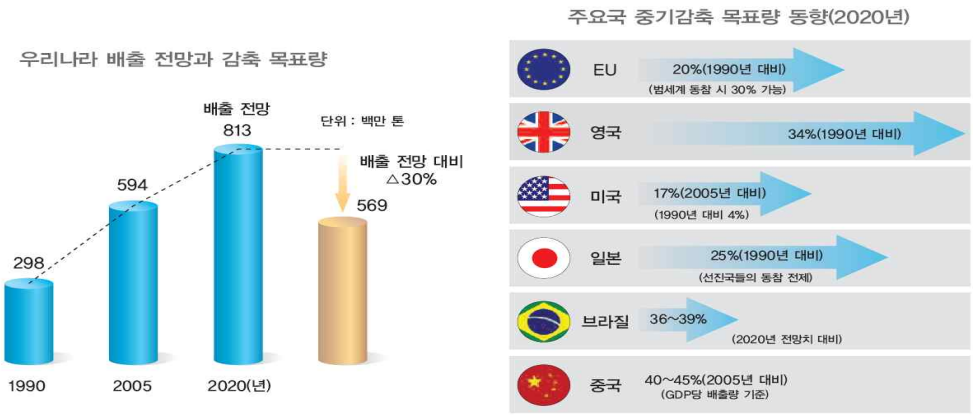
■ 고도물처리산업은 '스마트 상수도', '친환경 대체용수' 및 '지속가능한 물환경'이라는 3개의 STAR 브랜드로 구성되어 있음.

■ 각각의 STAR 브랜드는 정부에서 표 2.2와 같이 신성장 동력 기술의 개요, 선정 사유, 전략 품목 및 추진전략을 수립하였음.

▌표 2.2 신성장 동력으로서의 고도물처리산업

STAR 브랜드	내 용	
스마트상수도 (깨끗하고, 안전한 물생산·공급)	개요	막을 이용한 정수처리 방식을 도입하여 고품질의 깨끗한 물을 생산하고 각 가정까지 안전하게 공급할 수 있는 지능형 물 생산 및 공급 시스템
	선정 사유	수돗물의 최대 위협은 녹물로 지하에 매설되어 있어 관리가 어려운 상수관망 관리의 필요
	전략 품목	저에너지 정수막, 지능형 막여과·정수 시스템, WISE관망진단·개량 시스템, SMART 관망 관리 시스템
	추진 전략	- 막소재와 공정기술 등의 핵심 기술 개발 - 노후관 정비 및 시설 개선을 통한 유수율 향상
친환경 대체 용수	개요	고도처리를 통해 수질이 양호한 하수처리수를 대체 수자원으로 개발하거나 해수담수화를 통해 산업 전반에 필요한 각종 용수를 안정적으로 공급
	선정 사유	하수 재이용은 매년 꾸준히 증가하는 추세이며, 지역적인 물부족 현상이 심화됨에 따라 해수 담수화 시설에 대한 수요가 증가하고 있음
	전략 품목	대체 용수 전용 분리막, 환경영향 저감 하수재이용 시스템, 차세대 해수담수화 하이브리드 플랜트, 대체 용수 플랜트 최적관리 시스템
	추진 전략	핵심기술(멤브레인, 해수담수화 플랜트 등) 및 고효율 저에너지 설계 기술 확보를 통한 해외시장 진출
지속가능한 물환경	개요	물부족을 효율적이고 경제적으로 해소하고, 지속가능 물 및 수생태 관리를 통한 쾌적하고 안전한 21세기 물환경 구축
	선정 사유	'12년까지 국내 관련 시장규모 10조원 중 5,000억원 매출실적과 9,000명 이상의 고용창출 기대
	전략 품목	생태 하천, Eco-water system, 통합 수자원관리시스템
	추진 전략	- 우리 하천에 맞는 수생태복원기술 개발 및 상용화 - 3차원 하천 분석 및 관리 기술, IT 융합 수문계측 시스템 기술 등을 중심으로 사업화

▌정부는 2009년 11월 17일 1년여의 논의 끝에 2020년 온실가스 감축 목표를 2020년 온실가스 배출 전망치 대비 30%를 감축 목표로 설정하고 국내총생산(GDP)의 2%를 녹색성장에 투자할 계획을 발표함(청와대 정책소식, 2009, 11).



▌그림 2.1 우리나라 온실가스 배출전망 및 감축목표량 (청와대 정책소식, 2009, 11)

▌녹색성장위원회 (2009. 7)는 『저탄소 녹색성장 기본법』을 근간으로 녹색성장 국가 전략 및 5개년 계획안을 발간함.

- 저탄소 녹색성장 기본법의 주요 내용은 녹색경제, 녹색산업의 창출 및 단계적 전환 촉진, 녹색산업투자회사 설립, 기후변화, 에너지 목표 관리제의 도입, 총량제한 배출권 거래제 등 도입, 녹색국토 조성, 저탄소 교통체계 구축 등임.

- 2020년까지 세계 7대, 2050년까지 세계 3대 녹색강국 진입을 비전으로 설정함.

- 기후변화 적응 및 에너지 자립, 신성장 동력 창출, 삶의 질 개선과 국가위상 강화를 3대 전략으로 채택함.

- 효율적 온실가스 감축, 탈석유·에너지 자립강화, 기후변화 적용역량 강화, 녹색기술개발 및 성장동력화, 산업의 녹색화 및 녹색산업 육성, 산업구조의 고도화, 녹색경제 기반 조성, 녹색국토·교통의 조성, 생활의 녹색혁명, 세계적인 녹색성장 모범국가 구현을 10개 정책방향으로 설정함.

▌정부는 (2008.8.15) '저탄소 녹색성장(Low Carbon, Green Korea)'국가 비전을 수립하고, 지자체의 기후변화 대응 10대 과제와 분야별 추진과제를 설정함.

- '저탄소 녹색성장'은 기존의 화석연료 중심의 에너지 소비체제에서 벗어나 온실가스와 환경오염을 줄이는 지속가능한 성장이며 녹색기술과 청정에너지로 신성장 동력과 일자리를 창출하는 신국가 발전의 패러다임을 의미함.

- 친환경 도시 사례 분석 결과 친환경 저탄소 도시 내 이수관련 (용수 수송에너지의 절감 및 보조 수자원으로서 중수 및 우수의 활용) 기술과의 융합이 필수적임.

▌국토해양부(2008. 12)는 2009년 업무 보고에서 '물과 함께하는 국토 재창조' 등 『3대 핵심

정책 과제』와 공기업·민간 투자 유발효과가 커서 내수 진작 효과가 높은 프로젝트를 "한국형 뉴딜 10대 프로젝트"로 제시함.



[3대 핵심정책과제]

□ 공공부문이 경기회복을 견인하고 과감한 규제완화 추진
- 재정조기 집행과 건설시장 정상화로 침체된 경제 회복

□ 3대 핵심과제의 성공적 추진에 모든 역량 집중

▌그림 2.2 3대 핵심정책 과제

▌국토해양부(2010. 4)는 '저탄소 에너지절약형 신도시 조성방안 연구'에서 기존 도시의 운영보다는 도시 계획적 측면에서 주거부문, 에너지 부문, 환경기초시설 부문(상하수도 인프라 포함), 교통 부문, 녹지 부문 등 다양한 분야에 대한 탄소 저감 및 에너지 절약을 위한 전략이 요구됨을 강조, 또한 국토해양부는 기후변화에 대응해 앞으로 조성되는 신도시는 신재생에너지활용, 분산형 빗물관리 시스템 도입 등 저탄소 에너지절약형 신도시를 조성하기로 결정함.

- '지속가능한 신도시 계획기준', '도시 계획시설의 결정·구조 및 설치에 관한 규칙' 등을 개정하여 신도시 건설시 적용 예정임.

- 기후 변화를 초래하는 화석연료를 줄이고, 태양광, 태양열, 지열, 풍력 등 환경친화적인 신재생 에너지 사용을 확대하고자 함.

나. 지하수 정책 현황

▌우리나라 지하수관련법은 지하수법을 비롯한 8개의 법령이 있으며, 법령에 따라 5개의 중앙부처에서 관리되고 있음(표 2.3).

▌표 2.3 지하수 관련법 현황

법령	대상	규정내용	소관부처
지하수법	타법 규제받지 않는 모든 지하수	– 지하수 조사, 개발·이용, 보전·관리 – 지하수 수질, 정화	국토해양부 환경부
온천법	온천수	20℃ 이상의 온천수 개발	행정안전부
먹는물 관리법	먹는 샘물	먹는샘물제조(업)	환경부
농어촌 정비법	농업용지하수	농어촌용수(지하수)	농수산식품부
민방위기본법	지하양수시설	민방위계획에 따라 지하양수시설 설치 또는 정비	행정안전부
제주특별법	제주도 지하수	제주도 내 지하수 개발·이용	국토해양부
주택법	공동주택비상 급수시설	아파트 등 공동주택용	국토해양부
국방군사시설법	국방군사시설(지하수)	군사목적의 지하수 시설	국방부

▌지하수관리기본계획(2008~2016)은 지하수법 제6조에 근거한 법정계획으로서 지하수의 개발·이용 및 보전·관리에 관한 국가의 최상위 계획임.

- 지하수관리기본계획은 제4차 국토종합계획 수정계획(2006~2020)의 국가목표인 "균형국토, 개방국토, 복지국토, 녹생국토 및 통일국토 실현을 위한 수자원 이용·개발·보전"과 수자원장기종합계획(2006~2020)의 기본이념인 "물이용의 안정성, 형평성과 효율성 향상"의 실현을 위한 지하수 정책방향을 제시하고 있음.

- 지하수법뿐만 아니라 다른 법률에 의하여 관리되는 먹는 샘물, 온천수 등 모든 지하수를 포함하는 통합 지하수관리 계획임.



▌그림 2.3 지하수관리기본계획과 다른 계획과의 관계(지하수관리계획, 2008)

- 우리나라 지하수의 체계적인 조사 및 개발과 합리적인 이용·보전을 위한 중장기 계획으로 일선 관계기관의 지하수 관리의 기본 지침이 되며, 단계별 추진계획 및 투자계획을 수립하고 있음.

- 지하수관리기본계획에 제시된 중점사항은 표 2.4와 같음.

▌표 2.4 지하수관리기본계획 중점사항 및 중점내용

중점사항	중점내용
조사이용	□ 지하수 기초자료 확보를 위한 광역 및 정밀 지하수 기초조사를 지속적으로 실시하여 정책수립 및 관리에 활용 □ 지하수 관측망을 확대 구축하여 관측 자료의 효용성을 제고하고 관측자료 통합관리를 통해 지하수 장애 감시 강화 □ 지하수 이용·실태 조사 및 이용계획량 설정으로 체계적인 지하수 개발·이용 도모 및 공공지하수 개발로 농어촌, 도서지역에 지하수 공급 확대
보전관리	□ 지하수 개발·이용 시설에 대한 통합관리체계를 구축하여 무분별한 개발을 방지하고 지하수 장애를 사전에 예방 □ 지하수보전구역 제도의 활성화를 위해 국공립공원, 상수원보호구역 등으로 보전구역 대상지역을 확대하, 보전구역 내 행위제한 강화 및 지속적인 관리실태 조사 실시 □ 지하수 오염을 사전에 예방하고 양질의 지하수를 확보하기 위하여 지하수 수질관리를 강화하고 관리기반 구축 □ '먹는샘물 품질평가 시스템' 도입 및 샘물개발 허가제도 개선으로 먹는샘물 관리를 강화하고 사전 환경성 검토 강화로 체계적인 온천 개발 추진
관리기반 강화	□ 지하수 관련 법체계 정비, 지하수 전담조직 설치, 지하수 이용부담금 및 특별회계를 통한 안정적인 재원확보를 통해 지하수 관리 인프라 강화 □ 지자체의 실정에 맞는 '지역지하수관리계획'을 수립하여 국가 기본 계획과 연계한 실질적인 지하수 관리 기반 구축 □ 표준화 및 공동 활용을 통한 지하수 정보 통합관리체계를 구축하고, '국가지하수정보지도(IGIS)' 확대 구축을 통해 지하수 관리 의사결정 지원 및 상시 분석서비스 제공 □ 지하수 연구·개발에 대한 투자를 지속적으로 확충하고 지하수 교육 및 홍보를 강화하여 대국민 인식 제고
연구개발	□ 정책 및 제도 – 지하수 관련법 및 관리제도 개선 방안 – 지하수 관련 분쟁조정 방안 □ 조사 및 이용 – 지하수 함양량/개발가능량 산정, 시험유역설정·운영 – 유출지하수 저감·활용/대도시 지역 인공함양 □ 보전 및 관리 – 오염취약성 평가/기후변화에 의한 지하수자원 영향 – 지하수보전구역 지정·관리 방안/오염물질 확산 방지 □ 정보화 – MIS 및 GIS 분석 기술의 지하수 업무 활용 – 지하수정보 활용도 제고 – 지하수 관리 표준모델 서비스/데이터 품질보증(QA/QC)

▌최근 지하수종합관리방안(2009, 국토해양부 내부자료)에서는 지하수자원에 대한 전반적인 관리 방안을 마련하기 위한 정책을 수립함.

- 공공재, 경제재이자 국가 주요 전략 경영자원인 지하수자원의 역할 제고
- 공적자원으로서의 지하수 관리기반 강화
- 지하수 현안문제에 적절한 대응체계를 구축하고, 지하수 정책 패러다임 변화에 능동적으로 대처

▌국토해양부에서는 수도시설의 안정화 계획을 수립하여 홍수, 가뭄과 같은 자연재해 뿐만 아니라 수도시설의 사고로 인한 단수사고를 방지하기 위하여 관로 복선화, 비상연계시설 등의 사업을 추진 중임.

■ 2011년 구미시 단수사고로 인하여 급수지역의 약 50만명이 1~5일동안 수돗물 공급이 중단되었고, 산업단지 약 30개 업체가 용수공급 중단으로 피해가 발생함.

■ 이러한 사고를 방지하고자 국토해양부에서는 「2025 수도정비기본계획(광역상수도 및 공업용수도)」에서 수도시설의 안정화 계획을 수립하여 추진하고 있음. 즉, 도송수관의 복선화 및 비상연계시설을 추진 중임(표 2.5).

▌표 2.5 2025 수도정비기본계획 중 안정화 구축계획

구 분	세 부 사 업 내 용	사업비 (억원)
총 계	-	53,876
1. 수원의 안정화 구축	수량 및 수질의 안정화	22,367
2. 정수시설 안정화 구축	고도정수처리시설 및 정수장 예비능력 도입	5,320
3. 도·송수시설 안정화 구축	관로 복선화 931㎞	14,114
4. 수도시설 비상연계 계획	-	12,075
가)광역-광역간 비상연계	14개소, Q=4,418천㎥/일, 관로 338㎞, 가압장 22개소	7,143
나) 광역-지방간 비상연계	42개소, Q=1,788천㎥/일, 관로 426㎞, 가압장 31개소	4,932
다) 광역-농업용수간 비상연계	수혜면적 : 98,525ha, Q=1,576천㎥/일	-
라) 환경개선용수 공급	대상하천 : 11개소, Q=81.4천㎥/일	-

자료:「2025 수도정비기본계획(광역상수도 및 공업용수도)」, 국토해양부(2009)

▌환경부는 1997년부터 2009년까지 23개 시·군, 123개 도서지역에 안전하고 깨끗한 식수를 공급하기 위해 「도서지역 식수원 개발사업」을 추진하고 있음.

■ 환경부는 1997년부터 유인도서에 식수원개발사업을 추진하고 있고, 2009년까지 사업비 약 7,096억원을 투자하고 있음. 이로 인해 167개소가 사업을 완료하였고, 38개는 추진 중임(표 2.6).

▌표 2.6 도서지역 식수원개발사업 1,2단계 지원현황

구 분		합 계	1단계 ('97 ~ '04)	2단계 ('05 ~'09년)
도서지역	사업수	205(완료 167)	123(완료 96)	109(완료 71)
	사업비	7,096	3,116	3,980
	국비	4,967	2,181	2,786
	지방비	2,129	935	1,194

자료:「농어촌·도서지역 2단계('10~'14) 상수도 확충 수정계획」, 환경부

■ 도서지역의 특성상 사업내용은 지하수 관정, 저수지 개발 등 신규 수원개발 사업이 많고, 수

돗물 공급을 위해 관로 연결사업이 대부분이나 일부 해저해상관로 설치하고 있음.

■ 또한, 신규 수원개발이 곤란한 지역은 해수담수화시설을 설치하고 있으나, 시설 운영 및 유지를 위한 전문인력 부족, 운영비 과다 등의 사유로 41개 시설을 한국수자원공사에 위탁 운영 중임.

■ 2010년부터 2014년까지는 사업계획을 수정하여 8개 시·도, 19개 시·군에서 102개 상수도 확충사업에 총 4,075억원의 사업비가 소요되는 것으로 계획함. 이 중 전남이 62개소의 사업을 위해 2,197억원 소요가 예상됨(표 2.7).

▌표 2.7 도서지역 상수도 확충 지자체 계획('10 ~'14) (단위 : 개소, ㎥/일, 억원)

시군	시군	사업 지역	저수지 (천㎥)	정수장 (㎥/일)	배수지		가압장 (㎥/일)	관로 (km)	사업비		
					개소	용량(㎥)			계	국비	지방비
전국	19	102	270(9개)	10,955	76	29,665	24,378	581.2	4,075	2,852	1,222
인천	2	5		400	2	4,000	3,400	73.5	405	284	122
경기	1	2		90	2	90	90	0.9	7	5	2
충남	2	8		540	4	140		15.2	33	23	10
전북	2	5	40	300	4	4,600	9,230	42.7	424	297	127
전남	6	62	230	3,975	47	8,325	6,250	309.6	2,197	1,538	659
경북	1	1		3,000	7	3,210	3,000	28.8	280	196	84
경남	4	15		150	8	6,800	2,408	107.5	609	426	183
제주	1	4		2,500	2	2,500		3.0	120	84	36

자료:「농어촌·도서지역 2단계('10~'14) 상수도 확충 수정계획」, 환경부

■ 지역 특성상 상수원 확보 곤란으로 66개소의 정수시설 사업 중 37개소가 해수담수화시설로 계획하고, 저수지는 9개소를 건설하여 270천㎥의 용수량 확보를 목표로 하고 있음.

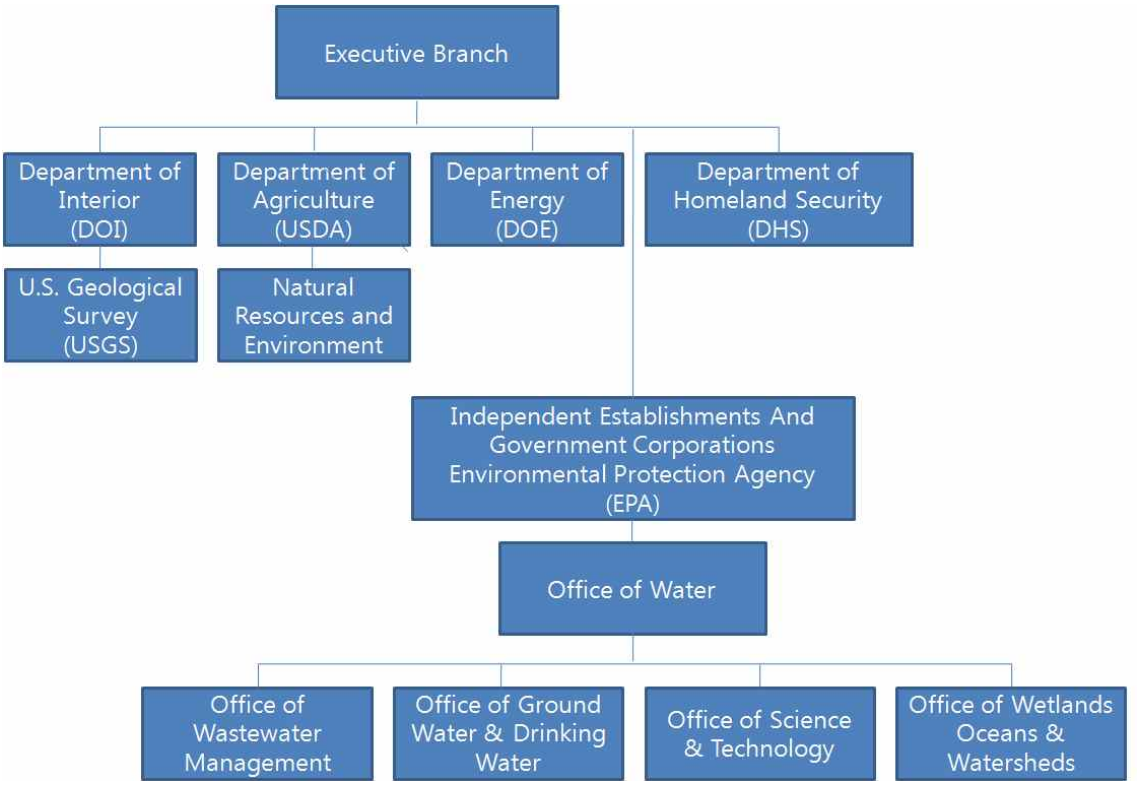
2. 국외 정책·제도 동향

가. 미국

▌미국의 지하수 관리는 연방정부와 주정부의 이원화 체계로 이루어져 있음.

■ 연방정부에 속해있는 내무부, 농무부, 에너지국, 국토안전부, 환경보호국의 5개 기관이 지하수 관리에 관여하고 있으며, 관련 법령, 지침, 기준 등의 전반적인 사항을 제시하고 주정부의 지하수 관리정책을 뒷받침 할 인적자원 및 재정 등을 지원하는 역할을 담당하고 있음.

■ 환경보국(EPA) 산하의 물관리부가 지하수 수질 관리의 중심역할을 수행함.



자료: 한국환경정책평가연구원, 주요 지질별 지하수 개발·이용 및 수질관련실태 비교연구, 2006

▌그림 2.4 미국 연방정부의 지하수 관리 조직

- 지하수의 개발 및 관리에 대한 실질적 권한은 각 주정부가 가지고 있으며, 연방정부에서 제시한 법령, 지침, 기준 등을 근거로 각 주의 실정에 맞게 계획을 수립하고, 시행함.
- 주 기관(State Agency)으로 표 2.8과 같이 6개 기관이 있음.

▌표 2.8 주 기관(State Agency)별 업무

기 관	업 무
Environment Agencies	EPA와 유사한 지하수 수질보전업무 즉, 수질기준규제, 비점오염원 관리, 지하수 모니터링 정책, 공공지하수 보전 등
Department of Agriculture	살충제의 등록, 사용 및 기준 제정, 살충제 오염방지를 위한 모니터링 정책수립 등
State Department of Health	정화조 관리, 공공 음용수 관리, 공공 지하수 관정관리, 물 공급 모니터링, 하위기관에 기술적 지원
Cooperative State Research, Education, and Extension Service	자연자원, 수질, 가족건강, 농업생산교육 등의 프로그램 수행
State Soil and Water Conservation Commission	USDA NRCS와 통합정책을 통하여 사유지의 토양과 수자원 보전업무
State Water Rights Agency	수자원 사용권의 배분과 수자원의 대량 이용제한

■ 지역 기관(Local Agency)으로 표 2.9와 같이 5개 기관이 있음.

▌표 2.9 지역 기관(Local Agency)별 업무

기 관	업 무
Local Planning and Zoning Boards, City Planning Commissions, Country Planning Boards	토지이용구역 지정, 일반 지역계획, 프로그램 진행 감독
Local Erosion and Sediment Control Districts	침식과 침전을 일으킬 수 있는 활동 감시
Local Irrigation and Acequia Districts	지역 수자원 이용과 관개사업의 관리, 건설사업에 의한 오염과 침식 규제
Local Municipal Utilities Districts	상하수 관련 공공사업의 운영, 세금부과와 채권발행
Regional Planning Commissions and Councils of Government	지방정부기관 사이의 업무조정, 기술적 조언 및 정보 제공

▌관련법으로는 청정수법, 안전음용수법, 자원보전복원법, 종합환경조치책임보상법이 있음(지하수 자원의 합리적 이용·관리를 위한 정책방향, 2007).

■ 청정수법은 오·폐수의 배출을 규제하여 지하수 오염이 지표수에 미치는 영향을 관리하는 법안임. 이 법안은 하천 및 호소로 흘러가는 지하수를 보호한다는 것을 인식하는 것으로서 CWA에는 주정부 지하수 보호계획 프로그램 개발이 서술되어 있음.

■ 안전음용수법은 미국의 유일 대수층을 보호하고 지하로 오염물질이 유입되어 음용수 대수층이 오염되는 것을 방지하기 위한 법이며, 미국 환경청으로 하여금 다양한 오염물질에 대한 먹는 물 수질기준을 제정하도록 하였음.

■ 자원보전복원법은 유해 쓰레기의 발생과 운반, 처리에 대한 체계적인 문서를 요구하는 법안으로서 새로운 쓰레기 처리 체계는 침출수 수집체계와 관측용 우물 등 감시하는 체계를 구축해야 하는 것이며, 액상 유해 폐기물의 지상 매립을 금지시키고 있으며, 궁극적으로는 지상 매립에 의한 다른 유해 폐기물의 처리도 금지하려고 하고 있음.

■ 종합환경조치책임보상법은 'Superfund Act'로 알려져 있으며, 법안의 주목적은 대기 중이나 수중 또는 육상의 유해 물질 정화를 촉진시키고 집행시키는데 있음. 미국 환경청이 궁극적인 정화가 필요한 지역의 우선순위를 정해야 하며, 미국의회는 미국 환경청의 주도 아래 정화 지역에 투입할 수십억불을 확보하고 있음.

▌미국의 지하수 관리계획으로는 주정부 지하수 보호계획, 취수정보호계획, 유일대수층 보호계획, 지하주입제어계획, 수원평가프로그램이 있음.

- 주정부 지하수 보호계획(Comprehensive State Ground Water Protection Program, CSGWPP)에는 여러 기관들의 접근을 통하여 지하 수자원의 관리를 자발적으로 개발하도록 하고 있으며, 내용에는 이러한 프로그램을 준비하고 승인을 얻는 방법 등이 EPA에 의해 제공되고 있으며, 6가지 전략적 활동(① 지하수 목표 확립, ② 지역의 필요에 의거하는 우선순위 확립, ③ 국가 및 지역 프로그램에의 역할과 책임 명백, ④ 관리 전략 실행, ⑤ 정보와 모니터링 제공, ⑥ 시민 참가와 지원 개선)이 적절하게 취급되는 것을 요구하고 있음.

- 취수정보호계획(Wellhead Protection Program, WHP)은 1986년 개정된 안전음용수법에 명시되어 있으며, 취수정보호계획 중 취수정보호지역이란 공공급수용으로 공급하는 1개 양수정이나 우물장을 둘러싸고 있는 지표와 그 하부의 면적으로서 이를 통해 오염물질이 취수지점으로 이동하거나 도달되는 지표면 및 지하면적으로 규정되어 있음. 각 지방자치단체마다 대수층의 특성이 모두 다르기 때문에 주정부는 자체적으로 지역특성에 부합되는 취수정보호계획을 수립해야하며, 기술적인 지원은 중앙정부가 함. 따라서 주정부는 반드시 국가 및 지방의 역할과 책임, 취수정보호 지역의 묘사, 잠재오염원 조사 수립, 오염물질 관리 및 통제, 대체급수를 위한 비상계획 수립, 신규 취수정 규격기준 설립, 시민 참여확대 사항을 고려해서 자체의 취수정 보호계획을 수립함.

- 유일대수층 보호계획(Sole Source Aquifer Program, SSAP)에서 유일대수층이란 EPA가 유일 또는 주음용수원으로 지정한 대수층의 지표면상에 분포된 구역으로서 이러한 대수층으로부터 음용수를 공급받은 주민이 거주하는 토지들이 포함됨. 특히 상기구역에서 50% 이상의 음용수를 공급하는 대수층 또는 대수층이 오염되었을 때 적절한 대체 용수원이 없는 대수층을 유일대수층이라고 하며, 유일대수층으로 지정된 지역 내에 존재하는 주용 대수층 분포지역을 오염으로부터 보호하기 위하여 고안된 입증 프로그램을 수립 및 수행하고 평가하는 절차를 설정하기 위함임.

- 지하주입제어계획(Underground Injection Control Program)은 1974년에 수립되었으며, 석유생산과 광산으로부터 배출되는 폐기물 및 여러 위해폐기물 등을 처리하기 위해 사용되는 지하주입 우물을 규제하기 우해 SDWA에서 제정한 계획임. 현재 대다수의 주정부가 이 계획을 승인하였으며, 미국에는 약 100만개의 주입 우물이 있음.

- 수원평가프로그램(Source Water Assessment Program, SWAP)의 주된 목적은 공공급수원이 오염되지 않도록 하여 국민건강을 보호하고 차세대를 위한 용수공급원을 보호·보전하며, 오염된 용수원을 정화하는데 소요되는 과다한 비용을 피하면서 대체용수원을 규명해 두는 것임. 또한 EPA가 주정부에게 요구하고 있는 특별삼시체께를 보류중인 주정부에게 적용 가능한 정보를 제공하고, 취수정보호계획을 개발토록 하여 급수시설의 비용을 절감토록하며, 풍부하고 깨끗한 용수원을 확보하도록 하여 지역경제 성장을 촉진시키려는 부수적 목적이 있음. 각 주정부는 SWAP에 의거하여 주정부 단위의 지하수 보호전략, 취수정 보효계획 및 대수층과 취수정 보호계획의 실제적인 실시를 지자체 단위에서 주로 행해지고 있음.

▌미국의 인공함양(ASR) 관련 법령은 약 16개 주에서 제정하여 시행됨.

- 미국 국가연구위원회(NRC)의 물과학 및 기술위원회 (WSTB)는 '인공주입을 통한 대수층의 수자원확보'를 가장 높은 우선 순위의 주제로 선정한 바 있다 (US NRC, 2003)
- EPA(2009)는 빠른 속도로 증가하고 있는 ASR 관정에 대한 연방정부의 법령은 안전한 음용수법(Safe Drinking Water Act)과 지하 인공주입법(Underground Injection Control)이며 주정부에서는 별도의 ASR 관련 법령을 제정하고 있지만 연방정부의 관련 법령이 우선 순위를 가진다. 현재 ASR 관련 법령은 16개 주에서 제정이 되어 있는데 ASR이 시행되고 있는 일부 주에서는 관련 법령이 제정되지 않고 있음.



▌그림 2.5 ASR 관련 법령이 제정되어 있는 미국의 16개 주

나. 일 본

▌지표수 및 지하수 수질관리의 근간이 되는 법은 1970년 12월 25일 제정되어 이듬해부터 시행된 '수질오탁방지법'과 1989년 11월 19일 공포·시행된 '환경기본법'이 대표적임.

- 지하수 수질 보전에 대해서는 환경기본법 중에서 "중앙정부의 해당 부처에서 수질의 오탁에 관한 환경기준을 정한다"는 것을 근거로 하여 1997년 3월에 지하수 수질오탁과 관련된 환경기준을 설정・고시하였음.

- 1989년 개정된 수질오탁방지법에는 일정한 배출 기준을 정해 이 기준을 넘는 유해 물질을 포함한 오수가 지하에 침투하는 것을 금지하고 있으며, 이를 위반했을 경우에는 벌칙이 적용되어 손해가 발생할 경우는 손해배상 책임이 부과됨.
- 일본의 지하수의 수질보전에 대한 법과 제도는 표 2.10에 제시되어 있음.

▌표 2.10 일본의 지하수의 수질 보전에 대한 관한 법·제도

명 칭	제정년	주요 내용
공해대책기본법	1967년	대기의 오염, 수질의 오탁, 토양의 오염, 소음, 진동, 지반의 침하, 악취 등에 의한 사람의 건강 및 생활환경의 피해를 공해라고 정의 함.
환경기본법	1989년	정부는 대기의 오염, 수질의 오탁, 토양의 오염 및 소음
수질오탁방지법	1970년	다수의 지하수 오염이 표면화해 왔던 것에 따라 유해물질을 포함한 물의 지하침투금지 및 지하수 수질의 감시 체제 도입에 의한 지하수 오염의 미연 방지, 지하수의 수질의 정화와 관계되는 조치명령 등에 관한 제도적 골조 마련을 목표로 함.

자료: www.gims.go.kr

▌지반침하 방지 등 지하수 관리대책에 있어 지하수 관련법령으로 공업용수법, 건축물용 지하수 채취 규제에 관한 법률, 지방자치단체 조례 등에 의한 규제가 있음.

- 공업용수법은 공업용수원으로서 지하수 이용이 증대되고 지하수위의 저하 및 지반침하가 격하되는 지역이 나타나게 됨에 따라 1956년에 제정되었으며, 지정지역내에 있어서의 공업용 지하수 채취에 대한 허가제도를 도입함. 지정지역은 지하수를 보전하기 위해서 지하수의 합리적인 이용을 확보하여야 하는 지역으로서 공업용수가 이미 개발되었거나 1년 이내에 게시될 지역으로 되어 있음(표 2.11). 지정지역 내 일정규모 이상인 우물에서 지하수를 채취할 경우에는 스트레이너 설치 위치, 양수기 토출면적이 기술수준에 적합하지 않으면 허가하지 않음. 이러한 기술기준은 지하수위 이상 저하·염수화를 일으키지 않도록 채취량과 채취해야할 대수층을 고려해서 결정함.

▌표 2.11 공업용수법에 의거한 지정지역

도도부현명	시구정촌명	면적 (km^2)	지정년월일
미야기현	센다이시 일부, 다카이죠시 일부, 이찌가하마읍 일부	90	1975. 7. 11
후꾸시마현	하라마찌시 일부	41	1979. 6. 1
사이타마현	가와꾸찌시 일부, 우라와시 일부, 요노시, 소오카시, 와라비시, 토다시, 카모가다니시, 야시오시	154	1963. 6. 1 1979. 6. 1
치바현	치바시 일부, 이찌가와시, 후나바시시, 마쯔도시, 나라시노시, 이찌하라시 일부, 우라야스시, 소데가우라시 일부	326	1969. 9. 11 1970. 4. 3 1974. 6. 28
동경도	스미다구, 고오도오구, 키타구, 아라가와구, 이타바시구, 아타찌구, 카츠시가구, 에도가와구	264	1960. 12. 19 1961. 6. 1 1972. 4. 3
카나가와현	가와사키시 일부, 요꼬하마시 일부	73	1957. 6. 10 1958. 3. 6 1962. 10. 20
아이찌현	나고야시 일부, 이찌노야가미시, 쯔시마시, 고오난시, 오니시시, 이나사와시, 기요수읍, 키소가와읍, 소부에읍, 헤이와읍, 시쯔보오읍, 미와읍, 지모구지읍, 오오하루읍, 카니에읍, 쥬시산촌, 도비시마읍, 야도미읍, 시야읍, 타쯔타읍, 하라기이읍, 사오리읍	458	1960. 5. 17 1984. 6. 5
미에현	요카이찌시 일부, 쿠스읍	34	1957. 6. 10 1963. 6. 24
오사카부	오사카시 일부, 토요나카시 일부, 후키다시 일부, 다카즈키시 일부, 이바라기시 일부, 셋시, 모리구찌시, 야오시 일부, 와야가외시 일부, 다이토오시 일부, 카도마시, 히가시오사카시 일부, 시죠나와테시 일부, 키시와다시 일부, 이즈미오오쯔시, 카이쯔카시 일부, 와이즈미시 일부, 타다오카읍	432	1958. 12. 4 1962. 10. 20 1963. 6. 1 1965. 9. 25 1966. 5. 17 1977. 12. 26
효고현	아마카사키시, 니시노미아시 일부, 이타미시	955	1957. 6. 10 1960. 10. 7 1962. 10. 20 1963. 6. 1
계	10도부현	1,957	

자료: www.gims.go.kr

■ 건축물용 지하수 채취 규제에 관한 법률은 경제발전과 함께 도시지역에서 건축물용도로서의 지하수 채취, 이용 급증으로 인한 지반침하와 이에 따른 재해를 방지하기 위하여 1962년에 건축물용 지하수 채취 규제에 관한 법률을 제정하여 건축물용 지하수 채취를 규제함. 건축물용 지하수는 냉방설비, 수세식 화장실 등에 이용하는 것으로 규정되어 있으며, 지하수 채취 규제의 틀은 공업용수법과 동일하며, 지정지역 내에서 건축물용으로 사용하는 일정규모 이상의 우물은 허가제에 의해 규제함(표 2.12).

▌표 2.12 건축물용 지하수 채취 규제에 관한 법률에 의거한 지정지역

도도부현명	시구정촌명	면적 (km^2)	지정년월일
오사카부	오사카시	203	1965. 8. 24
동경도	특별구 전역	577	1963. 6. 1 1972. 4. 3
사이타마현	가와꾸찌시, 우라와시, 요노시, 소오카시, 와라비시, 토다시, 하토가야시	253	1972. 4. 3
치바현	치바시 일부, 이찌가와시, 후나바시시, 마쯔도시, 나라시노시, 이찌하라시 일부, 우라야스시, 카마가야시	564	1972. 4. 3 1974. 6. 28
계	4도부현	1,597	

자료: www.gims.go.kr

■ 지방자치단체의 조례 등에 의한 규제로 지하수는 일본 각지에서 다양한 용도로 이용되고 있으며, 각 지방자치단체에서 지역 실정에 맞게 조례·요강 등으로 지하수의 채취 규제 및 보전을 도모하고 있음. 동경도의 경우 '공업용수법' 및 '건축물용지하수채취규제에 관한 법률'과 '동경도공해방지조례'에 의거 지하수를 채취하고 있으며, 규제 대상지역과 스트레이너의 위치 등 양수기 구조기준은 일본토목기술연구소에서 동경도를 대상으로 실시한 기반암의 심도 등의 조사 토대로 결정되었음.

다. 호주

▌국가지하수위원회(National Groundwater Committee, NGC)는 정보를 공유하고 국가 지하수 정책에 통찰력 및 자원관리, 연구방향, 우선권 및 프로그램을 제공하기 위하여 설치된 정부간 네트워크임.

■ 국가적 차원에서 지하수의 감시와 조정을 제공하고, 호주 주·영토정부·산업조직을 적절하게 협력하도록 하고, 지하수 전문가, 기술자, 자연자원매니저를 위한 지하수 교육 및 훈련의 적절성, 이용 개관을 제공함[3].

■ NGC의 대표기관으로 환경과 수자원부(Department of Environment and Water Resources), 농림수산업부(Department of Agriculture, Fisheries and Forestry), 환경지속가능부(Department of Sustainability and Environment), 영토와 지자체 서비스부(Department of Territory and Municipal Services), 자연자원부(Department of Natural Resources), 환경과 문화부(Department of Environment and the Arts), 환경보전부(Department of Environment and conservation), 지하수연구센터(Centre for Groundwater Studies)가 있음.

■ NGC는 네트워크를 통해 진보시키기 위한 몇몇 지하수 정책이슈를 제시했으며, 이에는 통합

3) 자료: www.environment.gov.au

된 지하수와 지표수 관리, 생태계에 의존하는 지하수의 질적인 관리와 보호, 지하수자원에 대한 토지 이용 변화의 영향, 미시적인 관리도구로 수위 관리, 지하수 과학과 정책 등을 포함함.

▌호주의 수자원 관리는 각 주 정부가 관장하고 있으며, 지하수의 경우 각 주정부마다 그 주의 환경과 수리지질 조건에 맞는 지하수법을 가지고 있음.

- 대표적인 주정부인 빅토리아주는 1969년 지하수법(Groundwater Act)이 국회를 통과하여 1992년 지표수법, 광천법과 병합하여 수자원법(Water Act)이 되기까지 단일법으로 운영되고 있음.

- 지하수법에는 '빅토리아주에 거주하는 주민의 현재와 장래의 유익한 사용을 위하여 지하수자원을 보호하고 관리하는 것을 그 목적으로 한다'라고 명시되어 있으며, 모든 지하수의 소유권은 원칙적으로 국가에 속하는 공수로 규정하고 있으나 문구상으로는 '지하수의 소유'라는 직접적인 표현 대신에 '지하수의 사용과 관리'라는 단어를 쓰고 있음. 누구라도 지하수를 사용하고자 하는 자는 법에 의해 정해진 기관의 장으로부터 허가나 면허를 받아야 함.

- Ward와 Dillon(2011)은 강우유출수, 하수 처리수 그리고 대수층의 저장공간에 대한 법적 권한이 명시되어 있지 않아 향후 인공함양시장의 장애가 될 수 있다고 경고하고 있음.

▌기후변화로 인한 물공급의 불확실성이 높아지고 있기 때문에 수자원 확보정책의 일환으로 「수원다원화(Security through Diversity)] 정책을 도입함.

- 서호주 정부는 기후변화로 인한 물공급의 불확실성을 줄이기 위하여 2005년 "수원 다원화(Security through Diversity)" 정책을 도입함. 이는 물 공급에 있어 기후,기상의 영향을 줄이기 위한 노력으로 "통합물공급계획(Integrated Water Supply Scheme)"의 형태로 제도화됨(그림 2.6).

- 주요 수원 다원화 정책은 해수담수화, 하수처리수 재이용, 인공함양 등 지하수 개발 등 임.

- 호주 북동부의 퀸즐랜드주는 1999년도 극심한 기후변화로 기존 댐을 통해 확보한 수자원이 고갈위기에 처하자 주정부가 약 90억 호주 달러(한화 9.5조원)를 긴급 투입하여 연간 3.5억 m^3의 용수를 추가 확보·공급하는 신규 수자원개발 계획을 수립함.

- 수자원 개발 계획에는 수자원 확보를 위한 댐 건설과 증축, 해수담수화, 하수 재이용과 함께 총 연장 450km의 광역상수도 설치가 포함되었고, 착수 2년 만에 주요 공종이 완료되어 물공급의 안정성을 회복함.



자료: Water Corporation, Integrated Water Supply Scheme Source Development Plan 2005-2050, 2005

▌그림 2.6 호주의 통합물공급계획 범위

라. 독일

▌환경청(EPA)은 지하자원을 사용하는 물 시스템 내에 미생물병원체의 유입을 막기 위해 국가주요음용수법 및 지하수법을 공표함[4].

- 지하수법은 모든 지하수시스템이 쉽게 오염되는 지하수 물 시스템을 위험타겟으로 수립되었음. 음용수 공급에서 불순물은 국민의 건강을 위협하는 미생물 병원체의 잠재적 존재로 인한 감염이며, 이 법은 미생물병원체에 노출로 인한 질병과 사망의 경우를 감소시키기 위한 조치임.

▌지하수를 관리하기 위해 지하수 시스템의 정기적인 위생조사를 실시하고 법규에 따라 수원을 모니터링을 함.

- 지하수 관리개선을 위한 조치로 부족량을 보충하거나, 지하수 오염원을 제거하며, 대체적인 수원을 제공함.

- 바이러스를 99.99%로 비활성화시키거나 제거하도록 달성하는 처리방법을 제공하며, 개선을 위한 조치(네가지 방법) 중 하나 이상은 반드시 실행하여야 함.

마. 프랑스[5]

4) 자료: 경기개발연구원, 경기도내 지하수관리 및 이용방안에 관한 연구, 2001
5) 자료: 외국수자원정책 사례연구 - 영국과 프랑스, 2004년 대한토목학회 정기학술대회 (이승호와 이동률)

▌프랑스 수자원 정책의 가장 두드러진 특징은 유역에 기반을 둔 통합수자원관리를 지향하고 있는 것임.

- 1964년 물법에 의해 프랑스 전역을 6개 유역으로 나누고 각 유역마다 유역관리공사(Agence de l'Eau) 및 유역위원회를 설치하였으며, 중앙정부에서는 전국 수자원 관리에 대한 조정과 통제기능을 계속 유지하고 지방정부로서는 각 지역 실정에 맞는 수자원 개발, 관리 및 상하수도 사업진행에 도움을 받는 행정 및 정치적 경계를 넘어 유역에 기반한 효율적 수자원 관리를 시행하고 있음.

- 현재 프랑스 수자원 정책의 주체는 중앙정부, 6개 유역에 설치된 유역관리공사 및 전국 수자원/유역위원회, 지방자치단체 및 상하수도 민간 사업자를 들 수 있음.

- 유역통합수자원관리체계는 1964년 최초로 주창된 이래 비교적 성공적으로 운영되어 왔으며, 30여년의 시행기간을 거친 후 구체적인 개선안으로 1992년 유역수자원계획(SDAGE)과 지역수자원관리개선계획(SAGE)를 수립, 수질과 수량에 대한 관리 및 공급능력 향상을 추구하였음.

▌물의 경제적 가치를 일찍이 인식하고 사용자부담원칙 기준을 실시, 오랜 기간을 통해 확립시켜 왔음.

- 경제재로서의 물의 개념을 널리 확산시킨 계기는 현재의 비올리아, 온데오 같은 프랑스 민간 사업자들이 19세기 중반이후 프랑스 전역에서 상하수도 서비스 사업에 참여하면서 150여년의 시간이 흐르는 동안 수도요금에 대한 협상과 타협을 통해 물의 경제적 가치를 사회전반에 인식하도록 함.

- 중앙정부는 물의 공공재적 성격을 고려, 유역관리공사가 수도요금에 용수이용료를 부과, 재원을 갖추게 하여 간접적으로 보조금을 지급, 각 지역 수자원 관리 및 개발에 재정지원을 하였으며, 이것이 '오염자부담원칙(Polluter-Pays Principle)'을 현실 정책에 적용한 것임.

바. 영국[6)]

▌1973년 이래 꾸준히 유역통합수자원관리로의 정책방향을 견지해왔으나 1973년 물법개정에 의한 유역관리청(RWA)의 설립으로 유역에 기반한 이수, 치수, 하천환경 및 수질규제에 대한 종합적 관리제도를 시도한 것이 대표적인 증거임.

- 1989년 상하수도 서비스 민영화를 통하여 수자원 정책 및 관리의 전반적인 개혁이 있어났으나 유역관리청에서 민간회사로 거듭난 10개 상하수도 서비스 회사에 각 지역 수자원에 대한 전반적인 개발권을 주어 유역통합수자원관리의 기본 이념을 유지하고자 하였음.

6) 자료: 외국수자원정책 사례연구 - 영국과 프랑스, 2004년 대한토목학회 정기학술대회 (이승호와 이동률)

■ 1989년 전국하천청(NRA)를 신설, 수자원 관리 전반의 개선을 도모하였고, 이후 1995년에는 환경청(EA)로 전환되면서 수질환경을 담당했던 기존의 여러부서들을 통합, 이수, 치수, 하천환경 및 수질규제 등 종합적 수자원 관리를 지향하고 수자원 관리의 효율화에 더욱 박차를 가하였음.

▌수자원 정책 및 관리 체계의 또 하나의 특징은 상하수도 서비스 민영화로 인한 민간사업자들이 정책결정에 미치는 영향임.

■ 1989년 물법개정을 통하여 영국정부는 10개의 유역관리청(RWA)을 민간사업자로 전환하고 기존의 18개 소규모 상수도 전문회사(현재는 16개로 흡수, 통폐합)의 기득권을 인정해 주는 상하수도 서비스 민영화를 시행하였음.

■ 규제기관으로 물서비스감시청(OFWAT), 음용수감시과(DWI) 및 소비자서비스평의회(CSC-현재는 물소리평의호, WaterVoice Council)를 설치, 민간사업자의 전횡을 견제·감독함.

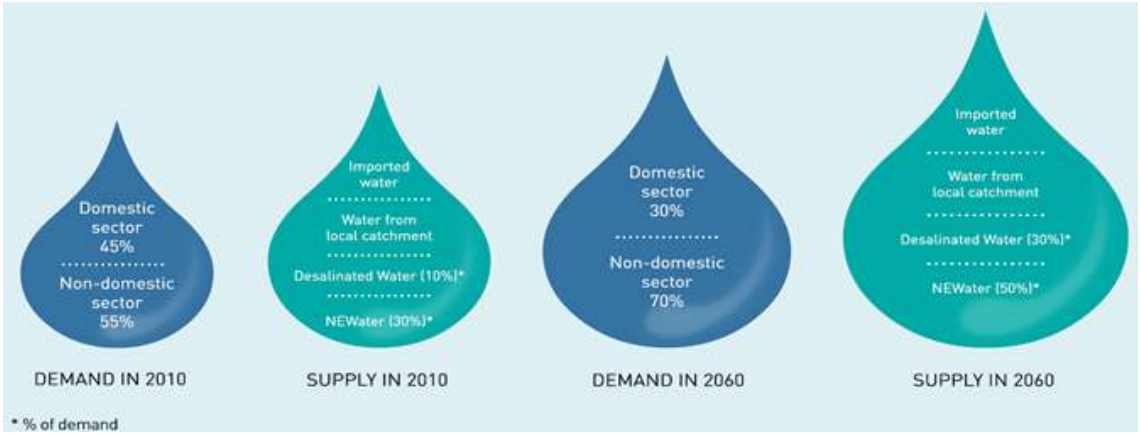
사. 싱가포르

▌향후 50년 동안 물수요가 2배로 증가될 것으로 전망하여, 수자원확보정책으로 인공저수지, 말레이시아 원수수입, 하수처리수 재이용, 대심도 하수시스템(DTSS), 해수담수화등의 수원다원화 정책을 실시하고 있음.

■ 싱가포르는 섬나라로 연평균 강수량이 1,749mm로 많은 편이나, 자국 영토내에 제대로된 하천이나 지하수층이 없어 전형적인 물기근 국가에 해당됨. 따라서, 서울시의 약 1.1배 면적에 인구 484만명이 거주하고 있으나 지난 수십년간 수자원의 50%를 말레이시아에 의존하고 있음.

■ 싱가포르는 수자원 확보를 위해 수돗물 생산 및 공급, 하수차집, 재생에 이르는 모든 물순환(water loop)의 전반적인 과정에 대한 통합업무는 PUB(Public Utility Board)라는 수자원 공기업에서 담당하고 있고, 국가 생존차원에서 “수원 다원화(the Four National Taps)” 전략을 추진하고 있는데, 주요 수자원 확보 정책은 인공저수지 확보, 말레이시아 원수수입, 하수처리수 재이용, 대심도터널 하수시스템, 해수담수화 등 다양한 수원을 확보하고 있음.

■ 이중 하수 재이용(NEWater Factory)으로 전체 물수요의 50%, 해수담수화시설의 시설용량을 10배 늘려 30%를 확보한다는 목표를 세우고 있어 향후 50년 동안 물수요가 2배 증가할 것에 대해 대비하고 있음.



자료: Public Utility Board

▌그림 2.7 싱가포르의 2060년 수자원 수급목표

아. 기타지역

- 남아프리카공화국의 수자원 및 산림부(DWAF)에서는 '국가수자원전략' (DWAF, 2004)에 인공함양에 대한 전략이 삽입되어야한다고 지적하고 있음. 넓게는 수자원의 효율적 활용과 수요 관리에서 수자원 최적관리의 일환으로 인공함양과 직접적으로 관련되어 처리수 활용, 잉여수의 지하저장, 수질 개선을 위한 지하 매체의 활용 등의 분야에 대해서 노력하고 있음.

- 인도의 수자원부 (CGB, 2002)는 인공함양에 대한 국가 마스터플랜을 수립한 바 있음. 이 계획은 주입수 확보와 대수층 저장능력에 기반하여 지하수자원 보충을 목적으로 수립됨. 농촌지역에서는 함양지와 관정주입 위주, 도심지역, 산간 그리고 해안에서는 지붕 우수 활용을 포함한 절수대책 중심으로 구성됨. 또한 인공함양이 수자원 확보를 위하여 가장 먼저 고려되어야할 지역들을 선정하였고, 대상면적은 450,000㎢이며 총 예산은 4조 5천억원 정도로 추산됨.

제 2 절 국내·외 시장현황 및 전망

1. 국외 인공함양 시장 현황 및 전망

가. 국제시장 현황 및 전망

▌UNESCO가 주도적으로 운영하고 있는 국제지하수자원평가센터 (International Groundwater Resources Assessment Centre, IGRAC)는 인공함양에 대한 국가별 자료를 조사한 바 있다. 지구에 존재하는 255개 국가 중에서 인공함양이 시행되고 있는 국가는 57개국이며 사례 수는 총 468건이라고 조사결과를 제시한 바 있음. 그 중 상위 10개국에 대한 정보는 다음과 같음.

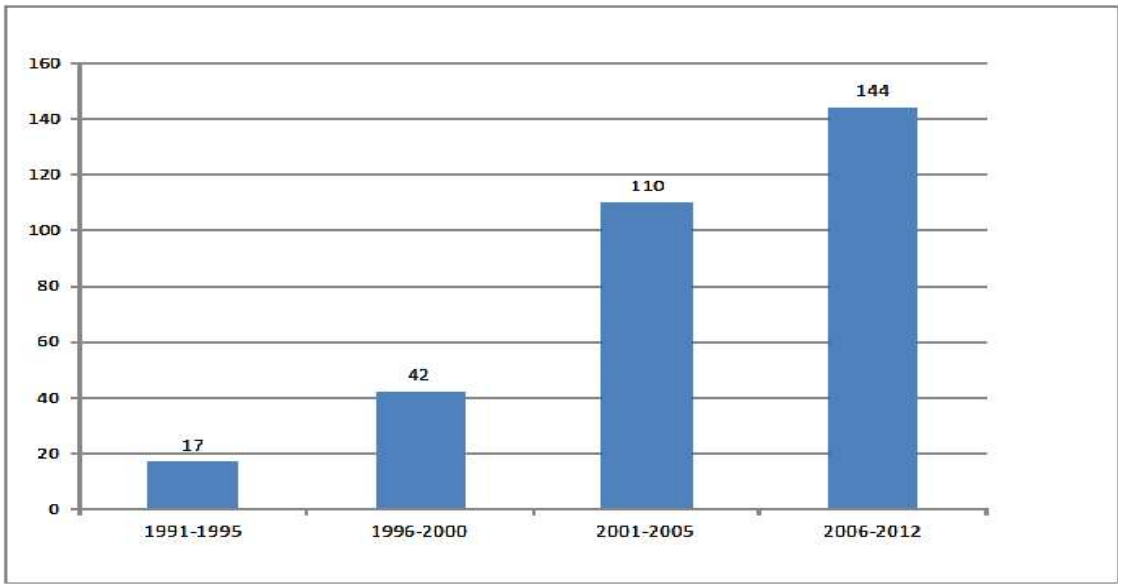
▌표 2.13 인공함양 사례 수가 가장 많은 상위 10개국 통계 (UNESCO-IGRAC, 2012)

국가명	강우유출수 활용	함양지 인공함양	강변여과	수로개선 인공함양	관정 인공주입	국가별 계
India	9	21	1	91	30	152
United States	0	24	0	0	58	82
Netherlands	0	6	26	1	5	38
Australia	0	10	0	4	19	33
Spain	0	6	0	1	8	15
China	0	3	0	1	7	11
United Arab Emirates	0	0	0	9	0	9
Germany	0	0	8	0	0	8
Iran	0	7	0	1	0	8
Hungary	0	2	5	0	0	7

- 그런데 상기 자료는 실제보다는 상당히 과소 평가된 것으로 판단된다. 예를 들면 우리나라의 경우 제주도 한천에 인공함양 관정이 20개가 설치되어 있으나 상기 조사결과에는 0으로 집계되어 있었다. 따라서 상기 자료는 전 세계에서 인공함양이 시행되고 있는 최소한의 사례를 보여주고 있다고 판단됨.

▌GWI(2010)는 세계적으로 ASR의 용량은 10억 갤런/일 [379만㎥/d]이며, 2020년에는 50억 갤런/일 용량에 달할 것으로 예측됨. 2020년까지 평균 설계 및 설치비용은 $400 백만에 달 할 것으로 예상하였음.

▌본 기획연구를 수행하며 지하수 인공주입 관련 300여 편의 보고서 및 논문을 수집하여 분석하고 있음. 1990년대부터의 기간별 발간 개수 경향을 도시하면 그림 2.8과 같으며, 2000년대부터 무척 큰 증가세를 보이고 있음을 알 수 있음.



▌그림 2.8 지하 저장 분야 국내외 프로젝트 보고서 및 논문 300여편의 기간별 증가 추세

▌세계 ASR 시스템의 반 이상이 미국에서 운영중에 있는 것으로 추정되며 (GWI, 2010)고, 나머지 부분은 영국, 캐나다, 호주, 남아프리카 및 중동지역에 분포되어 있음.

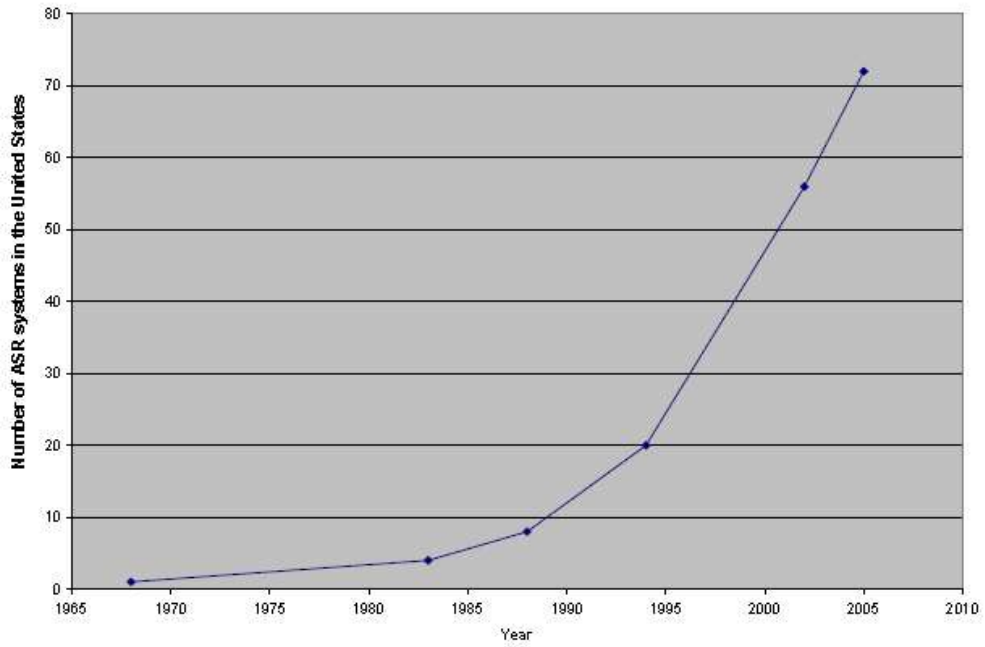
나. 미국 시장 현황 및 전망

▌EPA (2009)는 미국에서 ASR 시장이 성장하고 있으며 많은 지역에서 수자원관리의 주요 대안으로 발전하였다고 지적하였으며, EPA의 관할 중 북동부의 몇 개주로 구성된 Region 1을 제외하고는 나머지 모든 구역에서 ASR 관정이 존재하는 것으로 나타났음(그림 2.9).



▌그림 2.9 미국 내 가동중인 ASR 위치 (NGWA, 2008)

■ 대수층을 활용한 수자원의 저장 및 회수 (ASR) 시스템의 개수는 빠른 속도로 증가하고 있으며, 1983년 미국 플로리다에서 최초로 상업적 용도로 사용된 이후 현재 미국에서만 95개 이상의 ASR 시스템이 운영되고 있음(GWI 2010). Pyne(2005)은 1983년에 3개에 불과했던 ASR시스템이 2005년에는 72개로 증가했으며 최소한 100개가 개발 중이라고 보고하였음.



▌그림 2.10 1968-2005 미국 내 지하수 ASR 시스템 개수의 변화 (Pyne, 2005)

■ EPA (2009)는 미국 내에 동북부의 6개 주를 제외한 나머지 40여개 주에는 1203개의 인공함양 관정이 존재하는 것으로 파악한 바 있는데 이는 1999년 이후 4배 이상 증가한 수치임.

▌National Groundwater Association (2008)은 미국내 ASR 관정의 개수가 1695개를 초과한다고 보고한 바 있음. 또한 지역 별 ASR 잠재력 조사에서 캘리포니아주에서는 약 100억㎥의 저장능력과 연간 6억㎥의 공급능력을 가진 것으로 보수적으로 조사된바 있음.

▌플로리다에서는 총 50개소에서 일 1,059,800㎥/d의 용량으로 ASR 관정이 가동되거나 계획되고 있음(www.evergladesplan.org/docs/asr_whitepaper.pdf).

■ 향후 미국 연방정부와 플로리다 주정부는 에버글레이즈 복원 사업의 일환으로 인공함양정 333개소에서 총 6,300,000㎥/d의 담수를 주입할 계획을 가지고 있다. 프로젝트 완성에는 약 20년이 소요될 것으로 예상됨.

▌미국 내에서 현재까지 알려진 가장 큰 인공함양 시설은 라스베가스에서 1987년부터 2009년까지 20여년 간 누적 총 4억3천만㎥(380,000m^3/d) 물을 우기에 주입하고 건기에 회수하는 운영실적을 가지고 있음.

- 초기에는 2개의 관정으로 시작하였으나 2009년 현재에는 78개의 관정이 가동되고 있음(Goff, 2010). GWI(2010)는 세계 최대 용량 ASR 시스템은 미국 라스베가스에 소재하고 있는데 시설용량이 157 MGD (594,245 ㎥/d)라고 선행 보고와 약간 차이가 나는 수치를 제시한 바 있음.

▌캘리포니아의 오렌지 카운티에서는 지하수보충 시스템에서 3단계 고도처리된 하수를 대수층에 주입하고 266,000㎥/d의 지하수를 생산하고 있음(www.gwrsystem.com).

- West Basin 수도국은 100여개의 주입정을 해안선을 따라 2.6km거리에 배치하고 28,500㎥/d 정수를 주입하고 있음.
- 로스앤젤리스 카운티에서는 4개 함양 프로젝트를 통하여 처리된 하수를 포함하여 391,000㎥/d를 대수층에 주입하고 있음.
- 캘리포니아의 San Bernardino 카운티에서는 2011년 현재 약 2000㎥/d를 주입하고 있으나 향후 9000㎥/d로 증대시킬 계획을 가지고 있음.
- 텍사스 주의 El Paso시에서는 2004년에 총 2,192,000㎥의 처리수를 대수층에 주입하였음.

▌워싱톤 주에서도 건조한 동쪽 지역의 Yakima시, Walla Walla시, Palouse 강 수역, Foster-Moses Coulee 유역, Whitman 카운티 등과 서쪽 지역의 Lakehaven 시 수도국, Whatcom 카운티, Yelm 시, LOTT County partnership, Sammamish 시 등에서 ASR 파일롯 연구 또는 본 프로젝트를 수행하고 있음(Washington State, 2000).

- Kennewick시와 Richland시 향후 물 수요를 충족하기 위하여 ASR에 대한 타당성 조사를 수행하고 있음.
- Lakehaven시 수도국은 1991년부터 10여년간 ASR 파일롯 연구를 수행하고 있음. 현재 3개의 관정과 피압대수층으로 구성된 ASR 시스템을 향후에는 27개 관정으로 확장할 계획을 가지고 있으며, 피압대수층의 저수가능량은 3천5백만㎥에 이름.
- Walla Walla시에서는 1999년에 한 개의 관정으로 ASR 프로그램을 시작하였으며 우기에 약 570,000~760,000㎥의 주입 능력을 가지고 있으며, ASR 관정을 추가하여 지표 저수탱크를 대체할 계획을 가지고 있음.
- Yakima시에서는 2000년 당시 파일롯 연구를 수행하고 있으며, 한 개의 ASR 관정에서 25일간 평균 6,600㎥/d로 주입하고 55일간 평균 11,000㎥/d로 양수 시험을 수행하였음.

▌북서부의 오레곤 주에서도 다수의 ASR 시설이 운영되고 있음.

- Salem시에서는 건기의 첨두 수요를 담당하기 위하여 2003년 현재 4개의 ASR 관정으로 34,065㎥/d를 공급시설을 갖추고 있는데 향후 75,700㎥/d로 확장 계획을 가지고 있음.

- Beaverton시에서는 1995년부터 타당성 연구를 수행하고 2003년 현재 2개소의 ASR 시설을 가동 중이며 향후 2개소의 증설 계획을 가지고 있음. 2개소의 ASR 시설에서는 건기에 11,355㎥/d의 물을 공급하였는데 이는 건기의 첨두수요의 18%에 해당되는 양에 해당됨(김형수 등, 2003).

▌아리조나 주 Tucson시에서는 함양지를 이용하여 인공함양을 시키고 관정을 통하여 양수하는 토양 대수층 수질정화(soil aquifer treatment) 방법으로 현재 연간 3,950,000㎥를 향후 8,000,000㎥로 시설 확장 계획을 가지고 있음(Thomure와 Marra, 2005; Tucson Water, 2004).

- 이외에도 아리조나 주의 Scottsdale시, Peoria시, 그리고 Glendale시, 그리고 버지니아의 Fairfax시에서도 인공함양이 실행되고 있음(Monterey Pennisula, 2011).

▌ASR의 미국 내 사용목적은 컴퓨터 제조업체의 여름철 기계장치 열 조절을 위한 겨울철 주입, 관계 및 어류 보호를 위한 응용 사례 (워싱턴, 켈리포니아), 플로리다 에버글레이드의 생태계 보호 등을 포함하여 무려 24가지 이상의 사례가 존재하고 있음.

▌ASR의 보급확산에 대한 3가지 주요 이유는 정수처리시설 대비 저렴한 설치비용과 계절적 강우 차이의 효율적 활용, 각종 재난에 따른 정수처리시설 기능 불능시 (예, 아이오와 주의 Des Moines 시 사례) 부족한 음용수 공급, 그리고 불필요한 전처리시설 (탈지소처리시설)에 따른 운영비용 절감 등을 포함함.

다. 유럽 시장 현황 및 전망

▌영국에서는 1994년 당시에는 운영중인 ASR 시설은 Lee Valley와 Enfield-Haringey 두 개소에 불과하였음.

- 두 시설은 가뭄 시 런던 지역에 연간 6천만㎥를 공급한다는 전략으로 개발되었다 (Connorton and McIntosh, 1994). 영국의 ASR 확장을 위하여 1998년부터 3년간 전국에 걸친 지질조사를 시행한 바 있음(김용철과 김용제, 2010).

- South London을 포함한 4개 지역에서 파일롯 연구 또는 타당성 조사가 진행 중인 것으로 알려져 있음(DWAF, 2007).

▌포르투갈에서는 가뭄에 대비한 통합수자원관리 차원에서 지하수인공함양의 타당성을 검토하기 GABARDINE Project에서 남부 Algrave 지역에 3개의 시험시설을 운영하고 있음.

- 시험에서는 주로 함양지와 주입관정의 성능 시험과 지하수위의 반응, 그리고 해수침투 거동을 조사하였으며 가뭄 피해를 저감 대안으로 적합한 것으로 평가되었음 (Lobo-Ferreira and Oliveira, 2007).

라. 중동 시장 현황 및 전망

▌중동 지역의 경우 ASR 프로젝트의 당위성은 1) 담수 의존성이 높은 도시의 장기간 수자원 공간 확보, 2) 폐수 처리수의 재활용 목적을 위한 시설, 그리고 3) 염수의 침입 방지 및 침투 경

로 우회 목적이라 할 수 있음.

- 아부다비 수전력청 (Abu Dhabi Water and Electricity Authority)은 아부다비 시와 인근 지역의 수자원 비상시를 대비하여 90일간 40 MIGD (181,800 ㎥/d) 용량의 중동 최대 규모의 ASR 프로젝트를 진행하고 있음.

- 사쟈 수전력청 (Sharjah Water and Electricity Authority)는 2009년 겨울철 초과 유량을 저장하여 여름철 첨두 유량시 (peak load cacpacity) 부족한 수자원 공급을 대체하고 수자원 공급의 안정성을 높이기 위한 소규모 시범사업과 수리지질학적 검토를 마쳤음.

- 폐수 재활용은 수년간 여러 중동 국가의 주요 수자원 정책의 일환이었으나 사우디아라비아나 이집트와 같은 주요 국가에서는 중앙 집중 폐수 처리수를 재활용 단계까지 현실화하는데 필요한 기반시설이 부족한 실정임. 이러한 점에서 ASR은 처리수를 3등급수 수준까지 처리할 수 있고 관계용수로 활용할 수 있는 기회를 제공한다.

- 바레인, 카타르, 리비야와 같은 국가는 해안 지역 인근 도시에서 음용수 대체로 사용된 지하수 고갈문제를 방지하고 이로 인한 염수 침투 및 침투 경로 변경을 위한 해안 대수층 보호 목적으로 담수와 오수 처리수를 활용할 계획이다. 이집트와 같은 경우는 아부다비에서 적용하고 있는 주입관정 대신에 인공함양지 (Ponds)를 활용한 시범사업을 진행 중에 있다.

마. 아프리카 시장 현황 및 전망

▌북아프리카의 튀니지에서는 1970년 초반부터 댐 저장수를 활용한 대수층 주입방식을 사용하였고(Nebhana 댐), 1980년 중반부터는 재생수를 주입 원수로 활용하고 있음. 전자의 경우 지하수위의 증가와 염수 농도의 감소 결과를 가져왔음.

▌튀니지에서는 대략 70여개의 대수층이 평균 146% 수준의 과도한 지하수 개발 피해를 입고 있으며, 이중 5개 대수층에 1,500 ㎥/d ~ 37,500 ㎥/d 비율로 재생수를 주입하여 그 적용성을 검토하고 있음.

- 또한, Mornag 대수층에 지하수를 보충하기 위하여 1991년부터 함양지를 운영하고 있다. 2004년까지 총 10,000,000㎥의 인공함양이 이루어진 것으로 평가되고 있으며 특히 96년부터 3년간은 연간 평균 1,700,000㎥의 인공함양이 이루어져 Mornag 대수층의 지하수위가 10m 정도 회복된 것으로 평가하고 있음(Mhamdi and Heilweil, 2007).

▌남아프리카공화국은 아프리카 대륙에서 인공함양 방법이 가장 활발하게 적용되고 있는 국가이다. 관정 인공주입 외에도 함양지, 모래대수층을 활용한 강우 유출수 수질 개선, 지표수-지하수 연계활용 등 다양한 방면으로 활용하고 있음(Murray and Ravenscroft, 2010).

2. 국외 물 산업 시장 현황 및 전망

▌물 산업은 지난 20세기 동안 전 세계적인 인구의 증가와 도시화산업화의 영향으로 크게 성장

하였으며, 물 수요는 전 세계적으로 폭발적으로 증가할 것으로 예측됨.

- Goldman Sachs는 그동안 전 세계적으로 물에 대한 수요가 20년마다 두 배로 증가했다고 추정함(The Economist, 2008.)

- 에너지원은 다양해져 서로 제한적이나마 대체가 가능하나 물은 대체방안이 전혀 없다는 면에서 상황은 더 심각해짐.

▌표 2.14 20세기 세계 인구 증가 및 도시화율 추이

연 도	세계 인구(명)	도시 인구(명)	도시화율(%)
1900	1,619,886,800	232,694,900	14.3
1970	3,610,034,400	1,354,237,000	37.5
1985	4,781,124,000	2,053,544,000	42.9
2000	6,055,049,000	2,881,079,000	47.6

* 자료 : Greenway and Monsna, 1989; Barrett and Johnson, 2001

▌영국의 물 전문 리서치기관인 GWI(Global Water Intelligence)에 따르면 세계 물 시장 규모가 2007년에는 3,620억 달러에서 2025년에는 8,650억 달러로 성장할 것으로 전망함[7].

- 2007년 기준으로 반도체 산업(2,800억 달러)이나 조선산업(2,500억 달러)보다 큼[8].

- 물 시장의 76.8%을 상하수 분야가 차지하고 있으며, 향후 해수담수와와 재이용수 분야의 성장 속도가 클 것으로 전망됨.

▌표 2.15 세계 물시장 규모 및 전망

구분	2007년	2025년	연평균 증가율
세계 물 시장	3,620	8,650	4.9
상수	1,720	3,880	4.6
하수	1,530	3,550	4.8
해수담수화	120	440	7.5
공업용수·농업용수	240	570	4.9
재이용수	10	210	18.4

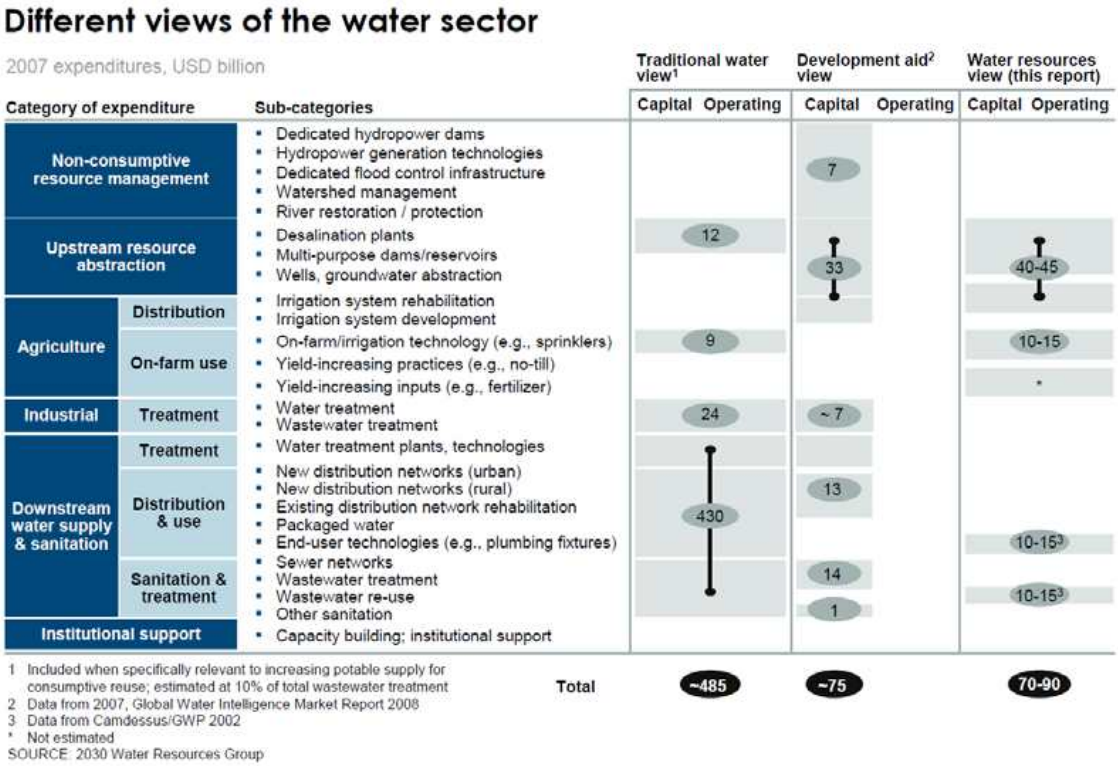
* 자료 : Greenway and Monsna, 1989; Barrett and Johnson, 2001

▌맥킨지와 컴퍼니(2009)에서는 최근까지 상하수도 중심의 물 산업이 주로 진행되어 왔다면, 향후에는 수자원 확보 관점에서의 물 산업이 활성화 될 것이라고 전망하고 있음.

7) 자료: GWI(2010)
8) 자료: GWI(2008), 국토해양부 외 (2011) 재인용

■ 기후변화와 토지이용의 변화 등으로 발생되는 물 부족 상태는 더욱 심화될 것으로 보이기 때문에 추가적인 수자원 확보를 위한 다각적인 노력이 산업에 반영될 것으로 전망됨.

■ 2007년 기준으로 볼 때 전통적인 상하수도 개발 분야에 비해 규모가 작으나 연간 700~900억 달러 규모를 형성하고 있어 급성장이 예상되며, 본 연구와 직·간접적으로 관련이 있는 지하수 확보, 해수담수화, 농업시스템개선 등의 분야는 400~500억 달러에 이름.



▌그림 2.11 세계 물 시장 규모

▌각국의 지속적인 물 수요 증가에 따른 물 시장 확대 추세임.

■ 아시아의 경우, 중국, 베트남을 중심으로 폭발적인 경제개발 진행 중이며, 최근 일부 국가에서 물 분야 인프라시설에 대한 적극적인 민자유치가 추진되고 있음.

■ 중동의 경우, 세계인구의 5%를 차지하고 있으나 가용수자원은 1%로 만성적으로 물이 부족하나 인구는 세계 평균보다 약 55% 빠르게 성장하고 있어 물 부족은 더욱 심화 예상되며, 최근 해수담수화시장 활발해 지고 있음.

■ 아프리카의 경우, 인구증가로 물 수요는 지속적으로 증가하나, 물 분야 투자는 매우 취약한 실정임.

▌표 2.16 각 국의 주요 시장동향

주요시장	시 장 동 향
아시아	- '90년대 말 아시아 금융위기 이후 경제는 전반적으로 안정적 성장세 유지 - 중국, 베트남을 중심으로 폭발적인 경제개발 진행 중임. - 물 관련 인프라의 부족으로 대부분의 나라(고소득국가 제외)가 상하수도 서비스 부재 - 최근 일부 국가에서 물 분야 인프라시설에 대한 민자유치를 적극적으로 유치하고 있으나, 낮은 구매력, 법적·제도적 장치 미흡함.
중동	- 중동시장은 세계인구의 5%를 차지하고 있으나 가용수자원은 1%로 만성적인 물 부족 - 인구는 세계 평균보다 약 55% 빠르게 성장하고 있어 물 부족은 더욱 심화 예상됨. - 2015년까지 1,270억 달러 규모의 상하수도 투자가 예상, 특히 부족한 수자 원 해결을 위하여 해수담수화 시장 급성장할 전망임. - 대부분의 투자 및 엔지니어링 부분은 유럽, 미국 기업에서 장악하고 있음. (물 분야의 투자사업은 담수화 부문과 하수도 부문이며, 시장진입이 매우 어려움)
아프리카	- 인구증가로 물 수요는 지속적으로 증가하나, 물 분야 투자는 전무한 실정(국가재정 등)임. - 민간투자는 AfDB 또는 IBRD등의 자금차입을 조건으로 주로 "O&M 계약" 또는 "Lease 계약" 형태로 진행되고 있음. - 아프리카 특유의 Governance로 대부분의 나라에서 법적 안정성이 취약함.
중남미	- 인구증가로 물 수요는 급증하나, 물 인프라 부족함. - '90년대부터 IBRD등 차관기관의 차관조건으로 물 분야 민영화 추진됨. - 경제위기, 환율조정, 부패 스캔들, 국민저항 등을 거치면서 대부분의 민간 투자사 업 실패, 대부분 프랑스, 영국, 미국 물 기업이 철수한 상태임. - 현재 대부분의 민영사업은 스페인 물 기업과 현지 물 기업이 장악하고 있음. - 중남미에 불고 있는 좌파 정책으로 신규 민간투자 기회는 없는 편이고, 일부 국가에서는 기존 민영사업을 국유화 하고 있음(Bolivia, Uruguay, Venesuela 등).

자료 : 세계 물 시장 수요현황 및 진출전략 (이경환, 2008)

▌각국은 세계 물 시장 공략을 위한 투자 및 지원확대 등 움직임 가속화되고 있음.

- KOTRA 보고서(2009)에 의하면, 싱가포르, 독일, 스페인 등의 국가에서는 자국에서의 경험을 활용하면서 국가정책의 일환으로 세계시장을 공략하는 움직임이 가속화되고 있음.

- 일본의 경우, 2025년까지 세계 물시장 점유율을 6%(1조8000억원 규모)까지 끌어올리기 위해 물 산업에 집중적인 투자 지원을 하며, 해외기업과의 합작기업 설립, 물 처리 기업 인수 등을 적극 지원함.

▌'99년 전 세계 70여개에 불과하던 물기업 수는 '10년 164개로 2배 이상 증가, 특히 개발도상국의 기업수가 대폭 증가함.

- '99년 전문 물기업의 86%가 OECD회원국이나, 현재는 49%만이 OECD회원국임.

▌표 2.17 물 전문기업 추이(누계)

구 분	'99	'01	'03	'05	'07	'08	'09	'10	'11
국 가 수	13	16	18	28	27	28	29	30	31
기 업 수	73	87	103	128	146	151	159	166	167
• OECD 국가	63	73	75	81	81	85	85	83	83
• 중 진 국	5	11	14	28	45	45	52	55	60
• 개 도 국	5	3	14	19	20	21	22	24	24

자료 : Pinsent Masons Water Yearbook 2011-2012

▌물 전문기업을 보유한 국가와 기업 수는 '99년 이후 '08년까지 10년 동안 2배 이상 증가되고 있음.

▌표 2.18 물 전문기업 추이(누계)

구 분	'99	'00	'01	'02	'03	'04	'05	'06	'07	'08
국 가 수	13	15	16	15	18	22	28	27	27	28
기 업 수	70	81	82	84	102	117	128	142	145	150
• OECD 국가	59	69	70	68	73	72	77	74	75	78
• 중 진 국	2	2	2	2	6	13	13	18	19	20
• 개 도 국	9	10	10	14	23	32	38	50	51	52

자료 : Pinsent Masons Water Yearbook 2008-2009

▌다국적 기업의 시장 점유율 감소

- 세계적 상위 5대기업(Veolia, Suez, SAUR, Agbar, RWE)의 시장점유율이 '01년 73%를 정점으로 '11년 31%까지 하락됨.

- 5대 기업 중 Suez는 2010년 스페인의 글로벌 물기업인 Agbar를 인수·합병하여 거대 물기업으로 성장함.

▌표 2.19 시장 점유율 현황 - 서비스 인구기준 단위 : 백만명

구 분	'99	'01	'03	'05	'07	'09	'10	'11
Veolia	74.8	95.2	104.5	117.5	133.9	122.4	124.4	125.4
Suez	81.7	94.7	104.2	104.5	110.4	90.0	87.9	124.3
SAUR	27.6	30.4	34	13.7	13.6	12.3	12.3	12.4
Agbar	31.2	35.3	35.2	34.9	22.1	29.7	29.5	0
RWE	23.7	56.5	70.1	67.2	35.7	18.3	18.3	18.3
계	239	312.1	348.0	337.8	305.7	272.7	272.4	280.4
세계 전체	350	430	490	565	681	802	861	909
비 율	68	73	71	60	45	34	32	31

자료 : Pinsent Masons Water Yearbook 2011-2012

▌세계적인 물 기업은 사업범위 확대하고 핵심역량 분석에서 Veolia, Suez는 운영역량 강화에 집중함.

- 상수도·하수도를 비롯한 산업용수, 해수담수화, 지하수 등의 물순환 전반으로 사업범위 확대함.

▌표 2.20 주요 기업의 물관련 사업분야

기업명	상수도	하수도	산업용수	해수담수화	지하수
Veolia	●	●	●	●	●
Suez	●	●	●	●	●
RWE	●	●	●		
Agbar	●	●			
Sabesp	●	●			
United Utilities	●	●	●		
FCC	●	●			
ACEA	●	●	●		
Severn Trent	●	●	●		
Saur	●	●			

자료 : Pinsent Masons Water Yearbook 2008-2009

- US Filter 등 수처리 제조업체를 매각하고 사업 참여 시 제휴, 아웃소싱을 통해 고객에게 관련 서비스 제공함.

▌표 2.21 주요기업의 핵심역량 분석

경쟁·선도기업	제조	건설	컨설팅/설계	운영
VEOLIA	일부 계열사 보유		설계기술 보유	상하수도 운영관리
SUEZ	일부 계열사 보유		설계기술 보유	상하수도 운영관리
Simens, Doosan	펌프, 설비 제조	설비 건설	설비 설계	

핵심분야(주력육성) 연관분야(참여) 비핵심분야(필요시 간접참여)

- 2011년 상수도서비스 인구기준 세계 10대 물기업 현황을 살펴보면, 베올리아와 수에즈, FCC, 사베습등 전통적인 상수도 서비스의 글로벌 기업들이 높은 순위를 차지하고 있으나, 중국 기업들(Shanghai Industrial Holdings, Beijing Capital, Beijing Enterprises Water)이 자국의 소비자들을 기반으로 높은 성장률을 나타내고 있음.

▌표 2.22 세계 10대 물기업 현황 (2011년)

순위 '11	기업명 (본사소재)	물기업 브랜드	기업형태	사업분야	매출액 (백만)	서비스 인구 (천명)	해외 사업 비중
1	Veolia Environment (프랑스)	VEOLIA WATER	민간기업	물, 쓰레기, 에너지, 운송	유로 12,128	125,416	81%
2	Suez Environment (프랑스)	suez ENVIRONNEMENT	민간기업	물, 쓰레기, 에너지, 전기, 가스 등	유로 7,992	124,287	90%
3	FCC(스페인)	FCC FOMENTO DE CONSTRUCCIONES Y CONTRATAS, S.A.	민간기업	물, 운송, 에너지, 부동산 등	유로 1,004	28,220	52%
4	Sabesp(브라질)	sabesp	공기업	물, 산업용수	BRL 9,321	26,200	0%
5	Shanghai Industrial Holdings(중국)	SIIC	민간기업	물, 도로, 의약, 소비재, 부동산 등	HKD 5,278	21,780	0%
6	Beijing Capital	首创股份 BEIJING CAPITAL CO.,LTD	민간기업	물, 도로등	RMB 3,037	19,585	0%
7	RWE(독일)	RWE	민간기업	물, 쓰레기, 전기, 가스, 운송 등	-	18,265	28%
8	ACEA (이탈리아)	acea	공기업	물, 에너지	유로 667	17,976	35%
9	Beijing Enterprises Water(중국)	北控水務集團有限公司	민간기업	상·하수도	HK$6,350	17,790	0%
10	American Water Works (독일 RWE)	AMERICAN WATER	민간기업	상·하수도	US$ 2,710	16,800	2%

☞ 자료 : GWI (2011), 기업별 홈페이지 & Annual Report

▌물 시장의 표준화 및 시장개방 논의 활발하게 진행 중임.

- 국제표준화기구(ISO)는 프랑스 표준기구(AFNOR)의 제안으로 2001년 4월 산하에 전문위원회(TC224)를 구성하여 2007년 10월 상하수도서비스 국제 표준 발간을 목표로 작업 중임.
- 서비스 분야는 우루과이라운드(UR) 협상을 계기로 세계무역기구(WTO)의 다자간 무역체제에 편입되었으며, 2001년 11월 개시된 '도하개발아젠다(DDA)'에서 시장개방 협상이 진행 중이며, 2000년 11월 유럽연합(EU)은 상하수도를 포함하는 환경서비스 분류체계 개선을 제안하였으며, 주요 국가들이 이 기준을 지지하고 있음.
- 전 세계적인 규모로 진행되는 WTO의 시장개방 협상은 더딘데 비해, 국가 간에 체결하는 자유무역협정(FTA)을 통한 시장개방은 비교적 활발하며, 우리나라는 칠레, 싱가포르, 유럽자유무역연합(4개국)와 FTA 체결, 미국, 아세안(10개국), 캐나다, 멕시코, 인도 등 14개국과 협

상 진행 중임.

※ 유럽연합(25개국)과는 예비협의 중으로 적절한 시점에 협상 개시 검토 예정임.

▌21세기에도 세계 물산업의 성장은 계속될 것으로 전망됨.

- 물 산업은 20세기의 석유산업과 같은 21세기 최대 성장산업(미국 포춘지)
- 21세기에는 물산업이 수천조원 규모의 산업 형성 예측(세계은행)
- 선진국에서는 시설의 재투자 시기 도래와 국민의 환경에 대한 욕구 증대로 인해 물산업이 성장할 것으로 전망됨.

  ※ 상하수도 인프라의 내구연한은 보통 60-80년 정도로 간주되며, 물 공급을 위한 인프라가 빠르게 노후화하고 있어, 막대한 투자가 필요한 시점임.

- 후진국의 경우 인구증가와 도시화·산업화 확산에 따른 수요 증가와 국제사회의 상하수도 보급확대 노력에 따라 물 산업이 성장할 것으로 전망됨.
- 2025년까지 개도국의 물 분야 총 투자수요는 연간 1,800억달러에 달함.

▌물 부족, 상하수도 보급 미비 등 물 문제가 심각한 신흥국은 안정적 수자원 확보를 위해 인프라를 구축 중임.

- 후진지역의 물 오염 심각하여 전 세계적으로 약 10억명 정도가 안전하게 물을 마실 수 없는 것으로 알려져 있으며, 이에 대한 사업기회가 큼(SAM study, 2007).
- 특히 아프리카는 아시아 다음으로 인구가 많은 대륙으로 면적은 20.4%에 해당하나 약 2/3 정도만 전기의 혜택을 받으며, 리비아, 남아프리카공화국, 이집트를 제외하면 약 20% 정도만 전기를 공급받아(Wikipedia, 2009) 용수공급에도 큰 장애가 됨으로 저에너지형 또는 신재생에너지 기반의 플랜트기술에 대한 수요가 클 것으로 전망 됨.
- 선진국과 비교할 때 중국, 인도, 중동 등 신흥국의 물 부족 현상이 상대적으로 심각함.

  ※ 주요국 물빈곤지수: 캐나다 77.7, 프랑스 68.0, 미국 65.0, 일본 64.8, 한국 62.4, 쿠웨이트 53.5, 인도 53.2, 중국 51.1

- 깨끗한 물의 공급과 안전한 수처리를 위한 상하수도 구축도 미흡함.

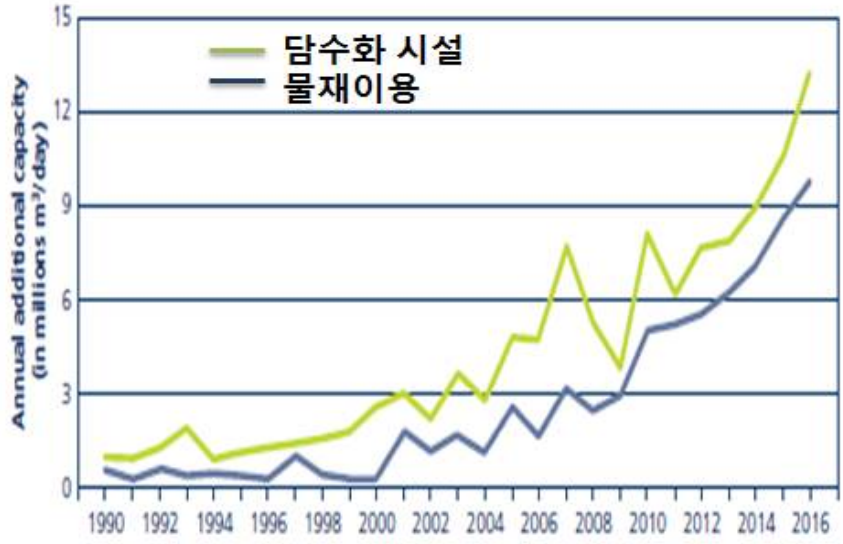
  ※ 중국의 경우 지표수 중 식용가능한 물은 68%에 불과 (2009년)

- KOTRA 조사(2009)에 의하면, 인도네시아 정부는 상수도 보급률을 2015년까지 도시지역 80%, 비도시지역 60%까지 올릴 계획임(현재 각각 40%, 20%).

▌물 부족 사태가 예견되면서 대체수자원인 물 재이용, 해수담수화 등의 수처리 시장이 급성장 세임.

- 해수담수화시설은 '10년 110억달러(6,600만톤/일)→'16년 180억달러(12,000만톤/일)으로 성장할 것으로 전망됨.

- 특히, 신소재인 멤브레인 시스템 시장이 급성장할 것으로 예상됨.
  - '09년 40억달러→'16년 130억달러로 성장할 것으로 기대됨.



☞ 자료 : "Water: a market of the future", SAM Study, 2010

▌그림 2.12 담수화시설 및 물재이용 시설용량

3. 국내 시장 현황 및 전망

▌국내에서 물 관련 산업은 사회간접자본으로서 공공성 측면이 강조되어 왔으나, 최근 들어 세계적인 물기업의 성장에 따라 산업적인 측면이 부각되고 있음.

- 우리나라 물 산업은 정부와 지자체가 주도한 대대적인 시설 확충의 결과로 2004년 시설 보급률이 상수도 90%, 하수도 80%를 넘어 선진국 수준 도달함.

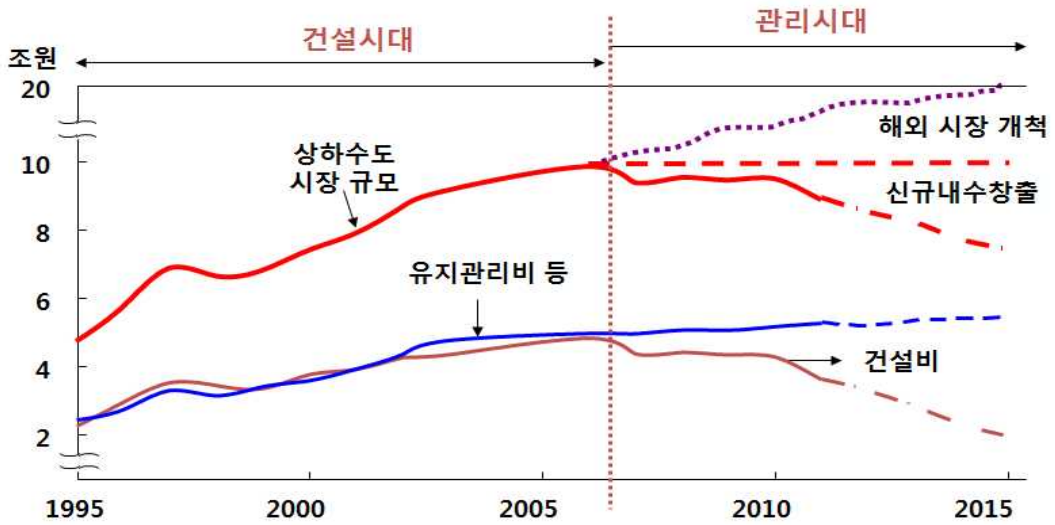
- 현재 수도산업의 규모가 2003년 우리나라 전체 물 산업 10.9조원의 84.5%를 차지하며, 국내총생산(GDP)의 1.3% 수준에 달함.

▌표 2.23 물 산업 분야별 국내 시장 규모(2003년 기준) (단위: 조원)

합 계	상수도	하수도	폐 수	생 수	정수기	기 타
10.9 (100%)	5.14 (47.3%)	4.05 (37.2%)	0.97 (8.9%)	0.19 (1.7%)	0.41 (3.8%)	0.12 (1.1%)

자료 : 물산업 육성방안(2006.2)

▌국내 상·하수도시장은 과거 건설 중심이었으나 현재와 미래에는 상·하수도시설의 유지관리 시대로 전환중임. 또한, 지속적인 성장을 위해서는 해외시장 개척이 필요함.



▌그림 2.13 국내 상·하수도 시장의 전망

▌국내 물산업 기술수준은 정부가 자금을 지원한 "G-7 환경공학기술개발사업 (1992~2001)"에 의해 발전하였으나, 선진국 수준에 못 미치는 것으로 평가됨.

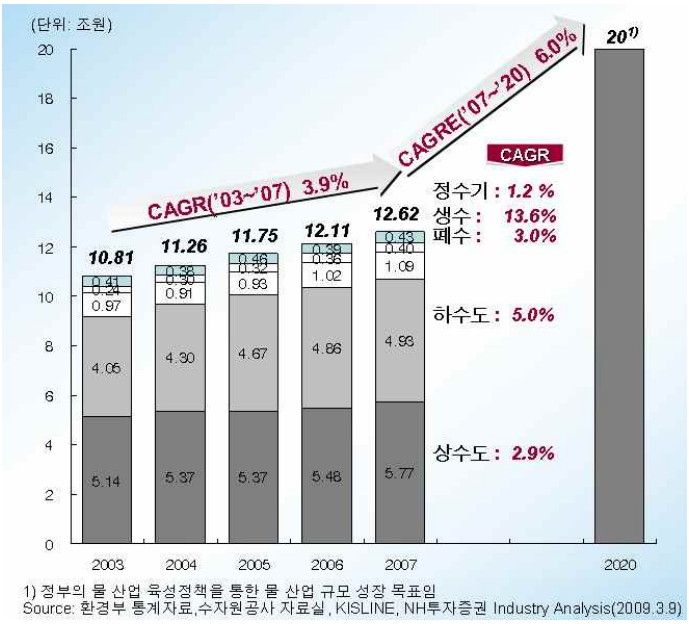
▌표 2.24 국내 물산업의 기술수준 평가결과

구 분	내 용
차세대 핵심환경기술 개발 10개년 종합계획 (2002.7, 환경부)	• 선진국 대비 50% 수준 내외 – 관망기술 부문은 41% 수준 – 하폐수 고도처리 및 재이용 부문은 63% 수준
수도산업 실태 조사분석 (2004.10, 환경미디어)	• 전문가 대상 델파이조사 결과 중진국 수준 이하 – 중진국 수준 52.5%, 후진국 또는 중하위 수준 32.8%
물산업 육성방안 (2006. 2, 환경부등)	• 선진국 대비 70~80% – 상수(75), 관망(55), 하수(80), 폐수(70), 먹는샘물(80), 정수기(80)

▌국내 물 산업의 규모는 2007년 약 12.6조원으로서 세계 8위에 해당됨. 이 중에서 상하수도 시장과 관련된 산업이 전체의 85%를 차지하고 있으며, 세계 물 산업에서 우리나라가 차지하는 시장 점유율은 불과 2.1%만을 차지하고 있는 실정임.

- 정부에서는 물 산업 육성을 통하여 2020년에 20조의 산업 규모를 목표로 시장을 전망하고 있음.

- 이를 위해 2010년 10월 제9차 녹생성장위원회에서 물 산업 육성 전략을 발표하였으며, 주요 내용으로는 첨단 막여과 스마트상수도 등 물 산업 핵심기술 개발, 전문 물 기업 육성, 친환경 대체용수 산업 등이 있음.



▌그림 2.14 국내 물 산업 현황 및 전망

▌'물 산업 육성전략'은 2020년까지 8개의 세계적인 물 기업을 육성하고 일자리 37,000개를 만들어 세계 물 산업 강국으로 도약한다는 목표로 원천기술개발 등 4개 핵심전략으로 구성되어 있음.

- IT 기반의 지능형 물 생산·공급시스템을 개발하여 세계 상하수도 기술을 선도하고, 향후 고도수처리에 필요한 첨단소재 막 공정 및 운영관리 기술 등 원천기술을 개발함.

- 토탈 솔류션 능력을 보유한 물 전문기업을 육성하기 위해 상수도 사업을 권역별로 통합화·광역화하여 공기업 등에 위탁함으로써 물 기업의 전문경영능력과 토탈 솔루션 역량을 확보하고, 유역 단위의 상하수도 사업 통합관리 체계 도입으로 해외진출 기반을 확보함.

- 먹는 샘물 산업발전을 위해 다양한 샘물자원을 발굴, 프리미엄 시장을 확대하고 먹는 샘물의 홍보와 수출을 적극 지원함.

■ 물 산업의 해외진출을 위해서 세계 물 시장 세분화와 지역별 시장분석을 통해 맞춤형 해외진출 전략을 수립·추진하고 건설·플랜트·자원개발과 물 산업을 연계하는 한편, 녹색펀드 조성, 공적개발원조 자금 확대 등 금융지원 시스템을 정비할 계획임.

■ 정부는 물 산업 육성 전략을 추진하기 위해 2020년까지 원천기술 개발에 6,871억원 등 총 3조 4,609억원을 투자할 계획임.

▌국내 먹는 샘물의 시장은 향후 2020년에 약 14,985억원으로 늘어날 것으로 전망되며, 프리미엄 생수시장(30% 점유)과 수입생수의 매출이 지속적으로 증가(연평균 20%).

■ 먹는 샘물 제조업체는 약 80개 100여개 브랜드 임.

■ 이 중 PC(대형물통)와 PET 제품을 생산하는 상위 7개사가 전체시장의 50%를 점유하고 있음.

▌표 2.25 국내 생수시장 현황

구 분	국산 생수	수입 생수
국내생수시장 규모 (2010년)	전체 총 5,500억원	
	3,800억원(69%)	1,700억원(31%)
최다판매생수	제주삼다수 (약 50%, 1600억원)	프랑스 에비앙 (약 76% 점유)
판매증가율 (최근 5년간)	연평균 10% 상승	연평균 23% 상승
최고가 판매생수	SK임업 이로수 (500㎖ 1만 6천원)	프랑스 에비앙폴스미스 (750㎖ 2만 8천원)

▌낙동강 하류지역인 부산광역시와 김해시의 경우 수질이 낮은 원수로 인해 고도정수처리시설을 운영하고 있고, 이로 인해 타 지역에 비해 높은 생산원가를 나타내고 있음.

■ 부산광역시와 김해시의 경우 원수의 수질이 낮은 관계로 모든 정수장에 고도정수처리시설을 갖추고 있어 이로 인해 동력비, 약품비, 수선교체비등의 ㎥당 원가가 전국 및 7대광역시 평균에 비해 높음.

■ 원수의 수질이 좋지 않아 고도정수처리시설을 운영하고 있는 울산시의 경우에도 동력비, 약품비 및 전체 ㎥당 원가가 높음.

■ 따라서, 부산광역시, 울산시, 김해시의 경우 비슷한 규모의 지자체에 비해 ㎥당 원가가 월등

히 높고 이러한 원가의 상승은 결국 부산광역시 시민에게 부담으로 전가됨.

▌표 2.26 주요 지자체의 원가현황(2010년 기준)

지역	㎥당 원가 (원)	동력비		약품비		수선교체비	
		총액 (백만원)	㎥당 원가 (원)	총액 (백만원)	㎥당 원가 (원)	총액 (백만원)	㎥당 원가 (원)
서 울	577.5	33,271	29.7	12,557	11.2	84,879	75.8
부 산	802.7	19,137	53.0	7,057	19.5	36,831	102.0
대 구	575.9	9,463	31.6	3,964	13.2	12,048	40.3
인 천	590.6	10,582	35.4	3,011	10.1	15,850	53.0
광 주	622.1	2,682	20.0	766	5.7	3,824	28.4
대 전	530.4	4,313	26.1	2,290	13.9	10,477	63.4
울 산	874.2	5,107	50.7	1,759	17.5	796	7.9
김 해	907.8	2364	59.7	533	13.5	2,457	62.0
전국평균	727.4	152,913	30.3	47,216	9.4	255,894	50.7
7대광역시 평균	629.6	84,559	34.1	31,406	12.7	164,708	66.4

자료 : 2010년 지방공기업 결산 및 경영평가, 행정안전부(2011)

▌환경부에서는 1997년부터 도서지역 식수원 공급사업을 시행 중에 있음. 1단계 사업으로 97년부터 2004년까지 23개 시군, 123개 도서에 국고 2181억원을 투자하여 수원지 및 해수담수화 시설, 정수시설, 지하수 관정, 관로 등 사업 시행하였음(문유리 등, 2009).

- 2005년부터 2009년까지 시행된 2단계 사업에서 21개 시군 109개 도서의 상수도 확충사업을 위하여 총 3980억원 투자하였음. 사업 내용으로는 관정, 수원개발, 정수시설, 해수담수화 시설 등이 포함됨. 시설 운영 및 유지를 위한 전문인력 부족, 운영비 과다 등의 사유로 41개 시설을 수자원공사에 위탁 운영함(문유리 등, 2010).

- 2010년부터 2014년 사이에 시행되는 2단계 수정 사업에서 19개 시군에서 102개 상수도 확충 사업에 총 4075억원의 사업비 추정. 2단계 수정사업에서는 거주인구가 30인 이상인 도서에 소규모 수도 시설 사업비 지원. 주요 사업내용으로는 수원지 및 정수시설 설치, 배수지 및 관로, 지하수 개발, 해수담수화시설 등이 포함됨.

제 3 절 기술동향분석

1. 기술 분류 및 정의

▌**지하저수지란 주입관정(우물)이나 함양지(연못) 등의 인공적인 방법을 이용하여 지표수를 대수층에 충진시키고 일정 기간 저장시키거나 유하시킨 후 양수하여 사용하기 위한 목적으로 활용되는 대수층과 일련의 시설**을 가리킴. 이러한 시설에는 주입/함양 및 양수 시설, 관망, 전후처리 시설, 시스템 감시 및 운영 시스템 등이 포함됨. 본 연구에서 추구하는 지하 저수지는 비용이 많이 소요되는 터널, 지하저류조, 또는 지하댐 등의 인공 구조물에 의존하지 않고 대수층의 자연 상태를 활용하여 구축될 수 있음.

▌**지하저수지의 종류 및 특징**

- 본 연구에서 추구하는 지하저수지의 종류는 상시주입-상시양수 형식과 우기주입-건기양수 형식의 두 가지로 구분됨. 각 형식에 대한 정의는 다음과 같음.

- **상시주입-상시양수 형식**의 지하저수지는 주입과 양수가 연중 이루어지는 형식으로 수질은 불량해도 주입할 수 있는 지표수가 연중 확보될 수 있는 지역에 설치될 수 있으며, 대하천 하구에서 나타날 수 있는 삼각주는 상시주입-상시양수 지하저수지의 좋은 후보지가 될 수 있음. 지하저수지의 규모는 삼각주의 규모 및 수리지질 특성에 의하여 결정되므로 삼각주의 규모가 크면 지하저수지가 조성될 수 있음.

- **우기주입-건기회수 형식**의 지하저수지는 수자원이 부족하여 우기 (장마, 태풍 등 시즌)에는 주입할 수 있는 잉여 지표수가 있으나 건기에는 지표수의 수량이 부족할 수 있는 지역을 대상으로 함. 하천 발달이 빈약한 산간, 도서 및 해안 지역이 주로 대상이 되며 이러한 지역에서는 대수층의 수평 및 연직방향 규모가 빈약한 경우가 많기 때문에 소규모 지하저수지로 규모가 제한될 수 있음. 여기서도 해안 및 도서지역의 후보 대수층에는 염도가 높은 지하수가 존재할 수 있음.

▌**지하저수지 구축 기술의 분류 및 정의**

- 지하저수지는 다음의 요소로 구성되며 각 요소별 기능과 정의는 다음과 같음.

  - **주입시스템**: 지하저수지의 상태가 최적상태를 유지하도록 주입압과 주입량 조절을 위한 지하저수지의 도수펌프, 관로, 주입정, 제어계통 등으로 구성됨.

  - **양수시스템**: 수위강하량과 양수량 조절을 위한 양수정, 수중펌프, 관망, 제어계통 등으로 구성됨.

  - **모니터링 시스템**: 주입시스템, 양수시스템, 수질관리시스템 그리고 대수층내 물의 거동 및

수질 특성 감시를 위한 관망 수압 및 수질 감시, 관측정, 센서, 원격측정설비 등으로 구성됨.

- **운영 및 유지관리 시스템**: 가동 중인 지하저수지를 최적 상태로 유지하기 위한 운영 및 유지관리 기술임. 모니터링 결과를 분석하고, 주입 및 양수 시스템의 제어장치를 이용하여 시스템을 미세 조정하는 기술 및 필요시 본격적인 유지관리 기술로 구성됨.

- **수질관리 시스템**: 지하저수지 수질 위해성 평가, 주입 전 처리, 대수층 수질변화, 그리고 양수 후 처리계통으로 구성됨. 대수층 내 수질은 물리적, 지구화학적, 생물학적 기작으로 변화될 수 있으며 이들로 인한 수질 변화에 대한 예측 및 평가 기술로 구성됨.

2. 특허동향 분석

▌『 청정 지하저수지 개발기술』에 대한 특허 동향 분석은 국토해양부의 요청에 의해 특허청이 발주하고 R&D 특허센터가 주관하는 사업이며 플러스특허법률사무소에 의하여 수행되었다. 여기에는 특허기술동향조사보고서에서 주요 내용을 발췌하여 수록하였음.

가. 분석 배경 및 목적

▌분석 배경

- 현재 국내 물공급 현황을 살펴보면 지역간 갈등으로 인해 지역간 물 이전이 사실상 어려워 지자체별로 심각한 물 부족을 겪는 경우가 왕왕 발생하며, 사회적 이슈로도 대두되고 있는 바 안정적인 물 확보 방안 마련이 시급함.

- 더 나아가 기후변화로 인해 지속적으로 악화되고 있는 지표수 환경에 대비하고, 물 안보의 제고를 위하여 용수원 다변화가 필요하며, 이와 더불어 저에너지, 저비용 및 화학약품 사용 최소화로 만족도 높은 용수 방안이 필요함.

- 전세계적으로 공통된 수자원 연구개발 정책의 기조는 기후 및 사회변화에 대처하기 위한 안정적 수자원 확보, 건강한 수환경의 보전과 정비 등에 모아지고 있으며, 기후변화에 따른 극한 가뭄에 대응하고 양질의 비상용수원 확보 차원에서 지표수와 연계한 용수확보 방안 수립이 필요함.

- 수자원확보 기술에는 하천수 또는 댐수를 이용하는 전통적인 지표수확보기술과 대안으로 여겨지는 지하 저수지, 지하 댐, 강변여과, 인공습지, 해수담수화 기술 등이 있으며, 이 중에서 지하저수지 개발 분야는 수질사고시 수 개월 이상 취수가 가능하여 비상시 대처 능력이 가장 뛰어나며, 대수층의 수질 개선은 강변여과 기술과 유사하긴 하나 오염지하수의 영향을 받지 않으며, 지표면의 오염원이 점토층에서 차단되므로 안전하다는 장점을 가짐.

- 또한 지하저수지는 주입정과 취수정의 배치를 통하여 배후 지하수의 취수정 유입을 차단할 수 있고, 연중 수질개선이 가능하므로 인공습지보다 유리하며, 상대적으로 균일한 체류시간으로 인해 수질개선효과를 일관성 있게 유지할 수 있으며, 대수층의 규모에 따라 상당한 규모의 저수량을 차수벽 없이 제공할 수 있으므로 지하댐보다 경제적임.

- 따라서 가용한 수자원의 장기적 보호를 통해 수자원의 지속 가능한 확보를 달성하고, 오염물질의 방류, 농약의 유입, 지하수 유실 위험 등 지하 저수지의 추가 오염을 미연에 방지하고, 가뭄 및 홍수에 의한 영향을 완화하기 위해 지하수의 체계적인 관리가 시급한 실정며, 국내 지하수의 보호를 위한 물관리 기본법 및 재정 투입의 채택이 요구됨.

▌분석 목적

- 본 보고서에서는 청정 지하저수지 기술을 개발함에 있어, 해당 분야의 기술을 지하수 설계기술, 지하수 운영 및 관리기술, 수질관리기술 분야로 나누고 각 기술분야에 속하는 세부 기술인 관정/관로/펌프 시스템 최적 설계 기술, 지하수 해수침투 모니터링 및 최적제어, ASR 시스템 최적설계, 대수층 주입수의 수리/수질 해석 및 지하수량 산출, 대용량 주입 및 양수 및 관정 관리, 양수에 의한 지반침하 방지, 관정 및 수도 관망에서의 수충격 최적제어, 시스템 비상 운영 및 제어, 인공 주입 전처리 및 지하수 정수처리, 염 지하수 담수화 기술, 대수층 내 오염물 저감 모델링 기술 분야에 대하여 기술개발 동향 및 환경분석 등의 특허동향분석을 실시함.

- 이를 통하여 국제 특허현황 및 국가별 기술경쟁력 등의 분석을 실시하고, 최근 트렌드로 떠오르고 있는 기술 등을 도출하여, 전략적인 연구개발 계획 수립에 활용할 수 있도록 하고 중복연구를 방지하기 위하여 본 연구개발과제 수행 타당성에 대한 객관적인 특허정보를 제공하고자 함.

나. 분석 범위

▌본 분석에서는 지하 저수지 분야에서 2012년 4월까지 출원공개 된 한국, 일본, 유럽 및 미국 공개특허와 2010년 10월까지 출원등록된 미국등록특허를 분석 대상으로 함.

▌분석대상 특허 검색 DB 및 검색범위 한정

- 분석대상 특허[9)]

8) ※ 출원일 기준으로 분석하며, 일반적으로 특허출원 후 18개월이 경과된 때에 출원 관련정보를 대중에게 공개하고 있음. 따라서 아직 미공개 상태의 데이터가 존재하는 2011~2012년 출원된 특허는 그 정량적 의미가 유효하지 않으므로 **정량분석은 ~2010 년까지를 유효기간으로 한정**함.

▌표 2.27 검색 DB 및 검색범위

자료 구분	국 가	검색 DB	분석구간	검색범위
공개·등록특허 (공개·등록일 기준)	한국	WIPS	~ 현재(검색일)	특허공개 및 등록 전체문서
	일본	WIPS		특허공개 및 등록 전체문서
	미국	WIPS		특허공개, 특허공개(공표), 특허공개(재공표) 전체문서
	유럽	WIPS		EP-A(Applications) 및 EP-B(Granted) 전체문서

※ 분석구간: 한국, 미국, 일본, 유럽 - 2000~20012(출원년도 기준)

▌ 분석대상 기술 및 검색식 도출

■ 기술분류체계

- 본 분석에서는 과제의 RFP 제안서를 기초로 청정 지하 저수지 개발 분야의 기술을 중분류는 AA_설계기술, BB_운영 및 관리, CC_수질관리의 3가지 분야로 나누고, 각 중분류를 다시 아래 표와 같이 소분류로 구분하여 이와 같은 기술분류 체계를 정량분석 및 핵심분석 시 동일하게 적용하였으며, 심층분석에 속하는 핵심특허 분석시의 기술분류는 자문위원들이 제시한 핵심연구기술 4과제를 기준으로 하여 분석을 수행함.

▌표 2.28 분석대상 기술분류

대분류	중분류	소분류
청정 지하 저수지 개발기술	AA_설계기술	AA1_관정/관로/펌프시스템 최적 설계
		AA2_지하수 해수침투 모니터링 및 최적 제어
		AA3_ASR 시스템 최적 설계
		AA4_대수층 주입수의 수리/수질 해석
	BB_운영 및 관리	BB1_대용량 주입 및 양수 및 관정 관리
		BB2_ 양수에 의한 지반침하 방지
		BB3_관정 및 수도 관망에서의 수충격 최적제어
		BB4_시스템 비상 운영 및 제어
	CC_수질관리	CC1_인공 주입 전처리 및 지하수 정수처리
		CC2_염 지하수 담수화 기술
		CC3_대수층 내 오염물 저감 모델링

■ 기술분류기준

- 다음 표와 같은 기준에 의해 관련 기술을 검색 및 분석함.

▌표 2.29 분석대상 기술분류기준

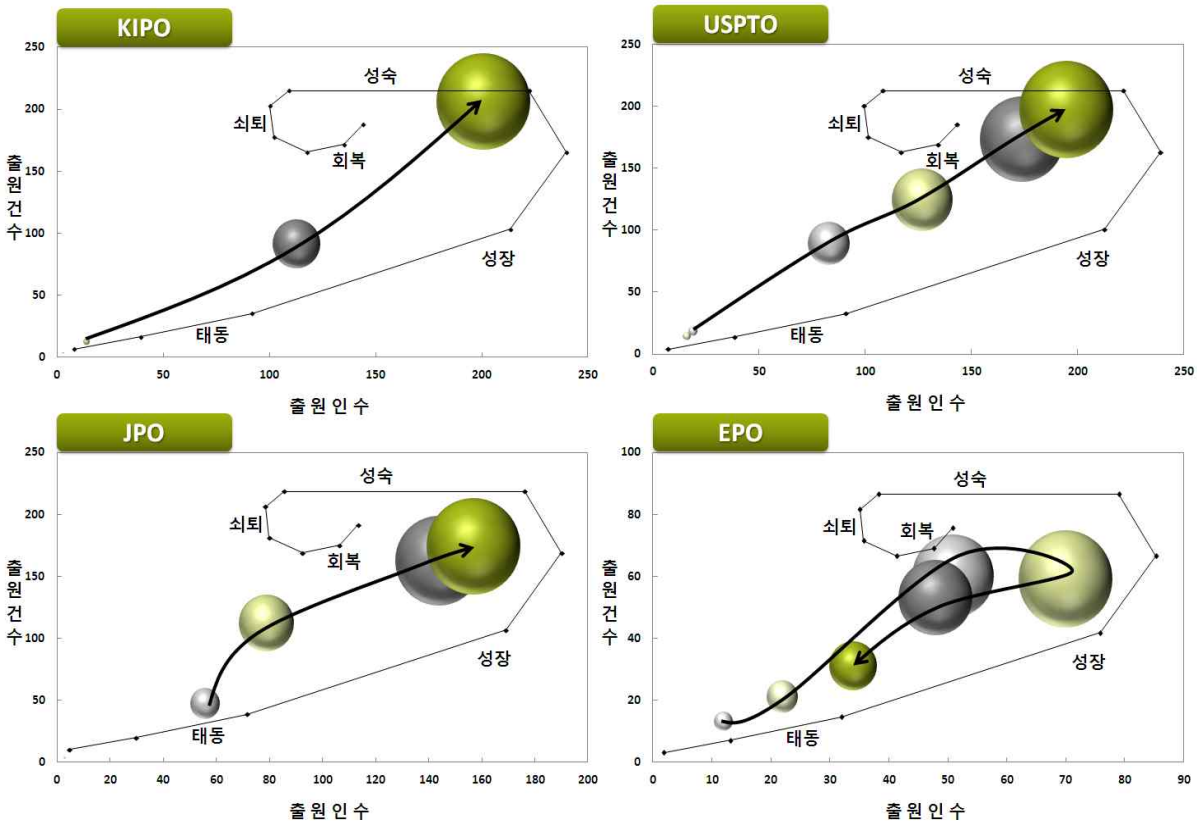
대분류	중분류	소분류	검색개요 (기술범위)
청정 지하저수지 개발기술	설계기술	관정/관로/펌프시스템 최적 설계	관정(주입정/양수정)-관로-펌프 시스템 최적 설계, 실시간 모바일 기반 모니터링, 저에너지 소비형 운영 및 유지관리 기술
		지하수 해수침투 모니터링 및 최적 제어	지하수 해수침투 모니터링 및 최적제어 기술
		ASR 시스템 최적 설계	ASR (aquifer storage and recovery) 시스템 최적설계기술
		대수층 주입수의 수리/수질 해석	충적 대수층 주입 수의 수리/수질 해석 기술 및 지하수 개발가능량 산출 기술
	운영 및 관리	대용량 주입 및 양수 및 관정 관리	대용량 주입 및 양수 기술 및 관정 관리기술
		양수에 의한 지반 침하 방지	지하수 양수에 의한 지반침하 방지 및 저감 기술
		관정 및 수도 관망에서의 수충격 최적제어	관정 및 수도 관망에서의 수충격 최적제어 기술 및 설비
		시스템 비상 운영 및 제어	주입 중단, 시스템 오작동, 수질 사고 발생 시 시스템 비상 운영 및 제어 기술
	수질관리	인공 주입 전처리 및 지하수 정수처리	인공 주입 전처리 및 지하수 정수처리
		염 지하수 담수화 기술	염 지하수 담수화 기술
		대수층 내 오염물 저감 모델링	대수층 내 오염물 저감 모델링 기술

- 한국, 미국, 일본, 유럽연합 총 6800여건의 특허가 검색되었음.

다. 유효특허 선별 결과 및 분석 결과

▌표 2.30 청정 지하저수지 개발기술의 유효특허 선별결과

소분류	유효데이터 건수				
	한국	미국	일본	유럽	계
관정/관로/펌프시스템최적설계	66	30	62	27	185
지하수 해수침투 모니터링 및 최적제어	9	24	1	25	59
ASR 시스템 최적설계	3	49	8	6	66
대수층 주입수의 수리/수질 해석	13	92	18	18	141
대용량 주입 및 양수 및 관정 관리	84	207	52	41	384
양수에 의한 지반침하 방지	14	11	144	6	175
관정 및 수도 관망에서의 수충격 최적 제어	9	13	0	23	45
시스템 비상 운영 및 제어	57	29	36	14	136
인공 주입 전처리 및 지하수 정수처리	82	246	141	69	538
염 지하수 담수화 기술	57	68	37	36	198
대수층 내 오염물 저감 모델링	37	130	72	34	273



▌그림 2.15 한국, 미국, 일본 그리고 유럽의 출원인수와 출원건수 관계

- 전체 국가의 기술위치를 포트폴리오로 살펴보면, 출원인수와 출원건수가 지속적으로 늘어나는 발전기 모습을 보여주며 특히 마지막 구간인 2005년-2009년 사이에 가장 증가속도가 빨라서 거시적으로 볼 때 이 분야의 발전 속도가 가속되고 있음을 알 수 있음.

- [KPO] 한국의 기술 위치를 포트폴리오로 살펴보면 처음부터 5구간(2000년-2004년) 및 6구간(2005년-2009년) 사이에 출원인수와 출원건수가 같이 늘어나는 발전기 모습을 보이며, 특히 마지막 6구간에서 매우 빠른 발전기 모습을 보여 이 기간 동안 이 분야에 새로 진입한 출원인이 많이 늘어난 것으로 나타나는데, 이는 이 분야 시장에 대한 필요성 증가 및 확대 가능성을 의미하며, 구제역이나 기타 가축 전염병 등으로 인한 지하 매립지의 증가로 인한 지하수 오염 가능성 등 안정적인 수자원 확보에 대한 필요성이 높아졌기 때문으로 풀이되며, 때문에 한국에서의 신규 시장 진입자를 파악하고 주요 출원인의 연구내용을 비교 분석할 필요가 있음.

- [USPTO] 포트폴리오로 나타낸 미국특허의 기술위치도 1구간(1980년-1984년)부터 6구간(2005년-2009년) 까지 지속적으로 발전하는 모습을 보여주며, 지하 저수지 개발을 통한 수자원 확보 및 수질 관리 분야 대한 관심이 항상 유지되고 있는 것으로 나타남.

- [JPO] 포트폴리오로 나타낸 일본특허의 기술위치는 3구간(1990년-1994년) 에서 4구간(1995년-1999년) 사이에 빠른 발전기 모습을 보이다가 5구간(2000년-2004년) 및 6구간(2005년-2009년) 에서 발전속도가 다소 느려지긴 했으나 지속적으로 발전기 모습을 보이고 있어 일본에서는 우리나라보다 앞서 지하수 개발 기술이 발전했고 최근에 와서도 지하수 개발에 대한 관심이나 의지는 지속되고 있는 것으로 풀이됨.

- [EPO] 포트폴리오로 나타낸 유럽특허의 기술위치는 1구간(1980년-1984년) 부터 5구간(2000년-2004년) 까지는 지속적으로 발전하다가 6구간(2005년-2009년)에는 출원건수와 출원인의 수가 줄어드는 쇠퇴기 모습을 보임.

라. 경쟁자 Landscape

▌표 2.31 경쟁자 landscape

분석항목 / 출원인	출원인 국적	주요 IP시장국(건수, %)				IP시장국 종합	주력 기술분야
		한국	미국	일본	유럽		
		KR	US	JP	EP		
SHIMIZU CORP	일본	0 (0%)	0 (0%)	69 (100%)	0 (0%)	일본	설계기술 /운영기술
OHBAYASHI CORP	일본	0 (0%)	0 (0%)	32 (100%)	0 (0%)	일본	수질관리
KURITA WATER IND LTD	일본	0 (0%)	0 (0%)	24 (100%)	0 (0%)	일본	수질관리
한국지질자원연구원	한국	15 (63%)	7 (29%)	0 (0%)	2 (8%)	한국	운영기술
KYOKADO ENG CO LTD	일본	1 (5%)	0 (0%)	19 (95%)	0 (0%)	일본	운영기술
UNIVERSITY OF WATERLOO	캐나다	0 (0%)	14 (74%)	0 (0%)	5 (26%)	미국	수질관리
KAJIMA CORP	일본	0 (0%)	1 (6%)	15 (88%)	1 (6%)	일본	운영기술
MATSUSHITA ELECTRIC IND CO LTD	일본	0 (0%)	0 (0%)	16 (100%)	0 (0%)	일본	수질관리
TAKENAKA KOMUTEN CO LTD	일본	0 (0%)	0 (0%)	16 (100%)	0 (0%)	일본	운영기술
IEG IND ENG GMBH	독일	0 (0%)	1 (7%)	1 (7%)	13 (87%)	유럽	수질관리
JAPAN ORGANO CO LTD	일본	0 (0%)	0 (0%)	14 (100%)	0 (0%)	일본	수질관리
SCHLUMBERGER TECHNOLOGY CORP	미국	0 (0%)	9 (64%)	0 (0%)	5 (36%)	미국	설계기술
TAISEI CORP	일본	0 (0%)	0 (0%)	14 (100%)	0 (0%)	일본	운영기술 /수질관리
THINKVILLAGE-KERFOOT, LLC	미국	0 (0%)	14 (100 %)	0 (0%)	0 (0%)	미국	수질관리
FUDO CONSTR CO LTD	일본	0 (0%)	0 (0%)	13 (100%)	0 (0%)	일본	운영기술
XEROX CORPORATION	미국	0 (0%)	6 (50%)	1 (8%)	5 (42%)	미국	수질관리
ASAHI TECHNO	일본	2 (18%)	2 (18%)	7 (64%)	0 (0%)	일본	운영기술
한국건설기술연구원	한국	10 (100 %)	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)	한국	운영기술 /수질관리
GENERAL ELECTRIC COMPANY	미국	0 (0%)	8 (80%)	1 (10%)	1 (10%)	미국	수질관리
한국수자원공사	한국	9 (100 %)	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)	한국	설계기술 /운영기술 /수질관리

■ 대규모 청정 지하저수지 개발기술 과제의 주요출원인 Top20를 추출한 결과, 일본SHIMIZU CORP, OHBAYASHI CORP, 일본 KURITA WATER IND LTD., 한국 지질자원연구원, 일본

KYOKADO ENG CO LTD, 미국 UNIVERSITY OF WATERLOO, 일본 KAJIMA CORP, 일본 MATSUSHITA ELECTRIC IND CO LTD, 일본 TAKENAKA KOMUTEN CO LTD, 독일 IEG IND ENG GMBH, 일본 JAPAN ORGANO CO LTD. 미국 SCHLUMBERGER TECHNOLOGY CORP, 일본 TAISEI CORP, 미국 THINKVILLAGE-KERFOOT, LLC, 일본 ASAHI TECHNO, 한국건설기술연구원의 순으로 관련특허를 다수 출원한 것으로 나타남.

- 상위 1위 출원인인 일본의 SHIMIZU CORP은 주요 출원국 중 일본에만 100% 출원하였고 다른 국가에 패밀리 출원은 하지 않은 것으로 나타났으며, 주로 설계 및 운영기술 분야의 특허를 출원한 것으로 나타났으며, 2위 출원인인 일본 OHBAYASHI CORP은 100% 모두 일본 국내에만 출원했고 주로 수질관리 부문의 특허를 출원한 것으로 나타났으며 일본 외에 타 국가에는 패밀리 특허를 출원하지 않은 것으로 나타나며, 일본 KURITA WATER IND LTD도 일본에만 출원했고 수질관리 부문에서의 특허를 주로 출원한 것으로 나타남.

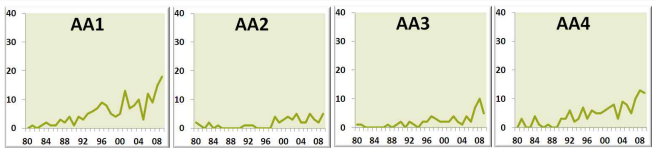
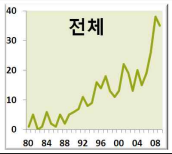
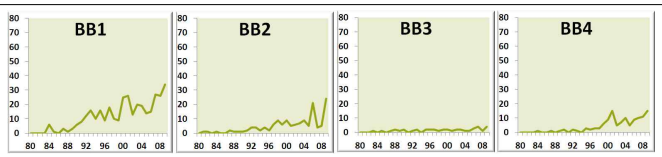
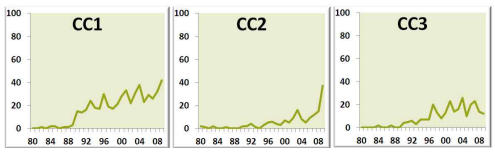
- 상위 6위 출원인인 미국UNIVERSITY OF WATERLOO는 캐나다 국적의 출원인으로서 미국 외에 유럽에도 출원한 것으로 나타났고, 주로 수질관리 분야의 특허를 출원한 것으로 나타남.

- 상위 출원인 10위인 독일 IEG IND ENG GMBH는 유럽, 일본, 미국에 모두 출원해서 다른 나라에서의 특허 출원에도 관심이 높은 것으로 사료되며, 주로 수질관리 분야의 특허를 출원함.

- 한국건설기술연구원은 운영기술 및 수질관리 분야에서, 그리고 한국 수자원공사는 설계기술, 운영기술, 수질 관리 부문에서 골고루 출원을 한 것으로 나타남.

마. 특허동향으로 본 세부기술

▌세부기술별 출원증가율

대분류	중분류	소분류	전체
청정 지하 저수지 개발기술	설계 기술		
	운영 및 관리		
	수질 관리		

[소분류 명칭]

AA1_관정/관로 펌프시스템 설계	BB1_대용량 주입 및 양수 관정 관리	CC1_인공주입 전처리 및 지하수 정수처리
AA2_지하수 해수침투 모니터링 및 제어	BB2_양수에 의한 지반 침하 방지	CC2_염지하수 담수화 기술
AA3_ASR 시스템 최적 설계	BB3_관정 및 수도관망에서의 수충격 제어	CC3_대수층내 오염물 저감 모델링
AA4_대수층 주입수의 수리/수질 해석	BB4_시스템 비상운영 및 제어	

▌그림 2.16 세부기술별 추세선 분석

■ 대규모 청정 지하저수지 개발기술분야의 중분류별 추세를 분석에 따르면, 중분류 분야인 설계기술분야, 운영 및 관리분야, 수질 관리 분야 모두 전체적으로 가파른 증가세를 보이고 있어 지속적으로 성장하고 있는 것으로 나타남.

■ 소분류별 추세를 보면 AA1_과정 및 관로 펌프시스템 설계분야, BB1_대용량 주입 및 양수관정 관리분야의 추세선이 가장 가파르게 나타나 이 분야의 발전이 최근 들어 빠른 것으로 나타나며, AA4_대수층 주입수의 수리/수질 해석분야, BB4_시스템 운영 및 비상 제어분야, CC2_ 염지하수의 담수화 분야의 특허도 최근에 빠른 속도로 증가하고 있는 것으로 나타나 이 분야의 기술들이 많이 발전하고 있는 시장의 트렌드를 반영하는 것으로 판단됨.

▌세부기술별 점유율 분석

■ 세부기술별 점유율 그래프는 대분류 아래 있는 중분류, 중분류에 속하는 각 소분류별 건수를 원의 크기로 보여주며, 전체적으로 어느 분류의 특허건수가 많은지를 조망할 수 있음.

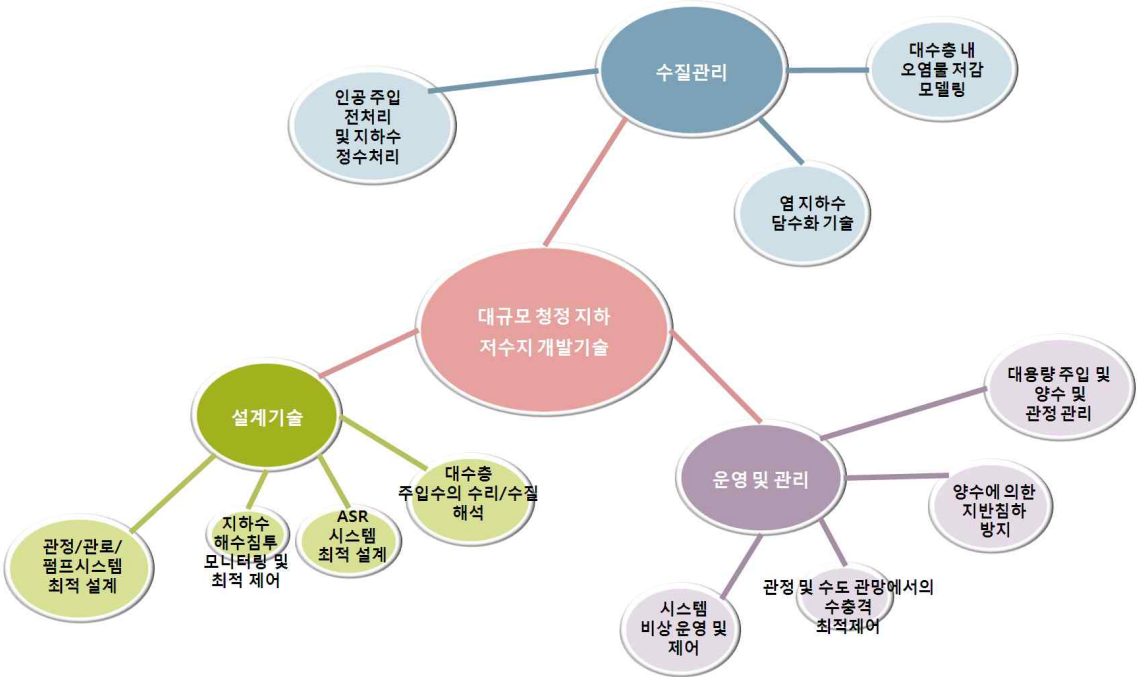
■ 청정 지하 저수지 개발 분야의 세 개 중분류 분야 중에서는 쉿ㄹ관리 분야의 건수가 가장 많고, 다음으로는 운영 및 관리분야의 특허가 많으며, 설계기술 분야의 특허가 가장 적은 것으로 나타나 설계 기술분야의 특허 장벽이 가장 낮은 것으로 판단됨.

■ 중분류 설계기술분야의 소분류 중에서는 관정/관로 펌프 시스템 분야의 특허가 자아 많고 다음으로 대수층 주입수의 수리/수질 해석분야, ASR 시스템 최적설계분야, 지하수 해수 침투 모니터링 분야 순으로 특허 비율을 차지함.

■ 중분류 중 운영 및 관리 분야 소분류 중에서는 대용량 주입 및 양수관정 관리 분야의 특허가 가장 많아서, 지하수를 사용함으로 인해 줄어드는 지하수의 수위를 유지하기 위한 기술이 많이 발전해 있는 것으로 나타나며, 수도관망에서의 수충격 제어 분야의 특허는 가장 적어서 이 분야의 기술은 많지 않은 것으로 나타남.

■ 중분류 기술 중 수질 관리 분야의 소분류 분야에서는 인공 주입 전처리에 의한 지하수 정수처리분야, 대수층내 오염물 저감 모델링, 염 지하수 담수화 기술분야 순으로 관련 특허가 많은 것으로 나타남.

■ 전체적으로 볼 때 수질 관리 분야의 특허가 가장 많고, 설계 기술 분야의 특허가 가장 적으며, 특히 지하수 해수 침투 모니터링 및 최적 제어 분야의 특허가 가장 적은 것으로 나타나 이 분야의 특허 장벽은 아직까지 낮은 것으로 나타남.



▌그림 2.17 세부기술별 점유율

바. 종합결론

- 청정 지하 저수지 개발 분야에서 기본적 기술이라 할 수 있는 설계기술 분야에서는 많은 중요특허들이 거절 혹은 취하되어 누구나 권리 대항 없이 실시할 수 있는 자유실시 발명이 되었거나 혹은 자국 내에만 출원되어 한국에서 지하수 설계 및 관리를 위해 이와 같은 기술을 이용하는 데 법적 장해가 그다지 높지 않은 것으로 사료됨.

- 지하저수지 운영 및 유지관리 기술 분야의 주요 핵심특허들은 모두 거절, 철회되거나 한국에는 출원되지 않은 것으로 국내에서 이와 같은 기술을 실시하는데 침해 우려가 없으며, 또한 이러한 특허를 바탕으로 일부 구성요소를 치환하거나 부가하여 새로운 특허를 창출하기가 용이한 부분이 높게 존재하는 것으로 판단됨.

- 수질관리 및 활용기술 분야에서는 가장 관련도가 높은 기술을 보유한 캐나다의 National Research Council of Canada(CA) 및 미국 SCHINDLER A RUSSELL(US)를 통해 분석해 보면 지하수 정수를 위한 가장 최근의 기술 트렌드는 미생물을 사용한 정화방법이나 INJECTION WELL을 통한 오염 정화 물질의 주입과 관련된 것으로 판단되며, 주요 특허들이 특허료 미납으로 소멸되거나 패밀리 특허가 미국에만 출원되는 등의 이유로 미국 이외의 다른 나라에서는 해당 기술을 실시하는데 장해가 없거나 자유실시 발명이며, 또한 주요 핵심특허를 보완하여 개량 특허를 출원할 수 있는 가능성이 높을 것으로 사료됨.

- 한국형 소규모 지하저수지 개발기술 분야는 관련도가 높은 기술을 보유한 출원인이 미국 Baski, Inc. 및 미국 SCHLUMBERGER TECHNOLOGY CORP.인 것으로 나타났고, Baski,

Inc. 이 2007년에 출원한 기술은 미국에만 출원된 특허로서 한국에서 동일 또는 유사한 내용의 기술을 실시한다 하여도 침해를 형성하지 않으며, 이 기술은 소규모 한국형 저수지를 개발하는데 있어 대수층의 물 흐름 조절에 응용할 수 있을 것으로 사료됨.

- 결론적으로 중요특허들이 대부분 한국에는 출원되지 않았거나, 거절, 소멸, 취하되어 한국 내에서 한국형 지하 저수지의 구현에 응용하는데 있어 침해 가능성이 낮을 것으로 보면, 개량특허를 출원하기도 용이할 것으로 판단됨.

- 또한 상위 출원인에 의한 시장점유율을 나타내는 CR4 값이 전 분야에서 매우 낮으므로 해당 분야의 시장에 독과점 체제가 존재하지 않고 다양한 출원인에 의해 특허 보유가 분산되어 있어 새로운 출원인의 시장 진입에 어려움이 적을 것으로 판단되므로 기술개발에 적극 참여하여 진입하는 것이 바람직할 것으로 사료됨.

3. 논문동향 분석

가. 총괄과제: 청정 지하저수지 통합개발 기술

▌현장 시험설비 연구

- 해외의 많은 인공함양 프로젝트는 본격 시행 전 장기간에 걸친 상당한 규모의 현장 시험이 수행되고 있음. 첫 ASR 시험으로 알려진 Cederstrom (1947) 이후 Goyal 등 (2008), Ward 등 (2008), Miontlinski (2011), Pavelic 등 (2006), CDM (2004) 등에서 최고 수천 m^3/d의 주입/양수 시험을 수행하였음.

- 현재까지 알려진 첫 ASR 실험은 1946년 중반에 Cederstrom (1947)이 기수를 함유하고 있는 염대수층에 담수를 주입하고 회수하는 실험을 수행하였음. 또한 그는 담수와 염지하수의 완전한 혼합으로 담수 회수가 어려울 것이라는 것은 기우에 불과하다고 결론내린 바 있음.

- 미국 워싱톤 주에서는 건기의 첨두 물수요를 충족하기 위하여 다수의 인공함양이 진행되거나 계획되고 있다(Washington State, 2000). 시애틀 시 남쪽에 위치한 Lakehaven시 수도국은 1991년부터 10여년간 ASR 파일롯 연구를 수행하고 있음.

- Goyal 등(2008)은 인도에서 수자원의 연계관리의 효과를 평가하기 위하여 ASR 기법을 제안하고 현장 시험을 수행하였다. 전기전도도가 28,400uS/cm에 달하는 염 지하수가 부존된 피압대수층에서 인공주입 시험을 수행하였음.

- Pavelic 등(2006)은 호주에서 수행한 ASR 연구에서 투수계수가 약 3m/d 정도인 피압대수층에 7개월에 걸쳐 9001~300m^3/d의 유량으로 주입하고 4개월의 저장 기간 후에 1300m^3/d의 양수량으로 회수를 시행하였음.

- Miontlinski 등(2011)은 호주 멜버른에서 도심의 우수를 투수성이 낮은 균열암반 피압대수층에 주입하고 회수하는 시험을 수행한 바 있다. 대수층에는 전기전도도가 2400~2700μS/cm 정도의 기수가 부존되어 있었음.

- 유럽연합의 덴마크, 벨기에, 네덜란드, 스웨덴, 핀란드, 스페인, 독일의 7개 국가에서 9개 기관이 1996년부터 3년간 수행한 '지하수 인공함양'이라는 국가간 연구과제에는 파일롯 스터디가 7개소에서 수행한 바 있음(Stuyfzand and Timmer, 2001).

- 포르투갈에서는 가뭄에 대비한 통합수자원관리 차원에서 지하수인공함양의 타당성을 검토하기 GABARDINE Project에서 남부 Algrave 지역에 3개의 시험시설을 운영하고 있음. (Lobo-Ferreira and Oliveira, 2007).

▌국내 기술동향

- 하경오(2007)는 수막재배로 인하여 낮아지는 지하수위를 복원하기 위하여 함양지 방법과 관정 주입 방법을 이용한 지하수 인공함양 파일롯 연구를 수행하고 주입정의 성능을 평가한 바 있다. 국토해양부의 지원으로 수행되고 있는 수변지하수 활용 고도화 연구단(2011)에서도 수막재배로 인하여 수위가 낮아진 비닐하우스 경작지의 지하수위를 복원하기 위한 인공함양 연구를 수행하고 있음.

- 프론티어 사업단의 인공함양 연구에서는 제주도 제주시 한천에 인공함양정 20개를 개발하였음. 이 연구에서는 함양정을 천변 저류지에 설치하여 홍수시에 유입된 하천수가 저류지에서 일정 수심을 초과하면 밸브를 개방하여 자연유하식으로 인공함양이 시작되는 시스템임.

- 프론티어 사업단의 강변여과수 연구는 경상남도 창원시 소재 기존 시설을 활용한 수리수문학적 특성을 중심으로 연구가 수행되었음. 구체적으로는 개발 대상지역의 수리지질학적 평가, 개발가능량 평가를 위한 수치모델링, 그리고 지하수계 생태조사, 지하수위 및 수질 변화 조사 등이 수행되었음.

- 수변지하수 활용 고도화 연구단(2011-2016)에서는 "수변 충적층 지하수위 복원 기술" 세부과제에서 수막재배로 인하여 낮아진 지하수위를 회복시키기 위하여 인공함양 기술의 적용에 대한 연구를, "수변 지하수 대용량 간접취수 시공기술 선진화" 세부과제에서는 대용량 지하수 취수에 대한 연구의 일환으로 시험현장이 계획되어 있음.

▌실험실 수리모형 연구

- 실험실 모래 수리모형에서 이루어진 실험은 염수가 존재하는 모래층에서 지하수 양수 또는 해수 쐐기 제어를 위한 담수 주입에 대한 연직 단면 실험위주로 이루어져왔음(Boufadel, 2000; Goswami and Clement, 2007; Nakagawa et al., 2005; Simmons et al., 2001,

Werner et al., 2009; Mao et al., 2006; Oswald and Kinzelbach, 2004; Thorenz et al., 2002; Watson et al., 2002; Zhang et al., 2001; 강정옥 등, 2005; 이소정 등, 2008).

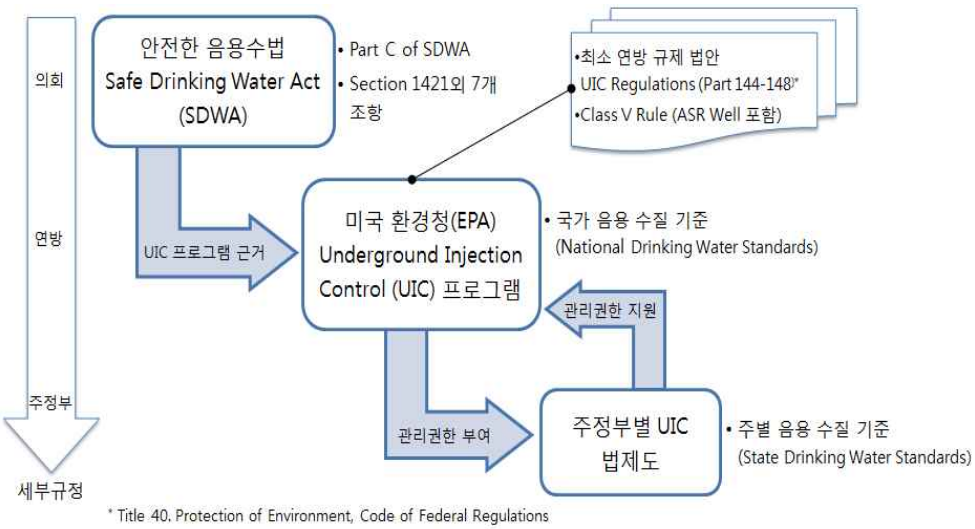
- 염수가 존재하는 대수층에서 담수를 개발할 때 염수 쐐기의 반응을 평가에 필요한 3차원 수조의 해수침투/지하수 개발 실험은 프론티어사업단 (2007) 연구 외에는 파악되지 않았음.

▌법, 제도 및 경제성 연구

- 1974년 미국의 안전한 음용수법(Safe Drinking Water Act)에서는 지하주입제어계획(Underground Injection Control, UIC) 프로그램 실행 근거 제시, 미국환경청 (EPA)은 UIC 프로그램 관련 법제도 정비를 통해 그림 1과 같은 체계 하에 의회, 연방 및 주 차원에서 UIC 프로그램을 운영 중에 있음. 2007년 기준 16개 주가 청정지하저수지 관련 법제도를 보유하고 있음.

- 미국의 UIC 프로그램은 지하수 음용원수 수질관리 차원에서 주입관정 관리에 대한 법제도만을 제정하고 있으며, 저장, 양수 등의 운영에 대한 법제도는 매우 미비한 것으로 판단됨. 몇몇 주가 특정 대수층내에서 주입수 체류 시간, 이동 시간 및 거리 등에 대한 법제도 개발을 진행하고 있으나 생물학적, 화학적, 물리학적 대수층간 다양성을 반영하지 못하고 있음.

- 미국의 EPA 주도하에 획일적인 UIC 프로그램 관리에 대한 적절성에 대한 의구심이 일고 있으며, 지역별 청정지하저수지 개발 혜택, 비용 및 위험요인 등을 고려한 포괄적인 정책 개발 필요성이 요구되고 있음 [Prospects for Managed Underground Storage of Recoverable Water, 2008].



▌그림 2.18 미국 청정지하저수지 법제도 체계

- 호주의 경우 국가수자원계획 (The National Water Initiative)을 추진하는 가운데 지하저수지 개발은 효율적이고 안정적인 수자원 공급을 위한 중요한 전략으로 인식되고 있음. 지하저수지 개발을 위한 인허가 제도에 대한 법안으로 환경보호법안 (Environment Protection Act)과 개발법안 (Development Act) 등을 포함하여 다수의 법안들이 제정되었으나, 지하저수지의 주입수 저장, 양수 및 활용 등에 대한 권한, 소유권 규정 사항은 매우 미비한 것으로 조사됨(John Ward and Peter Dillon, 2011; Water for Good, 2012).

- 호주의 남호주와 빅토리아 주에서는 지하저수지 개발에 필요한 요구사항과 역할 및 책임을 기술한 대수층함양관리 (MAR) 가이드라인을 자체적으로 개발하여 활용하고 있으며, 도시계획단계에서 부터의 대수층 함양관리시설의 적용을 검토하고 있음(Water for Good, 2012).

- 일본의 경우 환경기본법의 환경기준 설치 근거를 고시하고, 수질오탁방지법을 통해 일정 배출 기준을 넘는 유해물질의 지하 침투를 금지하고 있음. 지하수의 무모한 개발에 따른 지하수위 저하, 지반 침하 등 문제 방지를 위한 지하수 관련 법안으로 공업용수법, 건축물용지하수채취규제 법률 등이 있음.

- 해외에서는 본 연구와 유사한 ASR(Aquifer Storage and Recovery)[10]의 사례는 오랜 역사를 가지고 현재에도 활발한 사업을 하고 있음.

- 오만의 Nizwa지역에서의 ASR프로젝트에 따르면[11], ASR 설치비용은 지표면에 저수지를 개발하는 비용의 약 10%에 불과하다고 나타내고 있고, 미국 플로리다 ASR 프로젝트의 경우 ASR 설치비용이 저수지 개발 비용의 약 46%에 불과하다고 추정하였음.

- 호주에서도 ASR이 활발히 추진되고 있는데, 2009년 Dillion보고서에 따르면, ASR의 경우 해수담수화에 비해 약 30%~46% 정도 경제적이라고 나타내고 있음.

나. 대하천 하구 퇴적층에서 저수량 1,000만㎥ 확보를 위한 부지 특성 평가 기술 개발

(1) 대하천 하구 퇴적층 부지 특성 평가 기술 개발

▌대하천 하구 퇴적층의 형성과정 연구

- 서해안의 소규모 퇴적층이나 대륙붕의 퇴적층에 대한 퇴적환경에 대한 연구(김여상과 박수철, 1988; 김여상과 박수철, 1992; 박용안 등, 1995; 박용안 등, 1997; 임동일 등, 2002; 장

10) 단, 본 연구과제인 청정지하저수지 개발은 처음 주입한 물량이 대수층에서 여과되어 유출되는 반면(first in, first out), ASR의 경우에는 주입관정과 양수정이 하나이므로, 가장 나중에 주입한 물량이 처음으로 유출되는(first in, last out) 차이점이 있음.

11) 자료 출처: http://www.ismar7.org/proceedings/0311p.pdf

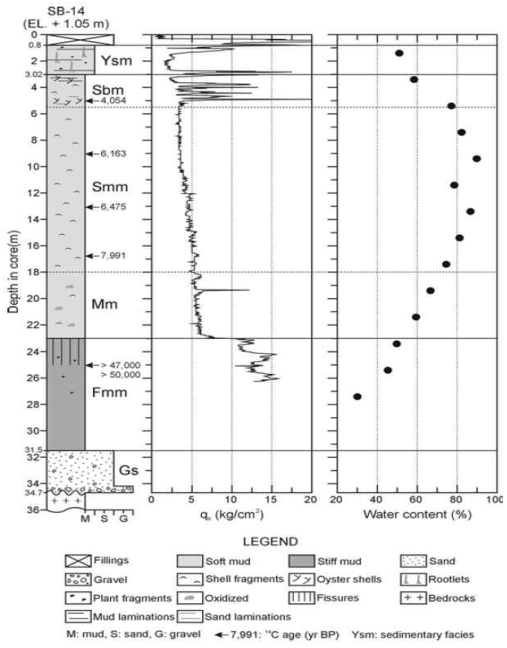
순근과 이경신, 1983; 천종화 등, 1995)는 어느 정도 이루어졌으나, 대하천 하구의 퇴적층에 대한 연구(김원형과 이형호, 1980; 류춘길 외, 2005; 유동근 등, 2004; 류춘길 외, 2011)는 아직 소수임.

- 낙동강 유역의 퇴적층에 대한 생성과정 연구(김원형과 이형호, 1988; 류춘길, 2003; 오건한, 1994; 유동근 등, 1997; 류춘길 외, 2011)는 약간 있으나, 기타 대하천(한강, 금강, 영산강, 섬진강)에 발달된 퇴적층의 형성과정 연구는 거의 없음.

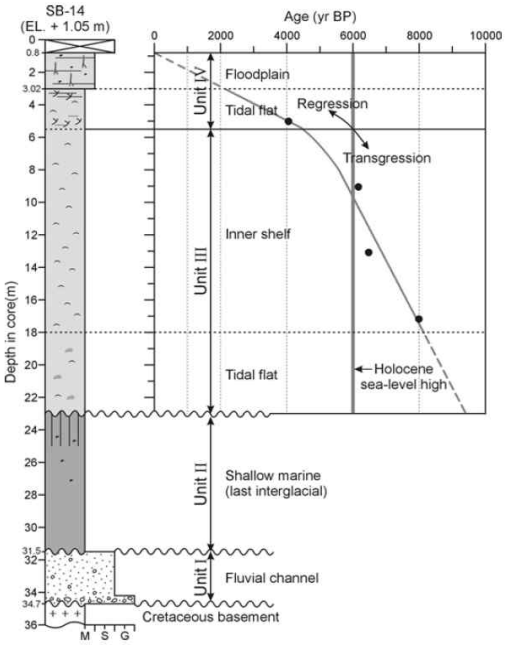
- 기존의 낙동강 삼각주 연구는 김해 남부 2개소 시추자료(류춘길 외, 2011)와 강서구 서낙동강 인근 1개소 시추자료(류춘길 외, 2005)를 대상으로 수행하였으나, 현재 강서구 삼각주지역에 대한 연구는 이루어지지 않았음.

- 기존의 연구는 퇴적상, 연대측정, 유공충군집과 간극수의 pH, Eh, Salinity에 대한 연구가 이루어졌으나, 퇴적물에 대한 물리적 성질(비중, 간극비, 투수계수 등)는 이루어지지 않았음.

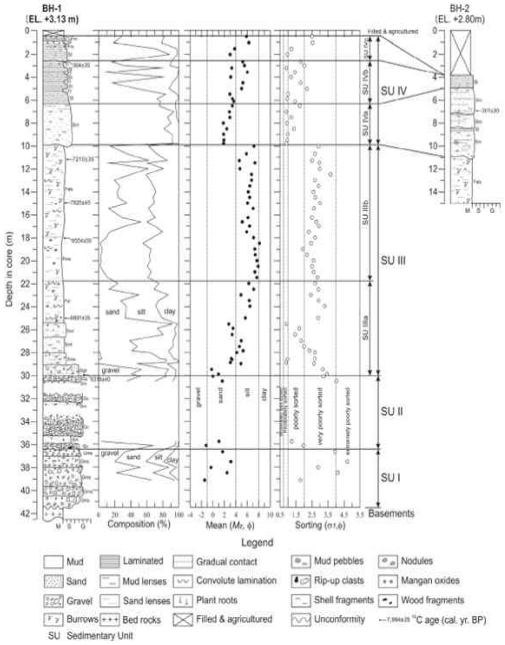
- 국내에서 낙동강, 한강 등 대 하천 제방에서의 지하수(강변여과수) 개발은 활발하게 진행되고 있으나, 대하천 하구 퇴적층에서 지하수 개발은 이루어지지 않았음.



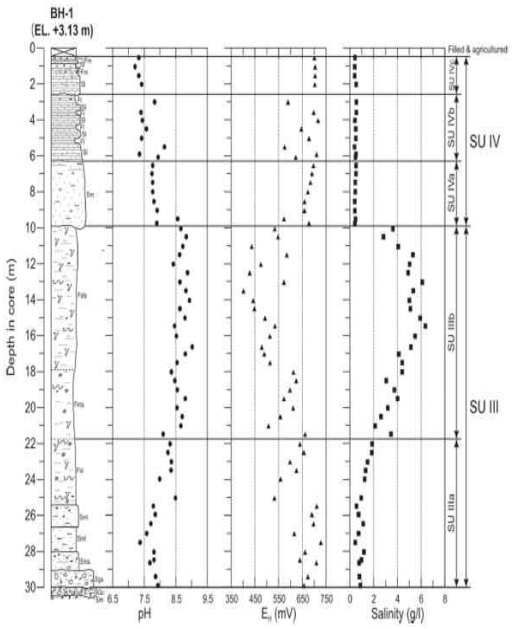
▌그림 2.19 강서구 서낙동강 지역 퇴적층의 퇴적상, 관입압력 및 함수율(류춘길 외, 2005)



▌그림 2.20 강서구 서낙동강 지역 퇴적층 층서와 퇴적환경(류춘길 외, 2005)



▌그림 2.21 김해 남쪽지역 퇴적층의 퇴적상 및 입도분포(류춘길외,2011)



▌그림 2.22 김해 남쪽지역 퇴적층내 간극수 수질(류춘길 외,2011)

▌ 대하천 하구 퇴적층의 수문학적 특성 연구

- 대부분의 지하수 함양량 산출은 하천유역의 자유면 대수층을 대상(김남원 등, 2006; 김만일 등, 2006; 김철겸 등, 2007; 안정훈 등, 2008; Chung et al., 2010; hollander et al., 2009; Houston, 2001) 으로 하고 있으나, 본 연구에서는 피압 대수층에서의 지하수 함양량을 산출을 필요로 함.

- 동위원소분석을 이용하여 많은 연구에서 청정 지하수의 기원, 연령, 순환과정, 해수의 혼합비율 등을 산정하였음(김규한 등, 2008; 김건영 등, 2007; 윤 욱 등, 2003; 고용권 등, 2000; Aeppli et al., 2010; Aji et al., 2008; Chen et al, 2011; Choi et al. 2010; Millit et. al., 2012; Subyani, 2004; Stewart, 2012; Vanderzalm et al., 2011; Z.Katta, 2010).

- 지하수위변동, 하천수 수위변동, 해수 조위변동의 특성을 규명하고, 이들간의 상관성을 분석하였음(Cay, T. and Uyan, M., 2009; Butera et al., 2009; Liu et al., 2012).

- Chung et al. (2010)은 통합 지표수-지하수 모형인 SWAT-MODFLOW 모형을 이용한 물수지 성분해석 기반의 지하수 함양량 추정기법을 이용하여 한국의 미호천유역에 적용하였음. 이 기법의 장점은 계산된 함양량과 관측 지하수위간의 상관성을 고려하여 지체시간을 결정하는 매개변수를 최소화할 수 있는 장점이 있다. 그런데 이 기법은 타 기법에 비하여 지하수 함양량이 크게 나타나는 경향이 문제임.

- Huang (2011)에 의하면 지하수 함양량은 건조지역의 경우에 토지이용에 영향을 받음. 식물뿌리밑의 염소이온 농도와 상부의 염소이온 축적구간에서의 토지이용에 따른 농도 차이를 조

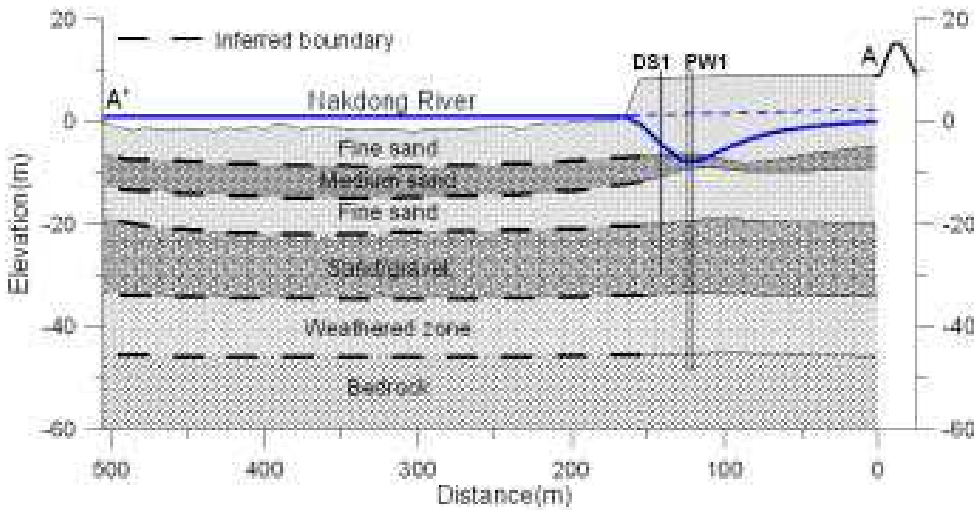
사하고, 염소이온 함량의 차이를 이용하여 지하수 함양량이 감소되는 것을 중국의 황토대지인 Guyuan과 Xifeng 지역에서 규명하였음. 본 논문은 지하수의 수질특성을 이용하여 함양량의 차이를 밝혀낸 데 의의가 있음.

- Stewart (2012)는 뉴질랜드 Christchurch 지하수계에서 탄소동위원소(C^{14}) 측정으로 Tritium에 의해 측정된 지하수의 연령이 잘 못 된 것을 밝혀냈으며, 산소동위원소를 이용하여 지하수 유입원을 규명하였음. 100년에서 1,000년 사이의 지하수 연령측정에는 탄소동위원소가 매우 유용하였음을 규명하였음.

- Millit et al. (2012)은 프랑스 남서부 지역에서 Eocene Epoch 시기의 대수층계에서 $\delta^{18}O$와 $\delta^{2}H$는 특별한 관계를 나타내지 못하였으나, 다른 안정동위원소 자료가 이 지역의 지하수는 지구의 대기순환수에 가깝다는 것을 보여주었음. 탄산염암, 증발암 및 규질암에서 B의 농도와 $\delta^{11}B$에 의하면 용존상태의 보론은 강우에서 유래된 것과 물과 암석과의 반응에서 유래된 것으로 구분된다. Li과 $\delta^{7}Li$ 역시 2가지 기원임을 나타내고 있음.

▌대하천 하구 퇴적층의 수리지질학적 특성 연구

- 우리나라에서 현재까지는 대부분이 소규모의 충적 자유면대수층에서 지하수 개발이 이루어졌으며, 의 지하수 개발은 주입기능이 없이 양수만 하는 강변여과수 개발방식이 수행되고 있음. 낙동강 강변여과수의 경우 심도 30～40m 내외의 자유면대수층을 이용하고 있음(그림 2.23).



▌그림 2.23 대산면 강변여과수 개발지역의 퇴적층 단면(과학기술부, 2004)

- 과학기술부 주관의 “수자원의 지속적 확보 기술개발 사업”에서 외국사례를 중심으로 ASR(인공주입 및 회수)에 대한 기본적인 연구를 수행하였으며, 그 결과 인공주입 방식의 인공함양

이 새로운 수자원 확보 또는 처리 및 공급 방식으로 활용될 가능성이 매우 높은 것으로 평가하였음(과학기술부, 2004; 299쪽).

■ 과학기술부 주관의 "수자원의 지속적 확보 기술개발 사업"(과학기술부, 2011)에서 현무암의 자유면대수층으로 구성된 제주도에 ASR(인공주입 및 회수) 기법을 도입하여 인공함양지를 건설하였음. 그런데 이 인공함양지는 강우의 저류보다는 홍수조절기능이 큼.

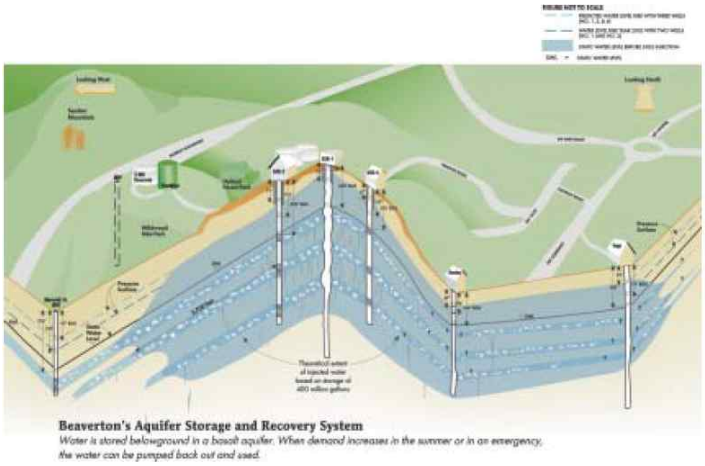


▌그림 2.24 제주도 인공함양 (a) 함양설비, (b) 함양지

■ 미국 오레곤주의 Salem시에서는 2003년 기준으로 4개의 ASR 정호를 이용하여 34,065㎥/일의 용수를 공급하고, 오레곤주의 Beaverton 시에서는 현무암 대수층에 ASR을 개발하여 11,355 ㎥/일의 용수를 공급함. 기타 오레곤주의 Tigard 시에서도 ASR 방식으로 용수를 공급하고 있음(과학기술부, 2004).



▌그림 2.25 Salem시 물공급 개념도(과학기술부, 2004)



▌그림 2.25 Beaverton시 ASR개념도(과학기술부, 2004).

■ 남부 아프리카지역에서는 결정질 균열암반에 ASR 정호를 개발하여 용수를 공급하며(Murray and Tredoux, 1988, 2002), 대표적인 사례가 4개소 있음. 즉, Windhoek 지역은규암 대수층에 195일 동안 214㎥/hr 속도로 주입, Karkams 편마암 대수층에 138일 동안 47.6㎥/day의 속도로 총 6,567 ㎥ 주입, Polokwane 충적층 및 편마암 대수층(충적층 두께 20m, 풍화대 두께 60m)에 하수 처리수 주입, Calvinia의 각력파이프는 실린더 모양의 파쇄암이며, 105,000㎥ 정도의 저류능력을 갖고 있는데 하천수를 주입하였음(과학기술부 2004).



▌그림 2.26 아프리카 남부의 균열대수층에서 ASR 정호개발 지역(과학기술부, 2004)

- Hongfei (2012)는 대수층 상수(투수량계수, 저류계수)를 구하기 위한 대수성시험에서 자료 분석시 케오틱 순열 최적화 기법(chaotic sequence optimization algorithm)을 이용하여 성공적인 결과를 얻었음. 그런데 chaotic sequence의 길이와 coarse search loop의 수를 키워도 이 기법의 수렴에는 영향을 못 미쳤다. 투량계수의 초기 추정값은 이 기법의 수렴에 영향을 줄 수 있으나, 최종적인 계산치의 결과에는 영향을 미치지 못했음. Chaotic sequence optimization algorithm은 기존의 방법과 비교하여 대수층 상수를 결정하는 데, 간편하면서도 정밀한 기법이었음.

- Taheri et al. (2012)은 서부이란의 Kermanshah Province 지역의 Mahidashat plain 에서 Schlumberger 수직전극배열을 이용한 전기탐사가 실시하였음. 이 지역의 지질은 주로 백악기 석회암과 신생대 3기의 마이오신 장석으로 구성되어 있음. 전기탐사로부터 Mahidashat plain의 충적 대수층에서 공극율과 비산출율을 추정하는 시도가 이루어졌으며, 공극율은 0.18 ~0.66, 비산출율은 0.15로 나타났음. 이 추정치는 현장에서 측정된 값과 잘 일치되었음. 이 논문은 비저항탐사로부터 신뢰도가 높은 충적 대수층의 상수를 구하였다는 데 큰 의의가 있음.

- Kloppmann et al. (2009)은 보론과 리튬 동위원소($\delta^{11}B$ and $\delta^{7}Li$)를 이용하여 이스라엘의 Shafdan 개간사업지내 모래 대수층에 주입된 하수처리수의 지화학적 특성을 연구하였음. 보론동위원소($\delta^{11}B$)는 보전성이 있어서 불포화대나 포화대에서 분화되지 않았지만, 리튬동위원소($\delta^{7}Li$)는 대수층 매질에 흡착되어 강하게 분화되었음. 이것은 보론이 점토광물에 더 잘 흡착된다는 예상을 뒤엎었음. 따라서 보론동위원소가 ASR 시스템에서 인공주입의 추적자로서 아주 가치가 있다는 것이 밝혀졌으나, 리튬 동위원소가 자연 상태의 지하수에서 추적자로서의 가능성에 대하여는 더 많은 자료가 필요함.

- Cay et al. (2009)은 터키의 Kenya 시의 지하수위 변동에 대한 모델링에 ArcGIS와 함께 지구통계기법(정규크리깅)을 이용하였음. 교차검증에서 지하수위 하강이 17% 적게 추정된 것으로 나타났지만, 허용될 수 있는 오차범위내에 있었음. 이 연구에서 크리깅 모델이 지하수 채수에 따른 위험지역 추적에 도움을 주었음.

- 대수층 특성 평가의 어려움이나 오염물질 추적의 어려움은 다공질 매질의 불균질성(heterogeneity)에 기인함. 투수량계수의 공간적 변화가 대수층에서 불확실성의 주요인이임. Butera et al. (2009)은 오염물질 이동경로의 추정을 위해 수두, 투수량계수 및 오염물질의 궤적을 결합하여 분석하였음. 이 일은 추계학적 작업인데, 선형모델인 코크리깅(Cokriging)을 이용하고, 2번의 Monte Carlo 실험에 의해 검증되었음. 즉, 하나는 약한 불균질성 대수층에 대하여, 다른 하나는 강한 불균질성 대수층에 대하여 검증되었음. 계산을 위하여 수치모델링이 이용되었으며, 계산 결과 오염물질의 이동경로의 추정에 궤적변이가 중대한 영향을 준다는 것이 밝혀졌음.

- 석회암층은 불균질성과 공간적 변동성이 매우 크다. Liu et al. (2011)은 강우량과 배출량에 대한 시계열해석(상관성, 교차진폭, 상과 간섭성 분석)을 대수층계의 기능, 수동력학적 거동과 수리적 특성 연구에 적용하였음. 자기상관과 교차상관에 의하면 강우량에 대한 민감도가

상류에서 하류로 이동함에 따라 점차적으로 감소하였음. 그러나 기억행동은 점차적으로 증가되었음. 상분석에 의하면 강우에 대한 배출은 시간적 지연이 있었음. 지연시간은 상류에서 하류로 갈수록 증가되었으며, 선형도는 상류가 하류보다 더 컸었음. 급속흐름과 완속흐름은 교차진폭 분석에서 이루어졌으며, 그 결과 상류에서 지하수 유출의 60%가 급속류인데, 하류에서는 5%까지로 감소되었음. 석회암에서의 주요 제어인자는 석회암의 지형과 내부 기원의 석회암 구조인 것으로 밝혀졌음.

(2) 주입 및 양수 시스템 최적 설계기술

▌상시주입-상시양수 지하저수지 주입계통과 양수계통의 최적 설계모델 개발

- Pyne (1995), Rasmussen (2008), Maliva와 Missimer (2010)는 지하수 흐름 모델링이 시스템 계획과 운영, 대수층의 불확실성 평가, 최소 비용으로 목표 달성 등을 위한 ASR 설계의 핵심적인 요소라 하였으나 모델링 s/w로 MODFLOW를 제시한 바 있음. MODFLOW는 널리 사용되고 있지만 적용 범위가 밀도가 일정한 지하수 흐름으로 국한되는 기본모델이므로 해안 지역에서처럼 해수와 담수가 상호작용을 하는 지역에서는 적용할 수 없음.

- Bloetscher 등 (2005)은 모델링이 ASR 시스템의 위험도 및 회수율 평가 등에 밀도 차이를 고려한 지하수흐름 모델링이 필요한데 이러한 내용의 의미있는 모델링이 수행된 프로젝트가 별로 없으며 이 분야의 연구가 필요하다고 지적하였음.

- 미국의 National Research Council (국가연구위원회) (2008)는 시스템 전반 평가 기술, 효율평가, 관측정, 주입정, 양수정의 최적 배치 (optimal placements)에 대한 연구와 시스템 성능의 최적화를 위한 주입-저장-양수 주기 (빈도, 기간, 그리고 강도)에 대한 연구가 필요하다고 강조하였음.

- National Ground Water Association (2008)은 대수층의 수문지질 특성이 무척 복잡하여 대수층에 물 저장의 수문학적 해석이 어려움. 지하수에 대한 기후변화의 영향에 대한 잘 이해되지 않고 있으며 연구가 최근에 시작되었다고 분석한 바 있음.

- Pavelic 등 (2004)은 남호주 Salisbury지역의 ASR 시스템의 설계를 위하여 FEFLOW모델을 이용하였다. 그러나 주입정과 양수정의 최적배치를 몇 가지 대안으로 구성된 시나리오에 대한 모델링 결과의 주관적 분석에 근거하여 설계 수행한 바 있음.

- NRC의 에버글레이즈 국립공원 복원위원회(2001)는 ASR 프로젝트 계획에 대한 검토의견에서 ASR 타당성 평가에 광역적인 흐름 모델링 연구는 매우 중요하다고 평가한 바 있음.

- 많은 인공함양 프로젝트 연구에서 모델링이 수행되었으나 대부분 주입 또는 양수로 인한 대수층 내 주입수의 거동 및 시스템에 대한 성능 평가 또는 예측에 국한되었음 (Ward 등, 2008; Merritt, 1986; Pavelic 등, 2006; Lowry and Anderson, 2006; CDM, 2004a; CDM, 2004b).

- 해수 침입의 영향을 받는 해안 지역의 지하수 개발 및 관리에 대한 연구는 1세기 넘게 진행되었으나 최적화 기법을 사용한 연구는 1990년 대 이후 시작되어 2000년 대 이후부터 활발

하게 진행되고 있음. 인공함양 연구는 2000년 대 이후 활발하게 진행되고 있으나 관정 자체(clogging 등), 대수층 수질 변화 등에 대한 기본적 연구에 국한되어 있으며 최적화 등의 시스템 관점의 연구는 시작된 바 없음.

- 해안 지역 지하수 개발에 대한 최적개발 연구는 지하수 흐름에 대한 해석해와 최적화 기법을 접목시킨 연구 (Park과 Aral, 2003; Cheng 등, 2000)이 있음. 해석해보다 제약이 적은 경계면 모델이 사용된 연구도 여러 연구자에 의하여 수행되었다 (Mantoglou와 Ppantoniou, 2008; Ayvaz와 Karahan, 2008; Park과 Hong, 2006 등; Alnahhal 등, 2010; Bhattacharjya와 Datta, 2005). 해안 지역 지하수 흐름에 대한 시뮬레이션 모델로는 흐름과 용질 수송 모델이 가장 진보된 기술이나 해석 시간이 오래 걸려 최적기법과 접목시키는 데는 현실적 제약이 있음.

- Bloetscher (2005) 등은 현재까지 진행된 프로젝트 중에서 심도있는 모델링 분석이 수행된 경우가 별로 없으나 모델링은 매우 중요하며 향후에 연구가 필요하다고 강조한바 있다. 특히 염대수층에 대한 주입의 경우 ASR 시스템의 위험도 및 회수율 평가 등에 밀도 차이를 고려한 지하수흐름 모델링이 필요하다고 하였음.

- Pyne (1995)은 모델링이 최소 비용으로 시스템 확장계획 수립 및 설계, 운영 방안 결정, 주입수의 거동 평가, 지화학적 수질 변화 등의 모의에 사용될 수 있다고 판단하였음.

- Jonoski 등(1997)은 선형계획법을 적용하여 함양지에서 함양된 물을 회수하기 위한 양수정의 개수, 위치 및 양수량의 최적 조합을 도출하는 방안을 제시하고 가상 대수층 예제에 적용한 바 있음.

▌강변여과수와 인공함양과 같은 간접취수 방법은 1870년대 유럽(특히, 독일)을 중심으로 적용되기 시작했음(표 2.20).

- 산업화에 의해 상수원 오염이 심각했던 독일(라인강, 도나우강, 엘베강)에서 활발하게 적용되고 있으며, 독일 외에도 오스트리아, 프랑스, 네덜란드 등에서 많이 적용되고 있는 실정임.

- 1870년 시작된 뒤셀도르프시 정수장은 라인강 오염으로 더욱 많은 강변여구 취수가 이루어지고 있으며, 비텐시 정수장은 인공함양(90%)와 강변여과(10%)의 조합을 통하여 100,000명에 물을 공급하고 있음. 드레스텐시의 Hosterwitz 정수장과 같은 경우에도 최초 원수의 취수는 엘베강의 직접취수와 강변여과 방식에 의한 취수가 함께 수행되며, 취수된 물은 응집, 침전 및 급속여과를 거쳐서 일차 처리된 후 인공함양지에서 다시 지하로 함양시킨 후 취수하여 사용하고 있음.

- 오스트리아 비엔나의 다뉴브강변에는 하류의 Freudenau 수력발전소 건설에 따른 상승된 지하수량을 적극적으로 활용하기 위해 강변여과수 개발용 관정 약 30개소를 설치 운영 중에 있음. 또한 체계적인 지하수위 및 수질관리를 위하여 지하수 양수 및 주입정 48개소, 지하수위 관측정 96개소, 수질 관측정 75개소 및 실시간 수질 관측소 4개소 등을 운영하고 있음.

■ 구미 선진국에서는 지하수 의존도가 높지만 근래에는 자연적으로 형성(함양)된 지하수를 이용하는 소극적 방법에서 벗어나 강변여과와 같은 간접적 인공함양 또는 함양지 그리고 주입관정을 통한 직접적 인공함양 등의 방법으로 지하수 수자원의 적극적 활용방법에 많은 투자가 이루어지고 있음.

■ 미국의 경우 간접취수를 위해 대용향 방사형 집수정을 이용하는 사례가 대부분이며, 특히 캔자스주 BPU(Board Public Utilities), 신시내티 볼튼 정수장이 대표적임. 캔자스 BPU에서 현재 운영 중인 방사형 집수정은 세계에서 가장 큰 규모이며, 각각 7개의 수평정을 2단으로 설치하였고 취수량은 집수정당 최대 147,000㎥/day임.

▌표 2.32 유럽 및 구미 간접취수 방법의 적용 사례

구 분	정 수 장 명	취 수 방 식	취수량 (㎥/일)	비 고
독 일	뒤셀도르프 정수장	취수정식(70정) 특수집수정(18정)	33,600 324,600	라인강둑으로부터 50~250m이격
	베를린 정수장	취수정식	1,140,000	포기→급속여과 방식으로 여과수 처리
	에센 정수장	취수정식+ 인공함양	134,000	하천표류수를 직접 취수하여 급속여과 인공함양
	퀠른 정수장	취수정식+ 인공함양	-	라인강에서 50~100m 이격
	테겔 정수장	취수정식 (1,200개 심정)	370,000	테겔호(강변)에서 60m 이격
오스트리아	비엔나 정수장	특수집수정	40,000	시험시설
프랑스	Le Pecq-Croissy 정수장	취수정식+ 인공함양	320,000	세느강 취수
네덜란드	암스테르담 정수장	취수정식+ 인공함양	250,000	라인강 지류 레크(Lek)강 취수
미국	니어만 정수장	취수정식	150,000	미주리강에서 15~20m 이격
	루이빌	취수정식	303,000	오하이오강에서 30~40m 이격

▌국내연구동향

■ 박남식 등(2003)과 홍성훈 등(2009)은 수자원의 지속적 확보기술개발 프론티어 사업단 연구의 일환으로 해안 지역의 지하수 개발 및 관리에 대하여 담수-해수 경계면 흐름 모델과 최적화기법을 사용하여 최적해를 도출하는 연구를 수행한 바 있음. 동 연구에서는 해수침투 제어를 위한 담수 주입정 또는 해수 양수정의 최적 설계에 대한 연구를 수행하였음.

■ Suk (2006)은 지하수 흐름 모델의 민감도 분석을 통하여 지하댐 최적 위치 선정을 위한 연구를 수행한 바 있음. 민감도 분석은 지하수댐의 두께와 깊이, 수리전도도, 그리고 댐 위치에 대하여 총 32 경우의 조합에 대한 모델링을 통하여 저수량을 평가하고 가장 우수한 조합을 선정하였음.

■ 지하수 관련 분야의 연구는 21세기 프론티어 연구개발 사업, 수생태사업단 연구, 수변지하수 활용 고도화 연구 등 다양하게 추진되어 왔거나 되고 있음.

- 이를 통해 지하수 자원의 확보, 강변여과수 분석기법 개발 등과 같은 분야에 비교적 적극적으로 대응하고 있음.
- 그러나 지역 간 갈등, 하천수질사고, 기후변화로 심화될 것으로 예상되는 가뭄의 빈도와 강도 등을 고려할 때 취수원의 다변화가 부각되고 있으나 이를 위한 지표수-지하수의 상호연계를 통한 연구 및 기술이 부족하여 국가차원의 통합적인 대응 능력은 아직 부족한 실정임.

■ 강변여과와 같은 간접취수 방법은 1994년부터 처음으로 강변여과 및 인공함양에 대한 조사 및 연구를 실시하였음.

- 현재 낙동강 하류에 해당되는 경남 창원시와 김해시, 함안군 등에서 강변여과수 취수장을 운영하고 있음(표 2.33과 표 2.34).

▌표 2.33 낙동강 강변여과수 개발현황

시군	지역	사업인가	사업기간	취수방식	정수량	사업비(백만원)		
						계	국비	시비
계	6개소							
함안	칠서	2002	2002~2004	수직정	2만톤/일	22,585	11,291	11,291
창원	북면	1998	2000~2001	수직정	1만톤/일	14,924		14,924
	대산	1998		수직정	1만톤/일			
	대산 1단계	2000	2000~2005	수직정	6만톤/일	80,159	18,384	61,775
	대산 2단계	2006	2006~2011	수직정, 방사형	6만톤/일	70,000	29,200	40,800
김해	생림	2006	2006~2009	방사형	18만톤/일	66,982	31,782	36,200

▌표 2.34 국내 강변여과수 개발 조사 사업현황

기관명	기간	사업명	과업개요
환경부·부산상수도사업본부, 경상남도	1995~1996	부산·경남지역 복류수 및 강변여과수개발 타당성 조사	•기본현황 조사 •세부수리지질 조사 •하천취수개선방안 타당성 조사 •시범사업 시행계획 •시범사업설치 및 각종설계인자 도출 •기술자문 및 해외시설 현지답사
창원시	1996~1997	창원시 강변여과수 개발 타당성 조사	•수준측량 •기본현황조사 •세부수리지질조사 •강변취수방안 및 타당성검토
	~1999	창원시 상수도 확장사업 타당성 조사	•실시설계
	~2001	준공후 운영 중	•수직정 10,000㎥/일 운영 중
	1997~1998	군북상수도 강변여과수 타당성 조사	•수준측량 •기본현황조사 •세부수리지질조사 •강변취수개선방안 및 타당성조사 •기술자문
	~2001	함안군 강변여과수 개발 및 상수도확장공사 기본설계	•기본설계
	2004	준공후 운영 중	•수직정 275,000㎥/일 운영 중
한국 수자원공사	1997~1999	강변여과 및 인공함양 방법을 이용한 영산강 수원개발 기본조사	•기본현황조사 및 세부대상지점 선정 •세부 수리지질 조사 •강변여과 및 인공함양 수원개발 •향후 계획 수립 •국가의 정책방향 제시
가평군	1998~1999	가평군 강변여과수 타당성 조사	•기본현황조사 •수준측량 •세부수리지질조사 •하천취수개선방안 타당성 조사 •기술자문
김해시	2007~	김해시 강변여과수 개발사업	•수평정 180,000㎥/일 시공 중
강남구	2005~	탄천 하상여과시설 설치공사	•수평정 7,000㎥/일 시공후 운영 중
울산시	2007~	울산시 태화강 수질개선 사업	•수평정 100,000㎥/일 실시설계중

자료: 환경부, 상수원 보호구역 관리개선방안 연구 (2008)

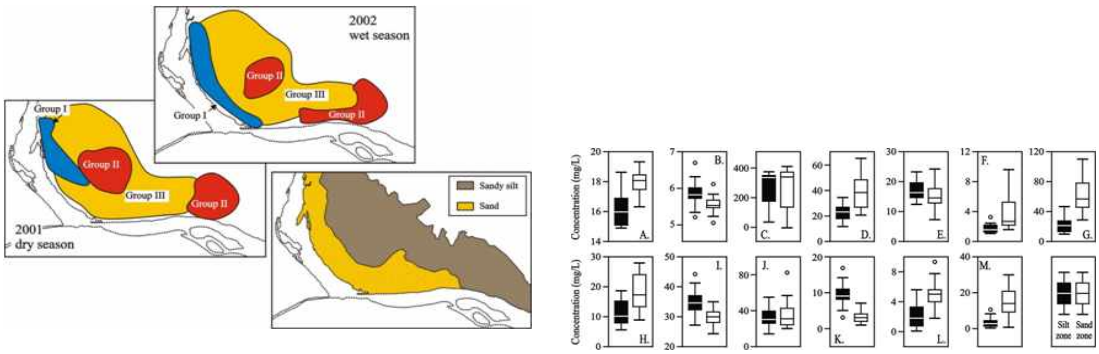
- 간접취수에 대한 국내 기술은 아직까지 선진국 수준까지 이르지 못하였으며, 간접취수 및 정수처리 부분의 기술경쟁력 함양을 위하여 국내 실정에 맞는 주입방법 및 유지관리 기술, 집수정 형식 및 방법, 수질사고 대응능력, 그리고 지하수 정수처리 공정에 이르기까지 전체적인 설계, 시공 그리고 운영기술의 개발이 필요한 실정임.

(3) 주입수 거동 및 수질평가 기술

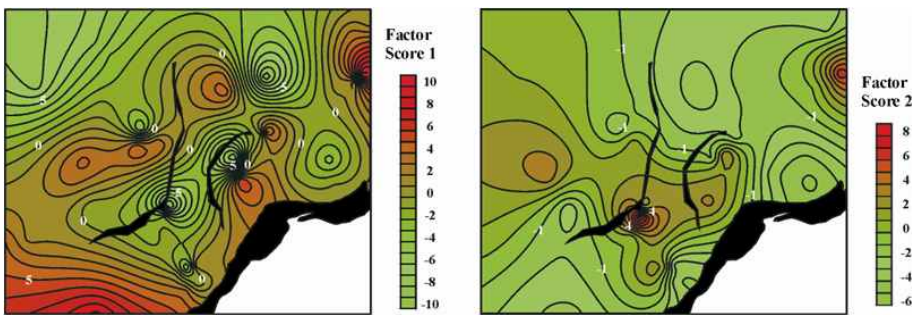
▌대수층의 광물학적 특성 및 배경 지하수의 수지구화학적 특성분석 기술

- 충적층 지하수(본 기술의 경우 기술 적용에 의해 생산된 지하수)의 수질(오염물질 분포 및 거동)은 충적층 지질매체의 지질/지화학 특성에 의해 조절됨(그림 27과 그림 28, Choi et al., 2012). 그림 28은 미호천 수변 충적층 지하수 내에서의 영양염류의 저감 특성을 지구통계 기법을 활용하여 공간적으로 도시한 것으로서, 우각호가 존재하는 강기슭 지역(riparian zone)의 대수층 내에서 발생하는 생지구화학 반응기작에 의해 질산성질소와 같은 영양염류의 자연적 제거가 일어남을 확인함. 즉, 실트질 충적층 환경 보다는 사질 충적층이 분포하는 지역일수록 영양염류 등에 의한 오염취약성이 현저히 높은데, 그 이유는 사질 충적층일수록 오염물질의 직접 침투가 보다 용이하고 지하수는 상당한 심도까지 산화환경을 유지하기 때문임(Min et al., 2003; Chae et al., 2004, 2009). 반면, 실트질 충적층(범람원 충적층)이 분포하는 지역에서는 환원성 환경이 지배적으로 조성되어 탈질(denitrification), 탈황 등의 환원반응이 일어나지만 철과 망간의 함량이 증가하게 되는 철-망간 환원이 발생함(Kim et al., 2009).

- 해외에서는 충적층 지질매체의 분포 및 공간변화에 관한 지도를 작성하고, 이를 안정적인 수질을 갖는 취수원 확보에 활용하고 있음. 즉, 다양한 지질매체에서의 다양한 오염물질의 변화(transformation)와 저감 과정에 대한 이해가 밝음.



▌그림 2.27 충적층 지질매체의 특성에 따른 충적지하수 수질 변화 국내 연구 사례 (Chae et al., 2004, 2009)



▌그림 2.28 환원성 충적층 매질의 분포가 지하수 수질 특성에 미치는 영향 사례(Kim et al., 2008)

- 특히, 국내 및 전세계적으로 농업활동이 활발한 충적층 지역의 지하수는 상당히 오염되어 있는 것으로 보고되고 있으며, 특히 질산염 등 영양염류의 부화는 대수층 내 지화학 반응을 조절하여 지하수의 화학성(수질)에 영향을 주는 것으로 알려짐(Böhlke 2002; Kim et al. 2008). 배경지하수 내 질산염 등 영양염류의 존재와 더불어 주입 대상 지층 내의 특정 광물질(황철석, 방해석, 점토광물 등)의 존재 여부 및 함량은 지하 저수지기술 적용과정에서의 수질 변화에 큰 영향을 미침(Konikow et al., 2001; Herczeg et al., 2004).

- 지하저수지 적용에 있어, 주입 이전 단계에서 충적층 지하수의 체계적인 조사 연구를 통해 지화학(수질) 특성을 밝히는 것은 수질 개선 평가예측 뿐 아니라 적정 입지 선정, 주입 방법(지화학 반응의 속도론적 측면 고려) 설계, 주입정의 관리 등 전공정에 있어 핵심적인 사항임(Herczeg et al., 2004).

- 이에, 본 연구에서는 해당 부지의 충적층 지화학 조사와 지하수의 배경수질 조사(수화학 및 안정동위원소 조사 기법, 수화학 모델링 등 적용)를 체계적으로 수행함으로써, 입지 선정부터 사후 관리에 관련된 핵심 기반자료를 제공하고자 함.

▌주입수 거동 및 수질변화 분석 기술

- 주입수의 수화학 특성은 지하저수지 활용기술에 의한 수질 개선효과 및 주입정 관리(클로깅 발생 등)에 절대적으로 중요하여 반드시 상세히 분석·평가되어야 함(Brown and Misut, 2010; Bekele et al., 2011). 상기 주제에서 평가된 충적층 지질매체 지화학 특성자료를 활용하여 성분이 알려진 주입수(산화상태)와 모의 반응(simulation)함으로써, 주입수의 이동과 생지구화학 거동 및 수질 변화를 예측할 수 있음. 이러한 결과는 최적 부지 선정과 선정된 부지에서의 최적 수질개선과 시설관리를 위한 주입 공정 설계에 활용됨.

- 본 연구에서는 주입수-충적층 지질매체 반응에 의한 시공간적 수질 변화를 창의적으로 모의함으로써, 모니터링 최적 설계에 활용코자 함.

▌주입수-지하수-지질매체 지화학 상호작용 분석 기술

- 청정 지하저수지 입지 지역에서의 주입수-지하수-지질매체(충적층) 간 상호작용은 recovered water의 수질(특히, 산화-환원에 민감하거나 관련되는 탄산염, 황산염 및 중금속 이온), 관정 효율의 변화(특히, 탄산염광물 침전에 의한 클로깅 발생) 뿐 아니라 저장 대상 지층의 수리지질 특성 변화(특히, 2차광물의 침전에 의한 저류성 변화)와도 매우 밀접히 관련됨(Brown and Misut, 2010; Page et al., 2011). 따라서 이러한 상호작용을 시설 설계 이전에 정확히 예측·평가(모델링)하고, 주입-저류 과정에서는 시공간적 관점에서 체계적으로 모니터링하고 평가(해석)하여야 함.

- 청정 지하저수지 기술 적용 중에는 주기적인 수화학 및 동위원소(탄소, 질소, 황 동위원소)

모니터링을 통하여 주입수-지하수-지질매체 간 상호작용을 밝혀 수지화학(수질) 변화와 2차 침전 광물질 발생과정을 평가함.

- ASR 등 지하 지층을 활용한 수자원확보기술의 적용성과 효율성은 대상 지층의 수리지질 특성(수리전도도, 수리경사 등으로 주입수-기존 지하수 interface 분포, 즉 처리능력을 결정) 및 수지구화학-수질 특성에 의해 일차적으로 지배됨(Sedighi et al., 2006; Misut and Voss, 2007; Hollander et al., 2009). 따라서 부지 선정 이전부터 주입에 이르는 전과정에 걸쳐 수리지질-수화학 자료를 기반으로한 성능 예측 및 평가가 이루어져야 함.

- 지하 매질 내에서의 원 지하수와 주입수 간의 수체 혼합(혼합비 분포) 양상과 이에 따라 2차 유도되는 지화학 반응에 의한 수질 변화를 예측 및 모니터링-평가함은 지하저수지 활용기술의 전공정 수행에 있어 필수적인 과업이며, 따라서 거의 모든 ASR기술 적용시 필수핵심기술로 활용되고 있음.

- 본 연구에서는 지화학모델링(Phreeqc), 특히 반응성 용질이동 모델링을 창의적으로 활용하여 주입수-지하수-지질매체(충적층) 간 상호작용을 사전 예측함으로써, 수질 예측을 고려한 시설 설계 및 적정 운영(주입수 수질, 주입율 등) 지침 제공에 활용토록 할 것임. 이를 위해 수리지질 조사평가 자료를 연계 활용할 것임.

- 이러한 사전 모델링 결과를 기반으로 주입정 주변의 수질 모니터링 설계가 이루어지며, 특히 모니터링 관정의 위치와 측정 항목과 주기가 결정됨.

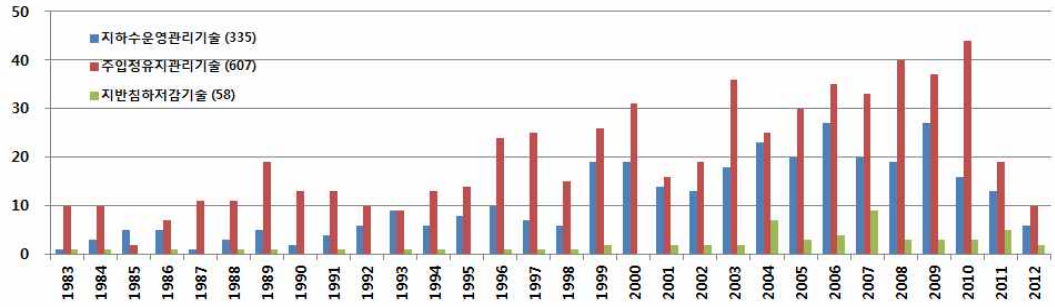
- 모니터링 관정에서는 주기적인 수화학 모니터링과 동위원소 모니터링을 수행함(Kattan et al., 2010). 수화학 모니터링 자료의 해석을 통하여 주입수의 이동 양상(혼합비 분포), 지하수-지질매체-주입수 상호반응에 의한 주입수의 수질 변동(개선효과), 2차 생성물질(이온성 물질과 2차 침전물)의 종류와 분포 등을 평가하게 됨. 일부 선행사례에서는 주입수의 성분과 주입율을 조절하면서 체계적인 모니터링을 실시하고 이를 토대로 최적 운전조건을 제시함.

나. 청정 지하 저수지 운영 및 유지관리 기술 개발

▌지하 저수지 유지관리에 대한 관련 논문 검색은 크게 세 가지 분야를 통해 즉, 지하수 운영관리 기술, 주입정 유지관리 기술 그리고 지반변형 저감 기술에 대해 수행되었음.

- 국외논문의 경우 SCOPUS 홈페이지를 통해 검색을 수행하였으며, 국내논문의 경우 한국건설교통기술연구원에서 제공하는 NDSL 홈페이지를 통해 수행하였음.

- 국내외논문 모두 1983년부터 2012년 현재까지 30년 동안 발표된 해당 논문의 편수를 연도별로 정리 및 분석을 수행하였음(그림 2.29).



▌그림 2.28 지하 저수지 유지관리에 관련된 국내외 논문검색 결과

- 검색결과 지하수 운영관리 기술 분야에 대해서는 총 335개가 검색되었으며, 1998년까지는 상대적으로 적은 편수의 논문이 발표되었으나 이 이후부터 매우 큰 폭으로 증가되고 있는 것으로 나타났음.

- 그리고 주입정 유지관리 기술 분야에 대해서는 607개의 논문이 검색되었으며, 비교적 많은 논문이 검색되었으며, 지하수 운영관리 기술 분야와 마찬가지고 1900년대 후반부터 급격히 증가하는 경향을 나타냈음.

- 또한 지반변형 저감 기술 분야의 경우 검색된 논문의 수는 58개로 상대적으로 다른 분야에 비해 연구 실적이 적은 것으로 나타났음. 그러나 2000년대에 들어와서는 약간씩 증가하고 있는 실정임.

▌보다 세부적으로 지하저수지 통합운영관리 기술, 주입정 유지관리 기술, 지반침하 저감 기술에 대한 기존의 연구내용, 성과 그리고 한계 등에 대한 분석을 수행하였음.

(1) 지하저수지 통합운영관리 기술

- 청정지하저수지 통합운영관리 기술개발을 위해서 목표생산량과 목표수질을 달성하는 운영방안에 따른 전반적인 시스템 운영 및 제어관리기술이 개발되어야 하며 이를 위해서 무선자동 자료수집 및 모니터링 시스템 운영기술이 개발되고 실시간 모니터링의 편의성과 자료 분석 결과에 따른 신속한 대응을 위해 실시간 모바일 기반 모니터링 시스템이 개발됨.

- 시스템의 전반적인 제어관리기술이 개발되기 위해서는 주입정, 양수정, 관측정으로부터의 지하수위, 온도, 수질, 압력, 전기전도도 등의 자료 측정과 함께 자동무선송수신 모듈과 실시간 모니터링 시스템을 개발하여 목표생산량과 목표수질을 확보하는 시스템 정상운영 상태를 확인할 수 있게 함과 동시에 전송된 자료들의 분석 결과에 따라서 시스템에 생기는 문제점에 대해서 자동 및 수동으로 신속하게 대처할 수 있도록 함. 또한 모바일 기반의 실시간 모니터링 시스템을 개발하여 시스템 운영 담당자의 위치와 관계없이 실시간 모니터링이 가능할 수 있도록 하여 신속하고 정확한 대처를 가능하게 함.

- 본 연구는 기존의 연구와 비교해 볼 때 ASR이나 ASTR 시스템과 유사한 바가 있지만 이러한 시스템에서는 주입정과 양수정에서 주입량, 양수량, 수질에 대한 여러 가지 항목에 대해

서 정기적인 단순한 측정을 실시하고 결과를 분석해서 운영에 반영하게 됨. ASR 또는 ASRT에 관련된 연구는 최근 활발히 진행되고 있음(Page et al., 2007, Page et al., 2010, Barry et al., 2005, Harris et al., 2005, Herrman, 2005, Pavelic et al., 2005, Pyne, 2005, Rinck-Pfeiffer et al., 2005, Stuyfzand et al., 2005, Baski, 2007). Page et al.(2010)의 연구에서 Managed Aquifer Recharge(MAR) 사례를 소개하고 여러 가지 수질 측정 항목들에 대한 자료를 제시하였음. Harris et al.(2005)와 Stuyfzand et al.(2005)의 논문에서는 수질측정과 ASR 중의 수질변화에 대해서 다루고 있고 Page et al.(2007)는 ASTR에서 재해분석을 수질에 대해서 실시하였음. Harris et al.(2005)는 ASR 양수량 증대에 대한 연구를 실시하였고 Herrman(2005)은 비피압대수층에서 ASR 양수량 최적화에 대한 연구를 하였음. Pavelic et al.(2005)는 여러 관정분포의 경우에서 ASTR 모델링을 실시하였고, Pyne(2005)은 최근 미국에서의 ASR 기술에 대해서 소개하였음. Rinck-Pfeiffer et al.(2005)는 도시지역의 홍수발생 시 ASR 또는 ASRT를 제안하였음. Baski(2007)는 ASR 관정에 대한 비교적 자세한 설명과 함께 관정에 설치되는 각종 센서 및 자료수집 및 분석 장치에 대해서 소개하고 시스템 운영상의 내용이 간단히 소개되어 있음. 그러나 Baski(2007) 논문을 제외한 기존의 모든 보고서와 논문에서 용수확보를 위해서 ASR 또는 ASTR을 적용한 사례는 소개하고 있으나 세부적인 장비나 시스템적인 운영에 대한 언급은 전무한 실정임. Baski(2007)의 논문은 참고문헌이 한 편도 제시되지 않은 점으로 보아 ASR 장비나 운영에 대한 이전의 참고할 만한 공식적인 자료가 없었음을 시사함. 위와같이 수질측정이나 양수량 증대를 위한 모니터링시스템이 개발된 예는 있으나 운영관련 자료는 거의 전무한 실정이고 본 연구에서는 기존의 시스템과 유사한 부분도 있으나 주입정과 양수정의 배치 등이 다른 새로운 시스템을 계획하고 있고 전체 시스템에 적용되는 모니터링시스템과 제어시스템을 개발하는 초기단계에서부터 관련기술 전문업체와 공동 및 위탁연구를 실시하여 운영 시 발생되는 문제점을 해결할 계획임.

(2) 주입정 및 양수정 유지관리 기술

- 주입정 및 양수정에서의 주요 문제 중에 하나는 폐색(또는 공막힘)현상으로 이는 물리적, 화학적 그리고 생물학적 과정 중 하나 또는 둘 이상을 통해 발생됨. 지금까지 수행된 주입정 폐색현상에 대한 많은 연구에 따르면 주입정에서의 폐색현상은 대부분 물리적 폐색(physical clogging)인 주입되는 물에 포함되어 있는 부유물질에 기인한다고 제시하였음(Harpaz, 1971; Hauser and Lotspeich, 1967; Vecchioli, 1972; Olsthoorn, 1982). 부유물질 다음으로 주입정 폐색의 주요 요인은 생물학적 폐색 (biological clog ging)임(Oberdorfer and Peterson, 1985). 만약 주입되는 물이 살균 처리되지 않았을 경우 세균 또는 미생물들이 포함될 수 있으며, 이는 주입정 근처 대수층에 영양영분을 제공하는 환경이 조성될 수 있음. 주입정 근처에서의 미생물의 여과와 재성장은 주입정 운영에 있어 중요한 요소가 될 수 있음. 주입과 양수 사이에 중단이 발생되었을 때 주입 시 사전염소처리가 된 물을 주입하였다 할지라도 양수된 지하수 내에 높은 개체의 대장균 존재할 수 있음(Rebhun and Schwarz, 1968)을 제시하였음.

- 국내에서 폐색에 관한 연구로 추창오 등(2012)은 부산 금정산 일대 지하수 관정 내에서의 폐색현상을 일으키는 물질의 특성과 형성원인을 조사하였으며, 대표적 물질은 철수산화물로

관정 재질로부터 기인하였다고 평가한 바 있음.

- 주입정에서 발생되는 폐색현상은 주입수의 전처리 과정(침사지 이용 등)을 통해 상대적으로 큰 입자의 유사 또는 부유물질, 유기물질, 영양염류 등을 분리한 후 주입하고 주입정 내에서 압력의 변화양상을 모니터링하여 주기적으로(주로 일단위) 주입수보다 높은 압력의 역세척(backwashing), 서어징(surging), 에어콤프레셔를 동반한 jetting 등의 기계적인 방법을 통해 저감하고 화학적 방법은 염소와 같은 산화제(oxidizing agent)와 염화칼슘과 같은 응집제를 주입하며, 화학적 폐색이 심한 경우에는 산(acid)을 주입함(Olsthoorn, 1982; Pyne, 1995; Perez-Parico and Carrera, 1999; Bouwer, 2002; Pavelic et al., 2007).

- 최근 관정 내에서의 폐색현상 저감에 대한 연구로 함세영(2012)은 폐색현상 제거 기술개발에서 고압수 분사방식, 공기-브러쉬 방식, 고압가스 분사방식, 폭약방식 등을 다수의 관정에 적용하였으며, 취수량 평가를 평가하였음. 충적대수층에서는 고압가스 분사가 암반대수층에서는 현장 상태에 따라 제시된 방법별 효과가 달라질 수 있다고 제안하였음.

- 지하 저수지의 장기간 동안 지속적으로 효율적이고 안정적으로 운영되기 위해 유지관리 차원에서 주입정과 양수정으로 이루어진 관정 시스템 내에서의 폐색현상에 대한 진단을 할 필요가 있으며, 이를 위해 관정 시스템 내 유량 및 압력 변화와 같은 수리학적 거동 등을 모니터링을 할 필요가 있음(Gonzalez-merchan et al., 2010). Perez-Paricio and Carrera(1999)와 Pyne(2005)는 관정의 유지관리에 있어 폐색의 형태, 원인, 진단과 측정방법에 대해 표 2.34와 같이 제안하였음.

▌표 2.34 관정의 유지관리를 위한 폐색의 형태, 원인, 진단 및 측정방법

폐색 메커니즘	원인	최소화 및 방지	개선기법	측정 및 기법
부유물질의 침투	-원수내의 미립자 또는 관망 내 침전물 -처리되고 남은 부산물 (예, 백반(alum)) - 침사지내에서의 조류 성장	- 원수의 전처리 개선, 특히 부유물질의 제거 - 조류 성장 억제를 위한 빛의 제거 - 역세척 관정 설치 또는 침사지의 건조 횟수의 증가	- 펌핑 - 서어징 - jetting - 침사지 건조 또는 긁어내기(scraping)	- TSS, 탁도, MFI, 원수 그리고 토양/대수층 내 입자크기 분포 - 바이패스 여과 시험 - 관정 비용량의 변화
미생물 성장	원수 내에 풍부한 기질(substrate) (특히, 질소, 인 , AOC)	- 원수의 전처리 개선, 특히 영양염분 제거 또는 염소 주입 - 역세척 빈도 증가 - 침사지 건습 사이클의 적절한 기간 설정	- 펌핑 - 염소 주입 증가 - 산 처리 - 가열 - 와이어 브러싱 - 다성분 효소용액주입 (multienzyme solutions) - 침사지 건조 또는 긁어내기(scraping)	- 수질분석 - (침사지) 영상 그리고 (관정 내) TV 카메라에 의한 조사 - 토양과 대수층 샘플에 대한 화학적 그리고 미생물학적 분석
화학적 침전, 이온-교환	- 산화-환원 반응 -원수, 지하수 그리고 대수층 재질 사이의 불친화성 (incompatibility) - 반응 점토의 존재(팽윤/확산)	- 전처리 개선 - 원수의 pH 또는 양이온 농도 조절 - 원소 내 DO 방지 또는 제거 - 역세척 빈도 증가	- 펌핑 - 산 처리 - 와이어 브러싱 - 침사지긁어내기 (scraping)	- 수질분석(특히 산화-환원 조건과 미네랄 포화 지표) - 역세수 또는 토양/대수층 샘플의 SEM 분석 - (침사지) 영상 그리고 (관정 내) TV 카메라에 의한 조사
공기유입, 가스바인딩 (binding)	- 자유 낙하수 - 원수 내 가스의 존재 - 생물지화학적 반응	- 가스 차단 - 원수에서의 가스 배출 - 가스 반응 방지(예, N_2 생산)	- 펌핑 - 가스가 용해될 때까지 기다림 - 관정 설계의 개선	- 물, 온도 그리고 특별한 가스 특성 분석

AOC = assimilable organic carbon; DO = dissolved oxygen; MFI = membrane filtration index; SEM = scanning electron microscope; TSS = total suspended solids

■ 폐색현상을 예측하기 위해 많은 기법들이 개발되어져 왔으며, 주요 기법에 대한 요약은 다음과 같음.

- 실내 column 실험: 토양과 대수층을 구성하는 코어(core) 매질 그리고 주입 원수를 이용하는 실내 column 연구는 폐색의 정도, 주입 원수의 전처리에 대한 필요성을 확인할 수 있음 (Rinck-Pfeiffer et al, 2000; Wood et al., 2005). 그러나 지하 대수층 특성의 공간적 변동성 (variability) 때문에 이러한 작은 규모의 실내 column 실험은 단지 정성적인 가이드만을 제공하며, 현장 규모에서의 관정 성능을 정확하게 예측하기 위해 적용되기 어려움이 있음.

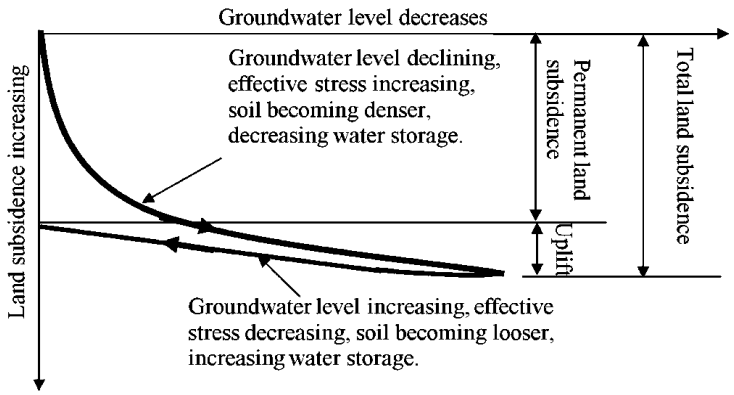
- 도해적 기법: 폐색을 예측하기 위한 단순한 도해적 기법이 개발되어져 왔으며, Hutchinson and Randall(1995)는 대수층의 투과율(transmissivity)과 MFI(Membrane Filtration Index) 자료를 이용하여 주입정의 물리적인 폐색율을 예측하기 위한 표준곡선(type curve)을 개발하였음. 또한 Taylor and Jaffe(1990)는 실내 column 실험으로 얻어진 결과를 이용하여 다공성 매

질 내에서의 바이오매스의 정도에 따른 투수성의 상대적인 감소를 결정하였음.

- 수치 또는 물질 수지(mass balance) 모델링: 공극율과 투수성 변화에 대한 현장 예측을 위해 생물지화학적 반응(biogeochemical reaction)에 대해 흐름과 수송(flow and transport)이 결합된 정교한 수치 모델링 코드들이 개발되어 적용되어 오고 있음(Perez-Parico and Carrera, 1998). 그러나 이러한 코드는 매우 복잡하고 많은 양의 자료를 입력해야 할 필요가 있으며. 현재까지 연구목적으로 이용되고 있음. Pavelic et al(2007)은 물리적, 화학적 또는 미생물학적 과정이 투수성에 미치는 영향을 분석하기 위해 보다 단순한 물질 수지 모델링을 수행한 바 있음. 물리적인 폐색과정을 보다 정량적으로 수치적 분석을 위해 Lu et al.(2011)은 미세립자 퇴적의 시공간적 분포와 동수역학을 결합한 수치모형을 개발하였음.

(3) 지반침하 저감 기술

- 주입정을 통해 인공적으로 물을 주입할 때 주입정 스크린 주변의 대수층 내에서의 지하수 수위는 상승하며, 이로 인해 지반 융기(ground uplift)을 일으키는 대수층의 유효응력이 감소함(Budhu and Adiyaman, 2010). 이와는 반대로 양수정을 통해 물을 양수할 경우 대수층 내의 유효응력은 감소하며, 이로 인해 지반 침하(ground subsidence)가 발생함. 그림 2.29는 지반침하와 융기에 영향을 미치는 지하수의 양수와 주입의 효과 그리고 지하수 저장능력을 나타낸 것임.



▌그림 2.29 지반 침하/상승에 영향을 미치는 지하수 변화 효과에 대한 개략도

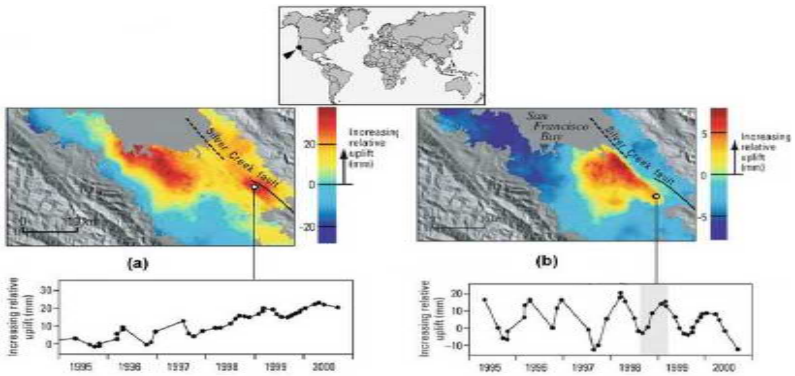
- 대수층을 구성하는 토양은 탄성적이지 않으며, 이로 인해 지반 침하와 융기는 지하수의 양수와 주입의 양에 직접적으로 비례하지 않음. 일반적으로 압밀된 토양에서 지하수 수위의 변화가 유사할 지라도 지반 융기의 양은 침하의 양과 동일하지 않음(Budhu and Adiyaman, 2010). 일반적으로 균질의 압밀된 토양에서의 지반 융기의 양은 유사한 유효응력 크기 하에서 지반 침하의 양에 20~30% 정도 밖에 되지 않음(Budhu and Adiyaman, 2010).

- 지하수 양수에 의한 지반 침하에 대한 연구는 지난 수십년 전부터 광범위하게 연구되어 왔으나(Gambolati and Freeze, 1973; Gambolati et al., 1973; Booker et al., 1985; Booker and Carter, 1986; Small and Booker, 1984; Leake, 1990; Leake, 1991; Leake, 1992; Leake

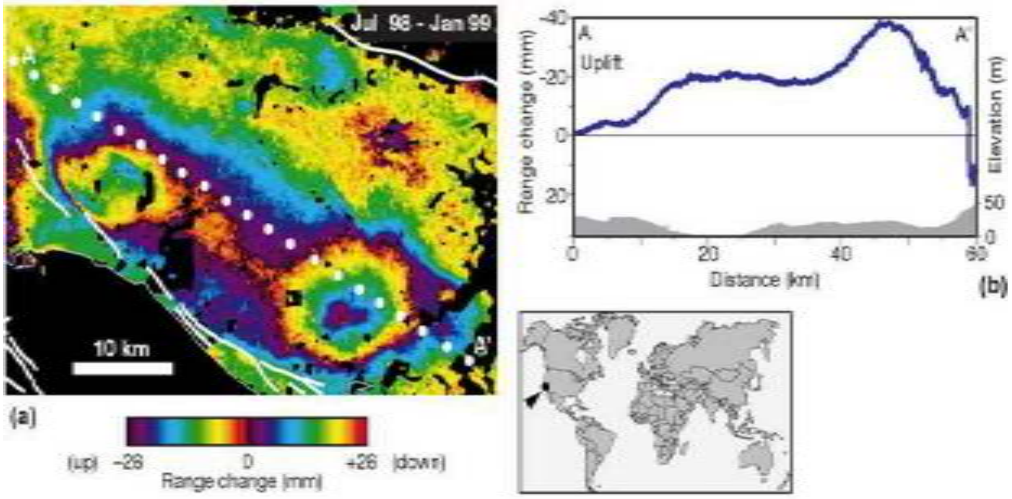
and Prudic, 1991; Burbey, 2006; Harada and Yamanouchi, 1983), 아직까지 신뢰할 만한 예측도구는 아직 개발되지 않았음. 이러한 주요 원인은 a) 지반 침하/융기에 대한 불완전한 이해, b) 대수층의 복잡한 지질학적 구조, c) 관정의 위치, 밀도 및 깊이 그리고 양수양에 대한 최적의 기준의 결핍 그리고 d) 종합적인 자료의 부족임.

- 지반 침하를 예측하기 위한 대부분의 연구는 주로 공개 프로그램인 MODFLOW 모형을 이용하여 수행되어져 왔음(Leake, 1990; Leake, 1991; Leake, 1992; Leake and Prudic, 1991; Hill et al., 2000).

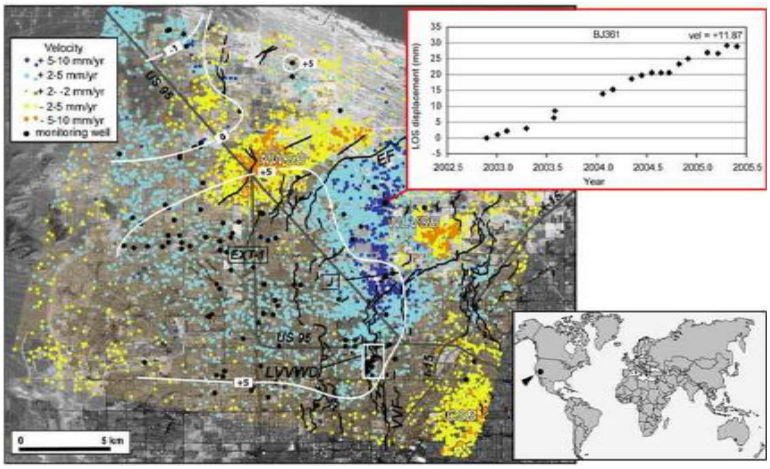
- 주입정 내로 물의 주입함에 의해 발생되는 지반 융기는 지반 침하에 비해 매우 드물게 일어나는 현상이며(Teatini et al., 2010), 이에 대한 연구는 극히 미비한 실정임. 이에 대한 이유로 지반 융기는 환경적인 위험이 발생하지 않을 만큼 매우 작으며, 실제로 지반 융기에 대한 값 비싼 모니터링 시스템을 구축할 필요가 없다고 여겨졌기 때문임. Teatini et al.(2010)은 주입에 의한 지반 융기의 매커니즘에 대한 열-공극-탄성 이론을 제시하였으며, 미국, 캐나다 그리고 유럽 주요 ASR지역에서 발생된 지반 융기 관측 및 분석에 대한 사례연구를 제시하였음. Schmidt와 Burgmann (2003)은 InSAR(Interferometric Synthetic Aperture Radar)를 이용하여 관측된 1992년부터 1999년까지 발생된 미국 캘리포니아 주 Santa Clara 계곡 내 ASR 지역에서의 지반 융기의 결과를 제시하였음. 최대 지반 융기는 4cm이며, 이는 피압대수층의 poroelastic 반응을 반영하는 것임(그림 2.30). 계곡 남쪽의 남동부에서는 계절적인 지반 융기 신호가 오랜 기간에 걸쳐 중첩되는 현상을 나타내었음(그림 2.31). 장기간 그리고 계절적 지반 변형은 대수층 내에서의 지하수 수두의 변화에 의한 것으로 판단하였음. Amelung et al.(1999)와 Bell et al. (2008)은 미국 네바다 주 Las Vegas 계곡에 위치한 ASR 지역에 대해 Persistant Scatter InSAR을 이용하여 지반 융기를 관측한 결과 계절적 최대 지반 융기는 인공함양의 첨두 기간동안 매년 1월부터 3월까지 발생하였다고 제시하였음(그림 2.32).



▌그림 2.30 캘리포니아 주 Santa Clara 계곡에서 관측된 지반변형. (a) 92년 9월~99년 10월, (b) 98년 8월~99년 3월



▌그림 2.31 (a) 1998년 7월부터 1999년 1월 까지 InSAR에 의해 측정된 미국 캘리포니아 주 Santa Ana 유역에서의 지반 변형, (b) (a)에서 A-A' 단면을 따른 지반 융기 거동



▌그림 2.32 미국 네바다 주 Las Vegas 계곡 북동지역에 대해 2003년 4월부터 2005년 5월까지 Persistent Scatter InSAR에 의해 관측된 융기 발생 속도에 대한 지도

- 지하수를 주입하고 양수하면, 지반내의 대수층을 통과시 지반의 투수계수와 대수층의 수두상태에 따라서 양수정에서 유출되는 유량은 변화하게 됨. 양수압이 걸린 대수층에는 지하수위 저감이 발생하게 되고 이는 지반의 유효단위중량을 증가시킴으로써 지반침하를 유발시키게 된다(이봉주와 황세호, 2008). 또한 복수의 양수정이 작동하게 되면 지하수위 저감은 중첩하게 되며 중첩된 지반 침하의 좀 더 크게 나타남.

- Lixin et al. (2011)은 최근에 중국 Tianjin에서 50년 이상의 장기간 과잉 양수에 의해 발생된 지반 침하에 대한 조사를 수행하였으며, 이를 저감하기 위한 방법 및 대책을 제시하였음: 1) 인근 하천으로부터 지표수 유입을 통한 용수공급, 2) 지하수 양수 제한, 3) 대수층 내로의 인공함양, 4) 물이용을 위한 저장시설 보수 및 확충, 5) 관리 대책(administrative

measure), 6) 지하수 이용에 대한 요금 인상, 7) Tianjin 중앙정부의 조례 규정, 8) 지반 침하에 대한 모니터링.

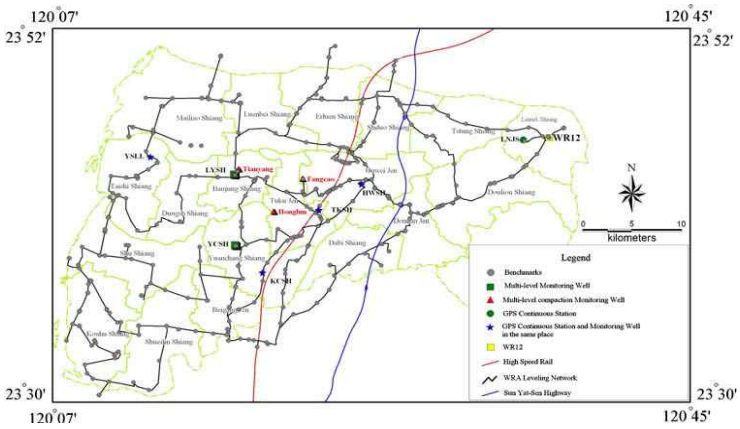
- Giao et al.(1998)은 태국 방콕 시에 위치한 AIT 대학 캠퍼스에서 지반 침하 저감을 위한 대책을 마련하기 위한 인공함양 현장 실험을 통해 주입량에 따른 지반 침하와 지반 융기에 대한 측정하였음. AIT 대학 캠퍼스 내 대수층은 모래층과 점토층으로 이루어진 반대수층(aquitard)이며, 1994년 3월부터 6월까지 매일 250톤을 10시간 정도 주입하였을 때 주입정 근처 모래로 이루어진 대수층에서는 약 3mm의 지반 융기가 발생하였으나 점토층에서는 지반 융기가 발생되지 않았음. 또한 Giao et al.(1998)은 주입정 설계에 있어 설치지역에 대한 수문지질학적 조건이 가장 중요하며, 인공함양은 간극 압력의 부족을 회복시킴에 의해 주입정 근처의 대수층의 융기를 강화시키며, 인근의 반대수층에서의 융기현상을 발생시킴. 결국 보다 많은 양의 물이 장기간 동안 주입된다면 보다 큰 지반 융기가 발생될 것으로 기대된다고 제시하였음. 결론적으로 인공함양은 방콕 AIT 캠퍼스 내에 존재하는 반대수층에서의 지반 침하 저감을 위한 효과적인 방법이 될 수 있다고 제안하였음.

- Hung(2007)은 지반 침하의 시공간적 특성은 매우 복잡하므로 지반 침하에 대한 보다 나은 분석을 위해서는 다중-센서 모니터링 시스템을 구축할 필요가 있다고 제안함. 모니터링 센서의 선택은 다음과 같은 사항을 고려할 필요가 있음: 1) 높은 공간적 샘플링 밀도(high spatial sampling density), 2) 측정 정확도의 우수성, 그리고 3) 높은 측정 빈도.

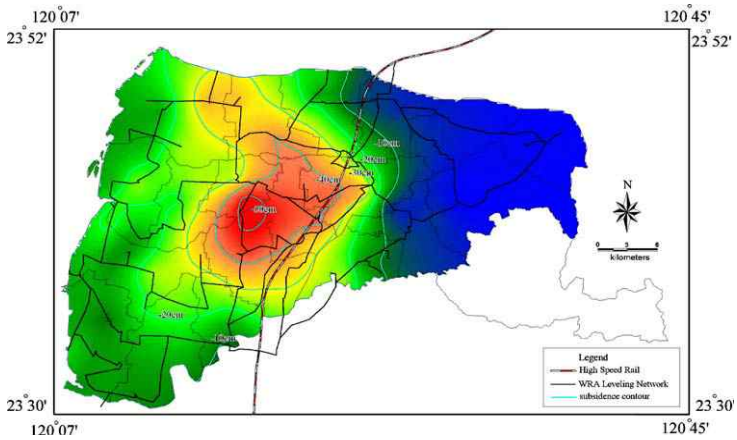
- Hung et al.(2010)은 지반 침하를 감지할 수 있는 센서의 종류와 이에 대한 장단점을 표 2.35와 같이 제시하였음. 그림 2.33은 leveling 경로, 관측정 그리고 GPS 기지를 나타낸 것이며, 그림 2.34는 leveling으로부터 측정된 양수정 주위의 누적 침하량을 나타낸 것임.

▌표 2.35 다중-센서 비교

	Leveling	연속 GPS	관측정	DInSAR
공간해상도	1.5~2km	10-15km	5~10km	25m
측정 빈도	1년	1일	1개월	35일
측정 정확도	0.5~1.0cm	0.5~1.0cm	0.1~0.5cm	2.0cm

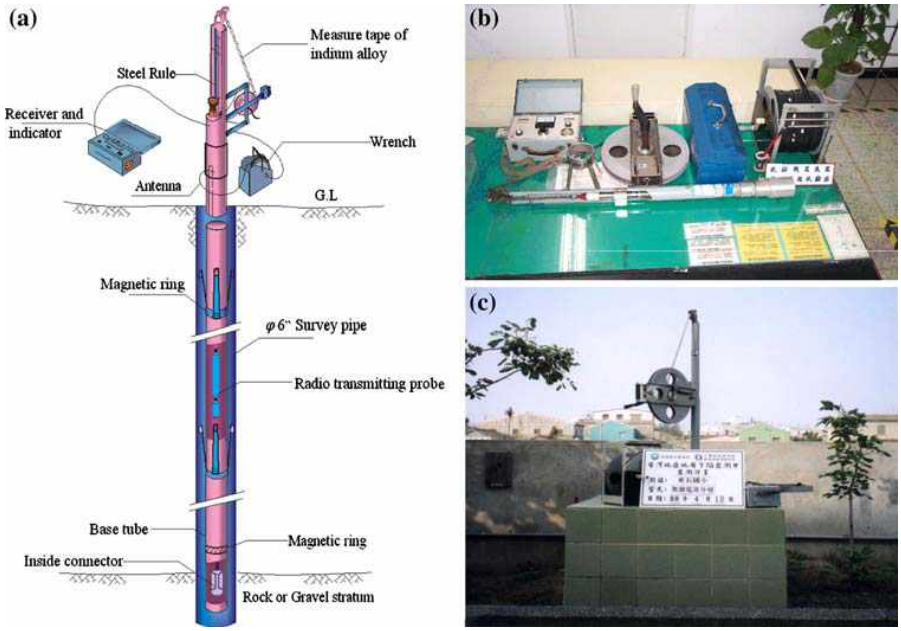


▌그림 2.33 leveling 경로, 모니터링 관정 그리고 GSP 기지의 예



▌그림 2.34 leveling으로부터 측정된 2002년부터 2007년까지의 누적 지반 침하분포

■ 지반 침하의 매커니즘을 보다 잘 이해하기 위해서는 대수층 내 서로 다른 토양층 사이에의 압밀 또는 팽창에 대한 측정이 중요함. 26개 이상의 마그네틱 링이 지층의 변화에 따라 관측정 내 서로 다른 깊이 설치되어 있음(그림 2.35). 각각의 마그테틱 링의 깊이는 1mm의 정확도를 가진 indium-alloy로 만들어진 측정 테이프에 연결된 probe에 의해 감지됨. 두 개의 인근 링 사이의 깊이 차의 변화는 두 링 사이의 지층의 변형을 나타냄: 만약 두 링 사이의 거리가 작아졌다면, 지층은 압밀 또는 압축된 것임. 팽창의 경우는 이와 반대임.



▌그림 2.35 (a) Multi-level compaction monitoring well, (b) 구성 요소, 그리고 (c) 현장 측정 자료 수집

라. 청정용수 공급을 위한 수질관리 및 활용기술

(1) 음용수로서의 신뢰도 확보를 위한 청정 지하저수지의 수질 위해요소 사전관리기술 개발

▌식품 위해요소 중점관리 기술(HACCP)

- HACCP(Hazard Analysis Critical Control Point; 위해요소중점관리기준)은 NASA가 1959년에 처음으로, 우주인에게 제공할 식품의 안전성 확보를 위해 식품업체에 요구했던 관리기준임. 이후 미국에서 병원성대장균에 의한 식중독이 발생하고 식품에서의 위해요소가 증가하면서 HACCP가 식품위생 및 안전성 확보를 위한 대안으로 정립되었음. HACCP은 가축의 식품생산 전 과정에서 이용자의 건강에 악영향을 미칠 수 있는 모든 잠재위해요소를 분석하고, 위해요소를 방지·제거하거나 안전성을 확보할 수 있는 단계에서 중요관리지점을 설정하여 과학적·체계적으로 중점관리 하는 사전위해관리 기법임. 국제식품규격위원회(Codex Alimentarius)는 HACCP 적용을 위해 제시한 지침(표 2.36)에 의거하여 전세계적으로 각 분야에서 HACCP 관리계획을 적용하고 있음. HACCP 적용 지침에 앞서 준비 5단계를 따르게 됨: (1) HACCP 팀 구성, (2) 제품의 특징 기술, (3) 제품의 사용방법 기술, (4) 공정흐름도 작성, (5) 공정흐름 현장 확인.

▌표 2.36 HACCP 적용원칙 7단계

1. 위해분석 (HA, Hazard Analysis)	▪ 생물학적, 물리적, 화학적 및 특성 상태의 위해 정의 ▪ 부작용 야기 수준 분석, 중대 위해 여부 결정 ▪ 잠재적 위해요소 차단을 위해 철저한 HA 실시
2. 중요 관리 설정 (CCP, Critical Control Point)	▪ HA 결과를 토대로 최적 CCP 설정 ▪ 과업 설계, 장비, 원료 또는 과업단계에 따라 최적 CCP 설정 ▪ 불필요한 CCP를 제거하여 관리 최적화
3. 관리기준 결정 (CL, Critical Limits)	▪ CCP 관리의 적합성을 판단할 기준 설정 ▪ 현장에서 쉽게 확인할 수 있는 수치 또는 특정 지표를 활용 ▪ 안전성을 보장할 수 있는 과학적 근거에 기초하여 설정
4. 모니터링 방법 설정	▪ 각 단계별로 가장 적합한 모니터링 절차 파악 ▪ 모니터링 항목, 위치/지점, 방법, 주기 결정 ▪ 모니터링 담당자 지정 및 훈련
5. 개선조치 설정 (CA, Corrective Action)	▪ 위해요소 발견 시 신속한 대처조치의 사전 설정 ▪ 이탈 사항의 정도 별로 구체적 개선조치 설정
6. 검증방법 설정	▪ HACCP 관리계획에 대한 유효성 평가 ▪ HACCP 관리계획의 실행성 검정
7. 기록유지방법 설정	▪ 효율적인 기록 및 운영근거를 확보할 수 있도록 HACCP 관리 전반을 체계적으로 기록할 방안 마련

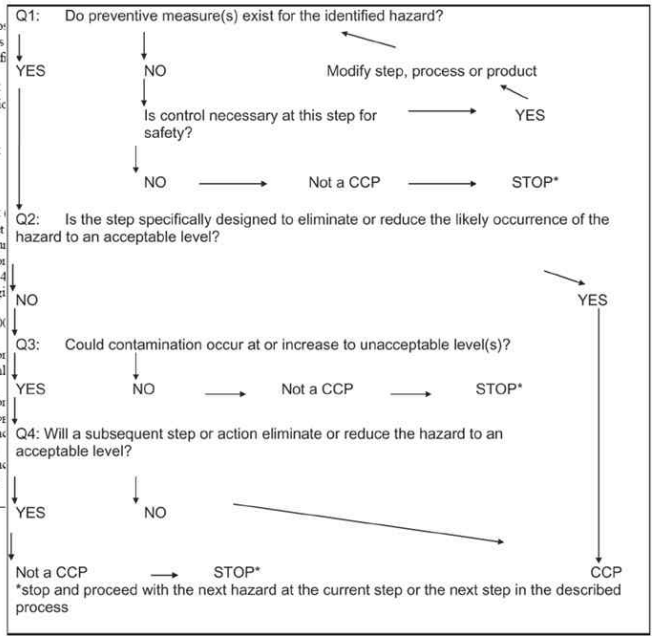
▪ HACCP 도입으로 소비자는 제품안전성을 확보할 수 있으며, 제품선택의 기회를 갖게 됨. 제품에 표시된 HACCP 마크를 통해 제품 선택의 기준을 제공함. 또한 공급자에게도 다수의 강점을 제공함. 체계적인 위생관리 체계 구축 및 집중적인 위생관리를 통하여 위생적이고 안전한 제품을 생산할 수 있으며, 위생관리의 효율성을 확보할 수 있음. HACCP 마크를 획득함으로써 제품의 이미지 제고와 신뢰성 향상을 기대할 수 있음. 미국 식품의약품관리국(FDA), 미국 농무부/식품안전성 검사국(USDA), 캐나다 식품안전성 강화계획(FSEP) 및 유럽 등지에서 HACCP를 적용하여 식품 및 의약품 안전성 확보에 노력하고 있음. 국내에서는 식품의약품안전청, 축산물HACCP기준원 등에서 HACCP 시행 및 관리를 주도하고 있음.

▌수자원 안전관리 기술

▪ 공정관리에 있어서의 위해요소 관리는 전통적인 산업분야에서 중요하게 여겨져 왔음. 발전소, 제조공장, 폐기물 처리 등의 분야에서 주로 연구되던 위해요소 관리가 식품 및 의약품 외 여러 분야에서 사용됨. WHO(World Health Organization)는 식품안전성을 위한 HACCP 이외에 먹는물, 재이용수, 폐기물처리 등에 관한 위해요소관리 기준을 설정하고 매뉴얼을 배포하고 있음(WHO, 2012). 또한, 먹는물 안전확보방안 매뉴얼(WHO, 2006)을 통해 안전한 음용수 제공을 위한 관리 방안을 제공함. 매뉴얼에는 음용수의 위해요소 분석, 중점 관리대상을 선정, 모니터링 방법이 제공됨. 먹는물 안전확보방안 매뉴얼에 따른 음용수의 잠재 위해요소 관리방안으로 잠재 위해요소의 위험도 관리 우선순위를 정하고, 각 위해물질별로 관리방안을 수립함. 이후 관리방안은 사전예방, 사후 조치, 그리고 모니터링 방법들까지 포함되게 되어있음.

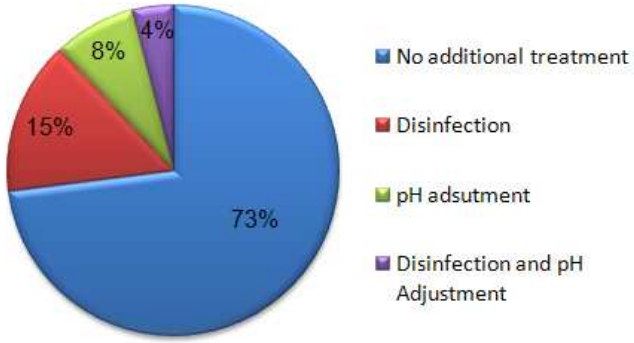
■ Greece의 Aspropyrgos 정수장에서는 수처리 및 공급과정 관리에 HACCP를 적용했음(Damikouka et al., 2006). 그림 2.36은 전통적인 정수처리장(원수-집수-취수-도수-정수-송수-급수 과정을 거치는 정수장)을 대상으로 HACCP 적용원칙 7단계를 토대로 수처리과정 전·후에 수정·적용한 것임.

Process step	Hazards	Preventive measures	CCP parameters/ limits	Monitoring procedure	Corrective actions
Catchment area (Mornos Lake)	Microbiological Algae growth, pathogens, bacteria, viruses, protozoa	Define protection zone- Acute toxicity detectors	In accordance with 75/440/EEC	Faecal index bacteria Specific pathogens turbidity	Increase treatment, alternative supply
	Chemical Heavy metals, pesticides, PAHs, PCBs, solvents, fertilizers	Define protection zone- Acute toxicity detectors	In accordance with 75/440/EEC	Frequent chemical analysis	Increase treatment, use of PAC, alternative supply
Pre-chlorination	Chemical Overdose, formation of disinfection by-products (THMs)	Optimize dose and contact time of disinfectant	Chlorine dos Trace levels chlorine at fi		
Coagulation/ flocculation/ sedimentation	Microbiological Viruses, protozoan oocysts	Optimizing coagulant, coagulant-aid dose and mixing conditions	Turbidity < sedimentatic		
	Chemical Poor floc formation and removal of inorganic substances	Optimizing coagulant, coagulant-aid dose and mixing conditions	Turbidity <		
Filtration	Chemical Inorganic constituents, filter defects	Regular backwashing and cleaning	Turbidity < filters outlet Particle cou		
Post-chlorination	Microbiological Survival of pathogens	Optimize dose and contact time	Residual coi chlorine: 0.4 Bacteriologi organisms		
	Chemical Overdose, formation of THMs	Careful chlorination	THMs < 10(		
Storage of treated water	Microbiological Recontamination	Integrity of tank construction. Air filtration Reduce residence time	Total colifor Residual chl water		
Distribution	Microbiological Regrowth, re-contamination	Positive pressure. Reduce biofilm potential. Residual chlorine, replacement and flushing programs	Total colifor system P_{O95} In accordanc 98/83/EEC		
	Chemical	Reduce residence time Integrity of pipe construction Replacement	In accordanc 98/83/EEC		



▌그림 2.36 Greece Aspropyrgos 정수처리장에서의 HACCP

(2) 청정 지하저수지의 지속가능한 운영을 위한 주입수 전처리 기술 개발



▌그림 2.37 Pre-injection treatment methods at potable water ASR schemes (beyond existing treatment)

- 미국 내 ASR 적용 사례에 따르면 73% 이상이 전처리 없이 인공주입수를 대수층에 함양하는 것으로 나타났다. 이는 대수층에서 충분히 지표수의 오염물을 제거하여 먹는물 수질기준에 적합한 생산수가 생산됐기 때문으로 사료됨(AWWA, 2002).

- 하지만 최근 ASR 적용 사례를 보면 응집/침전, 고도산화, 막여과 등 다양한 전처리 공정들이 적용되고 있음. 이는 기존에는 인공주입수 대부분을 하천수로 사용하였지만 최근에는 물순환 왜곡을 극복하고자 하수처리수, 강우유출수 등 다양한 원수를 사용함에 따라 고도정수처리 공정이 전처리 기술로 적용되고 있으며, 또한 산업화의 영향으로 표층수의 오염이 심화됨에 따라 지하 대수층의 수질 보전을 위해서 보다 엄격한 전처리 공정이 도입된 것으로 사료됨 (Charlesworth and Bristow, 2002; Duijvenbode van and Olsthoorn, 2002; Gerges et al., 1996; Pyne, 1995; Schottler, 1996; Stuyfzand and Doomen, 2004).

- 그리고 전처리공정을 통하여 원수의 수질을 개선할 경우 대수층 내 clogging 발생이 상당부분 감소되는 연구결과들이 보고되고 있음. 따라서 인공 주입 및 추출의 운전의 안정성 증대를 위해 물리 · 화학 · 생물학적인 전처리 기술의 적용이 점차 증가되고 있으며 또한 전처리 공정을 통한 주입수 내 특정 오염물을 제거하는 연구가 이뤄지고 있음(Bouwe, 2002; Rinck-Pfeiffer et al., 2000; Bouwer, 2002).

- 국내 · 외 유사사례의 운영실적 및 문제점을 분석하였으며, 주입수질과 clogging의 상관관계를 규명한 결과로 표 2.37에서는 ASR 공정에서 주입수 수질과 대수층 지질 조건에 따른 clogging 생성 속도를 나타냈으며, TSS와 TOC가 1 mg/L 이하일 경우는 대부분의 대수층 지질 조건에서 안정적으로 운영되는 것으로 나타난 반면 TSS와 TOC가 10 mg/L이상인 경우는 clogging가 급속히 진행되는 것으로 나타났음. 안정적인 공정 운영을 위해서는 원수 수질 및 대수층 특성에 적합한 전처리가 요구되는 것으로 확인됨.

■ 또한 주입수 내 과량의 용존산소가 대수층 내 용존 상태로 존재하는 철 · 망간을 산화시켜 대수층 공극에 clogging을 유발할 수 있으며, ASR 공정에서 미생물 막 생성에 의한 clogging 방지를 위해 NaOCl 주입 시 THMs 생성이 이뤄질 수 있어 먹는물 수질을 오히려 악화시킬 수 있음. 따라서 청정 지하저수지 개발 시 주입수의 수질 특성, 대수층의 지화학적 특성, 적용 공정, 후처리 공정 등을 분석 및 대응하여 위에서 제기된 문제가 최소화 할 수 있도록 해야 함.

▌표 2.37 Rates of clogging at 14 aquifer storage and recovery sites according to aquifer type and quality of source water (Pérez-Paricio and Carrera, 1999; Pyne, R. D. G., 2005)

	Source water quality		
	Low	Moderate	High
	TSS>10 mg/L	TSS>1-10 mg/L	TSS>1 mg/L
	TSS>10 mg/L	TSS>1-10 mg/L	TSS>1 mg/L
Aquifer Type	Rate of Clogging		
Limestone	Low-moderate	Low-moderate	No data available
Sand and gravel	Moderate-severe	Low-moderate	Low-moderate
Fractured rock	Severe	No data available	No data available

■ Clogging의 발생은 TSS와 TOC 뿐만 아니라 물리·화학·생물학적으로 다양한 원인에 의해 나타나게 됨. 표 2.38의 결과에서는 clogging의 원인과 예방방법 및 clogging 발생시 원인에 따른 해결방안을 제시하고 있음. 하지만 대수층 내에 형성된 clogging을 제거하는 것이 용이하지 않아 clogging 발생을 예방하는 것이 매우 중요함.

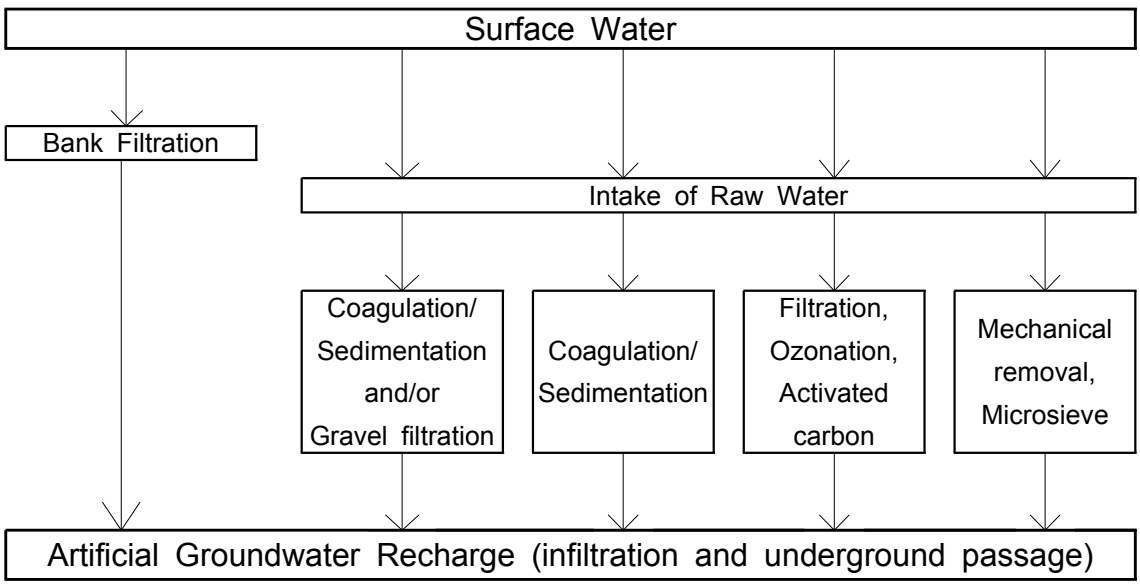
▌표 2.38 Comparison of Major Engineering Factors for Engineered Groundwater Recharge (Murray and Harris, 2010)

	Recharge Basin	Vadose Zone Injection Wells	Direct Injection Wells
Aquifer Type	Unconfined	Unconfined	Unconfined of Confined
Pretreatment Requirements	Low Technology	Removal of Soilds	High Technology
Estimated Major Capital Costs(US$)	Land and Distribution System	$25,000~75,000 per Well	$500,000~1,500,000 per Well
Capacity	100~20,000 m³/hectare-day	1,000~3,000 m³/d per Well	2,000~6,000 m³/d per Well
Maintenance Requirements	Drying and Scraping	Drying and Disinfection	Disinfection and Flow Reversal
Estimated Life Cycle	> 100 Years	5~20 Years	25~50 Years
Soil Aquifer Treatment	Vadose Zone and Saturated Zone	Vadose Zone and Saturated Zone	Saturated Zone

▌표 2.39 오염물질 별 적용 가능한 전처리 기술

처리대상 물질	처리가능한 단위 공정	병행 처리공정
입자성 오염물 물질 (일반 정수처리)	응집, 침전, 모래여과, 막여과	응집+침전+모래여과 응집+막여과
맛, 냄새	오존, GAC, BAC, PAC, AOP, RO	오존+PAC (GAC, BAC)
암모니아성 질소	생물처리, RO, BAC	오존+GAC
질산성 질소	생물처리, 이온교환, RO	-
황산이온	이온교환, RO	-
휘발성 유기물	Air stripping, GAC, PAC, AOP	Air stripping+AC
THM 생성능	AOP, PAC, 오존, GAC, 막여과	오존+GAC AOP+GAC

▌사례연구 (전처리 적용)



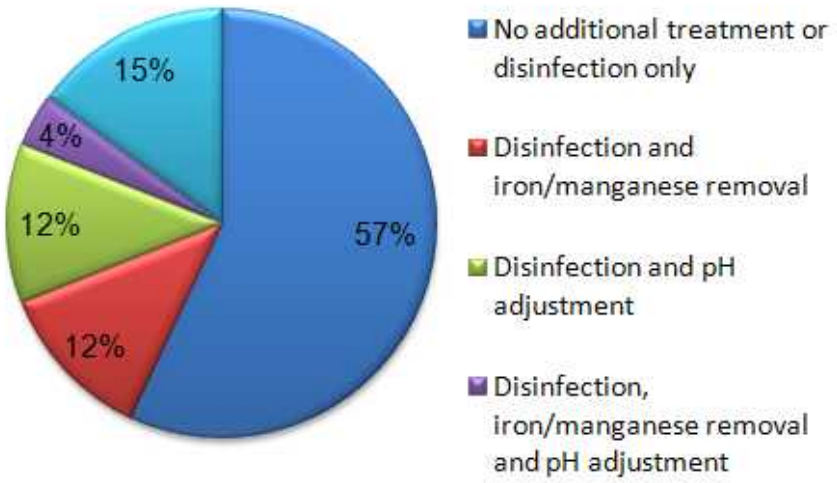
▌그림 2.38 인공주입 시 적용 가능한 전처리 공정

▌표 2.40 미국 ASR 시설 전처리 사례

위치	용량 (㎥/d)	수질	전처리공정
캔사스 Wichita市	100,000	먹는물	취수 → 침전 → 펌프장 → MF → AOP → 정수지 → 인공함양
플로리다 Okeechobee市	18,000	먹는물	취수 → 여과(Filter tank) → UV 소독 → 인공함양 → 계단식 포기
플로리다 Peace river	68,000	먹는물	응집 → 침전 → 여과 → 소독 → PAC
텍사스 Kerrville市	9,500	먹는물	-

(3) 먹는물 공급을 위한 플랜트 최적 설계 · 운영 · 유지관리 통합 기술개발 (후처리 기술)

▌연구동향



▌그림 2.39 Post-injection treatment methods at potable water ASR schemes

- 인공주입에 의한 처리수는 지하 대수층을 50~60일 가량 통과되어 표류수 내 존재하는 오염물이 희석, 흡착, 이온교환, 미생물에 의한 자연저감, 대수층 공극에 의한 여과, 그리고 지화학적 반응에 의해 수질개선이 나타나게 됨(Hiscock and Grischek, 2002). 특히 탁도, 의약물질, 질산이온, 박테리아 등과 같은 생물학적 오염물 제거도 우수한 것으로 알려져 있다. 그리고 인공주입에 의한 휴믹물질과 같은 유기물 감소는 소독부산물 발생을 50~80% 정도 까지 감소시키는 것으로 보고됨(Weiss et al., 2003).

■ 인공주입에 의한 처리수는 앞에서 설명한 것과 같이 유기물 및 영양물질 제거 효율은 높은 반면에, 대수층 내 존재하는 환원상태의 철, 망간 등 2가 금속과 황화물등이 먹는물 수질 기준 이상으로 검출되는 것으로 나타남.

■ 이러한 지하수특성에 기인하여 과학기술부(21세기 프론티어연구개발사업-수자원의 지속적 확보기술 개발사업)와 지식경제부(지질자원 요소기술을 이용한 기후변화대응/지구환경보전 기술개발) 등을 중심으로 진행된 기존연구의 경우 수처리 부분은 연구가 제한적으로 이뤄졌으며, 특히 용수처리 공정의 경우는 철·망간 및 입자성 물질 제거에 초점을 맞추어 연구되었음.

■ 국내·외 지하수 용수처리 공정의 실제 적용사례로 한국 창원에서는 강변여과수를 폭기, 급속여과, 활성탄여과 후 정수처리수로 사용하고, 독일의 뒤셀도르프와 뮐하임, 그리고 퀠른라인 정수장은 오존과 활성탄여과지, 그리고 소독공정 이후 정수처리수로 공급한다고 보고되고 있음. 일반적으로 간접취수원을 이용한 정수처리 공정은 기존 고도정수처리공정을 일반 정수처리공정으로 전환이 가능하므로 최소한의 정수처리 공정으로 구성되게 됨.

■ 미국의 ASR 정수처리 공정의 경우 57% 이상이 추가적인 정수공정이 없는 것으로 나타났으며, 추가적인 정수처리 공정이 들어간 경우는 철 · 망간, 그리고 pH 조절등으로 나타났음. 이는 인공 주입수 내의 오염물들이 지하 대수층에서 저감된 것과 인공 주입수의 수질이 적정기준을 초과한 경우는 추가적인 전처리 공정을 수행하였기 때문으로 사료됨(AWWA, 2002).

■ 최근 미국내 ASR 원수 수질에서의 문제점을 확인한 결과 중금속 및 소독부산물(DBPs) 검출이 나타나고 있는 것으로 확인되었음. 이는 주입과 양수가 동일정에서 이뤄지는 ASR 상에서의 구조적 문제점으로 본 연구에서 적용하고자 하는 ASTR 시스템 적용시에는 DBPs에 대한 문제점은 크게 감소될 것으로 예상됨(Brown et al., 2006).

■ 국내외 연구 및 현장적용 사례로부터 지하 대수층 내 존재할 가능성이 있는 염수, 질산성 질소와 같은 이온성분 및 DBPs에 대한 처리 공정 연구는 미흡한 것으로 나타나 이러한 오염발생 가능성이 있는 부분에 대한 처리공정 연구가 필요할 것으로 판단됨.

■ 표 2.41에서는 지하수 내 존재할 수 있는 다양한 오염원에 대한 처리 공정 및 실제 현장에서 발생되는 수질 issue에 대하여 제시하였음.

▌표 2.41 철, 망간 처리방법 (Sung and Morgan, 1981; Davies and Morgan, 1989; Katsoyiannis and Zouboulis, 2004; Pacinim et al., 2005)

처리방법	처리가능 원수 조건	철, 망간 제거 영향 인자
공기포기+여과	Fe : 1.0~10.0 ppm Mn : < pH	유기물과 결합된 Fe는 제거 불가능 Mn제거를 위해서는 충분한 접촉시간 필요
염소산화+여과	Fe : < 2 ppm Mn : 추천공정 아님	유기물과 결합된 Fe는 제거 불가능 Mn 제거에는 부적합
KMnO4+여과	Fe, Mn 농도 제한 없음	$KMnO_4$과다 주입시 처리수 색상 변경
오존+여과	Fe, Mn 농도 제한 없음	오존과다 주입시 $KMnO_4$ 형성에 따라 처리수 색상 변경
염소산화+KMnO4+여과	Fe, Mn 농도 제한 없음	KMnO4과다 주입시 처리수 색상 변경
ClO2+여과	Fe 농도 제한 없음 Mn 농도 제한 없음	Mn처리를 위해서는 충분한 체류시간 필요
산화코팅 또는 촉매여재	Fe, Mn 농도 제한 없음	TOC 1ppm 이상인 물에는 부적합 여재는 주기적인 재생이 필요
생물여과	Fe, Mn 농도에 무관	Fe : Zn, H2S 농도에 영향 Mn : Zn, H2S, NH_4 농도에 영향

▌표 2.42 탈염 및 이온성 물질 처리방법

Technology		Energy consumption (kWh/㎥)	비고
증발법	MED	- Seawater : 7.9~18	- 에너지 소비량 과다 - 스케일 형성 문제
	MSF	- Seawater : 84.5	
전기투석 (Electrodialysis)		- Brackish water : ~2	- 전극 스케일 형성 문제
분리막법 (RO)		- Seawater : 4.0~9.0 - Brackish water : 2~4	- 기술성장기에 진입한 안정적인 공정 - 막오염으로 인한 효율저하
축전식탈염법 (CDI)		- Seawater : 2.5 - Brackish water : 0.1~0.4	- 에너지 소비량 낮음 - 상업화 초기단계 (기술검증 필요)

*based on 1,000㎥/d plant, AWWA

▌표 2.43 ASR Water Site Data for sites 1 to 20 (Brown et al., 2006)

Site	Site Geology	T (㎥/d)	in-TSS (mg/L)	Well Clogging	Water Quality	Purpose	Cost ($/㎥)
Highline Seattle	S & G	277	1.0-4.0	yes-algae	radon	seasonal	2.04
Columbia South Shore Portland	S & G	251	1.0-4.67	yes-inversti gated	none	seasonal	1.10
Beaverton Oregon	B	1,242	1.0-10	no	none	seasonal	4.77
Salem Oregon	B	2,973	0.3-1.0	no	DBPs & radon	emergency	NR
SE Salt Lake City Utah	S & G	460	<1.0	yes-algae	none	seasonal	0.34
Houon South Dakota	GS	372	NR	NA	atrazine	restore	1.89
Washoe County Nevada	GS	NA	NR	yes	none	seasonal	5.68
Calleguas California	S	929	1.0-3.0	yes-TSS, air entrainment	mangan & iron	emergency	2.46
Las Vegas Nevada	S & G	2,349	<1.0	yes-TSS air entrainment	DBPs	peak & seasonal	2.84
Antelop Valley California	S & G	232	1.0-1.67	yes-TSS & biological growth	DBPs	seasonal	NR
Highlands Ranch Denver	SS	93	1.0-2.0	yes-TSS & air entrainment	none	seasonal	NR
Denver Basin Demo South Denver	SS	79	<1.0	no	biological growth	seasonal	9.27
Alamogordo Mexico	S & G	232	<1.0	none	iron precipitation	seasonal	0.38
Greenbay Wisconsin	SS & LS	102	<1.0	yes-TSS	arsenic, mangan, cobalt	peak	NR
Oak Creek Wisconsin	SS	305	<1.0	yes-TSS	mangan & iron	peak & seasonal	0.42
Hilton Head Island South Carolina	LS	3,530	1.0-2.0	yes-TSS&h ydrulic effects	none	peak & seasonal	NR
Myrtle Beach South Carolina	S	149	1.0-1.5	yes-TSS & biological growth	mangan & iron	seasonal	1.82
Wildwood	S	1,078	<1.0	yes-TSS	iron hydroxide precipitate	seasonal	0.38
Lychet Minster England	C	200	<1.0	none	fluoride	seasonal	NR
Windhoek Namibia Africa	FQ	1,951	NR	none	none	seasonal	NR

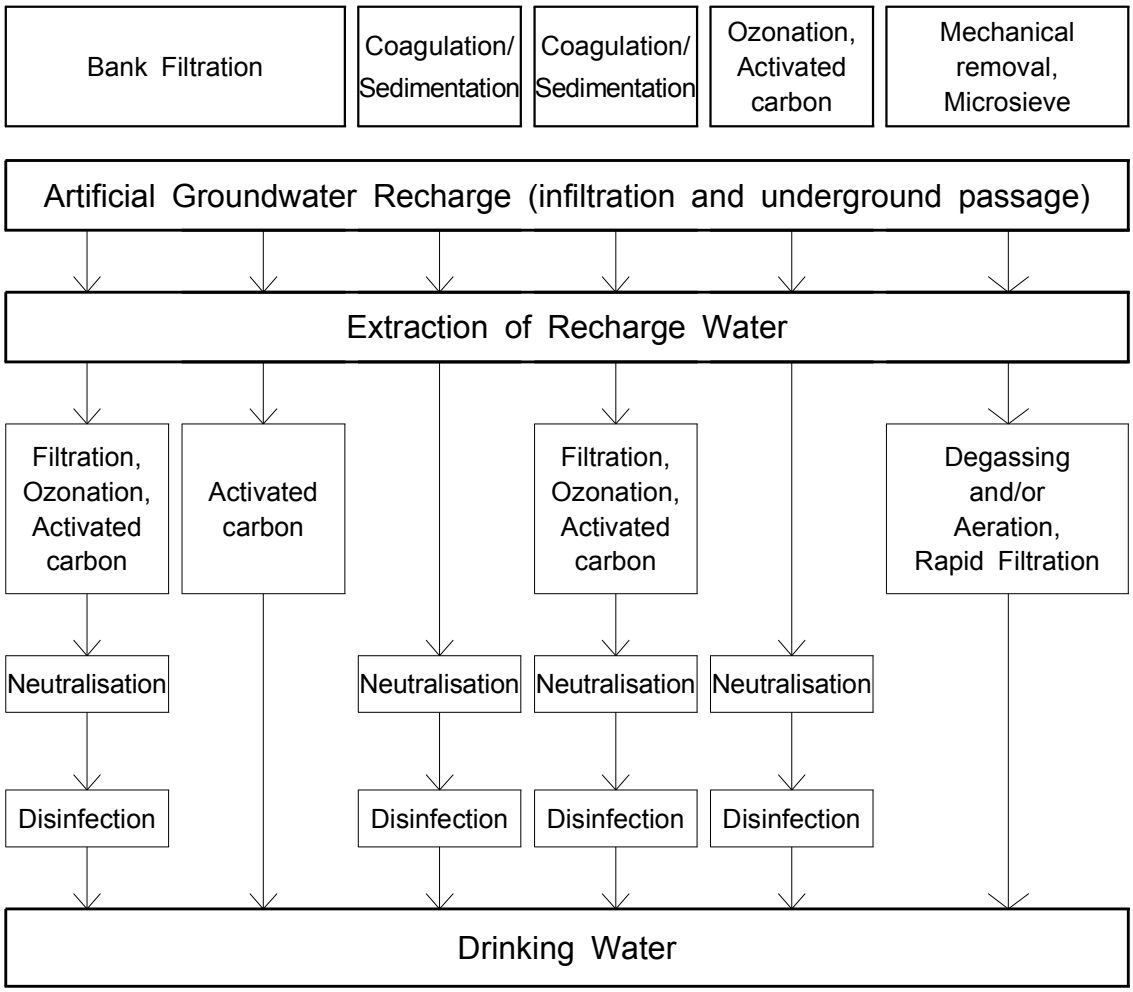
※ S : Sand, G : Gravel, B : Basalt, GS : Glacial Sand, SS : Sandstone, LS : Limestone, C : Chalk, FQ : Fractured Quartzite, NR : not reported, NA : not available

▌표 2.44 Key water quality hazards in source water, groundwater and aquifer materials

Hazard	Origin	Examples	Preventive measures
Pathogens	S, (G)	Viruss	Adequate aquifer residence time
Inorganic chemicals	G, A, S	Arsenic	Control Eh during recharge (avoid mobilisation)
Salinity and sodicity	G, (S)	Salinity	Increase volume of freshwater recharged
Nutrients	S, (G)	Nitrogen	Pretreat water (eg activated sludge)
Orgnic chemicals	S, (G)	Pesticides	Exclude prone sub-catchments
Turbidity particulates	S, (G)	Suspended solids	Pretreat water (eg wetlant)
Radionuclides	G, A, (S)	Alpha-radiation	Aquifer selection (avoidance)

※ A : aquifer minerals, G : groundwater, S : source water for recharge

▌사례연구 (후처리 적용)



▌그림 2.40 인공주입 시 적용 가능한 후처리 공정

▌표 2.45 후처리 시설 적용 사례

위치	용량 (㎥/d)	인공주입 방법	후처리공정
독일 Düsseldorf市	180,000	bank filtration	강변여취수 → 오염접촉(1차 : 5분, 2차 : 30분) → 활성탄 여과 → (이산화염소, 인산염, 규산염 혼합) → 공급
독일 mülheim RWW市	244,000	AR	취수 → 모래여과 → 인공함양 → 집수 → 오존접촉 → 다층여과 → (소독, NaOH) → 정수지
독일 Essen市	200,000	AR	심층 지하수 취수 → 계단식 포기 → 인공함양 → 집수 → 소독 → 정수지
독일 드레스덴市	250,000	bank filtration	강변여과수 → 응집침전 → 급속여과 → 인공함양 → 폭기 → 활성탄 여과 → 소독 → 정수지
네덜란드 Amsterdam市	250,000	AR	취수 → 응집/침전 → 급속여과 → 인공함양 → 포기 → 오존접촉 → 연수화 → 활성탄여과 → 완속여과 → 공급
네덜란드 WPH정수장		Dune Filtration	취수 → 응집/침전 → 급속여과 → 인공함양 → 포기 → 오존접촉 → 연수화 → 활성탄여과 → 완속여과 → 공급
헝가리 Budapest市 Csepel	150,000	AR	취수→착수→계단식 포기→오존 접촉조→혼화/응집→급속여과→활성탄→정수지
한국 창원市	200,000	bank filtration	강변여과수 취수→포기→급속여과→활성탄→소독→정수지
한국 함안郡	20,000	bank filtration	강변여과수 취수→계단식 포기 → 오존 접촉조 → 활성탄 → 정수지

■ 한국의 경우 표류수의 수질사고 대처, 지역간 물분쟁 최소화를 위한 취수원 다변화 정책이 추진되고 있음. 하지만 대부분이 강변여과 적용이 이뤄졌으며, 최근 제주도에서 인공함양 기술이 적용되었음.

(4) 물리 · 지화학적 대수층 수질의 개선 특성 평가 기술 개발

▌인공주입수의 수질개선효과에 미치는 영향인자 규명 및 수질 예측기술 개발

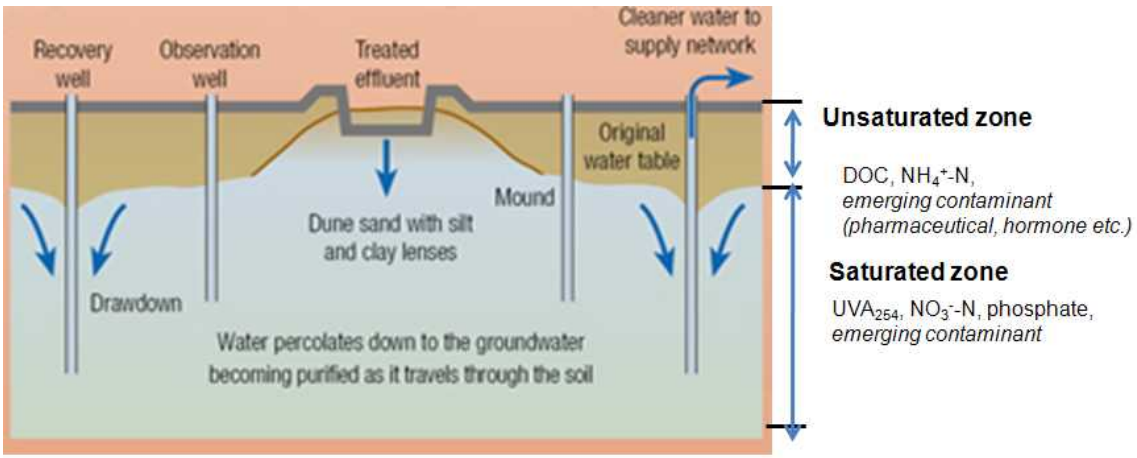
- 본 연구과제에서 주요 지하 저수지로 고려하고 있는 피압대수층(confined aquifer)을 대상으로, 구성광물과 주입된 인공주입수의 상호작용에 대해 별도의 연구를 수행한 사례는 찾아보기 힘듬.

- 피압대수층에서 예상되는 주요 반응(산화-환원, 흡착, 이온교환, 침전 등)이 비피압대수층에서 예상되는 반응과 크게 다르지 않아, 비피압대수층(unconfined aquifer)을 대상으로 상당한 연구가 진행된 soil aquifer treatment (SAT) 기술에서 관련내용을 찾아볼 수 있음.

- 비피압대수층내 지하수 함양을 궁극의 목표로 하는 자연형 수처리 기술인 SAT는 양질의 수자원이 부족한 미국 Arizona 지역과 이스라엘 등에서 연구개발이 활발히 이루어짐(그림 2.41).

- SAT를 통해 포화도가 다른 지중 구간(불포화대 및 포화대)에서 용존유기물, 질소계 오염물, 인 등에 대한 정화효과를 오염물질의 거동(fate)관점에서 평가함 (Amy et al., 1993; Wilson et al. 1995; Quanrud et al., 1996 (a); Quanrud et al., 1996 (b); Drewes and Jeckel, 1998; Drewes and Fox, 1999; Viswanathan et al. 1999).

- 유럽 및 미국에서는 최근 SAT에 의한 신종유해물질(약물질, 환경호르몬) 제거효과에 대한 연구가 보고된 바 있음 (Heberer et al.,2004; Cordy et al, 2004; Kathleen et al, 2010).



▌그림 2.41 Schematic diagram of soil aquifer treatment and treatable contaminants at unsaturated zone and saturated zone

- 하지만, 처리수의 대수층(특히, 피압 대수층) 주입에 따른 기존 흡착물질의 재탈착 및 재용출 가능성, 광물의 용해에 따른 음용수로서의 가치상승에 대한 연구는 극히 제한적이며, 찾아보

기 힘듬.

■ 또한 국내 · 외 유사사례를 확인한 Pilot 규모 이상에서 결과 물리 · 지화학적인 부분과 생물학적인 부분을 나눠서 수질개선 부분 및 예측기술을 평가한 사례가 없음. 대수층 내 오염물의 거동을 체계적으로 이해하고 밝히기 위하여 물리적인 부분과 생물학적인 부분을 나눠서 규명할 필요가 있음.

▌주입수와 배경지하수 수질차이, 대수층 구성물질에 따른 clogging 발생 특성 평가 및 예측기술

■ 기존 연구에서는 관정 혹은 관정인근에서의 막힘현상(clogging)을 해결하기 위하여 발생인자를 도출하고 발생시 해결할 수 있는 방안에 대하여 다각적으로 연구가 이뤄지고 있다. 이러한 막힘현상은 크게 입자상 물질의 유입, 미생물의 성장, 공극내 침전물 형성과 같은 원인으로 이뤄지고 있으며 이러한 문제를 해결하기 위해서는 전처리 공정을 통한 입자성 물질 유입의 최소화, 소독제 주입을 통한 미생물 성장 억제 및 사멸, 주입수 수질 조절(pH, DO 등)을 통한 대수층 내 침전물 형성 억제 등을 예로 들고 있다. 하지만 이러한 현상들에 대해서 통합적인 처리를 위한 공법을제시하고 있는 가이드라인의 개발이 필요하다. 그리고 운영관리의 효율화를 위해서는 정확도 있는 막힘현상 예측모델개발이 필요하므로 본 연구에서의 실증시설을 통한 관련기술 개발 및 보정작업이 필요한 것으로 판단됨.

▌표 2.46 Clogging 발생 인자

발생인자	원인
공기유입	• 주입정 내의 낙차 발생에 따른 주입수의 과폭기
입자성 물질 유입	• 입자성 유기물 및 미세 토양입자에 의한 공극폐색
대수층 내 박테리아 성장	• 대수층 내 영양물질 및 유기물질 유입
침전물 형성	• 함양수와 원지하수와의 지화학적 반응
점토입자의 분산	• 함양수와 대수층 물질과의 이온교환
철이온의 침전	• 함양수의 pH 와 Eh에 기인된 원지하수 내 철이온의 산화
물리적 압축	• 주입압력 및 유속증가에 따른 미세입자들의 이동 및 압축

▌표 2.47 Clogging types, causes, diagnosis and methods for management (Pérez-Paricio and Carrera, 1999; Pyne, R. D. G., 2005)

Clogging mechanism	Cause	Minimisation and prevention	Renovation technique	Mesurements and techniques
Filtration of suspended solids	Particulates in source water or deposited in pipes Treatment byproducts (eg alum) Algal growth in basins	Improve pretreatment of source water, especially removal of suspended solids Prevent light(algal growth) Backwash wells or dry out basins more frequently	Pumping Surging Jetting Basin drying or scraping	TSS, turbidity, MFI, particle size distribution of source water and soil/aquifer Bypass filter testing Changes in specific capacity (wells)
Microbial growth	Abundant substrate in source water (especially N, P and AOC)	Improve source water pretreatment especially nutrient removal or chlorine dosing Backwash more frequently Adapt duration of wetting and drying cycles in basins	Pumping Chlorine shock dosing Acid treatment Heat Wire brushing Multienzyme solutions Basin drying or scraping	Water quality analyses Photography (basins) and down-hole TV camera survey Chemical and microbial analyses on soil and aquifer samples
Chemical precipitation, ion exchange	Redox reaction Incompatibility between source water, groundwater and aquifer materials Presence of reactive clays(swelling/dispersion)	Improve pretreatment Adjust source water pH or cation concentration Avoid or removal DO in source water Backwash more frequently	Pumping Wire brushing Acid treatment Basin scraping	Water quality analyses(especially redox conditions and mineral saturation indices) SEM analysis of backwash water or soil and aquifer samples(scrapes of well face for deep systems) Photography (basins) and down-hole TV camera survey
Air entrainment, gas binding	Free falling water Presence of gas in souce water Biogeochemical reactions	Avoid cascading Gas trap Degas source water Prevent reactions (eg N2 production)	Pumping Waiting for gas to redissolve Improving well design	Analyse water temperature and specific gases

(5) 대수층 수질의 생물학적 개선특성 평가기술 개발

▌대수층의 생물학적 수질 개선특성조사

- 국내외적으로 지하수처리에 중점을 둔 연구가 대부분이고 상수도원수로 사용하기 위한 목적으로 대수층 지하수 오염물질의 생분해나 생분해의 원리에 관한 연구는 드묾.
- 국내에서는 인간 활동으로 인해 오염된 지하수 처리에 중점을 둔 처리위주의 연구가 보고되었고 처리대상 오염물은 주로 NO_3-이었음(하철윤 외, 2005).
- 국외에서 지하수의 수질을 저하시키는 오염물들의 제거에 대한 보고가 비교적 많음. 최근에는 피압대수층에서 NOM의 생분해(Kolehmainen et al., 2008; Heberer et al., 2008; Maeng

et al., 2011)와 철과 망간(Farnsworth & Hering, 2011)의 생물학적 전환에 대한 연구가 보고되었음. Cyanotoxins과 병원균의 제거/분해가 물리적요인과 생물적 요인들의 조합으로 제거될 뿐만 아니라, 대수층 환경에서 병원성미생물들이 생존능을 상실하거나 포식자에 의한 포식 또는 토착미생물과 먹이에 대해 경쟁함에 따라 수가 감소한다고 보고되었음(Gordon & Toze, 2003; Langmark, 2004; Stevik et al., 2004; Bournea et al., 2006; Grutzmacher et al., 2002, 2010; Eleuterio & Batista, 2010; Toze et al., 2010).

- 이러한 국내외 결과들은 대수층 내에서 생분해가 일어난다는 것은 증명하였으나 부지환경 특이성에 따라 정작 생분해에 참여하는 토착미생물 군집조성과 더불어 활성이 달라지므로 일반화하기는 어려움.

- 대수층 내의 토착미생물의 생분해능을 활성화하는 적극적인 대책은 지하수처리목적으로는 다양한 복원기법이 적용되었으나 상수원수로서 사용될 지하수정화목적으로는 거의 보고되지 않았음.

▌대수층 미생물 모니터링 기술개발

- 최근에 분자생물학적 기법을 이용하여 대수층의 미생물 생태에 대한 연구는 보고되었음. 대수층에서 토양입자가 지하수 보다 더 많은 생태학적 서식지를 제공함(Page & Dillon, 2007; Humphreys, 2009). 대수층에서 미생물 군집의 조성은 표층 토양 및 지표수 군집조성과 다르고 생물적, 비생물적 요인들이 대수층에서 미생물 다양성을 직,간접 조절한다고 알려졌음(Boyd et al., 2007; Flynn et al., 2008; Giebler & Lueders, 2009; Rousk et al., 2011; Smith et al., 2012). 대수층 미생물 군집은 대부분 원핵생물로서 토양이나 바위 표면에 부착하여 집락과 biofilms을 형성하는 것으로 보고되었음(Page & Dillon, 2007; Giebler & Lueders, 2009; Humphreys, 2009; Zhu et al., 2010).

- 그러나 미생물 모니터링 결과와 수질과의 상관관계를 도출한 연구는 아직 보고되지 않았음.

▌지하저수지의 biofouling 제어 기술개발

- Biofouling을 막기 위한 전처리 기술로서 염소소독이 가장 흔히 사용되고 있으나 발암성 소독부산물에 의한 부작용으로 말미암아 개선된 또는 새로운 biofouling 제어기술개발에 대한 필요성이 제기됨.

- 국내에서는 펌프 및 관망의 침전물 또는 부식에 관련된 미생물 및 그 성장 조건(성은혜 외, 2008)에 대한 연구에서 해안 대수층의 지하수를 이용한 실험실 규모 실험을 통해 사용된 금속시편에 미생물에 의한 침전물 증가 및 금속부식 악화되었다고 보고하였음. 대수층에서 박테리아의 이동 및 부착에 대한 연구(이창구 외, 2007)에서는 회분 및 칼럼실험을 통해 양전하를 띤 여재 입자에 세균이 더 많이 부착하는 것으로 나타났음.

- 국외에서는Voudouris (2011)은 대수층의 지하수를 이용하는 시설에서 막힘 현상은 충진수, 미생물, 화학반응, 그리고 부유물에 의한다고 보고하였음. Taylor et al., (1997)은 지하수 회수정에서 biofouling에 관여하는 미생물은 철산화 세균과 황산염 환원균 이외에도 종속영양 미생물이라고 보고하였음. Vetter et al. (2012)는 지하수열에너지를 저장하는 지열공장에서

지하수의 저온 저장시 세균군집조성의 변화와 공장 system 운영 상태의 상호관계를 통해 저온저장에 막힘 현상에 미생물이 심각하게 작용하였을 것이라고 보고하였음.

마. 건기에 30일 이상-50m^3/d 이상 생산능력의 지하저수지 기술개발

- 2008년 현재 전국 유인도서 482개의 거주인구는 82만명임 (행정안전부, 2008). 이중 상수도를 공급받는 인구는 29%에 불과하며 나머지는 간이급수시설, 우물, 지붕수 등에 의존

- 문유리 등 (2010)은 도서지역에서 이용가능한 용수원별 특성 비교, 분석을 통하여 물 공급계획의 수립절차를 제안하고 시범 적용한 바 있음.

- 이정호 등 (2007)은 서남해안 지역의 지하수 이용 현황 및 관리 실태를 조사분석하고 그를 토대로 해안지역 수자원관리 개선방안에 대한 연구를 수행하였음. 연구내용에는 기존 문헌분석을 통한 해안 지역 지하수 해안유출량 및 개발 가능량 평가 방법, 지하수 모델링 방법, 그리고 해수침투 관측현상 등이 포함됨.

- 문유리 등(2009)은 도서지역의 안정적 용수공급방안의 기반을 닦기 위해 용수 이용 현황 및 관리 실태를 조사하고 문제점을 분석하였음. 연구는 문헌조사와 설문조사를 위주로 수행되었음. 조사결과 공급량 기준으로는 지표수 비중이 가장 컸으나 도서 개수 기준으로는 지하수가 가장 비중이 크게 나타났음. 또한 대부분의 도서가 단일 용수원에 의존하고 있어 비상상황에 취약한 것으로 나타났음. 수원별 주요 문제점으로는 지하수의 경우 용수량 부족이나 해수침투가, 지표 저수지의 경우 유기물 유입과 높은 수온으로 인한 부영양화가, 해수담수화 시설의 경우 전문관리 부재 및 고가의 운영 유지관리비 등이 파악되었음.

- 한수영 (2003)과 박남식(2004)은 Darcy 법칙을 이용한 지하수 해안 유출량을 평가기법을 제시하였음. 한강권역을 제외한 낙동강, 영산강, 섬진강, 금강 권역에서 평가된 지하수 해안 유출량은 권역 강수 총량의 0.5%에서 3.2%로 평가되었음. 이를 바탕으로 권역의 지하수 함양율을 평가하였으며 이는 9.2%~13.4%의 범위로 나타났음.

- 박남식(2011)은 한국수자원공사에서 위탁 관리하고 있는 서남해안 도서지역 해수담수화 시설 40여 곳에 대한 비용을 분석하고 절감방안을 제시하였음. 2005년부터 5개년 동안의 비용분석 결과 유지보수비가 50.6%, 인건비가 36.9%, 그리고 에너지비가 7.8%의 순으로 나타났음. 염도는 에너지 비용에는 물론, 가장 큰 비중을 차지하는 유지보수 비용에도 직접적 영향을 끼치는 것으로 조사되었음. 담수화 비용 절감을 위해서는 저염도 원수 확보가 필요함.

제 4 절 연구개발 인프라 분석종합분석

1. 국외 기관

▌CSIRO, 호주

- 호주연방과학산업연구소 (CSIRO, Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation)는 수자원 및 환경 분야의 국립 연구기관임.

- Land and Water는 호주의 국립연구소로 ASR 관련 연구를 활발히 수행하고 있으며 총 9개의 연구 그룹으로 구성되어 있음.

- ASR 관련 그룹에는 Dillon, Pavelic, Toze 등의 연구자들이 활동하고 있음.

- CSIRO에서는 수자원 재활용 지침 및 관련 영향평가, 대수층 인공 함양 (MAR)등에 대하여 다양한 분야의 연구를 수행하고 있음. 호주에서는 특히 처리되지 않은 우수를 대수층에 주입하는 파일롯 시설을 운영하고 있으며 주입정 막힘현상, 파일롯 플랜트 운영, 수질 변화 등에 대하여 주안점을 두고 있음.

▌Schlumberger Water Services

- Schlumberger Water Services는 석유탐사 전문회사인 Schlumberger의 자회사임.

- 모회사 Schlumberger는 1900년 대 초에 프랑스에서 창립되었으며 현재 140개 국적의 80,000명의 종사자가 근무하는 거대 기업임.

- 350여 명의 종사자가 근무하는 Schlumberger Water Services는 모 기업이 보유하고 있는 유전 관련 모니터링 및 조사 기술을 기반으로 설립된 지하수 분야 자회사로 중동 지역에서 다수의 ASR 관련 프로젝트를 수행하였음. 동 사에서 제공하는 전문 서비스는 시추정 지구물리, 시뮬레이션 소프크웨어, 계측기 (Divers) 등으로 대수층 특성 파악, 지구 물리탐사, 모델링 등의 전문 영역을 가지고 있음.

▌CH2M Hill

- CH2M Hill은 1946년 미국 오레곤 주에서 설립된 종합엔지니어링 기업으로 세계 각지에 120개의 사무실을 가지고 있는 다국적 기업임.
- 주요 사업 영역에는 수자원 (지하수 포함)개발, 하폐수 관리, 환경, 플랜트, 이동 통신, 교통, 에너지 및 원자력 등으로 다양한 분야의 기술 용역을 제공함.

- ASR 관련 서비스로 타당성 조사, 현장 조사, 인허가 지원, 환경영향 평가, 설계: 대수층 함양, 수처리, 물 재이용, 파일롯 플랜트 시험, 군정 개발 및 갱생, 시공감독, 운영 및 유지관리, 교육 등을 제공하고 있음.

- 미국, 캐나다, 영국, 호주, 쿠웨이트, 사우디 아라비아, 타일랜드, 대만 등의 국가에서 ASR 적용 실적을 가지고 있음. CH2M Hill은 ASR 프로젝트의 성공을 위한 핵심 요소로 타당성 조사, 모델링, 파일롯 플랜트, O&M을 꼽고 있으며 설계와 평가의 핵심 도구로 모델링을 들고 있음.

▌ASR Systems LLC

- ASR Systems LLC은 CH2M Hill에서 30여년간 ASR 분야를 리드했던 Pyne이 2001년에 독립하여 설립한 ASR 전문 회사임.

- Pyne은 미국에서 가동 중인 ASR 시스템 중에서 약 40여개소에 대하여 직접 설계 또는 자문을 제공하였으며, ASR 기술에 대하여 널리 이용되는 단행본을 2회 발간하였음. 단행본의 기술적 내용에서는 주로 우물 자재와 스크린 설계, 막힘현상, 부식, 강도, 그라우팅 등의 관정에 대한 세부적 내용과 물리학적, 지구화학적, 생물학적 수질 변화에 대한 내용을 심도있게 다루고 있음. 지하수흐름과 수질 모델링에 대한 내용도 다루어지고 있으나 핵심 수단으로는 취급되지 않고 있음.

▌GSI Water Solutions

- GSI Water Solutions Inc.는 2000년에 오레곤 주에서 설립되어 미국의 서부 지역에서 6개의 사무실을 운영하며 무대로 활동하는 지하수, 환경 오염, 수자원 분야의 기술용역회사임.

- 다양한 ASR 관련 프로젝트를 수행하고 있으며, 약 60여명의 직원 중에서 대학원 학위 소지자가 다수 있는데 그들의 학위 논문 주제는 모니터링, 지하수 모델링, 수질 변화 조사 및 모델링, ASR 파일롯 시설 평가, 해안지역 지하수의 혼합 특성, 지하수 함양과 배출, 통합수자원 모델의 수문학적 모델개발, 대수층 불균질성의 영향, 대수층 특성 평가, ASR 타당성 조사 등을 포함하고 있음.

2. 국내 기관

▌한국지질자원연구원

- 한국지질자원연구원(KIGAM)은 국가 연구기관으로서 1918년 지질조사소로 출발하여, 국내외의 지질현황과 자원개발에 역점을 두어 왔음. 연구원장 산하에 국토지질 연구본부, 광물자원 연구본부, 석유해저 연구본부, 지구환경 연구본부가 있으며, 지하수분야의 연구는 지구환

경 연구본부에서 수행하고 있음.

- 지하수연구실에는 현재 19명의 정규 연구원과 다수의 위촉연구원이 있으며, 주요 연구분야는 지하수자원조사 및 확보 연구, 지하수순환시스템 연구, 지하수토양관련 법안 및 기초조사 연구, 지하수토양환경 보전 및 개선 연구, 지하수토양환경 평가 및 생태 연구, 먹는샘물 관련 법안 및 관리 연구 등을 수행하고 있음.
- ASR 관련 연구는 2001년부터 시작된 교육과학기술부 뉴프런티어사업인 “수자원의 지속적 확보기술 개발사업”의 일환으로 제주도 한천 유역에 인공함양지를 개발하였음. 2개의 저류지에 각각 10개씩 총 20개의 인공함양정을 설치하였으며, 함양량과 수질을 자동 모니터링 할 수 있는 시스템을 설치하였음. 이 인공함양은 ASR 기능이외에도 홍수피해 저감에 큰 목적이 있었음. 또한 2011년부터 국토해양부의 지원으로 시행중인 “수변지하수활용고도화 연구단”에서 수변 충적층 지하수의 지하수위 복원을 위하여 충적대수층에 인공함양 연구를 시작하고 있음. 이 연구에서는 수변지하수 사용량의 20% 이상을, 강우량의 50% 이상을 함양하여 지하수위를 복원시키는 것을 목표로 함.

▌한국수자원공사

- K-Water는 1967년 창립 이래 국내 물 자원의 효율적 이용과 관리를 목표로 하고 있으며, 1개의 관리본부와 3개의 사업본부(수자원사업, 수도사업, 녹색사업)로 구성되어 있음.

- 지하수관련 업무는 수자원사업본부의 조사기획처와 공사 산하의 K-water 연구원에서 수행하고 있으며, 조사기획처 지하수팀에서는 1995년부터 국토해양부에서 주관하고 있는 1:50,00 축척의 지하수 기초조사 사업을 수행하고 있으며, 최근에는 지하댐을 이용한 지하수 인공함양 사업을 추진하고 있음. K=water 연구원에서는 2001년부터 2011년까지 교육과학기술부 뉴프런티어사업인 “수자원의 지속적 확보기술 개발사업”의 일환으로 낙동강 주변에서 강변여과수 개발과 관련된 연구를 수행하였음. 2011년부터는 국토해양부 지원의 “수변지하수활용고도화 연구단”을 운영하면서 지하수 활용가치 극대화 및 기반기술 구축, 수변 충적층 지하수위 복원기술 개발, 수변지하수 대용량 간접취수 시공기술 선진화, 수변지역 지질지하수 융합에너지 활용기술 개발 등의 연구를 총괄하고 있다. 이 연구단을 통하여 충적층에서의 인공함양 기술, 낙동강에서의 강변여과수 취수 기술 등을 개발하고 있음.

▌한국농어촌공사

- 한국농어촌공사(KRCC; Korea Rural Community Corporation)는 1970년에 설립된 농어촌진흥공사와 1942년에 설립된 조선농지개발영단이 2000년에 농업기반공사로 통합된 이후에 2008년에 농어촌의 경제사회 발전에 기여를 목표로 한국농어촌공사로 확대 개편되었음.

- 한국농어촌공사는 본사에 5본부에 18처실을, 지방에 3원(본부), 9지역본부, 93지사, 6사업단을 갖춘 거대 공조직이며, 지하수관련 업무는 본사의 유지관리본부 산하 환경지질처와 지방의 농어촌연구원에서 수행하고 있음. 환경지질처에서는 농어촌 지하수개발 사업을, 농어촌연구원에서는 지하수 기술개발 연구를 담당하고 있음. 한국농어촌공사에서는 농어촌 용수개발, 오염 토양 및 지하수 정화 사업, 농어촌 저수지구축 사업 및 해안지하수 관측망 구축사업 등

을 수행하고 있으며, 인공함양과 관련된 사업이나 연구는 아직 수행하지 않고 있음.

▌한국건설기술연구원

- 한국건설기술연구원은 건설분야의 출연연구원으로 수자원 분야에서도 많은 연구 실적을 내고 있음.
- 지하수 관련 대표적 연구실적으로는 지표수와 지하수 상호작용 규명과 통합 모델링을 들 수 있으며, 미국 농무성에서 개발된 SWAT 모형과 USGS에서 개발된 MODFLOW를 복합하여 개발한 SWAT-K는 지표수와 지하수 흐름을 연계한 통합 모델로 강수의 지하수 함양 부분이 논리적으로 처리된 강점을 가짐.

제 5 절 종합분석

1. 국내외 정책 및 시장 분석

가. 시장 동향 분석

▌본 기획연구에서 수집한 인공함양 시장 동향 자료를 요약하면 표 2.48과 같음.

▌표 2.48 국내외 인공함양 시장 동향 요약

출처	국가/지역	년도	주 내용
GWI	전 세계	2010	• 2010년 현재 인공함양의 용량은 현재 380만m^3/d • 2020년 1,900만m^3/d에 달할 것으로 예상
IGRAC, UNESCO	전 세계	2012	• 전 세계 57개국 468개소의 시설에서 인공함양 시행
현대경제연구원	아시아	2009	• 물 산업이 중국을 위주로 빠르게 성장할 것으로 예측 • 아시아 국가들은 경제적 여력이 상대적으로 커 물 산업의 매력적인 시장으로 부각 • 아시아 시장의 비중은 1980년 54.9%, 1995년 58.9%였으며, 2025년에는 62.2%까지 증가할 전망 • 우리나라 물 산업의 해외 진출은 현재 세계 주요 경쟁국과 대비하여 우위를 점하고 있는 시설 및 건설 분야에 집중 • 열위에 있는 운영 및 관리 분야는 향후 가장 큰 규모의 물 산업으로 전망되어 육성과 진출이 필요한 분야
NGWA	미국	2008	• 미국 내 ASR 관정의 수는 1695개 • 캘리포니아 저수능력 100억m^3, 공급능력 6억m^3
Pyne	미국	2005	• 지하수 인공 주입은 미국에서 가장 활발히 전개되고 있음. • 1990년 이전에는 시설의 수가 10개 미만 • 2000년 대 초에는 그 수가 60에 육박 • 2005년 170여개소의 시설이 가동 중 또는 계획
EPA	미국	2009	• 미국 동북부 몇 개주를 제외한 40여개 주에 인공함양 관정이 존재
플로리다	미국	2010	• 에버글레이드 국립공원 복원 계획에 333개의 인공함양 관정, 6백만m^3/d의 인공 주입계획
Dillon	호주	2010	• 미국에 이어 세계에서 두 번째로 지하수 인공함양이 활발하게 진행 • 전역에 걸쳐 수 개소의 인공함양 시설 • 관련 연구가 국가 차원에서 활발히 진행
GWI	중동	2010	• UAE, 바레인, 카타르, 리비아, 이집트 등의 국가에서 인공함양 사업을 시행하였거나 추진 중 • 지하수 고갈 해소, 해수침투 방지 등의 목적으로 담수 또는 재활용 수 주입 • 아부다비 수전력청은 18만m^3/d의 중동지역 최대 규모의 인공함양 프로젝트를 진행
김용철	한국	2009	• 제주도 한천의 저류지에 인공함양 관정 20개 설치 및 가동 중
Fildebrandt	인도네시아	2003	• Bandung 지역 인공함양 시범 사업 시행
Ting	대만	2009	• 남부 Pintung 지역에 인공함양 시행 중
Lobo-Ferreira	포르투갈	2007	• 가뭄에 대비한 통합수자원관리 차원에서 남부 Algrave 지역에 3개 시험 시설 가동 중
Mham야	튀니지아	2007	• Mornag 대수층에 1500~37500m^3/d 재활용 수 주입
Murray	남아프리카 공화국	2010	• 아프리카 대륙에서 인공함양을 가장 활발하게 추진 중

■ 상기 표에서 나타난 바와 같이 인공함양이 일찍이 시작된 미국을 제외한 다른 국가들에서는 2000년대 들어 인공함양 시설이 급증하고 있음. 이는 인공함양 기술이 수자원확보의 새로운 수단으로 대두되고 있음을 나타내며 세계의 인공함양 시장은 도입기에 있음을 의미함.

나. 국내외 정책 동향 분석

▌표 2.49에 인공함양 관련 수집된 국내외 정책을 요약하였음.

▌표 2.48 인공함양 관련 국내외 정책

출처	국가/지역	년도	내용
현대경제연구원	아시아	2009	• 싱가폴, 일본과 한국 등이 물산업의 해외진출에 대한 국가 전략 수립. • 우리나라는 아시아 경쟁국에 비해 비교적 늦지 않은 시기에 국가 전략을 수립하였으나 이후 실제 실행 측면에서 미흡한 상황임.
EPA	미국	2009	• 인공함양은 포괄적인 EPA의 UIC program으로 적용되었으나 16개 주에서 인공함양에 대한 별도의 기준을 제정하고 있음.
NRC	미국	2003	• NRC의 물 과학 및 기술위원회 (WSTB)는 인공주입을 통한 수자원확보를 가장 높은 우선순위 주제로 선정
WA	호주	2005	• 기후변화로 인하여 높아지고 있는 물공급의 불확실성에 대응하기 위하여 수원다변화 정책을 도입함
동경도	일본	2012	• 가뭄에 대한 안전도 제고를 위하여 지하수 활용을 포함한 다양한 수원 활용에 의한 리스크 대응 전략 수립
CGB	인도	2002	• 인공함양에 대한 국가 마스터 플랜 수립 • 대상 면적은 45만km^2에 소요 비용은 4조원 초과
DWAF	남아공	2004	• 국가수자원전략 수립 • 인공함양과 그와 관련된 처리수 활용, 잉여수 지중저장, 대수층 수질 개선 등이 주요 항목으로 포함
국토해양부	한국	2012	• 지하수 법에 도시지역의 물 순환 건전성 유도를 위한 유출 지하수의 인공함양의 제도 도입
환경부	한국	1991	• 도서지역 식수원개발 사업으로 관정개발, 해수담수화, 해저관망, 정수장건설 및 관망 부설 등 지속 추진 중임

■ 미국에서는 일찍이 인공함양이 실용화되었으나 제도 수립이 뒤따르고 있는 실정임. 타 국가에서도 인공함양을 중요한 국가 수자원확보 대안으로 간주하고 있음이 여러 국가에서 2000년 대에 수립된 정책 사례에서 나타나고 있음.

2. 기술개발 동향 및 인프라 종합분석

가. 특허 동향

- 지하저수지의 핵심 요소기술인 최적설계, 운영/유지관리, 그리고 수질관리에 대한 한국, 일본, 미국 그리고 유럽에 대한 특허 조사에서 총 2200건의 유효특허가 파악되었다. 한국과 미국의 특허 출원 건수-출원인 관계는 특허출원이 <성장>단계로 나타남.
- 세부 분야에서는 전후 수처리, 주입 및 양수 관정, 대수층 오염물 저감 등 3개 분야의 특허 갯수가 50% 이상을 차지하여 주 관심 분야로 나타남.
- 상위 출원인에 의한 시장 점유율을 나타내는 CR4지표가 전 분야에서 낮은 값을 보이고 있어 특허기술이 소수에 의한 독과점 없이 분산 소유되고 있음 신규 진입에 어려움일 적음.
- 중요 특허들은 대부분은 대수층 수질 오염 저감, 관정 부속 장치 등으로 지하저수지 연구에서 추구하는 핵심 분야 설계, 운영/유지관리, 수질관리 기술과 상이함.

나. 논문 동향

(1) 시험시설 및 법/제도/경제성 연구

- 국외 연구에서 대부분의 경우 다양한 규모의 파일롯 플랜트 시험이 수행되었음. 대부분의 경우 회수율, 수질 변화 등에 초점이 맞추어져 있음.
- 담수와 해수의 상호작용에 대하여 국내외에서 많은 실험실 수리 모형 실험 연구결과가 발표되었으나 하나의 연구를 제외하고 모두 연직단면 2차원에 국한됨. 3차원 실험은 수자원의 지속적 확보기술 프론티어 사업단의 연구에서만 수행된 것으로 조사됨.
- 지하저수지 관련 법 제도 경제성 측면에서 미국, 호주, 일본, 오만 등에서 현행 제도가 지하저수지의 잠재가능성을 충분히 표출시키는 데 미흡하다는 연구가 보고되었음.

(2) 최적설계 연구

- 국내의 경우 강변여과 또는 인공함양 연구가 자유수면 충적대수층에 대한 연구가 수행된 바는 있으나 기획연구에서 추진하는 피압대수층에 대하여 연구가 수행된 바 없음.
- 주입 및 양수시스템 최적 설계 분야에서는 국내외에서 수행된 연구 실적이 파악되지 않았음. 해외에서도 모델링을 통하여 사전에 결정된 인공함양 시스템에 대한 효과를 추정하거나 현재 운영 중인 시스템의 특성을 평가하는 수준임.
- 국외에서는 대수층을 구성하는 다양한 지질매체에서의 오염물질의 변화와 저감 과정에 대한 이해가 밝음. 특히 주입수-배경지하수-지질매체 간 생지화학 상호작용 분석은 인공함양에 중요한 요소기술로 평가되고 있음.

(3) 운영 및 유지관리 연구

- 국외의 연구에서는 주입정이나 양수정에 대한 주입량, 양수량, 수질 등에 대한 항목에 정기 측정을 수행하고 운영에 반영하고 있으나 시스템 전반에 대한 체계적이고 자동화된 운영지침이 개발되어 있지 않음.
- 유지관리 측면에서는 주입정의 막힘 현상이 주요 현안임. 이에 대한 원인 분석 및 대책 등에 대하여 다양한 연구결과가 발표되었음. 국내에서도 양수정의 막힘 현상에 대한 연구가 수행

된 바 있음.

- 지하수 양수로 인한 지반침하 현상 연구는 지난 수십년간 광범위하게 수행되었으나 아직까지 신뢰할 만한 예측 도구가 개발되지 않았음. 주입으로 인한 수위 증가로 지반 융기 현상은 매우 드물게 일어나는 현상이며 이에 대한 연구는 극히 미미함.

(4) 수질관리 연구

- HACCP는 식품의 위해요소를 관리하기 위하여 개발된 기준임. 그러나 최근에는 이 기준이 수자원관리에도 도입되고 있음. 그리스의 정수장에서 수처리 및 공급과정에 대한 HACCP를 적용한 바 있음.
- 주입 전 수처리는 대수층의 오염 방지와 주입정의 막힘 방지를 위하여 시행됨. 그러나 대수층의 자연정화 능력을 고려할 때 수처리는 주입정의 막힘현상 방지에 더 초점이 맞추어져 있음.
- 국내외 강변여과의 경우 후처리에 고도처리 공정없이 일반 정수처리공정을 채택하고 있음. 미국의 경우 과반의 ASR 시설에서 별도의 수처리 없이 소독을 거친 후 용수로 공급하고 있음. 일부 ASR 시설에서는 회수 초기에 소독부산물 농도가 기준치를 초과하는 문제가 나타남.
- 지구생물리화학적 분야의 국내외 연구에서는 관정의 막힘현상과 대수층 내 수질 변화 등에 대한 연구가 다수 수행되었음. 막힘현상 방지를 위해서는 주입수 수질과 대수층 구성 물질 및 배후 지하수 간의 상관관계 분석이 중요함.

3. 동향조사 종합 결론

- 인공함양은 세계의 수자원 시장에서 물 확보를 위한 중요한 대안으로 자리잡고 있음. 실용화가 가장 먼저 진행된 미국 시장은 30여년 전부터 성장하기 시작하였으나 57개에 달하는 국가에서는 2000년대부터 활발히 시작되고 있으며 여타 국가들도 곧 도입할 것으로 예상됨.
- 우리나라의 경우 2009년에 물산업 육성정책을 수립하여 아시아권의 싱가폴보다는 뒤쳐졌지만 일본보다는 더 빨리 국가 전략을 수립하였음. 다만 실제 실행 측면에서 미흡한 상황임.
- 싱가폴은 수처리 등에서 강점을 가지고 있으나 협소한 국토의 제약으로 지하수에 대한 시장이나 기술은 거의 없음. 일본은 물산업 국가전략 수립도 우리나라에 비해 뒤쳐졌을 뿐 아니라 지하수에 대한 법령도 아직 미비한 상태로 지하수 활용에 관해서는 한국에 비하여 열위인 것으로 판단됨.
- 따라서 인공함양 등의 지하수 수자원 활용 측면에서는 아시아의 주요 경쟁국들인 싱가폴이나 일본에 비하여 우리나라가 강점을 가지고 있으므로 향후 국가 물산업 전략 등에 인공항양 등의 지하수 분야의 비중을 키울 필요가 있음.
- 해외 유수의 물 전문 기업들이 물 산업 전반에 걸친 토털 솔루션을 제공하는 것에 비해 국내 기업은 설계, 해석, 운영 및 관리 경험이 절대적으로 부족함. 토탈 서비스를 요구하는 최근의 국제 물 산업의 조류에 대응하지 못할 시 최악의 경우 기존의 경쟁력을 지닌 시설 및 건설이 해외 시장에서 매력을 잃거나 해외 주요 물 기업의 하청으로 전락할 수 있음.
- 기술적 측면에서는 대수층 특성평가, 관정막힘 현상 대처, 관정 설비 및 시공기술, 대수층 수

질특성평가, 현장시험기술 등에서 국외 기술이 국내기술에 비하여 앞서 있는 것으로 판단됨.

- 그러나 지하저수지를 구성하는 시스템 전체 요소 (펌프, 관망, 주입정, 대수층, 양수정 등)에 대한 최적 시스템 설계기술과 통합운영기술은 국내외에서 개발된 바 없으나 국내에서 최적설계와 통합운영을 위한 기술 기반을 갖추고 있음.
- 따라서 열위에 있는 분야의 기술과 뒤처지지 않은 분야에 대한 별도의 전략 수립을 통하여 접근할 필요가 있음.

제 3 장 연구개발과제 구성 및 추진전략

제 1 절 비전 및 목표

1. 비 전

▌지하 저수지 연구의 비전은 다음과 같음.

비 전

국민들이 믿을 수 있는 청정 수도 원수 공급 및 세계 최고 수준의 지하 저수지 토탈 솔루션 기술 확보

▌ 비전 달성을 위한 연구진의 미션은 다음과 같음.

미 션

청정 지하 저수지 설계, 구축, 운영 및 유지 · 관리 기술개발과 검증

2. 연구의 목표

▌비전 달성을 위한 금 번 연구의 목표는 다음과 같음.

목 표

- **저수량 천만m^3 이상 – 일 생산량 십만m3/d 이상 성능의 대규모 청정 지하 저수지 설계, 구축, 운영 및 유지관리 기술 개발**
- **시험 시설에서 저수량 백만 m^3 이상 – 일 생산량 2천m^3/d 구현 및 기술 검증**
- **건기에 30일간 50m^3/d 이상 생산 가능한 우기주입-건기회수 지하 저수지 설계, 구축, 운영 및 유지관리 기술 개발**

3. 연구의 목적

▌본 연구의 목적의 다음과 같음.

목 적

기후변화 등의 수문환경 변화 시에도 믿을 수 있는 청정 용수 생산과 저수량 확보를 위한 지하 저수지의 경제적 구축 기술 개발

- 우리나라는 생활용수를 거의 대부분 지표수에 의존하고 있음. 그러나 지표수는 가뭄 등의 기상 변화나 수질 사고 등에 그대로 노출되어 물 공급의 안정성에서 취약함.

- 일부 지역에서는 원수의 불량한 수질이 수돗물 불신의 주요 원인이 되기도 하는 실정임. 또한 기후변화는 향후 가뭄의 빈도와 강도를 증대시킬 것으로 예상되어 수질 및 수량 문제를 더욱 악화시킬 것으로 예상됨.

- 본 연구의 목적은 지표수를 대수층에 인공적으로 주입하고 하류에서 양수하여 대수층 유하과정의 자연 정화기능을 이용하여 양질의 청정 원수를 생산하고, 상당량의 지하 저수량을 확보하여 장기간의 가뭄이나 지표수 수질 사고 시에도 안정적 취수가 가능한 청정 지하 저수지를 설계, 구축 및 운영 기술을 개발하는 데 있음.

제 2 절 기술개발에 따른 미래상

1. 현황 및 미래상

▌본 기술개발이 성공하면 여러 가지 측면에서 다음의 미래상이 기대됨.

정 책

분 야	현황(As is)	미래상(To be)
국가 물 안보도	대부분의 용수원을 지표수에 의존하므로 물 안보도가 취약함.	용수원을 다양화하므로 물 안보도가 제고 됨.
국토 활용	지표수 취수원 구역 주변은 상수원보호구역으로 지정되어 경제활동이 크게 제약됨.	점토층 등으로 지표면 활동과 차단된 지하 저수지의 경우 상수원보호구역 지정이 필요 없이 국토의 입체적 활용이 가능함.

재난대응

분 야	현황(As is)	미래상(To be)
수질 사고시	하천 등에서 수질 사고 시 취수 중단 등의 어려움을 겪음.	하천 등에서 수질 사고가 발생해도 상당 기간 안정적 취수가 가능함.
기후변화 (장기 가뭄)	대도시와는 달리 많은 해안 및 도서 그리고 산간지역에서는 빈곤한 물 부족을 겪음.	장기 가뭄 시에도 상당 기간 안정적 취수가 가능하며 수질도 양질을 유지함.
재난 시	행정 경계를 넘는 물 이전으로 지역 간 갈등이 큼.	지하저수지는 지표수 및 지표 환경과 격리되어 재난 시에도 수량과 수질이 안정적으로 관리됨.

물 산업

분 야	현황(As is)	미래상(To be)
신기술	지하 저수지에 대한 설험적 연구는 해외에서도 시작단계이나, 최적 설계 및 운영에 대한 연구는 전무한 실정	지하 저수지 시스템 최적화 연구로 세계적인 경쟁력을 갖추고 새로운 시장을 리드할 수 있음.
물 산업	현재 물 산업은 지표수 수처리, 해수 담수화 정도에 집중되어 있음.	물의 가치를 더욱 높일 수 있는 물 분야의 신 산업이 창출됨.

사회적

분 야	현황(As is)	미래상(To be)
물 만족도	많은 지역 원수의 불량한 수질로 수돗물 불신 가중 (예: 부산시 취수원 낙동강 하류 수질은 II등급 또는 III등급임.)	청정 지하 저수지에서 취수한 원수는 거의 그대로 음용이 가능한 1급수 수질을 가지므로 수돗물의 사용자 만족도가 높아짐.
물 부족	대도시와는 달리 많은 해안 및 도서 그리고 산간지역에서는 빈곤한 물 부족을 겪음.	지역별로 소규모 지하 저수지를 설치하여 물 부족 현상을 상당 부분 해소함.
지역갈등	행정 경계를 넘는 물 이전으로 지역 간 갈등이 큼.	지역 내 지하 저수지 설치로 지역 간 갈등이 해소됨.

기술적

분 야	현황(As is)	미래상(To be)
정수공정	원수가 불량하므로 많은 화학약품과 복잡한 정수공정이 필요하며, 에너지 사용량과 비용이 많음.	청정 지하 저수지에서 취수한 원수는 소독 등의 간단한 정수과정만 필요로 함.
지표수 저수지 용량 감소	저수지의 퇴적 현상으로 용량이 지속적으로 감소함.	지하 저수지의 저수량은 거의 감소가 없으며, 비상용량은 가동 기간에 따라 증대될 수 있음.

2. 기술개발 전략 및 효과

가. 기술개발 전략

지하저수지의 내외부 여건에 대한 SWOT 분석 결과는 다음과 같음.

▌SWOT 분석

Strength	Weakness
■ IT기술 및 관련 인프라 국제 경쟁력 확보 ■ 충적대수층에서의 지하수 수위, 유동 및 수질에 대한 조사/연구 경험이 많음. ■ 관망 연결 최적화에 대한 경험 보유 ■ 해수침투 제어를 위한 담수 주입정과 해수 양수정에 대한 최적설계 경험 보유 ■ 2, 3차원 실험실 수리모형 해안지하수 실험 경험 축적 ■ 수처리 기술 경쟁력 높음 ■ 외부 여건 등에 대한 빠른 적응력	■ 폐색이 일어날 수 있는 청정지하저수지 주입정의 운영관리에 대한 현장운영경험 부족 ■ 청정지하저수지 통합운영관리 경험이 있는 전문 기업의 부재 ■ 지하수 양수를 위한 지반변형 감지 및 대응시스템의 운영경험 부족 ■ 대하천 하구 퇴적층에서의 지하수 개발 경험 부족 ■ 인공주입수 전/후 처리에 대한 현장적용 경험 부족 ■ 유해물질 모니터링 및 오염물 대수층 내 수질예측기술은 적용 초기단계임
Opportunity	**Threat**
■ 기후변화 또는 도시화의 영향으로 기존 수자원의 고갈, 갈수기 수량부족, 그리고 수질 악화로 인한 안정적인 대체수자원 개발 요구 증대 ■ 물산업 개발 및 관련기술의 국제 경쟁력 제고를 위한 정부 투자 증대 ■ 주입정-채수정-펌프-관로의 최적화 시스템 구축에 대한 연구는 국내외적으로 미미하며 향후 연구가 집중될 것으로 예상 ■ 기존 인공주입 수질관리 분야에서는 주입수 및 처리수 수질 위주의 연구로 수행. 향후 범위가 넓어질 것으로 예상됨 ■ 안정적인 대체수자원 확보 ■ 극심한 가뭄이나 수질사고 시에도 비상 급수원으로서의 역할 가능 ■ 대수층 조건에 따라서 대용량 생산이 가능 ■ 자연재해나 테러로부터 비교적 안전한 대체수자원 확보 ■ 기존 정수처리 공정에 비해 높은 수처리 효율 나타냄. ■ 타 대체수자원 공정(해수담수화, 하수 재이용)에 비하여 낮은 에너지 비용 ■ 기존 인공함양에 비하여 대용량 처리수 생산 가능	■ 해수담수화 및 하수재이용 기술 등의 대체수자원 확보를 위한 기술 확보됨. ■ 국내외 업체의 인공함양 현장 적용 및 운영기술 확보 ■ 에너지 비용 및 원자재 가격의 상승 (그러나 타 대체수자원에서 더 높은 비용 상승 이 예상됨) ■ 대하천 하구 퇴적층은 분포 면적이 넓고, 심도가 깊어 대수층 특성의 정확한 평가 가어려움 ■ 대하천 하구의 델타층에 퇴적된 자갈 및 점토는 하부 암반층과 부정합(Unconformity)의 관계로서 최소 1 만년 전에 퇴적이 되었고, 또한 상부퇴적층(두께 20~40m)의 압력에 의한 다짐으로 투수성이 낮을 수 있음. ■ 기존 상수도 서비스 품질에 대한 낮은 신뢰도

■ SO 전략

- IT 융합 수처리 기술을 통한 자동화 운영관련 경쟁력 확보
- 전/후처리 최적 시스템 개발을 통한 중대용량 플랜트 구축기술 확보
- 신뢰성 있는 먹는물 생산을 위한 객관적인 수질관리 및 활용 시스템 개발
- IT 융합 유지관리 기술을 통한 자동화 운영관리 경쟁력 확보
- 청정지하저수지 최적유지관리 시스템 개발을 통한 중대용량 생산기술 확보
- 비상 시(가뭄, 수질사고, 자연재해, 테러, 등) 생산을 위한 유지관리 시스템 개발
- 대하천 하구나 주변 퇴적층의 형성과정에 대한 연구
- 대하천 하구 퇴적층에서 지하수개발을 위한 부지특성 평가 기술연구
- 주입정-채수정-펌프-관로의 최적화 시스템 구축 설계 능력 극대화
- 이상의 기술확보를 통한 국제수준의 경쟁력 확보

■ WO 전략

- 현장경험을 확보를 위한 인력 확보 및 양성
- 대수층 미생물의 활성도 유지 기술을 통하여 대수층 내 오염물 처리 효율의 안정성 확보
- 특성 평가된 수처리 기술 개발을 통한 국제수준의 경쟁력 함양
- 축적된 현장경험이 있는 인력양성 및 확보
- 주입정 폐색 시 운영관리시스템을 개발함으로서 지속적인 생산기술을 개발
- 지반변형 감지 및 대응 시스템 개발을 통한 안정적인 생산시스템을 개발
- 대하천 하구나 주변 퇴적층의 형성과정에 대한 연구에는 지질조사이외에도 지구물리탐사, 동위원소 분석, 수지구화학적 분석 연구능력 제고
- 대하천 하구 퇴적층내에서 주입수-배경지하수-대수층간의 물리·지화학적 반응 모델의 개발과 시뮬레이션 연구 수행
- 이상의 기술확보를 통한 국제수준의 경쟁력 함양

■ ST 전략

- 시험설비를 통한 에너지 소비량 평가 및 수질의 안정성에 대한 연구 수행 (낮은 에너지 소비량/ 수질의 안정성 확보)
- 대용량 시스템 운영이 가능한 전/후처리 기술 연구
- 전/후처리 시설이 연계된 최적 설계기술 도출을 통한 경제성 확보
- 대수층 지질구조에 따라서 생산용량이 결정되고 인위적인 생산용량조절에는 한계가 있으나 지속가능하고 안정적인 대체수자원 운영기술의 확보
- ASR 또는 ASTR 시스템 보다는 청정지하저수지 시스템이 에너지 비용이 더 들지만 지속적이고 안정적이면서 비상 시(가뭄, 수질사고, 자연재해, 테러, 등)에도 생산할 수 있는 운영기술 확보
- 대용량의 지하수 저류량 확보 연구 수행
- 모래나 자갈층의 코아회수연구 수행
- 이상의 기술확보로 위협요소 극복을 통한 국제수준의 경쟁력 함양

■ WT 전략

- 현장 위주의 청정지하저수지 기술개발을 통한 시공, 운영, 유지관리 기술 및 전문기업 확보
- 실시간 모니터링된 수질과 연계된 전/후처리 공정 실증연구를 통하여 최적 수처리 시스템 도출
- 센싱 및 수처리 기술의 융합을 통한 처리수질의 신뢰성 확보
- 개발된 타 대체수자원 기술들보다 지속적이고 안정적인 대체수자원 확보 기술이나 청정지하저수지 시스템 운영관리를 위한 플랫폼 및 모듈설치와 현장운영경험축적
- 강변여과시스템에서도 일어나는 주입정 폐색과 지반변형 감지 및 운영관리시스템 경험이 있는 전문기업 육성
- 대하천 하구 퇴적층의 분포 면적이 넓고, 심도가 깊어 부지특성에 대한 정밀 조사/연구 능력 제고
- 온도, 전기전도도 등의 항목 외의 수질 인자 장기모니터링 능력 제고
- 이상의 기술확보로 위협요소 극복과 약점 보완으로 국제수준의 경쟁력 함양

▌본 연구의 목표를 성공적으로 달성하기 위하여 현장 중심으로 연구를 수행하되 기술 경쟁력 확보를 위하여 지하저수지의 설계, 구축, 운영 및 유지관리 등 전 분야에서 원천기술을 확보하는 전략으로 연구를 추진하며, 본 연구의 기술개발 핵심 전략은 다음의 두 가지로 요약됨.

■ 현장 중심 연구
■ 핵심 기술별 원천기술 확보

▌상기 핵심 전략은 다음의 전략적 접근 방법으로 실행됨.

■ 국내외 학연산관 전문가 최대한 활용
■ 세부과제 및 협동과제의 유기적 연계
■ 수도 및 지하수 분야 산업체의 적극적 참여 유도
■ 중앙정부, 광역 및 기초 지방자치 정부와 긴밀한 협조

나. 기술개발 효과

▌본 연구에서 추구하는 지하저수지 관련 기술의 개발이 성공하면 다음의 기술개발효과가 기대됨.

■ 소극적 활용에 그치던 지하수 수자원과 대수층의 적극적 활용을 수자원 이용효율 극대화
■ 지역 내 지하 저수지 설치로 지역 간 갈등요소 해소
■ 수질 사고, 장기 가뭄 등의 재난 시에도 상당 기간 깨끗한 물을 안정적으로 공급
■ 물의 가치를 더욱 높일 수 있는 물 분야의 신산업 창출
■ 지하저수지 시스템 최적화 연구로 세계적인 경쟁력을 갖추고 새로운 시장 리드

제 3 절 연구개발과제 구성

▌충분한 저수량을 확보하며 수질이 자연 개선된 용수를 제공하기 위한 청정 지하저수지 개발기술연구는 다음과 같은 주요 분야로 구성됨.

▌표 3.1 세부 및 세세부과제

세부과제명	세세부과제(안)	기획과제 RFP 항목
총괄	• 청정 지하저수지 구축을 위한 통합기술 • 시험설비 구축 및 운영 • 지하저수지 관련 법, 제도 및 경제성 연구	⑦
1세부: 대하천 하구 퇴적층에서 저수량 1,000만㎥ 확보를 위한 최적설계 기술	• 대하천 하구 퇴적층 부지 특성 평가 기술 • 주입 및 양수 시스템 최적 설계기술 • 지하저수지 모니터링 시스템 설계기술 • 주입수 거동 및 수질 평가 기술	①, ②, ⑦
2세부: 정지하저수지 운영 및 유지관리 기술	• 지하 저수지 통합 운영 기술 • 비상 시 지하 저수지 운영 기술 • 시스템 유지관리 기술 • 지반변형 해석 및 방지(저감) 기술	③, ⑦
3세부: 청정용수 공급을 위한 수질관리 및 활용기술	• 음용수로서의 신뢰도 확보를 위한 청정 지하저수지의 수질 위해요소 사전관리기술 • 청정 지하저수지의 지속가능한 운영을 위한 주입수 전처리 기술 • 먹는물 공급을 위한 플랜트 최적 설계 · 운영 · 유지관리 통합 기술 • 물리 · 지화학적 대수층 수질의 개선 특성 평가 기술 개발 • 대수층 수질의 생물학적 개선특성 평가기술	③, ④, ⑤
4세부: 건기에 30일 이상-50m^3/d이상 생산능력의 지하저수지기술개발	• 우기주입-건기회수 지하저수지 설계 기술 • 소규모 지하저수지 운영 및 유지관리 기술	⑥, ⑦

▌기획과제 RFP에 제시된 연구범위는 다음과 같음.

① 지하 저수지 적지 및 규모 평가기술
② 소요 시설은 최소화하며 효과를 극대화하기 위한 최적 설계 및 운영 기술
③ 지하저수지의 성능 유지에 핵심적인 주입량 유지 기술
④ 주입량 유지 관리를 위한 맞춤형 주입 전 수처리 기술 및 안전한 용수 공급을 위한 양수 후 수처리 기술
⑤ 대수층의 수질 개선 특성 평가 기술
⑥ 지표수가 절대 부족한 지역에 대한 우기 주입과 건기 회수 기술
⑦ 제 기술들의 검증과 보완을 위한 시험설비 운영 및 수리모형 실험

▌시험 시설 연구에서 적용한 기술에 대한 지하수의 반응이 나타나는 데 시간이 수개월 이상이 걸리는 측면을 고려할 때 5년의 연구 기간이 충분하다고 할 수 없으며 대부분의 세세부과제를 5년간 추진해야하나 세세부과제의 기술 내용과 선후 순위를 고려한 연구 중점 추진 기간은 다음 표와 같이 제시될 수 있음.

▌표 3.2 과제별 연구 중점 추진 기간

	연차				
	1	2	3	4	5
총괄					
총괄-1 청정지하저수지 구축을 위한 total solution 개발			■	■	■
총괄-2. 시험설비 구축 및 운영	■	■	■		
총괄-3. 지하저수지 관련 법, 제도 및 경제성 연구			■	■	■
1세부 대하천 하구 퇴적층에서 저수량 1,000만㎥ 확보를 위한 최적설계 기술					
1-1 대하천 하구 퇴적층 부지 특성 평가 기술	■	■	■		
1-2 주입 및 양수 시스템 최적 설계 기술	■	■	■		
1-3 지하저수지 모니터링 시스템 설계기술		■	■	■	
1-4 주입수 거동 및 수질 평가 기술			■	■	■
2세부 청정 지하저수지 운영 및 유지관리					
2-1 지하 저수지 통합 운영 기술		■	■	■	
2-2 비상 시 지하 저수지 운영 기술		■	■	■	■
2-3 시스템 유지 관리 기술	■	■	■	■	
2-4 지반변형 해석 및 방지(저감) 기술		■	■	■	■
3세부 청정용수 공급을 위한 수질관리 및 활용기술					
3-1 청정 지하저수지 수질위해요소 사전 관리 기술	■	■	■		
3-2 지하저수지의 지속가능 운영을 위한 주입수 전처리		■	■	■	
3-3 먹는 물 공급을 위한 플랜트 최적 설계·운영·유지관리 통합		■	■	■	
3-4 물라지화학적 대수층 수질의 개선 특성 평가			■	■	■
3-5 대수층 수질의 생물학적 개선특성 평가			■	■	■
4. 건기에 30일 이상-50m^3/d 이상 생산능력의 지하저수지 기술					
4-1 우기주입-건기회수 지하저수지 설계	■	■	■		
4-2 한국형 소규모지하저수지 운영 및 유지관리		■	■	■	

▌본 연구에서 추진하는 과제별 핵심 기술과 핵심 성과물은 표 3.3에 제시되어 있음. 상세한 내용은 4절과 6장에 제시되어 있음.

▌표 3.3 과제별 핵심 기술 및 성과물

	핵심기술	핵심 성과물	비고
총괄			
총괄-1 청정지하저수지 구축을 위한 total solution 개발	• 요소 기술의 집적	• 지하저수지 토탈 솔루션 매뉴얼	
총괄-2. 시험설비 구축 및 운영	• 요소 기술의 집적	• 목표 수준의 시험 설비 • 시험설비 운영실적 보고서	
총괄-3. 지하저수지 관련 법, 제도 및 경제성 연구	• 전략 수립 기술	• 정책 및 제도 개선 안 • 시장 진출 전략보고서	
1세부 대하천 하구 퇴적층에서 저수량 1,000만m^3 확보를 위한 최적설계 기술			
1-1 대하천 하구 퇴적층 부지 특성 평가 기술	• 대규모 충적 피압대수층 부지특성화 기술	• 부지특성 평가 매뉴얼	
1-2 주입 및 양수 시스템 최적 설계 기술	• 펌프-관망-관정-대수층흐름최적 전산설계기술	• 주입-양수시스템 최적설계매뉴얼	
1-3 지하저수지 모니터링 시스템 설계기술	• 관정-관망-대수층 수압-유량-수질 측정 및 평가 기술	• 모니터링시스템 최적설계 매뉴얼	
1-4 주입수 거동 및 수질 평가 기술	• 주입수 수리역학적 거동 및 수질개선 분석 기술	• 주입수 거동 및 수질 평가 매뉴얼	
2세부 청정 지하저수지 운영 및 유지관리			
2-1 지하 저수지 통합 운영 기술	• 시스템 전반적 운영 및 관리기술	• 지하 저수지 개발 시스템 전반적 운영 가이드라인	
2-2 비상 시 지하 저수지 운영 기술	• 비상 시 대응 및 운영 기술	• 지하저수지 비상 시 운영 가이드라인	
2-3 시스템 유지 관리 기술	• 주입정 및 양수정과 전체시스템 유지관리 기술	• 주입정 및 양수정과 전체 시스템 유지관리 매뉴얼	
2-4 지반변형 해석 및 방지(저감) 기술	• 지반변형 예측과 분석 및 저감을 위한 기술	• 지반변형 예측과 분석 및 저감을 위한 기술 유지관리 매뉴얼 및 특허	
3세부 청정용수 공급을 위한 수질관리 및 활용기술			
3-1 청정 지하저수지 수질위해요소 사전관리 기술	• 수질 관리 및 대응기술	• 수질위해요소 사전관리 매뉴얼	
3-2 지하저수지의 지속가능 운영을 위한 주입수 전처리	• 주입수 수처리 공정 설계·운영 기술	• 전처리 시설 설계 및 운영 매뉴얼	
3-3 먹는 물 공급을 위한 플랜트 최적 설계·운영·유지관리 통합	• 정수처리 공정 설계·운영 기술	• 정수처리 시스템 설계및운영 지침	
3-4 물라지화학적 대수층 수질의 개선 특성 평가	• 주입수의 대수층 이동에 따른 수질 변화 예측 기술	• 대수층 오염물 거동 및 예측 프로그램	
3-5 대수층 수질의 생물학적 개선특성 평가	• 미생물에 의한 주입수 수질 변화 예측 기술	• 생분해 평가기술 및 모델	
4. 건기에 30일 이상-50m^3/d 이상 생산능력의 지하저수지 기술			
4-1 우기주입-건기회수 지하저수지 설계	• 전산 최적설계기술	• 우기주입-건기회수 지하저수지 설계 매뉴얼	
4-2 한국형 소규모 지하저수지 운영 및 유지관리	• 회수율 극대화 운영 기술	• 우기주입-건기회수 지하저수지 운영 및 관리 매뉴얼	

제 4 절 세부과제별 주요내용 및 추진전략

1. 총괄과제 (청정 지하저수지 통합개발 기술)

가. 총괄-1 청정지하저수지 통합개발 기술

(1) 연구개발 목표

▌핵심 요소기술들의 상호 호환성을 확보하고 연구성과들을 통합하여 지하저수지 토탈솔루션 구축

(2) 연구개발 및 정부지원 필요성

▌ 청정 지하저수지에 대한 통합기술 개발을 위해서는 여러 가지의 요소 원천기술의 개발이 필요함. 요소기술들을 통합하여 통합기술을 구성하기 위해서는 요소기술연구의 결과는 물론 연구과정이 상호 유기적으로 진행되는 것이 매우 중요하며, 총괄과제에서는 각 세부과제의 연구가 유기적으로 상호연계되어 진행되도록 세부과제들을 총괄하고 요소기술들을 통합하여 통합기술을 개발하여야 함.

▌총괄과제에서 수행하는 기술적 측면의 세부과제들에서 개발되는 원천기술들의 연구 과정과 결과, 그리고 시험설비 검증 과정을 총괄하고, 지하저수지의 원활한 보급을 위한 제도적 연구의 지원에는 민간보다는 정부의 역할이 더 커야함.

(3) 연구 주요 내용

▌시스템 통합 기술 개발

- 세부과제에서 개발된 요소 기술들의 집적을 통한 통합기술 개발
- 청정 지하저수지 설계, 구축, 운영 및 유지관리 매뉴얼 작성

▌통합 기술 검증

- 실험실 수리모형 구축 및 예비 평가
- 세부기술 검증결과 통합 및 보완 연구 관리
- 설계저수량 및 생산량 평가

▌연구단 운영

- 세부과제 진행 상황 평가 및 연계
- 연구단의 세부과제 별 연구 상황 모니터링 및 관리
- 성과 홍보
- 자문위원회 및 기획위원회 운영

- workshop 및 conference 개최
- 연구목표의 연차별 단계별 달성 점검

(4) 최종 성과물

- 청정 지하저수지 설계, 구축, 운영 및 유지관리 매뉴얼
- 통합 기술검증 보고서
- 총괄과제에서는 나머지 4개 세부과제의 연구가 상호 유기적으로 진행될 수 있도록 지원하고 관리하여 궁극적으로 연구단의 연구목표를 성공적으로 달성하는 데 있음.

나. 총괄-2 시험설비 구축 및 운영

(1) 연구개발 목표

- 백만㎥ 규모의 저수량과 2,000㎥/d 규모의 시험설비 구축

(2) 연구개발 및 정부지원 필요성

- 청정 지하저수지는 다양한 원천기술들이 체계적으로 적용될 때 그 효과가 극대화됨. 따라서 시험시설을 통한 원천기술의 검증이 필요하며, 그 과정에서 원천기술의 보완과 개선도 필수적임. 하나의 시험시설에서 시도될 원천기술들의 연구내용과 범위, 일정, 목적 등이 다양하므로 전체 시험과정에 대한 관리가 필요하며, 이를 위하여 시험시설의 구축 및 운영을 총괄과제에서 진행해야 함.

(3) 연구 주요 내용

▌본 연구에서 개발될 기술들의 현장 적용성 검증과 보완을 위하여 시험설비에서의 기술 검증이 필수적임.

▌시험설비 구축 및 운영

- 부지 선정 및 조사
- 시험설비 인허가
- 세부과제 기술 검증 업무 지원
- 시험설비 운영
- 시험설비 성능 분석

▌홍보시설

- 수리모형 설치
- 홍보 동영상 제작
- 대민, 대관, 대언론 홍보 전략 수립

(4) 최종 성과물

- 백만㎥ 규모의 저수량과 2,000㎥/d 규모의 시험설비
- 시험설비 운영 실적 보고서
- 홍보관 운영 및 실적 보고서

다. 총괄-3 청정지하저수지 개발 및 운영에 대한 모델 법·제도(안) 및 경제성 평가 가이드라인 개발

(1) 연구개발 목표

- 본 과제의 주요 연구목표는 청정지하저수지의 원활한 사업개발 환경 및 지속가능한 운영 여건 마련을 위한 모델 법제도(안) 개발과 이에 필요한 경제성 평가 지침을 개발하는 것임.

- 효율적 법제도 구축과 경제성 평가지침의 개발은 중앙 및 지방정부, 민간기업 간 성공적 청정지하저수지 개발, 주입, 저장, 양수 및 지속적 운영을 위한 최적의 참여주체간 역할 및 책임 규명, 기술적, 행정적 행동 방침을 제공하며, 궁극적으로는 청정지하수 개발 및 운영 시장에 민간자본의 참여를 활성화하여 성공적인 해외 대체수자원확보 시장 참여 진출을 위한 토대를 구축함.

(2) 연구개발 및 정부지원 필요성

- 대수층 함양관리[인공함양]에 대한 전 세계적으로 20여 가지가 넘는 다양한 활용사례와 성공 및 실패 사례 등이 존재하며 (MAR, 2011; GWI March, 2010), 인공함양 개발기술의 필요성과 활용가치가 점점 커짐에 따라 이에 대한 지침, 법제도, 정책적 연구가 필요함.

- 청정지하저수지 개발 및 운영은 다양한 기관간의 여러 기술적, 행정적 작업 요소 (표 3.1 참조)를 포함하고 있으므로 효율적이고 적법한 권한 및 책임 분담이 필요하며, 이러한 일련의 작업들이 표층수 관리와 지하수 관리로 이원화된 현재의 법제도 체계 내에서 양립할 수 있는 법제도(안) 개발이 필요함.

- 사전예측에 따른 획일적인 청정지하저수지 관련 법제도 및 인허가 시스템은 최근의 기후변화에 따른 예측 불허한 기후조건하에서는 청정지하저수지의 효율성을 반감시킬 수 있으므로 지자체별 다양한 편익과 위험요인을 고려한 유연한 의사결정방안을 고려한 법제도 개발이 필요함.

- 수자원 소유 및 사용권한에 대한 명확하고 체계적인 법제도가 확립되지 못하였을 경우 청정지하저수지 개발에 대한 투자 및 사업 여건 미조성으로 청정지하수의 도입을 통한 혜택을 기대할 수 없음. 또한 각종 분쟁 및 클레임 해결책 마련에 참여자간 부가적인 금전적 손해가 발생함.

■ 청정 지하저수지의 성공적 보급을 위해서는 나머지 세부과제에서 다루는 기술적 측면 외에도 법적 제도적 뒷받침이 따라야 함. 이를 위해서는 현행 법령의 분석과 지하저수지 보급 활성화를 위한 정책연구가 필요하며 이 연구는 총괄과제에서 수행되는 것이 이상적임.

- 물산업의 경우 정부에서 차세대 성장동력으로 육성하고 있고, 세계적으로 물시장의 규모가 연평균 4.9%정도 증가하고 있어, 새로운 원천기술 개발로 인한 물산업 진출 기틀 마련함.
- 기존 수자원개발과의 경제성평가를 통하여 사업의 타당성을 확보함.
- 정부 및 기업관계자들의 실제 사업화를 위한 의사결정여부를 판단할 객관적 지표로 활용함.
- 해외시장 사업화 가능성 타진 및 사업화 방안 검토하여 새로운 국부를 창출함.
- 기존 도서지역의 물부족을 해소하기 위한 정부의 투자비용(환경부의 「도서지역 식수원개발사업」등) 절감을 위한 방안을 제시함.
- 물산업 파급효과(고용증대효과, 산업유발효과 등)을 분석하여 무역수지개선(수입대체, 수출증대효과 등)과 같은 간접적인 효과를 기대할 수 있음.

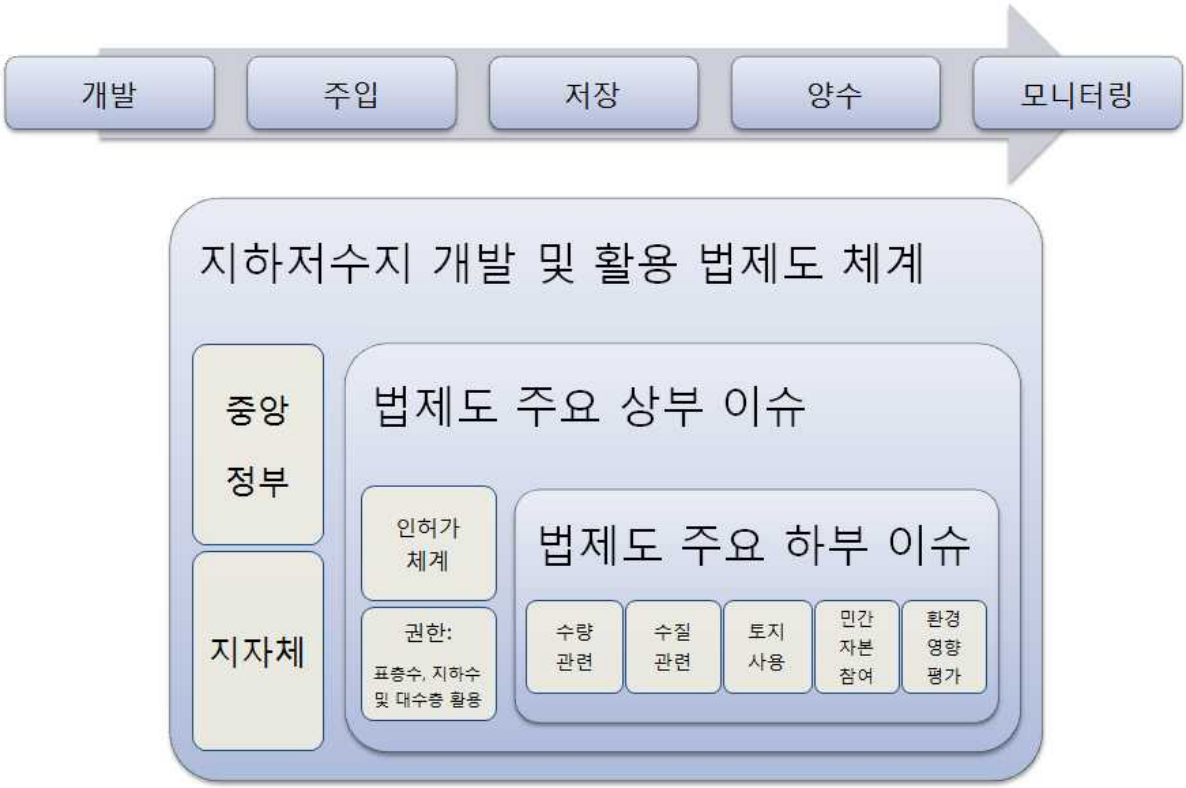
(3) 연구 주요 내용

▌청정지하저수지 개발 및 운영 관련 모델 법제도 및 경제성 평가 가이드라인 개발 연구는 다음과 같은 2가지 주요 연구항목으로 구성됨.

■ 청정지하저수지 개발 및 운영 관련 모델 법제도 개발

- 해외 청정지하저수지의 다양한 활용 및 응용 사례, 성공적 활용 및 실패사례 조사를 통한 핵심성공요인과 실패요인 도출
- 청정지하저수지 개발, 주입, 저장, 양수, 모니터링 및 지속적 운영에 필요한 제반 법제도 구축 현황 해외 사례 조사 (폐수 재활용, 우수, 담수 등의 재이용 관련 법제도 필요시 추가)
- 지속가능한 청정지하저수지 개발 및 활용 모델 법제도(안) 개발

■ 지하저수지 보급을 위한 정책 제안



▌그림 3.1 청정지하저수지 개발 및 활용 법제도(안) 체계

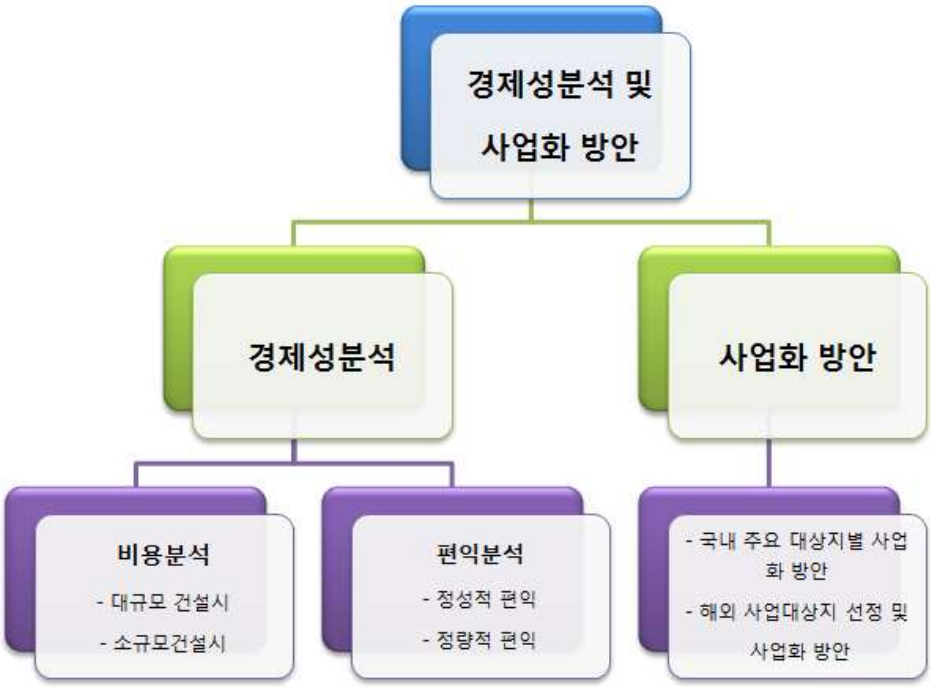
▌청정지하저수지 개발 기술의 경제성 평가 가이드라인 및 사업화 방안 구축

■ 청정지하저수지개발기술의 비용분석
- 프로젝트 규모별 (, 소규모) 개략공사비 추정
- 유지관리 비용항목 선정 및 단가 추정
- 해외사업 개발 관련 사업비 추정

■ 청정지하저수지개발기술의 편익분석
- 정성적 편익 (안전한 수원확보, 물안보 제고, 도서지역의 물부족 해소, 깨끗한 수질로 인한 수원의 불신제거 등)
- 정량적 편익 (생산비용 절감측면, 수질개선에 따른 소비자의 지불의사 비용등)

■ 청정지하저수지 경제성 평가 가이드라인 개발
- 해외 선진 사례 청정지하저수지 경제성 평가 가이드라인 조사
- 국내 사회적, 경제적 특수성을 고려한 경제성 평가 가이드라인 개발

■ 청정지하저수지개발기술의 사업화 방안
- 국내 주요 개발사업부지 대상지별 경제성 평가 및 사업화 방안 검토
- 해외 유망지역 선정 및 시장진출 전략 도출
- 지하저수지 실용화 및 미래 부가가치 극대화 방안
- 지하저수지 적용을 위한 법 및 제도 분석 및 개선방안 도출
- 연구성과의 실용화
- 개발기술의 부가가치 극대화 방안
- 경제적, 사회적, 문화적 효과 분석 및 극대화 방안



▌그림 3.2 경제성 평가 및 사업화 방안 연구 범위

(4) 최종 성과물

■ 및 소규모 청정지하저수지 경제성 평가 가이드라인
■ 국내외 유망지역 선정 및 시장진출 전략
■ 물산업 파급효과 분석 보고서

라. 성과지표

성과목표	성과지표		측정방법	단계별 목표치					최종목표치	가중치(0~1)	비고
				1	2	3	4	5			
과학기술적 연구 성과 향상	1-1	학술지 게재-SCI/SCI(E)	건	0	0	0	0	0	0	1	
	1-2	학술지 게재-일반학술지	건	0	0	0	0	0	0	0.4	
	1-3	국내외 학술회의 발표	건	0	0	0	0	0	0	0.2	
	1-4	지식재산권-특허, 소프트웨어	건	0	1	0	1	0	2	2	
기술개발역량 향상	2-1	과제당 산학연 협력 활동건수	건	0	0	0	0	0	0	0.2	
	2-2	산학연 기술지원 건수	건	0	0	0	0	0	0	0.2	
	2-3	세부과제 평가보고서 (고유지표)	건	1	1	1	1	1	5	2	
	2-4	관련분야 국제협력 네트워크 구축 (고유지표)	건	0	1	1	1	1	4	0.4	
사회경제적 파급효과증대	3-1	연구개발 관련 홍보 건수	건	2	3	4	3	3	15	0.4	
	3-2	기술확산을 위한 상호교류 정도	건	1	0	0	0	0	1	0.6	
	3-3	기술적용 및 기술이전	건	0	0	1	1	1	3	2	
	3-4	전문인력양성 (고유지표)	명	0	2	2	2	2	8	0.8	
기술개발 계획 및 추진체계 확립	4-1	법/제도/정책 제안	건	0	1	0	1	0	2	0.6	
	4-2	기술보고서	권	0	0	1	1	1	3	1	
	4-3	설계 기준 및 시방서 (매뉴얼)	권	0	0	1	1	1	3	0.4	
	4-4	연구지역 협의 및 확보		협의	확보						
합계				4	9	11	12	10	46	40	

▌질적 성과지표

- 통합기술의 완성도 및 상호 호환성 등
- 시험 설비의 완성도 등
- 제도 및 사업화 전력의 적정성 등

마. 연구개발 추진전략

▌시험설비 구축 및 운영

지하수는 그 반응이 매우 느리므로 본 연구에서 추진하는 결과가 나타나는 데 1년 정도의 시간이 소요됨. 따라서 시험 설비 검증 결과에 따른 기술 보완 등에 총 3년 이상의 시간이 소요되므로 연구 초기에 시험설비 구축이 필수적임. 따라서 아래와 같은 일정으로 시험설비 구축의 추진이 필요함.

- 1차년도에 시험설비 설계

- 2차년도에 시험설비의 주요 부분 설치 및 후반부 시험 개시
- 3차년도 시험 설비 설치 완료 및 full-scale 시험 실시

▌기술정보 수집 및 전문가 확보

- 국내외 각종 전문학술지 게재 논문자료
- 국내외 인공주입 전처리 및 지하수 용수처리 업체를 통한 시공 및 운영 정보교류
- 지하 저수지와 관련된 국제 학회 및 세미나 참석
- 기존 자문위원회 활용 및 국내외 관련 신규 전문가의 지속적인 확보

▌기존연구 결과 활용

- 기 수행되었거나 현재 수행되고 있는 연구개발 결과의 활용
- 국내외 선진 기술 및 결과의 벤치마킹을 통한 국내에 적합한 기술의 조기개발

▌산학연관 공동연구 수행

- 대학을 중심으로 원천 기술 개발을, 산업체는 상대적으로 우위를 점하고 있는 시설 구축 연구를, 연구소에서는 경제성 평가 연구를, 정부에 대해서는 제도 및 법 관련 자문을 통하여 연구를 수행함. 이와 같은 역할분담 및 효율적인 연구를 통하여 완성도 높은 통합 기술을 구축

▌개발기술의 검증

- 시험설비 시설에서 공정 설계 및 유지관리 가이드라인을 바탕으로 설계 및 운영을 수행하여 가이드라인의 적절성 검증

2. 1세부과제 (대하천 하구 퇴적층에서 저수량 1,000만m^3 확보를 위한 최적 설계 기술)

가. 연구과제명

- 대하천 하구 퇴적층에서 저수량 1,000만㎥ 확보를 위한 최적설계 기술

나. 연구개발 목표

- 대하천 하구 충적 퇴적층에서 대용량 수자원 확보를 위한 부지 특성 평가 기술, 주입 및 양수 시스템 최적 설계기술, 모니터링 시스템 설계기술, 주입수 거동 및 수질 평가기술 등의 지하저수지 최적설계기술의 개발

다. 연구개발 필요성 및 정부지원 필요성

■ 청정 지하저수지 구축에 가장 적합한 부지를 확보하기 위하여 지질학적, 수문학적 및 수리학적 조사와 분석이 필요함.

■ 대상 연구부지는 5 대강유역의 하류지역으로서 점토층, 모래층, 자갈층 등으로 구성되고 두께가 60~80m인 대하천 하구 퇴적층이므로, 내륙의 결정질 암반대수층과는 다른 수리지질학적 및 수지구화학적 특성을 갖고 있음.

■ 비용과 에너지 사용량을 최소화하면서 최대의 청정 지하수를 채수할 수 있는 최적 주입 및 양수 시스템을 설계하는 기술이 필요함.

■ 에너지를 최소화하면서 최대의 청정 지하수를 채수할 수 있는 최적 운전장치 시스템을 설계하는 기술이 필요함.

■ 청정지하수 생산의 비용절감을 위하여 주입정, 양수정, 관측정 및 하천수의 수위와 수질, 조석변동 및 지반변위에 대한 총괄적인 모니터링 시스템을 원격으로 제어하는 기술이 필요함.

■ 청정지하 저수지의 상태 감시와 이상 징후 판단을 위한 원격 모니터링 시스템 기술이 필요.

■ 주입수의 지하 저수지내에서의 거동과 수질의 변동에 대한 분석을 통하여, 최적의 부지 입지 및 운전 조건을 평가함으로써 청정 지하수를 지속적이고도 안정적으로 채수할 수 있는 기술이 필요함.

■ 충적 대수층에서 대규모 청정지하수 개발은 국내는 물론 외국에서도 시작단계에 있는 기술이므로, 정부지원하의 적극적인 연구개발이 필요함.

■ 충적 대수층의 지하저수지 기술은 국내는 물론 외국에서도 시작단계에 있는 기술이며 최적 설계분야에서 국내기술이 강점을 가지므로, 정부지원하의 적극적인 연구개발이 필요함.

라. 연구개발 주요 내용

▌1-1 대하천 하구 퇴적층 부지 특성 평가 기술 개발

■ 대하천 하구 퇴적층의 형성과정 분석 기술 개발

- 퇴적층의 지질학적 특성 분석 - 퇴적상, 층서, 광물조성, 연대, 화석 등
- 퇴적층내 간극수의 지화학적 특성 분석- pH, Eh, Salinity, EC 등
- 퇴적층의 물리적 특성 분석- 비중, 간극비, 비저항, 자연전위, 감마선량 등
- 퇴적층의 지화학 특성 분석 - 산화-환원, 용해-침전에 민감한 원소를 포함하는 광물종의 분석 및 지화학 조성

■ 대하천 하구 퇴적층의 수문학적 특성 평가 기술 개발

- 방사성(Tritium, 14C) 및 안정 동위원소(산소, 수소, 황, 염소 등)를 이용하여 지하수 연령,

순환과정, 해수의 혼합비율 등을 평가
- 물수지분석을 실시하여 청정 지하저수지내 지하수의 저류량, 함양량 및 개발가능량 평가
- 청정 지하저수지내 지하수 수위, 인근 지표수 수위 및 조석 변동에 대한 시계열 분석

■ 대하천 하구 퇴적층의 수리지질학적 특성 평가 기술 개발

- 대수성시험(Slug Test, 양수시험)을 실시하여 대수층의 수리상수(수리전도도, 투수량계수, 저류계수) 및 유효공극율, 주입정 및 양수정의 영향범위, 양수정의 우물효율 등을 산출
- 추적자시험을 실시하여 유효공극율, 분산지수 등을 산출하여 오염물질의 확산능을 평가
- 지구통계기법과 수치모델링을 이용한 지하수 분포상태, 수질상태, 유동특성, 함양 및 배출 특성 분석

■ 부지특성 평가 매뉴얼 작성

- 부지특성 평가 매뉴얼 작성

▌1-2 주입 및 양수 시스템 최적 설계기술

■ 상시주입-상시양수 지하저수지 주입계통과 양수계통의 최적 설계모델 개발

- 주입계통과 양수계통의 최적 제원 도출
- 주입계통과 양수계통의 에너지 사용량 최소화 방안
- 주입에 의한 환경영향 최소화 방안
- 대수층 수리지질 특성 등의 불확실성 고려 방안

■ 실험실 수리모형 기술 검증 및 보완

- 주입정과 양수정과 관련된 대수층 내 흐름에 대한 시뮬레이션 모델과 최적 기법에 대한 검증이 포함되어야함.
- 시뮬레이션 모델은 주입수와 기존 염지하수 사이의 거동, 양수정의 염도 등에 대하여 검증되어야함
- 최적 기법은 양수정과 주입수의 배치에 대한 적정성에 대하여 검증되어야함
- 다양한 통제된 조건에서 실험이 가능한 실험실 수리모형 (sand tank 등)을 이용한 기술검증을 수행하여야함
- 다양한 시나리오에 대한 실험을 통하여 최적 설계의 적정성을 평가하고 필요시 기술 보완을 수행해야함

■ 시험설비 기술 검증 및 보완

- 현장 시험은 장시간이 소요되므로 우선 순위를 고려하여 시험 시나리오를 개발해야함
- 대용량 지하저수지의 주요 요소에 대한 시험이 이루어져야함
- 실험실 수리모형 실험과 상호보완이 되도록 현장시험을 수행해야함.

■ 최적 설계 매뉴얼 작성

- 주입 및 양수 시스템 최적 설계기술 매뉴얼

▌1-3 지하저수지 모니터링 시스템 설계기술

■ 운전장치 효율적 모니터링 시스템 설계기술 개발

- 주입정 및 양수정 모니터링을 위한 관측정의 제원 및 위치 설계
- 하천수 수위 및 수질 모니터링을 위한 관측정 제원 및 위치 설계
- 조위 모니터링 시스템 설계
- 지반변위 모니터링 시스템 설계
- 펌프 및 관로 모니터링 시스템 설계
- 측정 오차, 불균질 수리지질특성 등의 영향 고려 방안

■ 오작동 및 비상시 운전장치 모니터링 대책 기술 개발

- 오작동시 대처방안 설계
- 비상시 대처방안 설계

■ 최적설계 매뉴얼 작성

- 모니터링 시스템 최적 설계 매뉴얼 작성

▌1-4 주입수 거동 및 수질 평가 기술

■ 대수층의 지화학-광물 특성과 지하수의 배경수질 및 수지구화학 특성 평가기술

- 대수층의 지화학적 특성
- 대수층의 광물학적 특성
- 배경지하수 수지구화학적 특성

■ 주입수 거동 및 수질변화 분석 기술

- 주입수의 수화학 특성 분석 및 평가
- 사전 모델링 및 주입 중과 주입 이후의 모니터링 및 평가
- 지질매체-물(주입수와 지하수) 상호반응 규명에 의한 오염물질별 자연저감 및 이동, 생지구화학 거동 특성 평가

■ 주입수-배경지하수-지질매체 지화학 상호작용 분석 기술

- 주입수의 수리역학적 이동 양상 및 수질개선 평가
- 주입수 수질개선 효과 예측 및 최적 운영공정 평가
- 지하저수지 적용 기술의 최적화를 위한 수지화학적 평가

■ 매뉴얼 작성

- 주입수 거동 및 수질 평가기술 매뉴얼 작성

▌연구 단계별 비상 대처 계획

■ 1 세세부: 대하천 하구 퇴적층 부지특성 평가 기술

- 시험시추시 퇴적물 코아회수가 불량할 경우:
샘플링 장비를 보완하거나 해외에서 구매하여 회수율이 100%가 되도록 조치

■ 2 세세부: 주입 및 양수 시스템 최적 설계 기술

- 주입정에서 인공주입이 잘 안되는 경우:
펌프 성능 개선, 스크린의 크기, 모양, 배열 상태 등이 다른 다양한 스트레이너 사용, 역세척으로 스크린 클로깅 물질 제거, 퇴적층의 투수성을 증가시키는 방안 적용(예: Hydrofracturing method), 수리모형에 의한 인공주입 기술 검증
- 양수정에서 양수가 잘 안되는 경우:
펌프 성능 개선, 스크린의 크기, 모양, 배열 상태 등이 다른 다양한 스트레이너 사용, 역세척으로 스크린 클로깅 물질 제거, 퇴적층의 투수성을 증가시키는 방안 적용(예: Hydrofracturing method), 수리모형에 의한 양수 기술 검증

■ 3 세세부: 지하저수지 모니터링 시스템 설계 기술

- 모니터링 시스템이 오작동할 경우:
전원이상 유무 점검, 계측기 점검 및 관리, 낙뢰 안전장치 점검
- 비상사태 발생으로 모니터링 시스템의 가동이 중단될 경우:
모니터링 시스템의 보호장치 점검 및 유지 보수

■ 4 세세부: 주입수 거동 및 수질 평가 기술

- 주입수의 예측 거동과 실제 거동의 차이가 발생할 경우:
관측공에서 주입수의 거동을 모니터링하면서, 예측 모델을 보완

마. 최종 성과물 및 성과지표

▌최종성과물

■ 대하천 하구 퇴적층 부지 특성 평가 기술

- 충적대수층의 퇴적상 및 층서, 퇴적층의 물리적 성질(비중, 간극비, 비저항, 자연전위, 감마선량 등), 간극수의 지화학적 특성(pH, Eh, Salinity, EC 등)/ 지하수 연령 및 체류시간, 지하수-해수의 혼합율, 지하수 체류시간, 지하수 기원, 지하수 함양량, 지하수 개발가능량/ 수리지질도, 지층단면도, 수리상수(K, T, S), 분산지수와 유효공극율, 지하수 수질 특성, 지하수 수위 및 유동 분포도, 지하수 수질(부유물질, Cl, SO4, NO3-N, Fe, Mn, 중금속, TCE 등) 농도분포도, 3-D 지층 구조도
- 부지특성 평가 매뉴얼

■ 주입 및 양수 시스템 최적 설계기술

- 주입정 및 양수정 최적 설계도, 관로 및 펌프 최적 설계도, 주입정-양수정-펌프-관로의 최적 배치도, 최적 설계를 위한 시뮬레이션-최적화 통합 전산설계 프로그램, 시험설비 가동 기술검증서
- 최적 설계 매뉴얼

■ 운전장치 모니터링 및 원격제어 시스템 설계기술

- 주입정/양수정/하천수/조위/지반변위 모니터링공의 제원 및 위치 선정, 주입정 및 양수정 모니터링공의 원격제어 시스템 구축, 펌프 및 관로 원격제어 시스템 구축, 하천수 수위 및 수질 모니터링 원격제어 시스템 구축, 조위 모니터링 원격제어 시스템 구축, 지반변위 모니터링 원격제어 시스템 구축, 오작동 및 비상시 모니터링 시스템 구축
- 모니터링 및 원격 제어 시스템 최적 설계 매뉴얼

■ 주입수 거동 및 수질 평가 기술

- 배경 지하수 거동 규명, 시스템 운영시 지하수 거동 규명, 포획구간 및 영향범위 설정, 배경 지하수 수질 변동 규명, 주입수 수질 변동 규명, 대수층의 수질개선 능력 규명
- 주입수 거동 및 수질 평가 매뉴얼

▌성과지표

성과목표	성과지표		측정방법	단계별 목표치					최종목표치	가중치 (0~1)	비고
				1	2	3	4	5			
과학기술적 연구 성과 향상	1-1	학술지 게재-SCI/SCI(E)	건	0	0	1	1	1	0	1	
	1-2	학술지 게재-일반학술지	건	2	2	3	3	3	13	0.4	
	1-3	국내외 학술회의 발표	건	4	4	6	6	6	26	0.2	
	1-4	지식재산권-특허, 소프트웨어	건	0	0	1	2	2	5	2.0	
기술개발역량 향상	2-1	과제당 산학연 협력 활동건수	건	1	1	1	2	2	7	0.2	
	2-2	산학연 기술지원 건수	건	0	0	1	1	1	3	0.2	
	2-3	세부과제 평가보고서 (고유지표)	건	1	1	1	1	1	5	2.0	
	2-4	관련분야 국제협력 네트워크 구축 (고유지표)	건	1	1	1	1	1	5	0.4	
사회경제적 파급효과증대	3-1	연구개발 관련 홍보 건수	건	0	1	1	1	1	4	0.4	
	3-2	기술확산을 위한 상호교류 정도	건	1	2	2	2	2	9	0.6	
	3-3	기술적용 및 기술이전	건	0	0	1	1	1	3	2.0	
	3-4	전문인력양성 (고유지표)	명	1	2	2	2	2	9	1.0	
기술개발 계획 및 추진체계 확립	4-1	법/제도/정책 제안	건	0	0	0	1	1	2	0.8	
	4-2	기술보고서	권	0	0	1	1	1	3	0.8	
	4-3	설계 기준 및 시방서 (매뉴얼)	권	0	0	0	0	4	4	0.4	
	4-4	연구지역 협의 및 확보		협의	확보						
합계				11	14	22	25	29	101	65	수정

▌질적 성과지표

- 부지 평가결과의 대표성
- 최적설계 기술의 우수성
- 주입수 거동 평가기술의 우수성
- 시험시설 검증 결과의 적합성

바. 연구개발 추진전략

▌대하천 하구 퇴적층 부지 특성 평가 기술 개발

- 부지특성평가에서 시험시추, 지구물리탐사, 지구물리 검층, 양수시험 등은 관련 전문업체와 공동으로 추진
- 방사성 및 안정 동위원소 연구는 분석이 가능한 국내외 연구소와 공동으로 수행
- 기타 연구내용은 연구진 자체적으로 수행

▌주입 및 양수 시스템 최적 설계기술

- 주입정 및 양수정 제원 및 배치 최적 설계, 시험설비 가동을 통한 기술검증 및 보완 등의 연

구는 지하저수지 관련 개발경험이 있는 국내외 기관과 협력
- 기타 연구내용은 연구진 자체적으로 수행

▌운전장치 모니터링 및 원격제어 시스템 설계기술

- 계측기 모니터링 시스템 설계는 관망 및 지하수 관련 전문업체와 협력
- 기타 연구내용은 연구진 자체적으로 수행

▌주입수 거동 및 수질 평가 기술

- 본 연구내용은 연구진 자체적으로 수행
- 동위원소 분석은 국내외 분석기관에 의뢰하여 수행

3. 2세부과제 (청정 지하 저수지 운영 및 유지관리기술)

- 중단 없이 목표 용수를 효율적이며, 안정적 그리고 지속적으로 공급하기 위한 유지관리 기술 개발

가. 2-1 지하 저수지 통합 운영 기술 개발

(1) 연구개발 목표

- 시스템 전반적 운영 및 관리기술 개발
- 무선 자동자료 수집 및 모니터링 시스템 운영 및 유지관리 기술 개발
- 실시간 모바일 기반 모니터링 시스템 개발 및 운영 기술 개발

(2) 연구개발 필요성

- 주입정, 양수정, 관측정으로부터의 지하수위, 온도, 압력, 수질, 전기전도도 등의 자료 측정과 함께 자동무선송수신 모듈과 실시간 모니터링 시스템을 개발하여 평상 시 목표생산량을 확보하는 시스템 정상운영 상태를 확인할 수 있게 함과 동시에 system malfunction, 주입수 수질사고, 극한 가뭄 등의 상황에서 자동 및 수동으로 신속하게 대처할 수 있도록 함.

- 모바일 기반의 실시간 모니터링 시스템을 개발하여 시스템 운영 담당자의 위치와 관계없이 실시간 모니터링이 가능할 수 있도록 하여 비상 시 신속하고 정확한 대처를 가능하게 함.

(3) 세부연구내용

▌시스템 전반적 운영 기술 개발

■ 지하저수지의 목표 양수량과 목표수질기준을 달성하도록 제어하는 시스템 개발 및 지하저수지의 상시용수공급시스템으로서의 기능을 유지할 수 있는 기술 개발함.

■ 지하저수지 시스템에 설치된 각종 센서로부터 측정된 자료의 무선수신시스템과 모니터링 시스템, 그리고 자동 자료분석 시스템 모듈 개발 및 분석결과를 바탕으로 지하저수지 시스템 제어를 위한 무선송신 및 시스템 요소별 제어 모듈 개발함.

■ 안정적인 무선 송수신 시스템 및 모바일 기반 제어시스템 개발을 위해 관련기술 전문 업체를 선정하여 공동 또는 위탁연구를 수행

■ 지하저수지 시스템 전체를 모니터링 할 수 있는 인터넷 또는 모바일기반의 모니터링 시스템 개발 및 실시간 모니터링 및 분석을 실시하면서 자료분석 결과를 바탕으로 지하저수지 시스템 제어가 필요한 경우 인터넷이나 모바일 기반에서 제어가능 기술 개발함.

▌무선 자동자료수집 및 모니터링 시스템 운영 기술 개발

■ 지하저수지 통합운영을 위해서는 주입정, 양수정, 관측정에 설치되어 있는 각종 센서로부터 수량, 수질, 수위, 압력, 온도, 변위, 등의 자료를 자동으로 수신 후 분석하여 제어를 하는 시스템을 개발해야 하는데 여기서 다수의 주입정, 양수정, 관측정으로부터 자료를 유선으로 받기에는 거리, 전선, 등 제한요소가 많으므로 센서로부터의 자료를 무선으로 수신하여 분석하고 만약 시스템을 제어할 필요가 있는 상황이 오면 무선으로 신호를 보내 주입정이나 양수정 또는 펌프나 밸브에 대한 제어가 가능하도록 하는 기술개발이 필요함.

■ 본 연구에서는 다수의 주입정, 양수정, 관측정, 그리고 해당 사이트에 설치된 각종센서로부터 실시간으로 무선으로 전송되는 수량, 수질, 수위, 압력, 온도, 전기전도도 등의 자료들을 모니터링하고 분석하여 실시간으로 무선으로 시스템 제어 및 운영에 분석결과를 반영함으로서 기존의 연구에서는 시도되지 않은 무선송수신 모듈을 개발하여 다수의 주입정, 양수정, 관측정, 펌프 및 밸브를 무선으로 제어할 수 있는 기존의 연구보다 훨씬 복잡한 송신, 수신, 분석, 제어 모듈로 구성되는 플랫폼을 개발하게 됨.

▌지하 저수지 통합 운영 상 비상 대처 계획 수립

■ 지하 저수지 통합 운영 시스템에서 발생될 수 있는 비상상황을 예측하여 이에 대한 대처 계획 수립 필요

- 공정별 제어 및 모니터링 시스템의 오작동 등에 대한 대응 방안 등

(4) 최종성과물

■ 지하 저수지 개발 시스템 전반적 운영 가이드라인
■ 모바일 기반 운영시스템 개발

나. 2-2 비상 시 지하 저수지 운영 기술 개발

(1) 연구개발 목표

- 시스템 오작동(system malfunction) 시 대처 및 운영 방안 확립
- 수량 및 수질 문제로 인한 비상운영방안 확립
- 주입중단 상황(재난상황) 시 비상운영 기술 개발

(2) 연구개발 필요성

- 지하저수지 시스템에서 평상시와는 달리 생산 조건이 달라지는 비상시 운영기술 , 원수의 수질악화, 수량부족, 시스템 오작동, 자연재해, 수질사고 및 테러상황에 대비해서 각 상황에 대응하는 운영기술을 개발 그리고 시스템오작동이란 하드웨어 작동에 문제가 생겨서 생산에 차질이 생기는 경우를 의미하는데 정전과 같은 직접적인 원인도 있으나 모니터링 자료를 실시간으로 분석하여 하드웨어에 즉각적으로 문제가 생길 것이 예측되는 상태도 고려할 예정임.

- 가뭄 등에 의한 수질저하 및 취수량확보에 문제가 생기는 경우와 자연재해나 테러 등에 의한 취수원 확보가 불가능한 경우에 청정 지하저수지 시스템을 운영하는 비상시 운영방안을 수립할 필요가 있음.

(3) 세부연구내용

- 지하저수지 시스템의 각 하드웨어 요소들의 오작동 시 전체적인 제어를 통해서 목표수량과 목표수질을 제어하고 유지하는 운영방안 확립 및 펌프 등 하드웨어의 오작동(malfunction) 또는 주입정 폐색 등으로 시스템의 주요 요소가 작동이 불가한 경우 대응방안 확립

- 주입수량 및 주입수질에 문제가 생겼을 경우 전처리 시설의 용량이나 능력을 고려한 최적운영방안 확립과 주입수량이 제한적으로 공급되는 비상 시 수질자료 모니터링을 통한 양수정 운영 방안 확립

- 취수원의 수량과 수질에 심각한 문제가 생긴 경우 주입수량이 전혀 없는 경우에 양수정 운영방안 확립 및 주입수 차단 시 실시간 수질 및 지반변형관련 관측자료 분석결과를 양수정 운영에 적용하는 방안 확립

▌시스템 오작동(system malfunction) 시 대처 및 운영 방안 확립

- 비상 시 지하저수지 운영기술 개발에서 비상 시 운영이라 함은 먼저 지하저수지 시스템을 구성하고 있는 하드웨어에 문제가 생기는 경우를 고려해야 함. 다수의 주입정이나 양수정 그리고 관측정에 설치된 수위, 수질, 압력, 온도 등을 측정하는 센서에 문제가 생기는 경우, 이들 자료를 송수신하는 무선 송수신 시스템에 문제가 생기는 경우, 그리고 자료분석 및 처리를 담당하는 플랫폼에 문제가 생기는 경우가 이에 해당되며, 즉각적인 대처가 필요한 상황임. 또한 특정 주입정 폐색이나 지반변형이 일어난 경우에도 시스템에 큰 영향을 미치는 경우이므

로 여기에 대한 대처 및 운영방안도 수립해야 함. 참고로 주입정 폐색에 대한 운영은 backwashing을 실시하는 일정과 연계해서 목표생산량에 차질이 없게 실시되어야 하며 지반변형에 대한 측정 및 이상변위가 발생했을 때의 운영은 전체 시스템을 보전할 수 있어야 하므로 가장 예민한 측정과 신중한 대처가 이루어져야 할 필요가 있음.

- 기존 시스템에서는 본 연구에서 개발될 비상 시 운영에 대한 지침이나 연구는 제대로 이루어지지 않은 실정임. 본 연구에서는 다수의 주입정과 양수정 그리고 관측정들로부터 실시간으로 수신되는 수량, 수질, 수위, 압력, 온도, 전기전도도 등의 자료들을 분석하여 비상 시 실시간으로 시스템을 제어하는 운영 방안을 마련함으로서 상시 수자원 공급 시스템으로서의 효율을 극대화 할 수 있음.

▌수량 및 수질 문제로 인한 비상운영방안 확립

- 비상 시 운영이라 함은 주입수의 수량이나 수질에 문제가 생기는 경우를 포함한다. 이 경우에는 주입정으로부터 주입되는 수량이 적어지거나 일시적으로 중단되는 경우이므로 양수정에서 목표생산량을 얼마나 유지하면서 그리고 시스템에 문제를 일으키지 않는 범위에서 생산을 할 수 있을지를 결정할 필요가 있음. 다시 말하면 주입량이 부족하거나 없어서 주변 염수가 침투하여 생산수에 염도가 올라가거나 과도한 수위저하로 지반변형이 생기지 않도록 시스템을 유지해야 함. 주입수의 수질이 문제가 생긴다면 일단 주입을 중지시키고 전처리 공정에 문제가 없는지 확인하고 만약 과도한 원수의 수질악화로 전처리 공정에서 목표수질을 맞출 수가 없다면 주입중단(재난) 상황으로 간주하고 운영에 반영해야 함.

- 본 연구에서는 다수의 주입정과 양수정 그리고 관측정들로부터 실시간으로 수신되는 수량, 수질, 수위, 압력, 온도, 전기전도도 등의 자료들을 분석하여 주입수량이 감소하거나 일시적으로 중단되었을 때 또는 수질이 기준치 이하의 값으로 측정될 때 다수의 주입정과 양수정 그리고 관측정들로부터 무선으로 수신되는 수량, 수질, 수위, 압력, 온도, 전기전도도 등의 자료들로부터 지반변형이나 생산수의 염도증가가 일어나지 않는 범위 내에서 비상 시 운영에 반영하는 기술로서 생산수 수질을 관리하고 상황에 따라서 전체 시스템에 문제가 생기지 않도록 생산수량을 조절하게 됨.

▌주입중단 상황(재난상황) 시 비상운영 기술 개발

- 비상 시 운영에서 필수적으로 고려해야 하는 극한 상황에 대한 운영기술 개발로서 극한 가뭄이나 수질사고, 자연재해 또는 테러 등의 이유로 원수 확보에 문제가 있어서 주입을 중단해야 하는 상황에 운영하는 기술에 대한 개발은 필요함. 이 상황은 취수원에 극단적인 수량이나 수질에 문제가 발생하여 주입수가 없는 상태에서 운영을 해야 하므로 위의 '수량 및 수질 문제로 인한 비상운영'의 상황과 유사하게 생산수의 염도증가와 지반변형을 모니터링하면서 양수를 실시해야 하지만 보다 단기간에 시스템에 영향을 미쳐서 생산량과 생산기간이 짧을 것으로 사료됨. 또한 수질적인 관점에서 생산수의 후처리 용량과 시스템 보전 문제도 고려하여 생산여부를 결정해야 함.

- 본 연구에서는 다수의 주입정과 양수정 그리고 관측정들로부터 실시간으로 수신되는 수량, 수질, 수위, 압력, 온도, 전기전도도 등의 자료들을 분석하여 주입수가 확보되기 어려운 경우

지반변형이나 생산수의 염도증가가 일어나지 않는 범위 내에서 실시간으로 시스템을 제어하는 운영 방안을 마련함으로서 상시 수자원 공급 시스템으로서의 효율을 극대화 할 수 있음. 수량은 확보되나 수질에 큰 문제가 생기는 경우는 주입수의 전처리 시설의 용량이나 수준에 따라서 제한적인 주입수 공급가능여부가 결정됨.

▌비상 시 지하 저수지 운영 상 비상 대처 계획 수립

- 비상 시 지하 저수지 운영 중에 발생될 수 있는 비상상황을 예측하여 이에 대한 대처 계획 수립 필요

  - 극한가뭄, 수질사고, 테러 등에 대한 대응 방안 등

(4) 최종성과물

- 시스템 오작동(System malfunction), 수량 및 수질문제, 재난 및 테러상황상황 등에 대응할 수 있는 지하저수지 비상 시 운영 가이드라인

다. 2-3 시스템 유지관리 기술 개발

(1) 연구개발 목표

- 물리적, 화학적, 생물학적 주입정 및 양수정 폐색 요인 분석 및 대책 연구
- 주입정 및 양수정 폐색 저감 기술 개발
- 주입정 및 양수정 폐색 상황 모니터링 및 예측 기술 개발

(2) 연구개발 필요성

- 지하 저수지의 기본적인 개념은 하천 하구 등에 위치한 모래와 점토로 구성되어 있는 충적대수층 내에 설치된 주입정과 양수정으로 이루어진 관정 시스템을 통해 지하수를 용수로 공급하는 것임. 이러한 관정 시스템을 효율적이며 장기간 동안 지속적으로 목표 공급용수량을 달성하기 위해서는 주입정 및 양수정에서의 폐색현상 저감하거나 방지할 필요가 있음.

- 이를 위해서는 우선적으로 주입정 폐색의 물리적, 화학적, 생물학적 폐색현상 요인을 분석하고 이에 대한 대책에 관련된 연구를 수행할 필요가 있음. 또한 폐색현상은 인공주입 시 주입되는 물에 포함되어 있는 유사와 그 외 부유물질 등에 의해 주입정 내의 압력을 증가시키고 이로 인해 주입량이 감소되며, 양수정의 경우 물리적 및 화학적 폐색현상으로 인해 양수정 스크린 주변 대수층의 투수성이 감소되며, 이로 인해 양수량이 감소됨.

- 따라서 지하 저수지 내 관정 시스템에서의 폐색현상을 최대로 저감시키기 위한 기술 및 폐색현상 예측에 관한 기술 개발이 필요함. 또한 지하 저수지의 장기간 동안 지속적으로 효율적이고 안정적으로 운영되기 위해서는 유지관리 차원에서 주입정과 양수정으로 이루어진 관정

시스템 내에서의 폐색현상 진단을 위해서는 관정 시스템 내 유량 및 압력 변화와 같은 수리학적 거동 등을 모니터링을 할 필요가 있으며, 이에 대한 최적의 설치 및 운영에 대한 기술 개발이 필요함.

(3) 세부연구내용

▌물리적, 화학적, 생물학적 주입정 폐색 요인 분석 및 대책 연구

- 주입정 및 양수정에서의 폐색현상은 물리적, 화학적 그리고 생물학적 과정 중 하나 또는 둘 이상을 통해 발생되며, 폐색현상을 적절하게 저감 또는 방지하기 위한 대책을 마련하기 위해서는 우선적으로 이에 대한 매커니즘을 분석을 할 필요가 있음.

- 이러한 폐색현상의 원인은 대수층의 물리적인 특성과 주입수의 물리적 및 화학적 상태에 따라 크게 차이가 날 수 있음. 따라서 본 연구에서 추진될 지하 저수지 적용대상 지역에 존재하는 대수층의 특성과 주입수에 대한 물리적 및 화학적 상태를 분석하여 폐색현상의 주요 잠재적인 원인을 분석하고 이에 대한 대책을 강구하고자 함.

▌주입정 폐색 저감 기술 개발

- 주입정 및 양수정으로 구성된 관정 시스템의 운영에 있어 가장 빈번하게 발생되는 주요 문제 중의 하나는 폐색(clogging) 현상임. 이러한 폐색은 인공주입 시 주입되는 물에 포함되어 있는 유사(sediment)와 그 외의 부유물질(suspended solids) 등에 의해 주입정 내의 압력을 증가시키고 이로 인해 주입량이 감소됨.

- 또한 양수정의 경우, 물리적 및 화학적 폐색현상으로 인해 양수정 스크린 주변 대수층의 투수성이 감소되며, 이로 인해 양수량이 감소됨.

- 따라서 지하 저수지로부터의 목표 용수공급량을 달성하기 위해서는 관정 시스템에서의 이러한 폐색현상을 최대로 저감시키기 위한 기술 개발이 필요함.

- 주입정이나 양수정에서 폐색의 가장 큰 원인 중의 하나인 유사나 부유물질 등에 의한 물리적 폐색현상을 저감하기 위해 가장 일반적으로 적용되는 방법은 역세척이며, 그 운영 프로세스(역세척 주기 및 1회 시행 시 기간 등)는 대수층의 물리적인 특성, 주입수의 부유물질 등의 정도 그리고 주입정 및 양수정으로 구성된 관정 시스템의 구성 등에 따라 달라질 수 있음. 따라서 본 연구에서는 이러한 특성을 고려한 최적의 역세척 프로세스 기술을 개발하고자 함.

- 본 연구에서 개발된 최적의 역세척 프로세스는 실증시설에 적용을 통해 검증하고 문제점 보완에 대한 작업을 수행할 것임.

▌주입정 및 양수정 폐색 상황 모니터링 및 예측 기술 개발

- 지하 저수지 내 설치된 주입정 및 양수정의 관정 시스템에서 폐색현상을 진단하기 위해서는 주입량 및 양수량에 따른 압력의 변화와 같은 수리학적 거동 등을 모니터링 할 필요가 있음. 또한 폐색현상을 예측하기 위해 적용될 수 주입수의 탁도, 총부유물질, 온도 등을 모니터링

할 필요가 있음.

- 지하 저수지의 효율적인 운영을 위해서는 폐색현상 모니터링 이외에 잠재적인 폐색현상 예측에 대한 기술도 개발할 필요가 있음.
- 본 연구에서는 이러한 기존의 연구에서 제시된 관정 시스템 내에서 폐색현상을 모니터링하는 방법을 참조하여 지하 저수지 시스템의 지속적인 운영에 있어 가정 적합하고 최적의 모니터링 시스템 구축에 대한 연구를 할 필요가 있음.
- 또한, 지하 저수지 내 관정 시스템에서 발생 가능한 잠재 폐색현상을 예측하기 위한 최적의 방법을 도출해 이를 실내 시험을 통해 검증하고 현장 건설될 실증시설에 대해 적용을 통한 문제점 보완을 수행할 필요가 있음.

▌주입정 및 양수정 폐색 현상에 대한 비상 대처 계획 수립

- 주입정 및 양수정 운영 중에 비상상황을 예측하여 이에 대한 대처 계획 수립 필요

  - 주입압력의 갑작스러운 증가 또는 감소 대응 방안 등
  - 전처리 과정의 이상기능으로 인한 주입수 내 부유물질 증가에 대한 대응 방안 등

(4) 최종성과물

- 주입정 및 양수정의 관정 시스템 유지관리 매뉴얼
- 주입정 및 양수정에서 폐색 예측 및 감시를 위한 모니터링 유지관리 매뉴얼

라. 2-4 지반변형 해석 및 방지(저감) 기술 개발

(1) 연구개발 목표

- 지하수 양수에 의한 지반변형 예측 및 분석 기술 개발
- 주입 및 양수에 의한 지반변형 저감을 위한 기술 개발
- 지반변형 상황 모니터링 방안

(2) 연구개발 필요성

- 일반적으로 개발되지 않은 대수층은 충전(recharge)과 방출(discharge)이 균형을 이루고 있으나 인공적인 취수 또는 양수는 이러한 균형을 파괴시켜 지반침하를 일으키는 원인이 될 수 있음. 지하 저수지 내 물을 주입하고 또는 이로부터 양수를 하더라도 지반 내의 대수층을 통과하여야 하므로 지반의 투수계수와 대수층의 수두의 상태에 따라서 양수정에서 유출되는 유량은 변화하게 됨. 양수압이 걸린 대수층에는 지하수위 저감이 발생하게 되고 이는 지반의 유효단위중량을 증가시킴으로써 지반침하를 유발시키게 됨. 또한 한 개 이상의 양수정이 운영될 경우 지하수위 저감은 중첩하게 되며 이로 인해 지반 침하의 크기는 더욱 커지게 됨. 지반침하는 운영되는 시설물과 인접 중요시설물이 존재할 경우 사용성(serviceability)을 제한하거나 혹은 구조물의 부등침하를 통한 시설물의 손상을 야기 시킬 수 있음. 따라서 주입

혹은 양수에 따른 지하수위의 유동과 대수층내 한계유속이상의 압력수두 발생에 의한 토사유동에 따른 침하를 적절히 예측하고 이를 관리하는 기법이 필요함.

- 또한 주입정 내에서의 지하수위 상승이나 양수정 내에서의 감소에 따른 지반변형은 필연적으로 발생함. 지반변형에 의한 관정 시스템의 사용성이나 구조적 손상을 방지하기 위해서는 전체적인 지반변형의 한계치를 설정된 대수층의 허용 총침하량 또는 허용 부등침하량이 만족되는지를 검토할 필요가 있음. 따라서 관정 시스템 내 주입과 양수에 의해 발생 가능한 지반침하의 영양 범위와 침하 혹은 융기의 정도는 반드시 비구조적 방법을 통해 예측될 필요가 있음. 지반변형을 실시간적으로 모니터링 하는 것은 현재 방재분야에서 폭넓게 활용하고자 하는 분야임. 지반변형을 예측하기 위해 지하수위와 강우량을 실시간으로 모니터링 하는 시스템은 이미 보편화되어 있으나 인위적인 주입과 양수로 인해 발생 가능한 지반침하나 세립분의 이동에 따른 싱크홀과 같은 국부적인 지반붕락을 사전에 대비하기 위한 IT 분야와 접목한 지반변형 상황 모니터링 시스템 구축 방안을 강구하여 운영 및 관리체계를 고도.

(3) 세부연구내용

▌지하수 양수에 의한 지반변형 예측 및 분석 기술 개발

- 지하 저수지 내 주입정과 양수정으로 이루어진 관정 시스템에서의 주입과 양수가 장기간 동안 시행될 경우 관정 시스템 주변의 대수층에서 응력교란으로 인해 지반 침하(subsidence) 또는 융기(uplift)와 같은 지반변형이 발생될 수 있음. 지하 저수지의 효율적이고 지속적으로 안정된 운영을 위해서는 이러한 지반변형을 예측하고 분석할 수 있는 기술 개발이 필요함.

- 대부분의 기존 연구는 자연 상태의 대수층 내에서의 양수에 의한 지반 변형에 대한 연구이나 본 연구에서는 주입정과 양수정으로 구성된 관정 시스템에서 장기간 지속적인 주입과 양수에 따른 지반 융기/침하에 대한 구조적 매커니즘을 분석하고 이를 예측하기 위한 기술을 개발.

▌주입 및 양수에 의한 지반병형 저감을 위한 기술 개발

- 주입정과 양수정으로 구성되어 있는 관정 시스템에서 주입과 양수를 장기간 동안 지속적으로 운영될 경우 관정 시스템 주변에 지반 침하/융기가 발생될 수 있으므로 이를 저감하기 위한 기술 개발이 필요함.

- 지반변형의 저감 대책은 지하 저수지 적용 대상지역에 존재하는 대수층의 물리적 특성, 주변 환경, 관정 시스템의 운영에 따라 달라질 수 있음. 따라서, 본 연구에서는 기존의 지반변형 저감 대책에 대한 연구결과와 적용 대상지역의 지질학적 및 주변 환경 그리고 관정 시스템의 운영에 따른 지반변형 저감 기술을 개발할 것임.

▌지반변형 상황 모니터링 방안

- 지하 저수지를 운영하는데 있어서 발생될 수 있는 지반 융기/침하에 관한 보다 정확하고 신뢰성 있는 예측과 저감을 위해서는 현장 조사 및 모니터링 구축이 매우 중요하며, 이에 대한 기술 개발을 할 필요가 있음.

■ 지반변형을 감지하는 적용될 수 있는 기술들은 대수층의 특성 및 지역 환경 그리고 주입정과 양수정으로 이루어진 관정 시스템의 운영에 따라 달라질 수 있으므로 본 연구에서는 지반변형의 감지를 위한 최적의 모니터링 구축 방안을 수립할 것임.

■ 양수정과 주입정 주위의 지반변형에 대한 상황을 지속적이며 안정적으로 모니터링을 하기 위한 시스템과 지반변형에 대응할 수 있는 시스템을 개발할 필요가 있으므로 관련기술 전문 업체와 공동 또는 위탁연구를 실시함.

▌지반변형에 대한 비상 대처 계획 수립

■ 주입정 및 양수정 주변에서 발생될 수 있는 지반변형에 대한 대처 계획 수립 필요

- 과도하고 장기적인 주입 및 양수로 인한 주변 지반변형 및 침하에 대한 대응 방안 등

(4) 최종성과물

■ 주입 및 양수로 인한 지반변형 해석 tool 및 유지관리 매뉴얼
■ 지반변형 모니터링 유지관리 매뉴얼
■ 지반변형 저감을 위한 요소 기술 (특허 등)

마. 최종성과물 및 성과지표

▌최종성과물

■ 지하저수지 통합 운영 기술 개발
- 지하 저수지 개발 시스템 전반적 운영 및 관리 가이드라인
- 모바일 기반 모니터링 및 제어시스템(software and hardware)

■ 비상 시 지하저수지 운영 기술 개발
- 시스템 오작동(System malfunction), 수량 및 수질문제, 재난 및 테러상황상황 등에 대응할 수 있는 지하저수지 비상 시 운영 가이드라인

■ 시스템 유지관리 기술 개발
- 주입정 최적운영 및 시스템 유지관리 매뉴얼
- 폐색현상 감지를 위한 모니터링 설비

■ 지반변형 해석 및 방지(저감) 기술개발
- 주입 및 양수로 인한 지반변형 해석 tool 및 유지관리 매뉴얼
- 지반변형 모니터링 설비
- 지반변형 저감을 위한 구조적 및 비구조적 요소 기술 (특허 등)

▌성과지표

성과목표	성과지표		측정방법	단계별 목표치					최종목표치	가중치 (0~1)	비고
				1	2	3	4	5			
과학기술적 연구 성과 향상	1-1	학술지 게재-SCI/SCI(E)	건	0	0	1	2	3	6	1.0	
	1-2	학술지 게재-일반학술지	건	0	1	3	4	4	12	0.4	
	1-3	국내외 학술회의 발표	건	0	3	3	4	4	14	0.2	
	1-4	지식재산권-특허, 소프트웨어	건	0	0	1	2	2	5	2.0	
기술개발역량 향상	2-1	과제당 산학연 협력 활동건수	건	1	1	1	2	3	8	0.2	
	2-2	산학연 기술지원 건수	건	0	0	1	1	1	3	0.2	
	2-3	세부과제 평가보고서 (고유지표)	건	1	1	1	1	1	5	2.0	
	2-4	관련분야 국제협력 네트워크 구축 (고유지표)	건	0	1	1	1	1	4	0.4	
사회경제적 파급효과증대	3-1	연구개발 관련 홍보 건수	건	0	1	1	1	1	4	0.4	
	3-2	기술확산을 위한 상호교류 정도	건	2	2	2	2	2	10	0.6	
	3-3	기술적용 및 기술이전	건	0	0	0	1	2	3	2.0	
	3-4	전문인력양성 (고유지표)	명	2	3	3	3	3	14	1.0	
기술개발 계획 및 추진체계 확립	4-1	법/제도/정책 제안	건	0	0	0	0	1	1	0.8	
	4-2	기술보고서	권	0	0	0	1	1	2	0.8	
	4-3	설계 기준 및 시방서 (매뉴얼)	권	0	0	0	2	3	5	0.4	
	4-4	연구지역 협의 및 확보		협의	확보						
합계				6	13	18	27	32	96	69.4	수정

▌질적 성과지표

- 지하저수지 운영 및 유지관리 기술의 타당성
- 비상시 지하저수지 관리기술의 우수성
- 지반변형 대책의 적합성
- 시험시설 검증 결과의 우수성

바. 연구개발 추진전략

▌지하 저수지 통합 운영 기술 개발

- 통합운영에 필요한 모바일 기간의 실시간 모니터링 시스템의 플랫폼 개발은 해당 전문업체와 공동으로 수행함.

- 실시간으로 수신되어 기록되는 수량, 수질, 수위, 압력, 온도, 전기전도도 등의 자료를 분석하는 방법 및 도구의 개발은 연구진 자체적으로 수행함.

▌비상 시 지하 저수지 운영 기술 개발

- 지하 저수지 시스템을 구성하는 하드웨어 요소들의 전반적인 제어를 통한 목표수량 및 목표 수질의 확보에 대한 기술 개발은 관련 전문업체와 공동으로 수행
- 주입수량 및 주입수질의 문제가 발생한 경우에 대비한 최적운영방안 도출과 주입수량의 제한적 공급이 이루어지는 비상 시 양수정 운영 방안에 대해서는 연구진 자체적으로 수행함.

▌시스템 유지관리 기술 개발

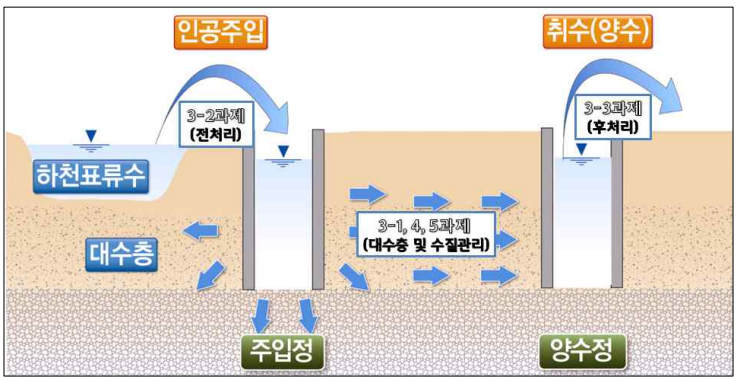
- 주입정 및 양수정에서의 물리적, 화학적, 생물학적 폐색현상 메카니즘 분석 및 수리모형실험을 통한 주입정 및 양수정 운영에 있어서의 최적 역세척 프로세스 기술 개발 및 실증시설에 통한 폐색 저감 최적 운영 방안 검증 및 문제점 보완은 연구진 자체적으로 수행함.
- 폐색현상 저감을 위한 관정 시스템 내 모니터링 시스템 구축 기술 개발은 관련 전문업체와의 공동연구를 통해 수행함.

▌지반변형 해석 및 방지(저감) 기술 개발

- 지하수 양수에 의한 지반변형 예측 및 분석 기술 개발 및 지반변형 저감을 위한 기술 개발은 연구진 자체적으로 수행함.
- 지반변형 상황 모니터링 시스템 개발 및 구축은 관련 전문업체와의 공동연구를 통해 수행함.

4. 3세부과제 (청정용수 공급을 위한 수질관리 및 활용기술)

- 청정 지하수 수질 유지를 위한 수질관리 및 용수처리 핵심 설계 기술 및 운영·유지관리 기술 개발



▌그림 3.3 수질관리 세세부과제의 개념

가. 3-1 음용수로서의 신뢰도 확보를 위한 청정 지하저수지의 수질 위해요소사전관리기술 개발

(1) 연구개발 목표

▌지하저수지 잠재 위해요소 분석
▌모니터링을 통한 위해요소 예방 및 추적 기술 개발
▌운영·관리 가이드라인 구축

- 기후변화에 따른 무강우일수 증가 및 빈번한 국지적 집중호우로 안정적인 상수원수 확보에 어려움이 있음. 또한 국내 수자원의 확보 및 공급은 주로 지표 공간을 활용하고 있으나, 수자원을 저장할 수 있는 지표 공간 확보가 어려운 지역이 존재함. 따라서, 지하저수지와 같은 새로운 방식의 수자원 저장 및 공급 방안이 강구될 필요성이 있음.

- 지하 공간을 활용한 수자원 저장을 위해 지하수 댐 방식이 이미 많은 국가에서 활용되고 있음. 미국, 호주, 유럽 등지에서는 대수층 저장 및 회수 방식(Aquifer Storage and Recovery)을 비롯한 다양한 방식의 지하 공간과 지층 매체를 활용하는 수자원 저장과 관리 사례가 증가되고 있으며, 인근 국가인 일본, 대만 등에서도 새로운 수자원 저장과 관리 방법으로 대수층 저장 및 회수 방식을 도입하고 있음.

- 지하저수지에 대한 기대가 높아지고 활용도가 증가하면서 새로운 시각으로의 접근이 요구됨. 청정 수자원으로 인정받기 위해서, 원수 수질에 대한 국민의 불안을 해소하기 위한 전문가 집단의 지속적인 노력이 필요하다. 본 과제의 목표는 선진국 수준의 위험도 사전관리를 통한 안전한 물 공급 시스템 구축에 있음. (1) 주입과 양수과정에서 발생·혼입 가능한 생물학적/화학적/물리적 위해요소를 파악·분석하여 (2) 위해요소를 예방·제거 또는 허용가능수준 이하로 감소시킴으로써 (3) 먹는물 안전 확보 기술 및 수질관리 가이드라인 개발을 목표로 함.

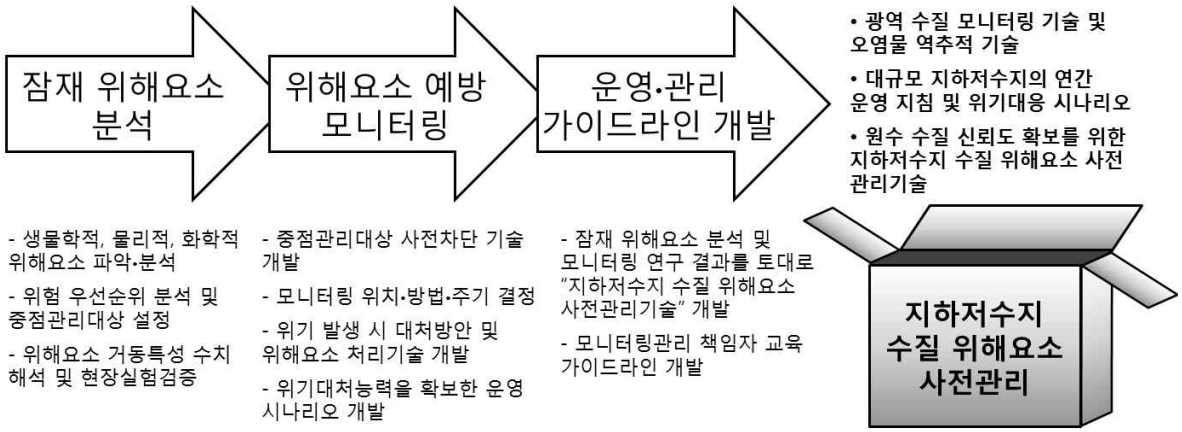
(2) 연구개발 필요성

- 사전 위기 대응 또는 위기관리에 관한 연구는 전세계적으로 사용되고 있는 기법임. 제조공정이나 발전소 등에서 주로 사용되던 위기관리기술이 식품분야에 이르러서 HACCP로 체계화되었음. HACCP는 위해요소를 사전에 파악하고 발생 가능한 모든 잠재위협에 대해서 관리방안을 마련하는 것임. 각 관리방안 별로 적절한 모니터링 기술을 계획하고 운영함. 수자원 분야에서도 적용되기 시작했으나, 정수시설을 주요 대상으로 하고 있음.

- 지표 공간에 한정되었던 수자원이 지하저수지로 확대됨에 따라 지하에 위치한 저수지의 직접 관리가 매우 어려워 질 것임. 지하저수지는 지표수보다 오염을 눈으로 확인하기 어렵고, 오염 범위를 쉽게 파악하기 힘들며, 오염대처 또한 비용과 시간이 많이 소요될 것임. 하지만, 잠재 위해요소를 사전에 분석하여 효율적인 관리방안을 수립하고 적절한 모니터링을 실시한다면 지하저수지를 청정하게 관리할 수 있을 것임.

(3) 세부연구내용

■ 기존의 식품분야 및 정수시설 수처리 분야에서 사용된 위해요소 중점 관리기술을 지하저수지에 적용하고자 함. 청정 지하저수지 운영을 위한 지하저수지 수질 위해요소 사전관리기술 개발을 위해 다음과 같은 연구가 필요함(그림 3.3).



▌그림 3.4 세부 연구 내용 체계도

▌지하저수지 잠재 위해요소 분석

■ 수질관련법이 제시하는 오염물을 중심으로 지하저수지 수질에 영향을 끼치는 오염물 별 위해도 분석 및 잠재 위해요소 분석

– 생물학적(바이러스, 박테리아, 원생동물 등 기타 생물학적 요인), 물리적(대수층 내 용존 물질), 화학적(질산성 물질, 염도, 잔류물질 등) 및 기타 잠재 위해요소 분석

■ 위협 우선순위 분석을 통해 관리 우선대상 설정

– 먹는물 수질기준이 제시하는 항목 중 관리 우선대상 설정을 위한 프로젝트 대상지역 내의 위해요소들의 우선순위 설정

■ 취수 및 함양에 따른 대수층 내의 각 오염물의 거동특성을 수치해석과 현장분석을 통해 규명하고 지하저수지 수질 안전성 확보가 가능한 최소한계 도출

– 관리 우선대상에 따라 파악된 위해요소들의 수원지 내 거동특성 수치해석(QUAL2K, SMS, AQTESOLV, FLOWNET, MODFLOW 등의 모델링 패키지 사용)
– 위해요소의 종류별, 농도별 지하저수지로의 영향범위 및 오염농도를 예측하여 지하저수지 먹는물 수질기준 및 지하수 수질기준에서 제시하는 수질기준 미만으로 제한

▌모니터링을 통한 위해요소 예방 및 추적 기술 개발

■ 중점관리대상을 토대로 사전 차단 기술 개발

- 오염원 유입 방어선 외측에 위해요소 관측을 위한 관측정, 원격 센서, 수질 정화장치 등의 효율적 차단장치 개발 및 기 개발된 방법 적용방안 모색

■ 효율적 모니터링 위치, 방법, 주기 결정을 위한 시나리오 별 수치해석 및 테스트베드 검증

- 외부에서 유입 가능한 위해요소 중 관리 우선대상의 거동특성 분석 및 현장자료 검증 결과를 토대로 최적 관측망 설계 방안 도출

■ 모니터링 중 위기 발생 시 즉각대처방안 및 위해요소 차단/처리 기술 개발 및 현장시험

- 수치해석 및 현장데이터를 토대로 한 사전 오염물 유입 예상 시나리오 별 위기대응 가이드라인 개발

■ 위기대처 능력을 확보한 운영시나리오 개발을 위해 오염물 역추적 모형 개발

- 천재지변·사고 등으로 파악할 수 없었던 오염사고에 대비할 수 있는 오염물 역추적 모형 개발
- 프로그래밍 언어 기반 시뮬레이션 모형 또는 통계모형을 기반으로 하는 역추적 모형 개발

▌운영·관리 가이드라인 구축

■ 잠재 위해요소 분석 및 모니터링 연구 결과를 토대로 지하저수지 수질 위해요소 사전관리기술 개발

■ 모니터링관리 책임자 교육 가이드라인 개발

▌수질위해요소 사전관리 연구 단계별 비상 대처 계획 수립

■ 성공적인 연구수행을 위하여 본 과제 제안 시 각 연구단계 별 발생 가능한 비상상황을 예측하여 이에 대한 대처 계획 수립 필요

- 수질규제 항목 이외의 독성물질이 지하저수지에서 검출 될 경우 대응 방안 등

(4) 최종성과물

■ 광역 수질 모니터링 기술 및 오염물 역추적 기술
■ 지하저수지의 연간 운영 지침 및 위기대응 매뉴얼
■ 지하저수지 수질 안전성 확보를 위한 지하저수지 수질 위해요소 사전관리기술 매뉴얼

나. 3-2 청정 지하저수지의 지속가능한 운영을 위한 주입수 전처리 기술 개발

(1) 연구개발 목표

▌지속가능한 인공주입 시설 운영을 목적으로 지하저수지 시험설비 운영을 통한 용량별 전처리 운영 및 설계기준 도출과 하천 수질사고 대응 기술의 개발

▌주입수의 수질 및 지층 특성에 적합한 전처리 공정 도출

▌고효율 전처리 시스템 개발을 위한 최적 설계, 운영, 유지관리 기술 도출

■ 정의
- 전처리 기술 : 하천수 내 존재하는 공극폐색 유발물질 제거 및 지하저수지 보전을 위한 수처리 공정과 실시간 중요 수질을 계측할 수 있는 센싱 기술을 포함

(2) 연구개발 필요성

▌주입수의 수질 및 지층 특성에 적합한 전처리 공정 도출

- 인공주입에 의한 지하저수지 기술은 본 연구를 통하여 최초로 제안된 기술이며 따라서 지하저수지 설계 및 운영 등의 제안된 기술의 원활한 적용을 위하여 주입 전처리 기술 및 지하수 용수처리 기술도 체계적인 연구의 수행이 필요함.

- 주입 전처리 기술로 응집/침전, 오존처리, 여과등 다양한 물리·화학적 공정이 활용될 수 있으나, 경제성 및 유지관리성, 그리고 중복투자 등의 문제 등을 극복하기 위한 각 공정의 최적화 기술개발이 필요함.

▌고효율 전처리 시스템 개발을 위한 최적 설계, 운영, 유지관리 기술 도출

- 주입수는 전처리 공정에 따라 대수층 및 주입정 주변에 clogging 발생에 영향을 미치게 되며, 따라서 주입정 설계 방안 및 역세주기 등과 상관관계를 가지게 됨. 또한 전처리 공정은 주입수의 수질 특성을 바꿔 지하 대수층에서의 수질 개선 특성과 최종 처리수의 수질에 영향을 미치게 됨. 하지만 기존 전처리 공정의 경우 단일 공정에 대한 효율 평가만 수행된 상황임. 따라서 전체 시스템의 효율 극대화를 위해서는 각 전/후 단위공정이 미치는 영향 분석 및 예측, 그리고 앞의 분석을 기반으로 한 최적 설계기술 개발이 필요함(Bouwer, 2002; Pérez-Paricio and Carrera, 1999; Pyne, 2005; Rosenbrand, 2010; Linlin et al., 2011; Murray and Harris, 2010; Rinck-Pfeiffer et al., 2000; Baveye et al., 1998).

- 특히 하천에서의 수질사고 및 수질악화로 부터 대체수자원(지하저수지)의 안전성 확보와 지속가능한 운영을 위한 실시간 주요 수질 계측기술 및 자동운전 제어 기술 개발 필요함.

- 이러한 최적 시스템 개발은 실험실 규모의 모형 시설에서 실험 경계조건을 정밀하게 조절을 통한 실험결과의 정확한 해석 및 예측, 다양한 조건에 대한 운영 및 설계인자를 확보할 수 있음.

- 또한 일정 규모 이상의 현장시험을 통하여 정확한 경제성 평가, 실 시설에 적용 가능한 신뢰성 있는 운영 및 설계인자 확보가 필요함.

(3) 세부연구내용

▌주입수의 수질 및 지층 특성에 적합한 전처리 공정 도출

- 주입수 수질 특성 조사 (3-4, 3-5세세부 연구에서 조사한 배경지하수 수질특성 연계)
- 공극폐색 현상을 최소화 하기 위한 현장환경 기반의 한 수처리 공정 선정 (3-4, 3-5세세부에서 도출한 주입수 수질기준 적용)
- 주입수에 의한 대수층 오염을 방지하기 위한 수처리 공정 선정
  - 주입수의 탁도, TSS(VSS+FSS), TOC(총유기탄소), BOD, 영양염류(T-N, T-P) 등의 수질특성 평가를 통하여 대수층 폐색 및 오염을 방지할 수 있는 전처리공정
  - 전처리 공정 성능 평가는 시설비 및 운영비, 공극폐색 저감 정도, 대수층 환경영향등이 포함되어야함.
  - 시설비는 주입수 전처리 시설, 운영시스템 구축 비용 등이 포함되어야함.
  - 운영비는 동력비, 약품비, 인건비, 유지관리 비용등이 포함되어야함.
  - 전처리 공정에 따른 공극폐색 저감 평가를 위하여 주입수의 수질과 배경지하수 특성, 대수층의 지질학적 특성이 공극폐색에 미치는 상관관계 규명이 이뤄져야 하며, 본 실험은 실험실 규모 모형 실험, 실증실험 규모로 이뤄져야함.
  - 대수층 환경영향에는 주입으로 인한 대수층 오염, 공극폐색 등의 영향이 포함됨.
  - 실험실 규모의 수처리 모형평가를 통하여 선정된 공정의 적합성 검증 수행

▌고효율 전처리 시스템 개발을 위한 최적 설계, 운영, 유지관리 기술 도출

- 각 단위 공정 최적 설계 · 운영인자 도출
- 전체 시스템 효율의 증대를 위한 각 단위 공정의 구성의 최적화
- 지속가능하고 대용량 인공주입을 위한 설계 · 운영 · 유지관리 기술 도출
- 중요 수질 실시간 자동 계측 (EC, UV254, 탁도 등)
- 하천 주요 지점 수질 모니터링 데이터 취합 및 수질변화 예측 기술 개발
- 수질사고 대응 및 전처리 공정 연계 매뉴얼 도출
  - 설계, 시공, 운영 및 유지관리 기술은 현장 시험설비를 통하여 기술검증이 되어야함.
  - 실험실 규모의 수처리 모형시설 운영을 통하여 실증 시험 설계 및 운영인자 확보 및 기상

및 기후조건에 영향을 받는 하천수 특성을 최대한 모사하여 다양한 상황에 대한 통합공정에서의 예측 및 대응성 종합 검증 수행
- 현장 시험설비 운영 결과로부터 주요 설계 및 운영인자 확보를 위한 공정별 평가 수행을 하고 또한 해석 및 예측 기술의 보정 수행
- 현장 시험설비 운영을 통하여 전후 공정(전처리 공정→인공함양)과 연계된 운용기술 개발 및 공정의 안정성과 경제성 평가 수행

▌주입수 전처리 연구 단계별 비상 대처 계획 수립

성공적인 연구수행을 위하여 본 과제 제안 시 각 연구단계 별 발생 가능한 비상상황을 예측하여 이에 대한 대처 계획 수립 필요

- 전처리 공정 이후 주입수 수질기준 미달 시 대응
- 전처리 공정 이후 지속적인 clogging 발생에 대한 대처 등

(4) 최종성과물

- 시스템 운영시 수질변화 특성 보고서
- 전처리 시스템 설계 매뉴얼
- 전처리 시설 운영관리 매뉴얼
- 전처리 공정 기술검증 보고서

다. 3-3 먹는물 공급을 위한 플랜트 최적 설계 · 운영 · 유지관리 통합 기술개발

(1) 연구개발 목표

- 지하저수지 시험설비를 통한 100,000㎥/일 이상의 용량의 안정적인 처리 및 음용수 및 공업용수 수질기준에 만족하고, 대수층 내 유해물질 유입 및 수질사고 시에도 즉각적인 대응이 가능한 용수처리통합시설 설계 및 운영기술 개발

▌용수 수준의 용수공급이 항시 가능하고 안정적으로 계획 공급수량을 처리할 수 있는 용수처리 공정 도출

▌고효율 용수처리 시스템 개발을 위한 최적 설계, 운영, 유지관리 기술 도출

■ 정의 - 용수처리 기술 : 철 · 망간 등의 오염물질 및 인공함양수 내 존재하는 염분등을 제거하여 먹는물 및 공업용수 수질기준에 만족하기 위한 수처리 공정들을 포함함.

(2) 연구개발 필요성

▌용수 수준의 용수공급이 항시 가능하고 안정적으로 계획 공급수량을 처리할 수 있는 용수처리 공정 도출

- 산업화 및 도시화 진행에 따라 취수원 수계 내 다량의 난분해성 유기물은 점차 증가되고 있음. 이러한 난분해성 유기물이 증가할 경우 기존 정수처리 공정으로는 유기물 처리가 한계가 있으며, 잔류 유기물과 소독제가 반응하여 발암성이 있는 소독부산물 생성됨. 따라서 기존 수처리 공정의 한계를 극복할 수 있는 청정 지하저수지 공정과 함께 지하수 내 존재할 수 있는 오염물을 처리할 수 있는 통합 용수처리 시스템 개발 필요함(이정훈 외 5, 2012; Quanrud et al., 2003; McQuarrie and Carlson, 2003).
- 원수 수질 변화에 대한 실시간 자동대응 시스템을 개발하여 원수 내 위해성 물질 대응을 통한 수질의 안전성, 시스템 경제성, 운영의 안정성 등의 확보가 필요함.

▌고효율 용수처리 시스템 개발을 위한 최적 설계, 운영, 유지관리 기술 도출

- 기존 지하수 용수처리의 경우에는 철·망간 산화공정과 응집/여과등의 최소한의 공정으로 구성되어 있어 대수층 내 염수유입 및 오염발생 시 효과적으로 대응하기 어려운 단점을 가지고 있음. 그러므로 선진 기술의 벤치마킹을 통한 기존 공정의 개선과 더불어 앞에서 제시하였던 문제까지 해결할 수 있는 용수처리 핵심 원천기술 및 설계기술을 확보할 필요가 있음 (AWWA, 1999; CSM, 2009, Kim et al., 2005).
- 기존 연구에서는 단위 공정 및 주요 오염원에 대한 처리 효율 평가에 집중되었음. 그러므로 각각의 단위공정이 합쳐질 경우 과잉된 설비 투자될 가능성이 있음. 따라서 본 연구에서는 각각의 단위공정을 통합 평가하여 각 세부공정의 전후 영향 및 처리효율을 평가하여 최적 설계방안의 도출이 필요함.
- 최적 설계된 청정 지하저수지 용수처리 기술은 간접 취수 관련 기술력 확보 및 기술의 완성도를 높여 신규 해외시장 진출을 위한 경쟁력 확보를 가능하게 할 것임.
- 본 연구의 설계인자 및 운영인자는 실험실 규모 실험을 통하여 다양한 시나리오에 대한 평가를 통해 극한의 조건 등에서 다양한 결과의 확보할 수 있으며, 본 결과를 바탕으로 현장 실증시험을 수행하여 동절기/하절기 등 실제 운영되는 환경조건에서의 평가를 통해 기술의 성능, 안정성 등의 검증이 필요함. 또한 보다 정확한 경제성 평가, 실 시설에 적용 가능한 신뢰성 있는 운영 및 설계인자 확보를 위하여 일정 규모 이상의 현장 시험 필요함.

(3) 세부연구내용

▌음용수 수준의 용수공급이 항시 가능하고 안정적으로 계획 공급수량을 처리할 수 있는 용수처리공정 도출

■ 지하저수지에서 양수된 수질특성 평가 및 처리 대상 오염물 선정

■ 먹는물 수질기준 및 공업용수 기준 만족에 적합한 수처리 공정 도출

■ 철·망간을 포함한 중금속 처리 공정 도출

■ 염수 유입에 대비한 용수처리 방안 도출

■ 안정적인 계획급수량 공급을 위한 처리공정 도출

■ 하천 및 지하대수층 내 수질사고 및 악화에 실시간 대응을 위한 계측 및 자동 제어 시스템 개발

- 취수원수의 수질특성 평가를 위해서는 TDS(Total Dissolved Solid), 철 · 망간 농도 및 환경정책기본법 시행령상의 수질평가 기준 및 항목등이 포함되어야함.

- 용수처리수의 수질특성 평가를 위해서는 먹는물수질기준 및 이취미 개선정도 등이 포함되어야함.

- 용수처리 공정 성능 평가는 경제성(시설비 및 운영비), 운영의 안정성, 처리수질의 적합성등이 고려되어야함.

- 시설비는 용수처리, 관로, 운영시스템 구축 비용 등이 포함되어야함.

- 운영비는 동력비, 약품비, 인건비, 유지관리 비용등이 포함되어야함.

- 취수원수 수질특성 별 처리공정 평가는 철 · 망간, 염수처리 등에 대하여 실험실 규모 모형실험, 실증실험 평가 결과를 바탕으로 이뤄져야함.

▌고효율 용수처리 시스템 개발을 위한 최적 설계방안 도출

■ 각 단위 공정 별 최적 설계 · 운영인자 도출

■ 전체 용수처리 고효율 시스템 설계방안 도출을 위한 각 단위 공정 구성 방안 도출

■ 경제성 및 운영의 안정성 확보를 위한 설계 · 운영 · 유지관리 기술 도출

- 설계기술, 시공기술, 운영 및 유지관리 기술은 현장 시험설비를 통하여 기술검증이 되어야함.

- 실험실 규모의 수처리 모형 시설 평가를 통한 적정 공정 및 공정 조합의 선정을 및 실증 시험 설계 및 운영인자 도출함.

- 현장 시험설비 운영 결과를 통한 각 세부공정 조합기술 및 세부 설계 및 운영인자 도출, 그리고 용수처리 플랜트 적용 가능성 평가를 수행함.

- 기존 공정과 연계한 용수처리를 위한 공정 시스템화 및 운영기술 기술 개발 수행함.

▌정수처리 연구 단계별 비상 대처 계획 수립

■ 성공적인 연구수행을 위하여 본 과제 제안 시 각 연구단계 별 발생 가능한 비상상황을 예측하여 이에 대한 대처 계획 수립 필요

- 예측 수질 이하의 인공함양수의 정수장 유입 시 대응 (ex : 염수, 중금속, 소독부산물 등)
- 예측 양수량에 비하여 현저히 수량이 감소하는 경우에 대한 대응

(4) 최종성과물

■ 유지관리 시스템 가이드라인

■ 운영 프로그램(S/W)

■ 최적설계 및 운영 기술검증 보고서

라. 3-4 물리 · 지화학적 대수층 수질의 개선 특성 평가 기술 개발

(1) 연구개발 목표

■ 대수층의 물리화학적 특성에 따른 대수층에서의 인공주입수 수질개선 효과 예측기술 개발(예측정확도 80 % 이상)

▌주입수와 배경지하수 수질차이, 대수층 구성물질에 따른 clogging 발생 특성 평가 및 예측기술

▌인공주입수의 수질개선효과에 미치는 영향인자 규명 및 수질 예측기술 개발

(2) 연구개발 필요성

■ 지중 미세환경에서 지화학적 평형(equilibrium)상태를 이루고 있는 간극수의 화학조성(pH, 이온강도, 용존유기물 농도)과 다른 특성을 가지는 인공주입수가 지중에 유입될 경우, 새로운 평형을 찾기 위해 주입수와 토양 구성성분과의 상호작용이 일어날 것으로 예상됨.

- 따라서 인공주입수의 수질변화예측과 이를 통한 지하저장수의 수질관리를 위해, 특성이 다른 지반내 미세환경에서 인공주입수의 수질변화에 대한 실험적 연구가 필수적임.

- 이러한 대수층 내 정확한 수질거동 예측기술은 주입수 전처리 시설 및 인공함양수 후처리 시설의 과잉투자를 막고 청정 지하저수지의 수질 위해요소 사전관리기술을 보완하여 보다 안전한 상수원 개발에 필요함.

- 또한 지하저장을 통해 용수(예, 음용수)로서의 가치변화를 판단할 수 있는 기준 (미네랄 함량, 맛 등)에 대한 고찰이 필요함.

- 주입수 전처리 시설 및 인공함양수 후처리 시설의 과잉투자를 막기 위해서는 대수층 내 수질거동의 정확한 예측이 필요함.

(3) 세부연구내용

▌주입수와 배경지하수 수질차이, 대수층 구성물질에 따른 clogging 발생 특성 평가 및 예측기술

- 지속가능한 대용량 인공주입을 위한 주입수 적정 수질기준 도출(공극폐색 방지)

- 지층특성, 주입수 수질, 그리고 배경지하수 수질이 공극폐색에 미치는 영향 평가

- 인공주입수 특성에 의한 공극폐색 예측을 위한 모델개발

▌인공주입수의 수질개선효과에 미치는 영향인자 규명 및 수질 예측기술 개발

- 대상 대수층의 광물조성특성(광물조성 및 광물조성비, 토질구성, 입도분포특성) 및 인공주입수 주입조건(주입속도)에 따른 인공주입수의 수질변화특성변화에 대한 실내실험

- 대상 대수층에 주입된 인공주입수의 수질예측을 위한 모델개발

- 용도별 저장수의 가치 평가 기술 개발

– 대수층 수질저감 특성 평가에는 대수층 특성, 대상 오염물질 특성, 주입수의 특성, 대수층 환경영향, 체류시간에 따른 오염물 저감 및 용출 등이 고려되어야 함.

– 대수층 특성 평가에는 대수층을 구성하고 있는 토양의 고유투수계수 및 수리전도도, 토양구조 및 토성, 영양물질 농도, 온도, pH, 토양의 오염물 흡착능력, 용출능력 등이 포함됨.

– 대상 오염물질 특성 평가에는 휘발성, 용해도 및 분배계수, 화학적 구조, 농도 및 독성, 흡착 및 용출특성 등이 포함됨.

- 주입수의 특성 평가는 주입수의 수질특성에 기인되어 대수층 수질 및 환경 변화 등이 포함됨(주입수 내 입자성 물질, 용존 산소, 영양물질에 의한 공극폐색, 소독부산물 발생 등).

- 대수층 수질거동 해석 기술은 지하수 흐름, 대수층 및 주입수 내 오염물의 특성, 배경 지하수의 특성 등이 시간의 함수로 고려되어야함.

- 개발된 수질개선 특성 평가기술은 시험시설에서 보정 및 검증되어야함.

▌물리·지화학적 수질평가 연구 단계별 비상 대처 계획 수립

■ 성공적인 연구수행을 위하여 본 과제 제안 시 각 연구단계 별 발생 가능한 비상상황을 예측하여 이에 대한 대처 계획 수립 필요

- 예측한 수질과 상이한 인공함양수가 양수되는 경우에 대한 대응
- 외부 조건변화에 대한 대응 (지하수위 변동, 유입수 수질 특성 등)

(4) 최종성과물

■ 대수층 내 오염물 거동 및 공극폐색 예측 모델 (전산 S/W)

■ 지층 특성별 오염물 물리·지화학적 거동 특성 평가 보고서

■ 물리·지화학적 수질개선 특성 기술검증 보고서

마. 3-5 대수층 수질의 생물학적 개선특성 평가기술 개발

(1) 연구개발 목표

■ 대수층 내 미생물에 의한 인공주입수 내 오염물 저감을 예측 평가하는 기술 개발

▌대수층의 생물학적 수질 개선특성조사

▌대수층 미생물 모니터링 기술개발

▌지하저수지의 biofouling 제어 기술개발

(2) 연구개발 필요성

▌대수층의 생물학적 수질 개선특성조사

- 상수원수로 사용되는 지하수의 수질에서 고려해야 할 오염물질은 크게 1) 유기물(자연유기물과 인간활동에 의해 발생되는 유기물), 2) 무기물(질산(NO3-), 암모니움, 인산, 중금속 등), 3) 병원성 미생물, 그리고 4) 미생물기원 수질 오염물질로 구분됨.

- 이들 오염 물질은 심미적(물맛 저하, 냄새 또는 색 유발) 또는 건강상 해(지능 및 간 손상, 신경 독소, 출혈야기, 수인성 질병야기 등)를 초래하므로 수질관리에 있어 문제 야기

- 대수층 내의 생분해가 저하되면 토착미생물의 생분해능을 활성화하는 적극적인 대응전략이 필요함.

▌대수층 미생물 모니터링 기술개발

- 대수층의 미생물에 대한 정보는 비교적 드물다. 그 이유는 토양미생물이 대부분 실험실 조건하에서 배양이 잘 안 되는데다 대수층에는 혐기성 미생물이 비교적 많아 기존의 배양에 근거한 방법으로는 분석에 한계가 있음. 분자생물학적인 기법의 개발 및 적용은 이런 한계를 극복할 수 있음.

- 대수층 오염물질의 생분해의 기작을 이해하기 위해서는 관련된 미생물 군집에 대한 정보는 필수적이다. 미생물 군집분석을 통해 해당부지의 미생물 조성과 우점종을 파악할 수 있음.

- 생분해성 미생물 개체군의 크기가 크더라도 생분해 관련 유전자가 발현이 안되면 생분해가 일어나지 않으므로 생분해관련 유전자의 발현을 모니터링할 필요가 있음.

- 상기의 대수층 내의 총균수와 더불어 특정 미생물 개체군의 검출(예, 병원 미생물) 및 정량적 정보(유기물 생분해 미생물 등) 등은 안정적이고 안전한 지하수질 확보에 필수적임.

▌지하저수지의 biofouling 제어 기술개발

- 인공함양을 통한 대수층의 지하수를 상수원수로 확보하는 기술에 있어biofouling은 본 기술의 운영에 있어 가장 큰 장애요인 중의 하나임.

- Biofouling은 주로 생물막 형성에 따른 정(주입정 또는 취수정)의 부식 및 막힘과 더불어 정 주변 토양의 막힘 현상의 발생이 원인이며 이에 따라 지하수의 회수율과 질을 저하시키는 것으로 보고됨.

(3) 세부연구내용

▌대수층의 생물학적 수질 개선특성조사

- 유, 무기 오염물의 생물학적 저감 특성평가 및 최적화: 실험실 규모 컬럼 실험

- 대장균군 및 미생물기원 수질오염물의 자연저감 특성평가 및 최적화: 실험실 규모 컬럼 실험
- 대수층의 생분해 활성상승을 위한 적극적 전략기술개발: Biosparging, in situ bioremediation, bioaugmentation
- 유,무기 오염물의 생물학적 저감의 최적화 기술검증 및 보완: 현장 실험
- 대장균군 및 미생물기원 수질 오염물의 자연저감 최적화 기술검증 및 보완: 현장실험

▌대수층 미생물 모니터링 기술개발

- 지하저수지공정의 미생물 군집분석 기술개발: 실험실 규모 컬럼 실험
- 지하저수지공정의 총균수 및 특정 오염물 저감 미생물의 정량화 기술개발: 실험실 규모 컬럼 실험
- 지하저수지공정의 생분해균의 활성 모니터링 기술개발
- 지하저수지공정의 미생물 모니터링 기술의 현장 적용, 검증 및 보완: 현장실험:

▌대수층 미생물 모니터링 기술개발

- Biofouling 특성평가: 실험실 규모 컬럼 실험
- 전처리의 biofouling의 제어 효과 조사 및 최적화: 물리적 세척 및 화학적 소독-실험실 규모 컬럼 실험
- Biofouling 제어기술 현장 적용, 검증 및 보완: 현장 실험

▌생물학적 수질평가 연구 단계별 비상 대처 계획 수립

- 성공적인 연구수행을 위하여 본 과제 제안 시 각 연구단계 별 발생 가능한 비상상황을 예측하여 이에 대한 대처 계획 수립 필요

– 주입 미생물이 대수층에 정착이 실패한 경우에 대한 대응 (ex : 염수유입, 소독제, 타 미생물과의 경쟁 등)

(4) 최종성과물

- 부지 특이적 생분해 특성에 따른 생분해 진단 보고서
- 생분해 메커니즘 평가 및 모델링 소프트웨어
- Biofouling 방지 위한 최적화된 전처리 매뉴얼

■ 생물학적 수질개선 특성 기술검증 보고서

바. 최종성과물 및 성과지표

▌최종성과물

■ 음용수로서의 신뢰도 확보를 위한 청정 지하저수지의 수질 위해요소 사전관리기술 개발
- 광역 수질 모니터링 기술 및 오염물 역추적 기술
- 지하저수지의 연간 운영 지침 및 위기대응-매뉴얼
- 지하저수지 수질 안전성 확보를 위한 지하저수지 수질 위해요소 사전관리기술 매뉴얼

■ 청정 지하저수지의 지속가능한 운영을 위한 주입수 전처리 기술 개발
- 시스템 운영시 수질변화 특성 보고서
- 전처리 시스템 설계 매뉴얼
- 전처리 시설 운영관리 매뉴얼
- 전처리 공정 기술검증 보고서

■ 먹는물 공급을 위한 플랜트 최적 설계 · 운영 · 유지관리 통합 기술개발
- 유지관리 시스템 가이드라인
- 운영 프로그램(S/W)
- 최적설계 및 운영 기술검증 보고서

■ 물리 · 지화학적 대수층 수질의 개선 특성 평가 기술 개발
- 대수층 내 오염물 거동 및 공극폐색 예측 모델 (전산 S/W)
- 지층 특성별 오염물 물리 · 지화학적 거동 평가 보고서
- 물리 · 지화학적 수질개선 특성 기술검증 보고서

■ 대수층 수질의 생물학적 개선특성 평가기술 개발
- 대용량 인공주입을 위한 전처리 공정 핵심 설계 및 지침 도출
- 지하수 용수처리 통합공정 설계 도출 및 운영 시스템 구축
- 인공주입 및 지하수 용수처리 공정 설계 및 유지관리 가이드라인 도출
- 대수층 내 오염물 저감 모델링 소프트웨어 개발

▌성과지표

성과목표	성과지표		측정방법	단계별 목표치					최종목표치	가중치 (0~1)	비고
				1	2	3	4	5			
과학기술적 연구 성과 향상	1-1	학술지 게재-SCI/SCI(E)	건	0	0.5	0.5	1	2	4	1.0	
	1-2	학술지 게재-일반학술지	건	0	1	1	2	2	6	0.6	
	1-3	국내외 학술회의 발표	건	0	2	2	3	3	10	0.4	
	1-4	지식재산권-특허, 소프트웨어	건	0	0	1	1	1	3	2	
기술개발역량 향상	2-1	과제당 산학연 협력 활동건수	건	1	1	1	2	2	7	0.5	
	2-2	산학연 기술지원 건수	건	0	0	0	1	1	2	0.5	
	2-3	세부과제 평가보고서 (고유지표)	건	1	1	1	1	1	5	1.0	
	2-4	관련분야 국제협력 네트워크 구축 (고유지표)	건	0	1	1	1	1	4	0.4	
사회경제적 파급효과증대	3-1	연구개발 관련 홍보 건수	건	0	0	1	1	1	3	0.4	
	3-2	기술확산을 위한 상호교류 정도	건	1	1	1	2	2	7	0.5	
	3-3	기술적용 및 기술이전	건	0	0	0	1	2	3	1.0	
	3-4	전문인력양성 (고유지표)	명	0	0	0	1	1	2	0.5	
기술개발 계획 및 추진체계 확립	4-1	법/제도/정책 제안	건	0	0	0	0	1	1	1.0	
	4-2	기술보고서	권	0	0	0	1	1	2	1.0	
	4-3	설계 기준 및 시방서 (매뉴얼)	권	0	0	0	1	2	3	1.0	
	4-4	연구지역 협의 및 확보									
합계				3	7.5	9.5	19	23	62	43.4	수정

▌질적 성과지표

- 위해성 평가 기술의 적정성
- 전후 처리 기술의 경제성 및 적정성
- 대수층 내 수질 변화 평가 기술의 우수성
- 시험시설 검증 결과의 적합성

사. 연구개발 추진 전략

▌기술정보 수집 및 전문가 확보

- 국내외 각종 전문학술지 게재 논문자료
- 국내외 인공주입 전처리 및 지하수 용수처리 업체를 통한 시공 및 운영 정보교류
- 지하 저수지와 관련된 국제 학회 및 세미나 참석

- 기존 자문위원회 활용 및 국내외 관련 신규 전문가의 지속적인 확보

▌기존연구 결과 활용

- 기 수행되었거나 현재 수행되고 있는 수처리 및 오염물 저감특성 연구개발 결과의 활용
- 국내외 선진 기술 및 결과의 벤치마킹을 통한 국내에 적합한 기술의 조기개발

▌산학연 공동연구 수행

- 대학을 중심으로 오염물 저감 및 해석에 관한 핵심원천 기술 개발을 수행함.
- 산업체는 상대적으로 우위를 점하고 있는 수처리 설계·운영 기술연구를 수행함. 이와 같은 역할분담 및 효율적인 연구를 통하여 완성도 높은 통합 기술을 구축함.

▌개발기술의 검증

- 개발된 인공주입 전,후 수처리 기술의 현장 시험설비의 적용을 통한 성능의 검증 및 개선을 수행
- 시험설비 시설에서 공정 설계 및 유지관리 가이드라인을 바탕으로 설계 및 운영을 수행하여 가이드라인의 적절성 검증
- 시험설비 시설에서의 지층 및 체류시간별 유기물 농도 평가를 통하여 개발된 오염물 저감 모델링의 신뢰성 및 정확성 평가

▌개발기술의 수요처 확보를 통한 성과도출

- 효과적인 용수처리공정이 요구되는 국내외 인공함양 및 강변여과 적용 지역조사
- 추가적인 취수원 개발이 요구되는 지자체 및 관련기업 조사
- 물관련 산업 고성장이 이뤄지고 있는 아시아, 중동, 그리고 아프리카 지역 조사

5. 4세부과제 (소규모 지하 저수지 기술)

가. 연구과제명

- 건기 중 30일 이상 – 50m^3/d 이상 생산능력의 지하저수지 기술 개발

나. 연구개발 목표

▌우기주입-건기회수 기술을 이용한 건기에 30일 이상 - 50m^3/d 이상 청정 용수를 생산할 수 있는 소규모 지하저수지 설계, 구축, 운영 및 유지관리 기술 개발

- 소규모 지하저수지는 도서 및 해안지역, 그리고 산간 등의 낙후 지역의 물 공급을 원활히 하는데 유용한 기술임. 낙후 지역은 대체로 인구밀도가 낮아 비용이 많이 소요되는 지표수 개발 또는 타 지역의 수자원을 활용하는 방법은 경제성이 없거나 원천적으로 불가능할 수 있음.

- 또한 물 부족이 그다지 심각하지 않은 지역에서도 재난 시에도 상당 기간 동안 깨끗한 물 공급을 위한 비상용수 확보가 차원에서도 필요한 기술임. 따라서 소규모지하저수지 설계기술 연구에서는 국내의 보편적인 대수층을 고려하여 최저의 비용으로 건기에 안정적 물공급이 가능한 기술을 개발하여야 함.

다. 연구개발 및 정부지원 필요성

- 우기주입-건기회수 기술은 우기와 건기가 뚜렷한 기후를 가진 지역에서 연중 이용가능한 지표수 발달이 빈약하여 발생할 수 있는 건기의 물 부족 현상을 해소하는 데 기여할 수 있는 기술임. 우리나라에서는 인구밀도가 낮은 도서 및 해안지역, 그리고 산간지역에서 유용한 수자원 확보 대안이 될 수 있음.

- 상술된 지역에서도 우기에 발생하는 잉여 지표수를 대수층에 주입하고 건기에 회수하는 방법으로 건기의 물 부족을 완화시킬 수 있음.

- 소규모 지하저수지의 주 수혜지역은 도서 및 해안지역, 그리고 산간 등의 낙후 지역임. 동 지역은 약간의 가뭄에도 급수가 제한되는 등 물 사정이 매우 열악함. 특히 도서 지역의 경우 다른 지역의 물을 공급하는 것이 아예 불가능하거나 매우 어려운 경우 약한 가뭄도 심각한 결과를 초래함.

- 이러한 지역의 경우 대부분 인구밀도가 낮아 필요한 수자원량이 많지는 않지만 요구되는 수자원 개발의 경제성이 낮음을 의미함. 따라서 국민의 기본권인 깨끗한 물을 공급받을 권리를 충족시키기 위한 연구에 정부가 주도적으로 지원해야함은 당연함.

- 도서, 산간지역은 유역면적이 협소하고, 지표수 발달이 미약하여 안정적인 신규 용수공급원 개발 곤란

- 해안지역은 염수침입에 따른 지하수환경 훼손으로 양질의 지하수원 확보 곤란

- 따라서 산간, 도서·해안 등 지역특성을 고려하여 인공함양기술을 이용한 소규모 지하수자원 확

보기술 개발이 필요함.

■ 지하수 인공함양은 자연적인 물의 순환계에서 하천을 통해 바다나 대기로 방출되는 물의 일부를 자연환경을 파괴하지 않고 포획하여 인위적으로 지하에 주입함으로써 지속적으로 지하수 자원을 이용할 수 있는 녹색성장기술임.

■ 산간, 도서·해안지역에서는 대용량의 수원확보가 곤란하여 지역특성(지형/지질, 인구, 생활패턴 등)을 고려한 소규모 지하수원 확보만으로도 효과를 높일 수 있음.

■ 홍수기 · 평수기 등 강우 발생 시에 지하저수지를 활용한 저류량 증대를 통해 갈수기나 가뭄에 대비한 지하수량 확보함.

라. 연구개발 주요내용

▌4-1 우기주입-건기회수 지하저수지 설계 기술

■ 인공함양을 통해 지하수 확보가 가능한 후보지점 선정

- 가뭄에 취약하고 지표수 개발이 어려운 산간 및 도서·해안지역
- 석회동굴 등 지하공동 발달지역 및 기타 비상용수 필요지역

■ 효과적인 주입 및 저류가 가능한 함양기술 개발

- 직접 관정주입, 간접 함양지, 체류시간확보 방안
- 지표 인공함양지와 연계방식인 환상(環想) 회전식 저류 방안
- 충적층 발달이 빈약한 지역에 대한 함양기술 개발

■ 한국형 소규모 지하저수지 설계 기술 개발

- 암반 대수층 또는 소규모 충적층의 지하저수지 포텐셜 해석기술
- 주입 기간 및 주입량 설계 기술
- 대수층 유효저류량 및 저장 기간 해석 기술
- 회수 기간 및 회수량 해석 기술
- 수질 변화특성 분석 기술
- 시범설계 및 개발 가능 지역 평가

■ 실험실 수리모형 기술 검증
- 실험실 수리모형 설계 및 구축
- 다양한 시나리오 도출
- 실험 검증을 통한 기술의 완성도 제고

■ 배후 지하수 흐름과 주입 수의 상호관계

▌4-2 소규모 지하저수지 운영 및 유지관리 기술

■ 소규모 지하저수지 최적 운영기술

- 지역별 건기의 지속기간 및 물 부족 실태 조사
- 지역별 우기 강수량 패턴 분석을 통한 주입 기간 도출
- 배후 지하수의 흐름 특성 분석
- 회수율 극대화 방안

■ 단일공 주입-양수 성능 시간변화 평가 기술

- 주입 기간 및 주입량 설계 기술
- 대수층 저장 기간 해석 기술

■ 함양시설 유지관리 기술

- 주입(함양)량 및 양수량 지속을 위한 유지관리 기술
- 폐색(관정 및 함양지) 원인 분석 및 대책 수립

■ 주입, 저장 그리고 양수가 교차하며 주기적으로 이루어지는 관정의 운영기술

■ 수량 · 수질을 고려한 지하수 관리 최적화 시스템 개발

마. 최종 성과물 및 지표

▌최종성과물

■ 우기주입-건기회수 기술을 이용한 건기에 30일 이상 - 50m^3/d 이상 청정 용수를 생산할 수 있는 소규모 지하저수지 설계, 구축, 운영 및 유지관리 토탈솔루션 기술 및 적용 매뉴얼

■ 국내 소규모 지하수저수지 조성 가능 후보지점

■ 지역특성에 적합한 맞춤형 소규모 인공함양기술

■ 수리모형 검증 보고서

▌성과지표

성과목표	성과지표		측정방법	단계별 목표치					최종목표치	가중치(0~1)	비고
				1	2	3	4	5			
과학기술적 연구 성과 향상	1-1	학술지 게재-SCI/SCI(E)	건	0	0	1	1	1	3	1	
	1-2	학술지 게재-일반학술지	건	2	2	2	2	2	10	0.4	
	1-3	국내외 학술회의 발표	건	3	4	4	4	4	19	0.2	
	1-4	지식재산권-특허, 소프트웨어	건	0	0	1	1	1	3	2	
기술개발역량 향상	2-1	과제당 산학연 협력 활동건수	건	0	2	2	2	2	8	0.2	
	2-2	산학연 기술지원 건수	건	0	1	0	1	0	2	0.2	
	2-3	세부과제 평가보고서 (고유지표)	건	1	1	1	1	1	5	2	
	2-4	관련분야 국제협력 네트워크 구축 (고유지표)	건	0	1	1	1	1	4	0.4	
사회경제적 파급효과증대	3-1	연구개발 관련 홍보 건수	건	1	1	1	1	1	5	0.4	
	3-2	기술확산을 위한 상호교류 정도	건	1	2	2	2	3	10	0.6	
	3-3	기술적용 및 기술이전	건	0	0	1	1	0	2	2	
	3-4	전문인력양성 (고유지표)	명	0	2	2	2	2	8	0.8	
기술개발 계획 및 추진체계 확립	4-1	법/제도/정책 제안	건	0	0	1	0	1	2	0.6	
	4-2	기술보고서	권	0	0	1	1	1	3	1	
	4-3	설계 기준 및 시방서 (매뉴얼)	권	0	0	1	0	2	3	0.4	
	4-4	연구지역 협의 및 확보									
합계				8	18	21	20	22	87	54.2	

▌질적 성과지표

- 설계, 운영 및 유지관리 기술의 적용성 및 완성도
- 수리모형 기술 검증의 적정성

바. 추진전략

▌핵심 기술 확보를 위한 세부과제 연구의 독립성 부여와 total solution 확보를 위한 세세부과제 간, 타 세부과제와 유기적 연계 유지하여 추진함.

▌핵심 추진전략 실행을 위한 전략적 접근 방법

- 국내외 학연산관 전문가 최대한 활용
- 세부과제의 행정적 업무 최소화를 통한 연구집중도 제고
- 세부과제 및 협동과제의 유기적 연계
- 수도 및 지하수 분야 산업체의 적극적 참여 유도
- 중앙정부, 광역 및 기초 지방자치 정부와 긴밀한 협조

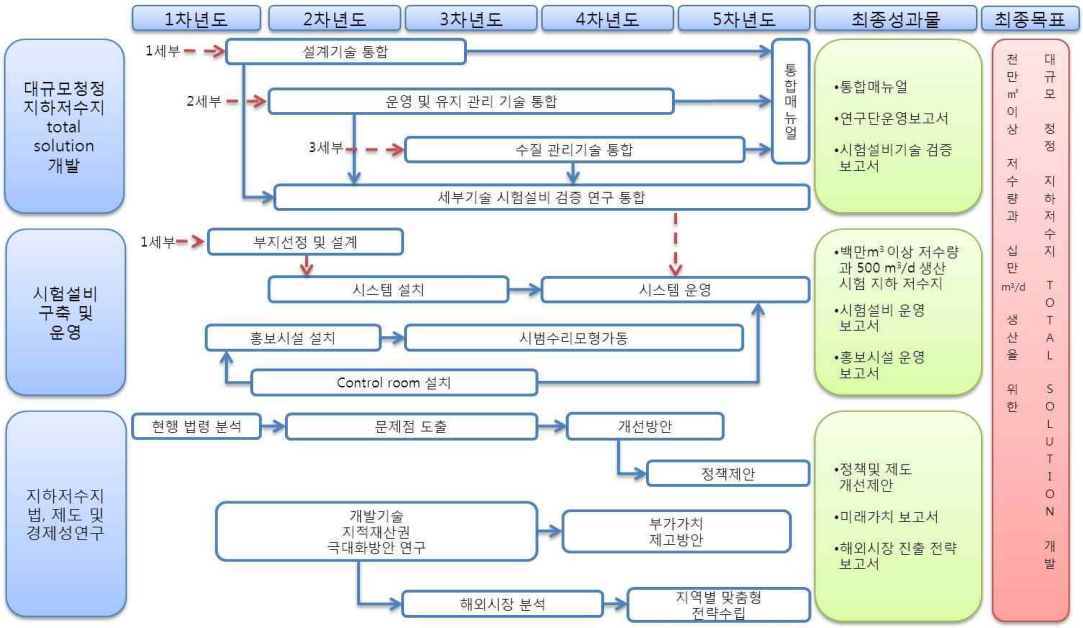
제 5 절 세부과제 간 연계관계

종점 / 시점	총괄	1세부 최적설계	2세부 운영 및 유지관리	3세부 수질관리	4세부 소규모 지하저수지
총괄		● 시험시설 활용계획 조정 및 승인	● 시험시설 활용계획 조정 및 승인	● 시험시설 활용계획 조정 및 승인	
1세부 최적설계	● 수리지질 조사기술 ● 최적설계기술 ● 시험시설 설계도 ● 시험시설 사용계획 및 검증결과		● 모니터링 및 제어 시스템 구성 체계	● 대수층 수리수문지질특성 ● 수질모니터링 시스템구성 ● 수질변화예측 모델	● 최적설계 원천기술
2세부 운영 및 유지관리	● 운영 및 유지 관리 기술 ● 시험시설 사용계획 및 검증결과	● 모니터링 요구조건 ● 주입정 유지관리기준		● 수질관리모니터링 결과 ● 운영 및 유지관리 효율화를 위한 수질관리 방안	● 관정 관리기술
3세부 수질관리	● 수질관리기술 및 기준 ● 시험시설 사용계획 및 검증결과	● 모니터링 요구 항목 ● 대수층 수질변화 특성	● 수질관리를 위한 운 및 유지관리 항목		● 소규모 지하저수지 수질관리 기술
4세부 소규모 지하저수지	● 설계, 운영 및 유지관리 기술 ● 제도관련 필요항목	● 소규모 지하저수지 유형별 특성	● 소규모 지하 저수지 시설 특성	● 소규모지하저수지 수리수문 특성	

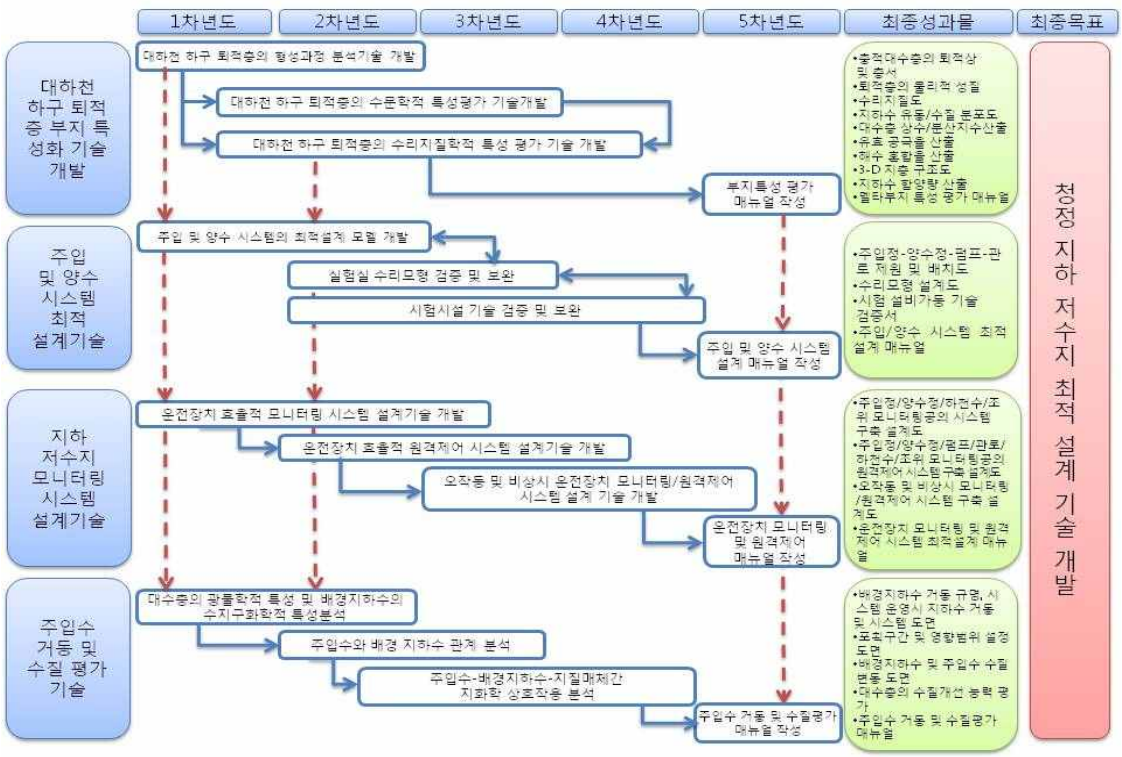
세부과제간 연계 항목의 흐름 방향은 시점 -> 종점임.

제 6 절 과제별·연차별 기술로드맵 및 성과로드맵

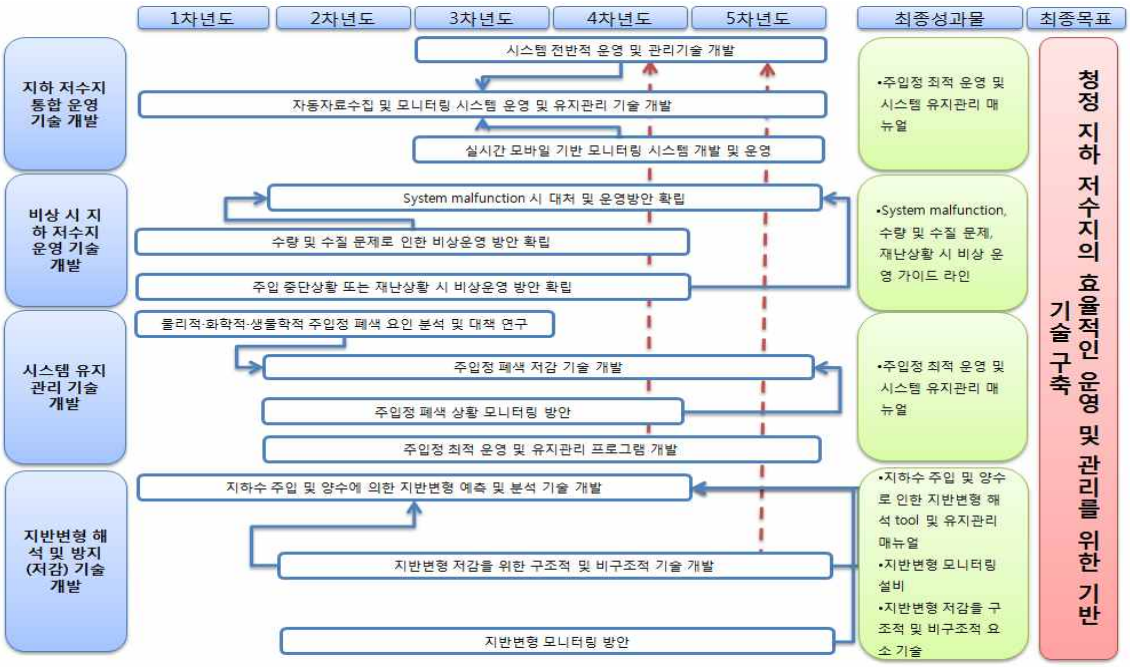
1. 총괄과제 기술 및 성과 로드맵



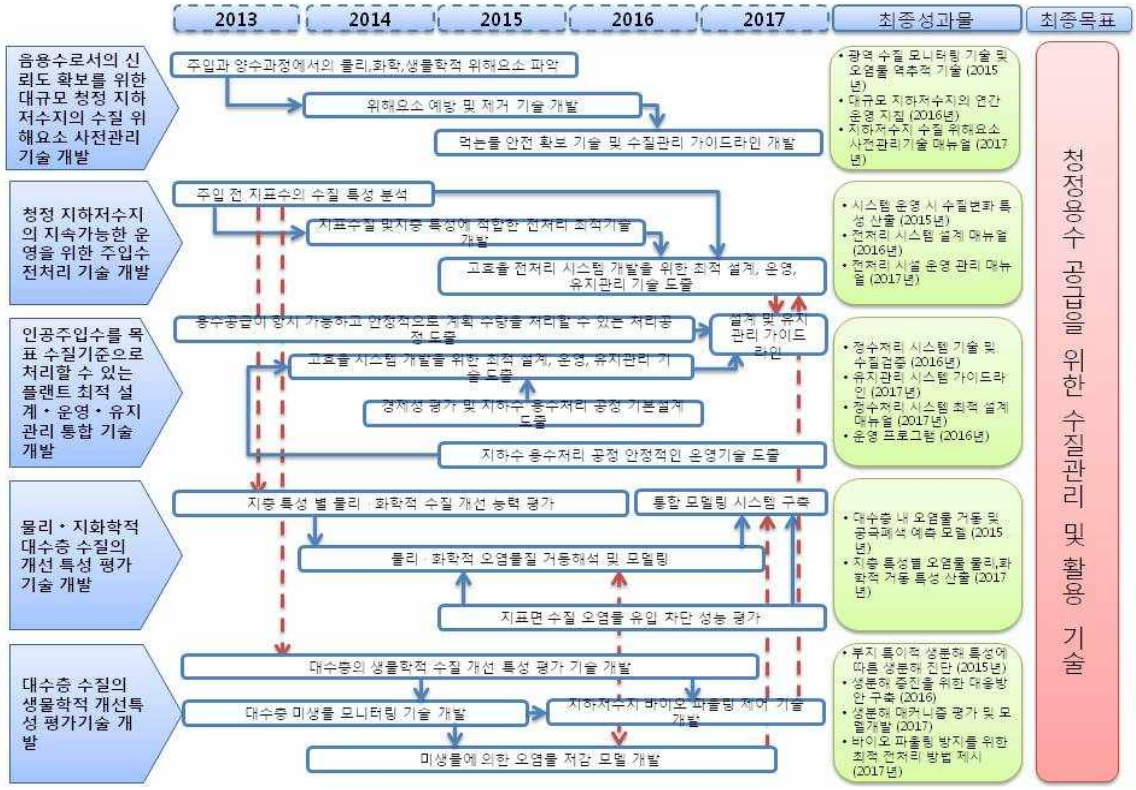
2. 1세부과제 기술 및 성과 로드맵



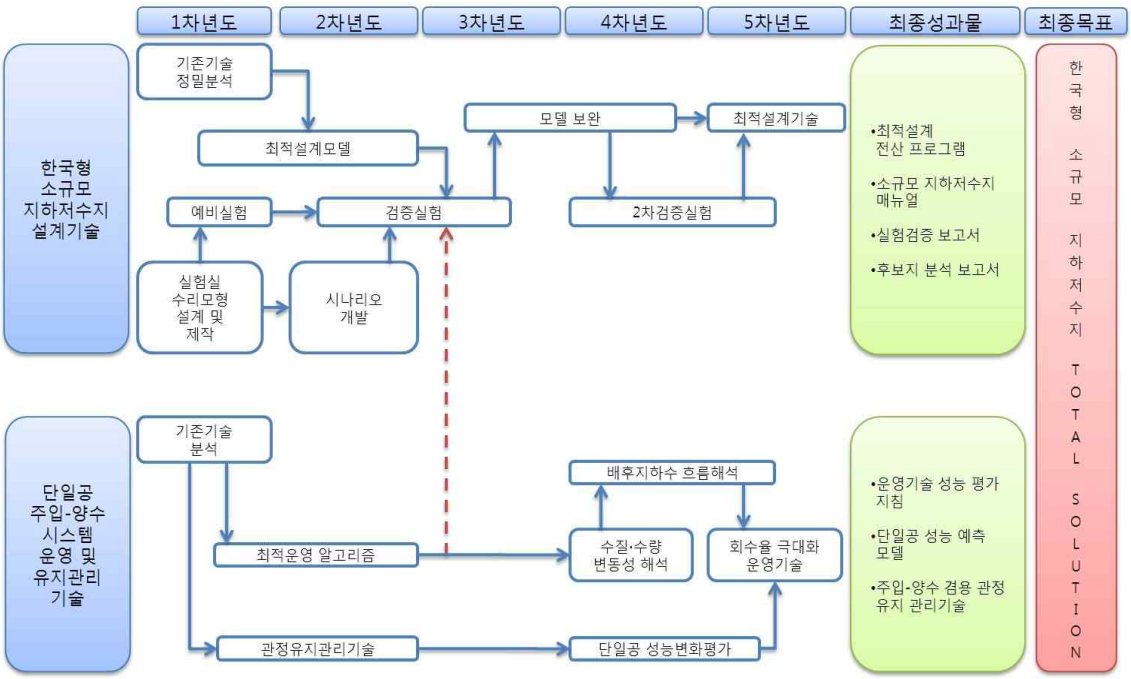
3. 2세부과제 기술 및 성과 로드맵



4. 3세부과제 기술 및 성과 로드맵



5. 4세부과제 기술 및 성과 로드맵



제 7 절 성과의 활용방안

1. 정책적 활용

▌미래지향적 용수공급의 국가 미래비전 및 전략 수립에 활용

- 경제적이고 실현가능한 새로운 물 관련 기술 및 대체수자원 확보
- 저영향개발(LID) 기반의 도시 물순환 체계 확립을 위한 개발기술 적용
- 미래 기후변화에 대응이 가능한 종합적인 물관리 방안 확립

▌물 산업 육성정책 실현의 한 축으로 활용

- 수처리 토탈 솔루션 역량강화 및 기술의 완성도를 높여 국제 경쟁력 증대
- 특성 평가된 대체수자원 기술 개발 및 진출 대상국가의 다변화를 통한 시장 선점

▌도서 및 해안 등 낙후지역의 안정적 물 공급으로 국가 균형발전에 기여

- 청정 지하저수지 개발을 통한 전국민의 물복지 실현 (면단위 농촌 상수도 보급률 : 45%)
- 물공급의 계절적, 지역적 변동성 최소화를 통한 물에 의한 산업체 운영 RISK 최소화
- 청정지하저수지 구축을 통한 각 지역의 물자립 능력 향상

▌물 이전으로 인한 지역 간 갈등 요인 제거로 중앙정부의 위상 제고

- 안정적인 대체 수자원 개발을 통한 이·취수 관련 분쟁 해결은 정부의 물관련 해결 의지에 대한 국민 신뢰성 향상
- 상수원 수질개선을 통하여 먹는물 및 관리시스템에 대한 불안감 해소

▌재난 및 사고에 강한 수원 확보

- 물부족 시에도 안정적인 취수가 가능하여 무중단 물공급 시스템 실현
- 조류발생등과 같은 수질악화 시에도 청정 수질의 수원확보
- 수질 예측기술 및 유해물질 모니터링 기술을 통한 신뢰성 있는 수질관리 시스템 실현

▌수원 다변화를 통한 물 안보 제고

- 표층수 위주의 수자원에서 청정지하저수지로의 전환을 통한 테러 및 수질사고 대비
- 이상가뭄 시에도 안정적인 먹는물 공급을 위한 물의 양과 수질의 확보
- 국가 기후변화에 대비한 지속가능한 물관리 시스템 확보
- 실시간 모니터링 시스템 구축을 통한 비상대응능력 향상

▌지하 및 지상 공간의 복합적 활용으로 국토의 입체적 활용

- 토지부족에 따른 용지난 극복과 함께 지상공간의 기능을 고도 · 합리적 이용
- 도시 인근 지하 공간을 저수지로 활용함으로써 도심지에 안정적인 식수원 공급 가능

▌깨끗한 수원확보를 통한 국민 만족도 제고

- 물 부족 지역과 인근 지역의 물 수급 불균형으로 인한 갈등 및 분쟁 해소
- 취수원 수질악화 및 수질사고로 인한 국민적 수질 불안감 해소
- 청정 수질의 정수 공급을 통한 국민 건강 위협요소 제거
- 양질의 청정수자원을 안정적으로 공급함으로써 산업체 입지 요건 충족

2. 경제적 활용

▌저비용 저에너지 소비형 신규 수자원 확보

- 청정 지하저수지를 통한 지속가능한 청정 수자원 확보
- 도심지 인근 수원확보를 통하여 관로비용 절감 가능
- 비교적 수질이 낮은 표층수를 이용함으로써 기존 수자원의 가치 증대

▌지하저수지 통합기술 확보를 통한 국제 경쟁력 확보

- 지하저수지 시공기술 뿐만 아니라 운영, 유지관리까지 통합 관리시스템 개발
- 실증시설 위주의 연구 수행을 통한 실용화 기술 확보

▌청정 원수 확보를 통한 정수처리 비용 절감

- 청정 수자원 개발을 통한 고도정수처리 비용 절감 가능
- 각 수처리 공정 조합 및 최적 설계를 통하여 건설비 및 수처리 비용 절감

▌부품 및 기자재 산업 육성을 통한 기술 경쟁력 확보

- 각종 산업의 부자재인 및 원료로 쓰이는 물의 안정적인 공급 확보를 통한 제품 생산의 신뢰성 확보

▌지표수 개발이나 해수담수화 등의 고비용 수자원 확보 기술의 대체로 예산 절감

- 댐건설과 같은 지표수 개발 시 발생되는 건설비용 및 사회갈등에 대한 사회비용 절감가능
- 기존 해수담수화 및 하수재이용 공정에 비해 투입되는 운영 에너지 비용 절감가능
- 청정 수자원 개발을 통하여 기존 정수처리공정 대비 가격 경쟁력 향상 가능

3. 기술수요처

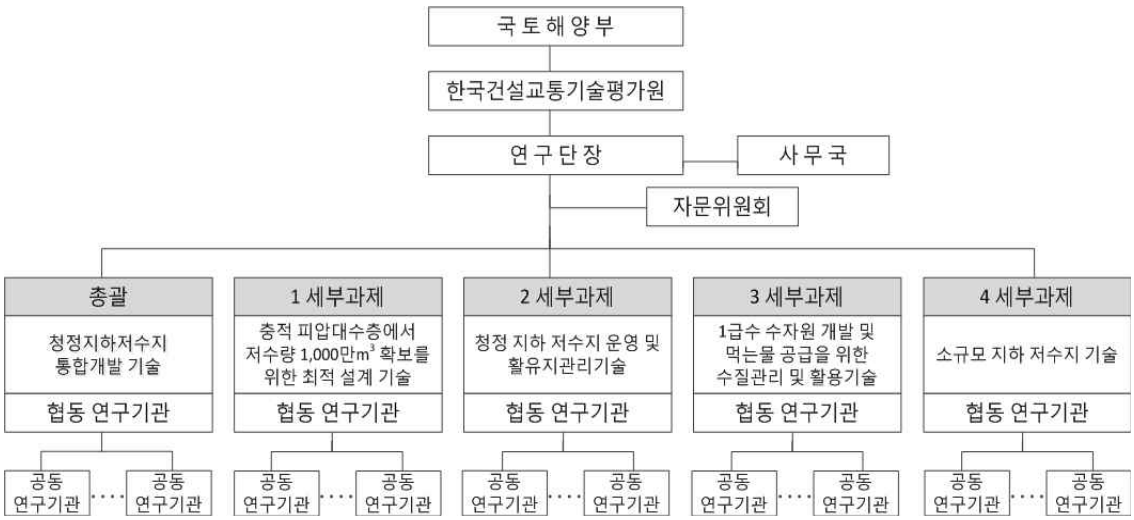
- 댐 개발 검토사업의 대안사업으로 활용
- 취수원 수질악화로 인한 대체취수원 개발 사업으로 활용
- 취수원의 잦은 수질사고로 인한 수질 불안지역의 대안사업으로 활용
- 고도정수처리 비용 증가로 인한 생산단가 상승지역의 대안사업으로 활용
- 취수원의 수량부족 지역, 원거리 취수원 위치지역의 대체수자원 개발 사업으로 활용
- 국내 대 하천 하구에 유사한 특성의 피압대수층 존재

  - 낙동강 하류 강서구 델타 일대에 피압대수층 존재
  - 한강 하류 경기도 고양시 일산 동구 장항동 장항습지 일대 모래/모래자갈질 피압대수층 (두께 ~20m) 존재
  - 금강 하류 부여 및 공주 일대 충적층에도 점토층 하부에 모래 및 모래자갈질 피압대수층 존재
  - 영산강 하류 나주, 영암 일대에 점토층 하부에 모래 및 모래자갈 (30~40m 두께) 피압대수층 존재

- 대부분의 산지, 도서의 계곡부 선상지나 해안 지역에 소규모 지하저수지 설치 가능
- 해외 물 부족 지역 및 취수원 오염지역에 대한 대안사업 제안을 통한 해외 진출 활용 (동남아시아, 남아메리카, 아프리카 대륙에 지하저수지 적용 가능 델타 수 십여 개소 이상 존재)
- 취수원 수질악화 및 물 부족으로 대체수자원 개발이 요구되는 지자체 및 관련기업
- 자체 취수원 부재 및 취수량 부족으로 취수원 확보가 어렵고 취수비용이 높은 지역
- 풍부한 대수층이 인접한 지역으로서 댐 개발 검토 지역
- 효과적인 용수처리 공정이 요구되는 국내외 인공함양 및 강변여과 적용 검토 지역
- 물 부족 지역 및 물 관련 산업 고성장이 이뤄지고 있는 아시아, 중동, 그리고 아프리카 지역

제 8 절 추진체계

▌ 청정 지하 저수지를 위한 설계, 구축, 운영 및 유지관리, 그리고 수질관리를 포함한 total solution 기술을 성공적으로 개발하기 위하여 아래와 같은 체제의 연구단 과제로 추진함이 타당함.



▌연구단은 연구단사가 연구단이 되며, 연구단사는 연구단의 단장을 선임해야 함.

▌연구단장은 지하수, 지표수 및 관수로 분야의 실무경력 또는 연구경력 20년 이상인 박사학위 소지자

▌연구의 완성도와 결과의 실용성을 높이기 위하여 산·학·연 관련 분야의 전문가의 참여가 필요함.

▌연구를 효율적으로 추진하여 성과를 극대화하고 실용화를 효율적으로 추진하기 위하여 세부과제간 정기적 진도점검 세미나를 개최하여 연계기능 강화

▌연구단에는 지하 저수지 구축기술과 관련된 국내외 산·학·연·관 전문가로 자문위원회를 구성하여 연구방향 및 연구 성과의 기술적 평가수행

제 9 절 최종평가 의견을 반영한 과제구성안

▌기획연구 최종 평가회의 의견을 반영하여 과제 구성(안)이 다음과 같이 수정되었음.

▌수정된 과제 구성안

세부과제명	세세부과제(안)
총괄 청정 지하저수지 통합 관리 및 제도 연구	• 청정 지하저수지 통합 관리 및 제도 연구
1세부 대규모 청정 지하저수지 구축 기술 (목표 저수량 1,000만m^3급)	• (1-1) 지하저수지 설계/운영/유지관리 기술 • (1-2) 지하저수지 시스템 시공 기술
2세부 대규모 청정 지하저수지 부지 특성 평가 및 모니터링 기술	• (2-1) 지하저수지 수리지질 특성 및 수질 개선 효과 평가 기술 • (2-2) 지하저수지 모니터링 기술 • (2-3) 지하저수지 지반변형 특성 평가 기술
3세부 도서·산간지역 우기주입-건기회수 소규모 청정 지하저수지 구축 기술 (건기 30일 이상 50m^3/d 이상 생산규모)	• (3-1) 우기주입-건기회수 소규모 지하저수지 설계 기술 • (3-2) 소규모 지하저수지 운영 및 유지관리 기술

제 4 장 사전타당성 검토

제 1 절 정책적 타당성

1. 상위계획과의 부합성

가. 국가차원의 계획과의 부합성

▌녹색기술연구개발 종합대책

- 2009년 국가과학기술위원회와 미래기획위원회 및 각 부처는 「녹색기술 연구개발 종합대책」을 심의하여 의결함. 이는 새로운 국정 패러다임인 「저탄소 녹색성장」을 범 부처 차원에서 견인하고, 국가차원의 녹색기술의 개념과 투자방향을 제시함으로써 체계적인 녹색기술 개발을 위한 중장기 기본계획으로 활용하고자 함임.

- 녹색기술연구개발 종합대책에 따르면, 녹색과학기술은 2020년까지 선진국대비 90%수준으로 향상시키고, 녹색산업경쟁력은 2020년까지 선진국대비 90% 일자리 창출 및 세계시장점유율을 10%이상 달성하고자 함. 또한 환경지속성 지수는 2020년까지 세계 10위권에 진입하는 것을 목표로 하여 녹색기술 선진화를 통한 녹색강국으로 재도약 하고자 함.



▌그림 4.1 녹색기술연구개발 추진전략

- 녹색기술 연구개발 투자방향은 우선 녹색기술 R&D 투자를 전략적으로 확대하고자 함. 즉, 경제성장과 저탄소·환경지속성에 직접적으로 영향을 미치는 녹색기술에 대한 R&D 투자를 2012년까지 2008년대비 2배이상으로 확대하고, 선택과 집중에 의거 중점 육성해 나갈 27개 기술을 선정함. 27대 중점 육성기술에는 대체수자원 확보기술이 포함되어 있음.

▌표 4.1 27대 중점육성기술

27대 중점육성기술	
1. 기후변화 예측 및 모델링개발 기술	15. 생태공간 조성 및 도시재생 기술
2. 기후변화 영향평가 및 적응기술	16. 친환경 저에너지 건축 기술
3. 실리콘계 태양전지의 고효율 저가화 기술	17. 환경부하 및 에너지 소비 예측을 고려한 Green Process 기술
4. 비실리콘계 태양전지 양산 및 핵심원천 기술	18. 조명용 LED· 그린 IT 기술
5. 바이오에너지 생산요소기술 및 시스템 기술	19. 전력 IT 및 전기기기 효율성 향상 기술
6. 개량형 경수로 설계 및 건설 기술	20. 고효율 2차 전지기술
7. 친환경 핵비확산성 고속로 및 순환 핵주기시스템 개발 기술	21. CO_2 포집, 저장, 처리기술
8. 핵융합로 설계 및 건설 기술	22. Non-CO_2 (이산화탄소제외 온실가스) 처리기술
9. 고효율 수소제조 및 수소저장 기술	23. 수계수질평가 및 관리기술
10. 차세대 고효율 연료전지 시스템 기술	24. 대체수자원 확보기술
11. 친환경 식물성장 촉진기술	25. 폐기물 저감, 재활용, 에너지화 기술
12. 석탄가스화 복합발전 기술	26. 유해성물질 모니터링 및 환경정화 기술
13. 고효율 저공해 차량 기술	27. 가상현실 기술
14. 지능형 교통, 물류 기술	

■ 결국, 본 연구과제는 기존의 하천에서 취수함에 따라, 가뭄이나 수질사고에 위험이 노출되어 있는 시스템에서 대체수자원인 청정지하저수지를 개발함으로 인해 물 공급의 안정성을 확보함에 따른 불확실성을 제거한다는 측면에서 27대 중점육성기술인 대체수자원확보기술에 포함된다고 볼 수 있으며, 따라서 정부가 추진하고 있는 녹색기술 향상을 위한 정책에도 부합된다고 판단됨.

▌물산업 육성전략

■ 2010년 녹색성장위원회, 국토해양부, 환경부는 국내 물기업이 내수시장만으로는 성장에 한계가 있고, 따라서 경쟁력 향상을 통한 해외 진출을 마련하고자 「물산업 육성전략」을 발표함. 주요 목표 및 기대효과는 2020년까지 8개의 세계적 물기업을 육성하고, 3만 7천개의 일자리를 창출하여 물산업 강국으로 도약한다는 것임.

▌표 4.2 물산업 육성전략의 기대효과

연도 / 주요 지표	'08	'13	'20
내수(조원)	12	17	26
일자리 창출(만명)	-	1.3	3.7
세계적 물기업(개)	0	2	8
물 재이용(억톤)	8.7	15	43.6
CO2 감축량(만톤)	3.9	7.4	20

■ 분야별 실행방안은 원천기술 개발, 전문 물기업 육성, 먹는샘물 등 연관산업 육성, 물산업 기반구축 등으로 구분하여 총 10개의 세부실행방안을 정하여 전략을 마련함.

■ 실행방안 중 원천기술 개발을 통한 경쟁력 확보 방안은 첨단 여과막등 블루골드시장을 주도할 수 있는 기술을 개발하고자 하는 것이 목표이며, 전략으로는 IT기술 융합을 통해 한국형 고유기술을 개발하여 해외기술과의 차별화를 도모하는 것임.

■ 구체적으로는 단기적으로는 기술의 실증 경험 구축후 상용화를 추진하고, 중·장기적으로는 핵심소재 국산화 및 종합 응용기술 개발을 통해 경쟁력을 확보한다는 전략임.



▌그림 4.2 물산업 육성전략 목표 및 세부전략

■ 정부는 물산업을 육성하기 위해 2020년까지 국비와 지방비를 합하여 약 3조 4,609억원을 투자한다는 계획이고, 이 중 원천기술 개발에 약 6,871억원, 친환경 대체용수산업 활성화에 약 1조 8,208억원을 세부투자 계획임.

▌표 4.3 물산업 육성 투자계획 단위:억원

분야별	계	'10~'13		'14~'17		'18~'20	
		국비	지방비	국비	지방비	국비	지방비
계	**34,609**	**5,975**	**7,014**	**8,638**	**5,440**	**4,191**	**3,351**
1. 원천기술개발	6,871	978	404	3,573	812	640	464
- 블루골드시장 주도기술 개발	4,080	600	404	1,160	812	640	464
- 신기술 실증공간 확보	2,791	378	-	2,413	-	-	-
2. 전문 물기업 육성	7,463	1,905	4,445	334	779		
3. 연관산업 육성	18,307	2,538	2,165	3,923	3,849	2,945	2,887
- 먹는샘물 산업 발전 기반 조성	34	10	-	12	-	12	-
- 친환경 대체용수산업 활성화	18,208	2,505	2,165	3,887	3,849	2,915	2,887
- 상하수도 기자재산업 경쟁력 강화	65	23	-	24	-	18	-
4. 해외진출활성화	1,968	554	-	808	-	606	-

■ 본 연구과제는 청정지하저수지 개발을 통한 블루골드 시장에 진출할 수 있는 기술을 개발함으로써 물산업 활성화에 기여할 수 있다는 측면에서 정부의 물산업 육성전략에 부합되는 것으로 분석됨.

▌수자원장기종합계획(2011~2020)

■ 수자원장기종합계획은 하천법 제23조[12]에 따라 수립되는 수자원관련 국가 최상위계획임. 수자원장기종합계획은 물이용, 치수, 하천환경 종합계획과 수자원조사연구 및 기술개발계획, 수자원 미래과제 대응전략 수립으로 구성됨.

■ 수자원장기종합계획은 개발시대의 다목적 댐 개발 및 치수 사업중심에서 기후변화 및 저탄소 녹색성장 개념에 의한 물관리 패러다임의 변화와 해외 물관련 시장의 급속한 성장에 대응하기 위한 새로운 계획 및 전략의 기틀을 마련하고 있음.

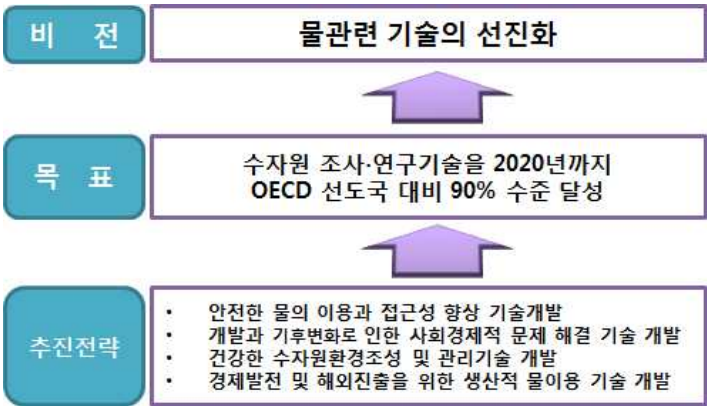
■ 수자원장기종합계획의 2020비전은 녹색국토를 위한 물강국으로 발전시키기 위하여 이수, 치수, 하천환경, R&D, 미래과제 등에 대한 세부 계획을 마련하고 있음.



▌그림 4.3 수자원 장기종합계획 기본목표

■ 이 중 「수자원 조사·연구 및 기술개발 계획」은 과거 대부분 이수 및 치수관련 연구에 편중된 점을 벗어나 「안전한 물의 이용과 접근성 향상 기술개발」, 「개발과 기후변화로 인한 사회경제적 문제 해결 기술개발」, 「건강한 수자원환경조성 및 관리기술개발」, 「경제발전 및 해외진출을 위한 생산적 물이용 기술개발」로 구분하여 추진하고, 2020년까지 OECD 선도국 대비 90%까지 기술수준을 향상시키고자 함.

12) 하천법 제23조(수자원장기종합계획의 수립) ① 국토해양부장관은 대통령령으로 정하는 바에 따라 수자원의 안정적인 확보와 하천의 효율적인 이용·개발 및 보전을 위한 20년 단위의 수자원장기종합계획(이하 "수자원장기종합계획"이라 한다)을 수립하여야 한다.



▌그림 4.4 수자원 조사연구 및 기술개발 계획 비전

■ 추진계획 중 「안전한 물의 이용과 접근성 향상 기술 개발」항목의 주요 내용을 살펴보면, 현실적인 대체 수원인 지하수의 활용성 증대를 위한 "국가 지하수자원 활용 고도화 기술개발"을 추진하는 것임.

■ 즉, 수변지역 지하수 조사평가 및 이용관리 고도화 기술을 개발하고, 지질 지하수 융합이용 기술 등을 개발하는 것으로, 본 연구과제의 주요 목표인 청정지하저수지를 효율적으로 이용하기 위한 기술개발과 상당부분 연구 목표가 부합되는 것으로 판단됨.

나. 부처 고유 업무 및 자체 계획과의 일관성

▌2025 수도정비기본계획(광역상수도 및 공업용수도)

■ 최근 급격히 변화되고 있는 사회·경제적 여건을 반영하여 전국적인 용수수급 현황을 분석하고, 기후변화로 인한 홍수, 이상 가뭄 등 기상이변을 고려한 광역상수도 및 공업용수도의 합리적인 설치·운영에 관한 계획을 수립함으로써, 한정된 수자원의 효율적 이용과 지역간 용수수급 불균형을 해소하고 용수공급의 안정성을 확보하고자 「2025 수도정비기본계획(광역상수도 및 공업용수도)」을 수립·고시함.

■ 「2025 수도정비기본계획」은 크게 시설확충계획, 시설개량계획, 안정화 구축계획, 대체수원 개발계획, 상수도 수질관리계획, 상수도 수요관리계획, 연구 개발 및 정보화 계획, 기술진단계획, 재해대책, 사업시행 및 재정계획등으로 구분할 수 있음.

■ 이러한 계획 중 대체수원 개발계획은 수원의 종류 및 특성에 따라 취수원 개발 가능지점 및 가능량을 검토하고 이를 기초로 장기적 관점에서 광역 및 공업용수도 취수원의 대체수원 확보가능량을 검토하고자 함.



▌그림 4.5 대체수원 개발계획 수립 절차

■ 수원의 종류별 특성에 따라 대체수원 개발 가능지점의 위치 및 가능량을 조사 분석한 결과 개발 가능지점은 총 116개소, 가능량은 3,048.8천㎥/일로 검토됨.

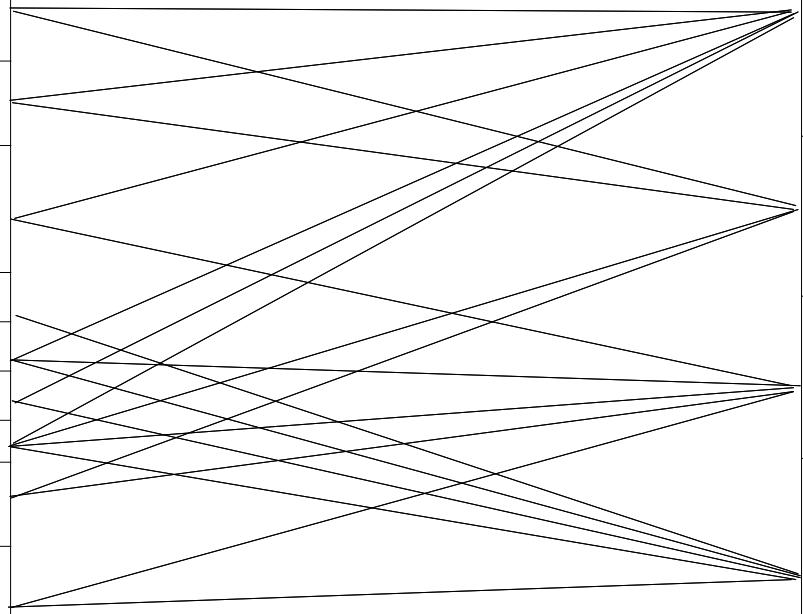
▌표 4.4 대체수원 확보방안 총괄

수 원	대체수원	개발 가능량 (천㎥/일)
계	**116개소**	**3,048.8**
지 하 댐	내양댐 등 21개소	726.1
저 류 댐	주리댐 등 23개소	593.4
식수전용 저수지	속초저수지 등 24개소	92.8
강 변 여 과 수	여주강천 등 33개소	646.5
하수처리수 재이용	포항하수처리장 등 15개소	990.0

■ 본 연구과제 역시 대체수원인 지하저수지를 개발하여 물 공급의 불확실성을 개선하기 위한 연구이므로 「2025 수도정비기본계획」의 계획과 상호 부합된다고 판단됨.

다. 상위계획과의 연계성

정부정책	관련 내용
27대 녹색기술 중 대체수자원확보기술	친환경 대체용수 산업 활성화
물산업 육성 전략	원천기술을 통한 경쟁력 확보
신성장 동력 비전 및 발전 전략 중 녹색기술 (고도 물처리)	친환경 대체용수
수자원 장기 물이용 종합계획	지역적 형평성, 안전성
	극한가뭄 대비 능력
	지하수 확보
지하수관리 기본계획	지하수 인공함양
2025 수도 정비기본계획	사고방지 비상연계시설
도서지역 식수원개발 사업	도서지역 식수원 확보



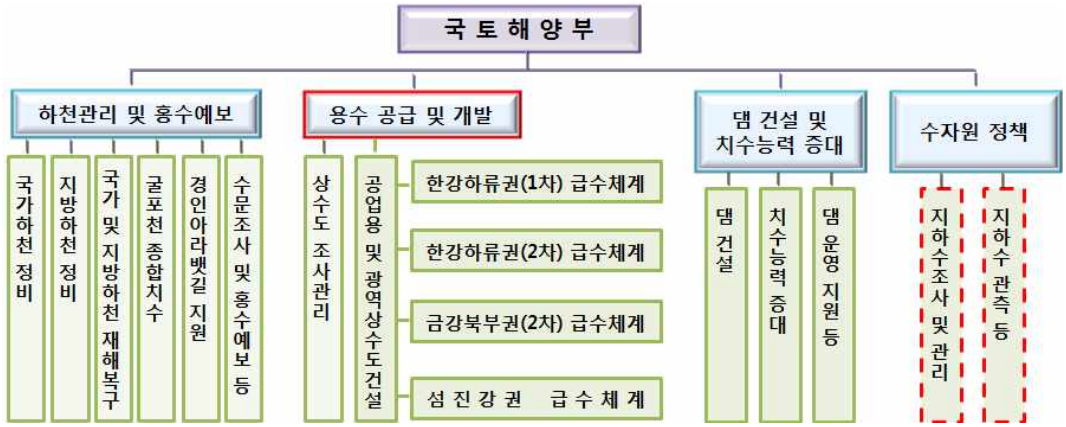
연구단 추진과제
1세부: 대하천 하구 퇴적층에서 저수량 1,000m^3 확보를 위한 최적설계 기술
2세부: 청정 지하 저수지 운영 및 유지 관리 기술
3세부: 1급수 수자원 개발 및 먹는 물 공급을 위한 수질관리 및 활용 기술
4세부: 건기에 30일 이상 50m^3/d 이상 생산능력의 지하저수지 기술개발

2. 사업추진의지 및 관련기관 협조체계

가. 사업추진의지

▌국토해양부

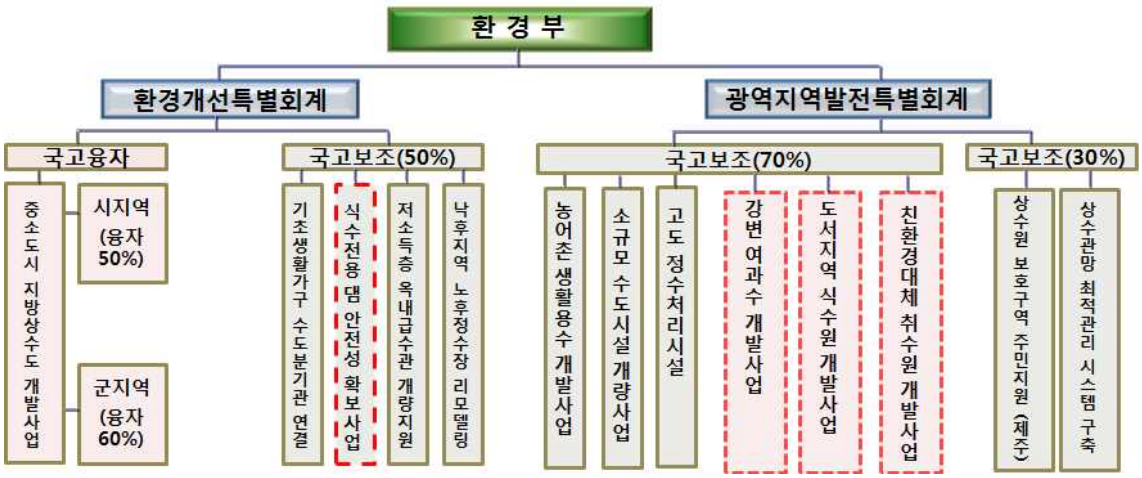
- 국토해양부의 경우 다양한 사업(주택, 도로, 수자원, 항공, 해양, 항만)을 관할하고 있고, 이중 수자원관련 예산편성 현황을 살펴보면 국토해양부의 사업추진의지를 알 수 있음.
- 수자원관련 예산편성은 크게 하천관리 및 홍수예보, 용수공급 및 개발, 댐 건설 및 치수능력 증대, 수자원 정책으로 구분할 수 있으며 이 중 수자원의 확보 및 개발은 용수공급 및 개발항목에 포함됨. 현재 이 부분은 광역상수도의 공급의 안정성을 높이기 위한 급수체계사업이 주가 되고 있으나, 이는 다양한 용수공급 개발정책이 변화하기 때문이며, 광의의 개념에서 청정지하저수지 개발사업은 용수의 공급 및 개발사업에 포함되므로 국토해양부의 사업추진의지는 높다라고 판단됨. 또한 수자원정책부분 중 지하수관련 예산이 따로 포함되어 있어 지하수 유지관리도 주된 사업이라 할 수 있음.



▌그림 4.6 국토해양부의 수자원 예산편성 현황

▌환경부

- 환경부의 수도사업 지원은 크게 환경개선특별회계와 광역지역발전특별회계로 구분함. 이 중 현재 광역지역발전특별회계 중 강변여과수 개발사업, 도서지역 식수원개발사업, 친환경 대체취수원 개발사업등 본 연구사업과 관련된 대체수자원개발사업과 관련하여 국고보조 70%를 지원하고 있음.
- 또한, 환경개선특별회계 중 식수전용댐 안전성 확보사업에 국고 50%를 책정하여 원수확보를 위한 국고지원을 강화하고 있는 실정임.



▌그림 4.7 환경부의 수도사업 국고보조 현황

- 따라서, 환경부에서 지방상수도의 열악한 재정상태를 감안하더라도, 수자원 확보를 위한 다양한 정책을 유도하고 있으므로, 본 청정지하저수지 뿐만 아니라 계곡이나 도서지역과 같은 소규모 청정지하저수지 개발기술은 환경부의 정책추진 목표와 부합되므로 환경부에서 충분한 협조가 있을 것으로 판단됨.

나. 관련 기관 및 부처의 협조체계

- 동 사업의 경우 사업추진에 있어 국토해양부, 환경부, 행정안전부 등 관련 부처와의 업무 협의 및 전·후방 지원체계 구축이 필요하며, 주요 지자체등등 관련 기관과의 협조가 불가피한 상황임.

  – 환경부의 수도정책과, 물산업육성과 및 국토해양부의 수자원개발과, 수자원정책과 등에서 이슈화 되고 있는 대체수자원 개발을 통한 안정적 용수 공급에 대한 사업 및 기술 개발 계획 등에서 부처 간의 마찰 발생의 우려 존재

- 그러나, 기관간의 업무 협조만이 진행 중에 있으며, 부처 차원의 업무 범위 조율은 이루어 지지 않고 있는 상황임.

- 따라서, 이를 고려하여 부처간 협력, 특히 환경부와의 데이터 교류 및 융합형 R&D 창출을 위한 인프라 구축이 필요함.

- 이외에 연구 수행에 있어서는 산·학·연 관련 분야 연구진간 특성에 맞는 역할 분담 및 연계 체계가 이루어짐으로써 효율적인 사업추진을 위한 업무 협조체계가 구축되어 있다고 볼 수 있음.

제 2 절 기술적 타당성

1. 기존 연구기술 개발 사업과의 중복성

가. 조사 개요 및 방법

▌조사개요

■ 국가가 지원하는 연구개발지원에 있어서 동일, 유사한 연구과제를 정부 각 부처에 중복 제안하여 지원 받는 사례를 사전에 방지하고, 국가연구개발투자의 효율성을 제고하기 위해 국가과학기술지식정보서비스(http://www.ntis.go.kr)를 이용하여 조사함.

▌조사방법 및 대상

■ 2002년부터 2012년까지 정부기관 또는 산하기관에서 추진된 수행과제에 대하여 " 청정 지하저수지 개발 기술"과 관련되거나 유사한 내용(즉, 연구제목, 연구내용 등)이 포함된 과제에 대해 과제 내용을 전수 조사를 실시함.

나. 조사결과

(1) 기획과제(세부과제)와 정부 부처별 R&D 사업과의 연관성

▌" 청정 지하저수지 개발 기술"과 관련하여 2002년부터 2012년까지 정부 각 부처에서 인프라, 수질, 수량 분야별로 수행하였거나 수행 중인 사업 및 과제의 현황을 조사함.

■ 국토해양부(구 건설교통부 포함)는 수자원의지속적확보기술개발, 건설기술혁신사업, 건설핵심기술연구개발사업 등을 통해 지하수자원 개발 및 조사, 시스템 구축 등이 주요 연구 분야임.

■ 환경부는 토양지하수오염방지기술개발, 차세대핵심환경기술개발, 지하수환경조사연구 등을 통해 지하수 수질 및 토양오염 등에 대한 연구가 대부분을 차지함.

■ 지식경제부는 신재생에너지기술개발을 통해 주로 대수층을 활용한 에너지 개발 관련 분야에 연구가 집중되어 있음.

■ 교육과학기술부는 목적기초연구사업 및 기초과학학술연구조성사업, 21C프론티어연구개발사업 등을 통해 지하수자원 개발 및 지하수 수질과 관련된 연구가 있으나 지하저수지 개발 기술과 관련된 연구는 적음.

▌기존 R&D 사업 유사과제와의 중복성 및 연계방안

■ 본 과제의 연구개발계획에 포함된 주요 성과물과 기존 R&D 사업 유사과제의 세부내용을 조사하여 중복성을 조사하고 이에 대한 연계방안을 검토하였음.

- 중복도는 3, 2, 1, 0으로 측정하였으며, 숫자의 크기가 클수록 기존 R&D 사업과 중복도가 높음을 의미함.

- 기존 R&D 사업 유사과제의 성과물을 본 과제의 연구개발계획에 포함된 과제로의 연계방안을 제시함.

■ 총괄과제

▌표 4.5 총괄과제 관련 기존 연구과제의 중복성 및 연계성

청정 지하저수지 개발 기술	기존연구과제			중복도	연계방안
세세부과제	사업명 (부처)	과제명	세부연구내용		
청정 지하저수지 구축을 위한 통합기술개발	수자원의 지속적확보기술개발사업 (국토해양부)	유역통합물수지분석 및수자원계획기술개발 (2001~2011)	- 수량 및 수질 그리고 수요관리 통합수자원 계획모형 개발	0	물 수요 관리방안 및 관리기술을 관정 및 관로 시스템 내 유동량 산정 기술 개발 및 수요관리를 통한 청정 지하저수지로부터 용수공급 최적화와 연계함.
시험설비 구축 및 운영	관련과제 없음	-	-	-	-
지하저수지 관련 법, 제도 및 경제성 연구	정책연구 (환경부)	물 수요 관리 종합대책 수립방안에 관한 연구 (2002)	- 물 수요관리 영향인자 도출 - 물 수요 관리 대책의 법적, 제도적 여건 분석	0	물 수요관리 및 관리대책의 법적, 제도적 분석 결과와 연계함.

■ 제1세부과제: 대하천 하구 퇴적층에서 저수량 1,000만m^3 확보를 위한 최적 설계 기술

▌표 4.6 제1세부과제 관련 기존 연구과제의 중복성 및 연계성

청정 지하저수지 개발 기술	기존연구과제			중복도	연계방안
세세부과제	사업명 (부처)	과제명	세부연구내용		
대하천 하구 퇴적층 부지 특성 평가 기술	(연구회소관 출연기관)한국지질자원연구원 (지식경제부)	청정 대용량 지하수자원 확보 기술 개발 (2007~2009)	- 광역 수계규모(금강수계)를 대상으로 지하수 순환 해석 기술 개발 - 지하수 오염 취약성 평가, 저감 정화 기술 개발	0	청정 지하저수지 시스템을 구성하는 대수층의 수리, 수문 및 지질특성을 평가에 활용하도록 함.
	건설기술혁신사업 (국토해양부)	수변지하수 활용기술 고도화 (2011~2016)	- 지하수 활용가치극대화 및 기반기술 개발 - 수변 지하수위 복원 기술 개발 및 수변관리 매뉴얼 제시 - 수변지하수 대용량 간접취수 시공기술 선진화 선진화	0	
주입 및 양수 시스템 최적 설계 기술	건설기술혁신사업 (국토해양부)	지하수 적정관리시스템 구축 및 적용 (2007~2011)	- 적용 지자체에 대한 지하수 흐름 모델 구축 및 검증 - 최적개발 설계 및 착정 - 기상 및 토양특성에 따른 GIS 자료 등을 이용하여 다년간의 지하수함양량 및 해안 유출량 산정하여 변동특성을 분석 - 현장조사 및 시험을 통한 고품질 지하수수위 및 수질자료, 수리상수 및 분산지수 자료 획득	0	청정 지하저수지 시스템을 효율적으로 운영하기 위한 최적의 운전장치 시스템 구성에 활용하도록 함.
지하 저수지 모니터링 시스템 설계 기술	토양·지하수 오염방지 기술개발사업 (환경부)	지하수에 의한 하천 오염부하량 측정 및 모델링 기법 개발 (2011~2013)	- 지하수-하천수 상호작용에 의한 질산성 질소의 오염부하량 평가 - 지하수 용질이동 모델을 이용한 질산성 질소 평가 - 하천 주변 퇴적층의 물리적 특성 차이와 질산성 질소 오염부하량의 관련성 분석	0	청정 지하저수지 시스템의 지속적이고 효율적인 운영을 위한 지하수위 및 수질 모니터링 시스템 최적 설계에 활용하도록 함.
	건설기술혁신사업 (국토해양부)	지하수 활용 홍수취약성 평가 기술 개발 (2011~2016)	- 지하수, 지질조사 및 분석 - 지하수 수위/수질 조사 - 하천변 강우별 지하수위 특성평가 - 침투능 및 함양특성 분석 - 홍수특성분석 및 기존 홍수특성 집대성	0	
주입수 거동 및 수질 평가 기술	건설기술혁신사업 (국토해양부)	수변 충적층 지하수위 복원 기술 (2011~2016)	- 실증지역 지하수환경 모니터링 시스템 구축 - 충적대수층 공간적 분포 평가 - 침투량계 설치 및 모니터링 - 정호주입식 인공함양 핵심기술 개발 - 농업용 인공함양수 수질기준 선정 - 충적층 지역 clogging에 의한 대수층 투수계수 및 공극율 변화 모델 검토 및 개발	0	지하저수지 시스템을 구성하는 주입정의 수리학적 거동 및 수질평가를 위한 기술과 연계하도록 함.

■ 제2세부과제: 청정 지하저수지 운영 및 유지관리 기술

▌표 4.6 제2세부과제 관련 기존 연구과제의 중복성 및 연계성

청정 지하저수지 개발 기술	기존연구과제			중복도	연계방안
세세부과제	사업명 (부처)	과제명	세부연구내용		
지하 저수지 통합 운영 기술 개발	핵심연구지원사업 (교육과학기술부)	도시화와 기후변화를 고려한 지속가능한 지표수와 지하수 이용을 위한 적응전략수립시스템 구축 (2011~2014)	- 도시화와 기후변화를 고려하여 지속가능한 지표수, 지하수 이용을 위한 적응전략에 대한 효과분석 수행	0	청정 지하저수지 시스템으로부터 지속적이며, 안정적인 용수공급을 위한 운영 및 유지관리를 위해 기존의 수자원 운영기술을 분석하여 연계하도록 함.
	21C 프론티어연구개발사업 (교육과학기술부)	통합수자원 관리 시스템 구축 및 실용화 (2007~2011)	- 지속가능한 수자원 관리 전략 개발 및 적용 - 통합수자원관리 실행전략 수립 및 현장 적용 - 통합수자원관리 기술 및 지원 시스템의 실용화	0	
비상 시 지하저수지 운영 기술 개발	관련과제 없음	-	-	-	-
시스템 유지관리 기술 개발	건설기술혁신사업 (국토해양부)	지하수 공공관정 시설현황 조사 및 개량기술 개발 (2011~2013)	- 공공관정 노후화 유형별 관리현황 조사 및 진단 - 노후화 유형별 개량기술 개발 및 적용	0	청정 지하저수지 시스템 내에 설치될 주입정 및 양수정으로 이루어진 관정시스템으로부터 지속적이고 원활한 용수공급의 장애요인인 공막힘 제거 관련 기술을 연계함.
	토양지하수 오염방지기술개발 (환경부)	막힘 관정의 오염물질 확인 및 공막힘 제거기술 개발 (2010~2012)	- 막힘관정 오염물질의 특성조사 및 공막힘 현상(clogging) 원인 평가 - 효과적인 이물질 제거를 위한 관정설계 및 관정재질 개선을 위한 재료 개발 - 효과적인 이물질 제거 및 막힘관정 세척장비 개발	0	

▌표 4.6 제2세부과제 관련 기존 연구과제의 중복성 및 연계성 (계속)

청정 지하저수지 개발 기술	기존연구과제			중복도	연계방안
세세부과제	사업명 (부처)	과제명	세부연구내용		
지반변형 해석 및 방지(저감) 기술 개발	핵심연구개발 (교육과학기술부)	지반침하재해 저감기술 개발 (2003~2004)	- 지반침하 재해사례 분석 및 진단, 예측 기술 개발	0	청정 지하저수지로부터 안정적으로 용수공급을 할수 있도록 기존의 지반침하 분석 및 진단, 예측기법을 활용하며, 지반침하에 대한 자동계측시스템의 활용방안을 연계하도록 함.
	산학연공동기술개발 (중소기업청)	IT기반의 지반침하 실시간 통합 자동계측시스템 및 분석프로그램 개발 (2009~2010)	- 지반침하 측정용 실시간 디지털 자력 위치 감지 시스템 및 자동 계측 시스템 개발 - 현장적용 및 검증을 통한 실시간 지반침하 계측방법의 실용화 기술 개발 - IT기반의 지반침하 실시간 통합 자동계측시스템 및 분석프로그램 개발	0	

■ 제3세부과제: 용수 공급을 위한 수질관리 및 활용기술

▌표 4.7 제3세부과제 관련 기존 연구과제의 중복성 및 연계성

청정 지하저수지 개발 기술	기존연구과제			중복도	연계방안
세세부과제	사업명 (부처)	과제명	세부연구내용		
음용수로서의 신뢰도 확보를 위한 청정 지하저수지의 수질 위해요소 사전관리기술 개발	토양·지하수 오염방지기술 개발사업 (환경부)	수생태계 보존을 위한 하천변 지하수의 최적 오염관리 및 저감기술 개발 (2004~2011)	지하수 오염 예측/평가 기법 및 하천 오염 부하량 산정기술개발의 기반 구축	0	지하수 오염 평가 및 예측 기술을 보완/개량하여 대수층 내 수질 관리 기술과 위해성 평가 기술을 보완/개량하여 지하저수지 내 위해성 평가 기법과 연계함. 이로부터 지표수의 위해성 관리 시스템을 보완하여 청정 지하저수지 관리 시스템의 완성도를 높이고자 함.
	토양·지하수 오염방지기술 개발사업 (환경부)	국내실정에 적합한 유류 및 중금속 오염토양의 독성 및 위해성 평가 기술 개발 (2008~2011)	유류 및 중금속 토양의 독성 평가 기술 개발	0	
	농림기술개발 (농림수산식품부)	시설용수 및 영농편의 용수공급을 위한 FDA 시스템 개발	청정용수 공급 및 위해성에 대한 안정성을 확보할 수 있는 시스템 구축	0	
지하저수지의 지속가능한 운영을 위한 주입수 전처리 기술 개발	21C 프론티어연구개발사업 (교육과학기술부)	대수층 활용 상수도 공급 시스템 개발 (2004~2006)	강변여과수 활용기술/인공함양 활용기술(전처리 공정 개발)/지하댐 활용기술/통합수자원해석기술/대수층 오염방지 및 처리기술 개발	0	대수층 오염방지 기술을 보완하여 지속가능한 청정 지하저수지 운영을 위한 최적 전처리 공정 도출
인공주입수를 목표 수질기준에 적합하게 처리할 수 있는 플랜트 설계·운영·유지관리 통합 기술개발	21C 프론티어연구개발사업 (교육과학기술부)	대수층 활용 상수도 공급 시스템 개발 (2004~2006)	강변여과수 활용기술/인공함양 활용기술/지하댐 활용기술/통합수자원해석기술/대수층 오염방지 및 처리기술(후처리) 개발	0	지하수 내 오염물 저감을 통한 상수도 공급을 위하여 기존 각 공정들을 최적화 하여 경제성을 향상시키며, 지하수 오염물 제거 공정을 보완하여 각 공정이 조합된 최적 설계 방안 도출함
	건설기술혁신사업 (국토해양부)	지속가능한 지하수 개발 시스템 구축 및 상용화 (2007~2011)	강변여과수 요소기술 개발을 통하여 강변여과수 수도공급 시스템 구축(비소/질소/철/망간 수처리 포함)	0	
물리·지화학적 대수층 수질의 개선 특성 평가 기술 개발	21C 프론티어연구개발사업 (과학기술부)	지질특성별 지하수 진단/평가/탐사기법 개발 (2001~2004)	지하수자원의 체계적인 진단/평가/탐사기법의 개발	0	지하수자원의 진단/평가/탐사 기법의 적용 및 불포화층 및 포화층에 대한 기존 해석기술을 바탕으로 포화층, 특히 대수층에서의 물리·화학적인 오염물 거동을 평가하여 청정 지하저수지에서의 오염물 거동 예측을 규명함
	차세대 핵심환경기술 개발 (환경부)	자연친화적 수질 정화기술 개발 (2008~2014)	하상여과시설 설계 및 시공 기술 개발/ 하천수질 및 토양 특성에 따른 오염물질 제거현상 규명	0	

▌표 4.7 제3세부과제 관련 기존 연구과제의 중복성 및 연계성 (계속)

청정 지하저수지 개발 기술	기존연구과제			중복도	연계방안
세세부과제	사업명 (부처)	과제명	세부연구내용		
대수층 수질의 생물학적 개선 특성 평가기술 개발	수자원의 지속적 확보 기술 개발 (건설교통부)	지속가능한 댐 개발 기술 (2001~2004)	인공함양 기술 수준 평가, 관정 개발, 지하수-지표수 연계기술, 생물학적 수질개선 특성 평가 기술 개발	0	생물학적 수질개선 특성 평가, 포화 및 불포화층에서의 미생물에 의한 오염물 저감 메커니즘을 활용하여 미생물 활성도를 평가하고 증대/유지방안을 도출함
	21C 프론티어연구개발사업 (과학기술부)	지속가능한 지하수 개발 및 함양기술 개발 (2001~2004)	지하수 생태 평가 및 생물 기작을 활용한 수질 개선 및 대수층 효과 규명	0	

■ 제4세부과제: 건기에 30일 이상 - 50m^3/d 이상 생산능력의 지하 저수지 기술 개발

▌표 4.8 제4세부과제 관련 기존 연구과제의 중복성 및 연계성

청정 지하저수지 개발 기술	기존연구과제			중복도	연계방안
세세부과제	사업명 (부처)	과제명	세부연구내용		
우기주입-건기 회수 지하 저수지 설계 기술	관련과제 없음	-	-	-	-
소규모 지하 저수지 운영 및 유지관리 기술	관련과제 없음	-	-	-	-

(2) 주요 기존 연구기술 개발 사업과의 차별성

■ 지하수 수자원 확보와 관련된 주요 종합 연구로는 수자원의 지속적확보기술개발 프론티어사업단 (2001-2011)과 수변지하수 고도화 연구단 (2011-2015)를 들 수 있다. 여기서는 상술된 연구와 본 연구의 차별성을 제시함.

(가) 수자원의 지속적확보기술 개발 프론티어 사업단 연구와의 차별성

▌2001년부터 10년간 수행된 프론티어 사업단 연구에서는 해안지하수, 지하댐, 강변여과 그리고 인공함양에 대한 연구가 개별적으로 수행되었다. 각 주제별 수행 내용과 차별성은 다음과 같음.

■ 프론티어 사업단 해안지하수 연구의 목표는 해안 지역에서 지하수 최적개발을 위한 전산 설계 모델을 개발하고 시험유역에 대한 검증임. 연구의 핵심 내용은 해안 지역에서 양수정과 양수량을 어떻게 배치시켜야 지하수 개발량을 극대화시킬 수 있느냐임. 기획과제에서 개발하고자 하는 설계기술은 주입정과 양수정, 관망 그리고 펌프 등 훨씬 더 많은 요소들의 최적배치이므로 선행 연구와의 명백한 차별성을 가짐.

■ 프론티어 사업단의 지하댐에 대한 연구는 양양시 소재 쌍천 지하댐을 중심으로 수행되었음. 쌍천 하류에 설치된 지하댐에는 상류에서 함양된 지하수와 복류수가 자연유하되어 집수되었으며 지하댐의 효과 등에 대한 분석과 갈수기의 댐체를 통한 해수침투 현상에 대한 연구를 수행하였음. 기획과제에서 개발하고자하는 기술은 원칙적으로 고비용의 지하댐에 의존하지 않으므로 선행연구와 차별성을 가짐.

■ 프론티어 사업단의 인공함양 연구에서는 제주도 제주시 한천에 인공함양정 20개를 개발하였음. 이 연구에서는 국내에서는 최초로 인공함양을 본격적으로 시도하였다는 의미를 가짐. 선행연구에서는 함양정을 저류지에 설치하여 홍수시에 유입된 하천수가 저류지에 일정 수심을 초과하면 밸브를 개방하여 자연유하식으로 함양을 시작하는 시스템임. 기획과제의 연구는 관망으로 연결된 주입정에서 연중 주입하고 주입수의 거동을 양수정으로 조절한다는 점에서 선행 연구와 차별성을 가짐.

■ 프론티어 사업단의 강변여과수 연구는 기존 시설을 활용한 수리수문학적 특성을 중심으로 연구가 수행되었음. 구체적으로는 개발 대상지역의 수리지질학적 평가, 개발가능량 평가를 위한 수치모델링, 그리고 지하수계 생태조사, 지하수위 및 수질 변화 조사 등이 수행되었음. 강변여과에서는 함양을 하천수위와 하상의 투수 특성 등 주로 자연조건에 의존하는 반면 본 기획연구에서는 주입정을 이용하여 '함양'을 인위적으로 제어한다는 점에서 차별성을 가짐.

■ 프론티어 사업단의 연구와 기획연구의 기술과의 차별성은 표 4.9에 요약 제시하였음.

▌표 4.9 기존 연구사업과 청정 지하저수지 연구와 차별성

분야	수자원의 지속적 확보기술개발 사업 (지하수 확보 기술)	청정 지하저수지
청정지하저수지 통합개발 기술	- 해당사항 없음	- 지하저수지 total solution 개발 - 시험설비 구축 및 운영 - 지하저수지의 법, 제도, 경제성 연구
청정지하저수지 최적설계 기술	- 학문적 성격의 지표수-지하수 연계 특 성 분석 ·물리적 특성 변화가 반영된 수치모델링 시스템 구축 ·강변 지역 지하수-하천수 수위 변동 시계열적 분석	- 안정한 용수 공급을 위한 최적 지표수 인공 주입과 양수 공정 도출 - 지하 저수지 모니터링 시스템 구축 및 지하 저수지 용량 평가 기준 도출 - 대수층 수리수문지질 특성 평가 기술 - 관정, 관로 및 펌프 시스템 최적설계 기술 - 모니터링 시스템 설계 기술 - 주입수 거동 및 수질 변화 해석 기술
청정지하저수지 운영 및 유지관리 기술	- 수리수문학적 특성 연구 중심 ·인공함양 활용 수도공급 요소 기술 도출 ·연계 이용 및 취수 대수층 평가 요소 기술 개발 ·지하댐에 의한 개발 가능량 산정 ·지하댐 부근 지하수위 변동 분석기술 개발 ·대수층 내 유효공극율 증대방안 기법 개발	- 시험설비 운영을 통한 개발기술 개선 및 검증, 운영 기술 확보 - 국내 지질특성에 적합한 지하저수지 시공 기술 확보 - 지하 저수지 확보를 위한 인공주입정 및 집수정 설계기술 및 운영기술 도출 - 지하 저수지 설계 및 운영기술 개 발 - 지하저수지 적지 평가 기술 개발 - 상습 가뭄지역 취수문제 해결을 위한 우기 주입-건기회수기술 개발
청정지하저수지 수질관리 기술	- 대수층 오염방지 및 처리 요소기술	- 대용량 인공주입에 적합한 최적 전처리기 술 도출 - 안전한 용수 공급을 위한 지하수 용수처리 설계·운영 기술 개발 - 대수층 내 수질개선 평가 및 모델링 시스템 개발
우기주입-건기회수 기술	- 해당사항 없음	- 한국형 소규모 지하저수지 설계 기술 - 단일공 주입-양수 시 지하수 흐름해석기술 - 운영 및 유지관리 기술

(나) 수변지하수 활용고도화 연구단 연구와의 차별성

▌수변지하수연구단 제 1 세부과제: 지하수 활용가치 극대화 및 기반 기술

■ 목표

- 수변지역 지하수의 활용가치 극대화에 필요한 지하수 정책 연계성 기반 기술 구축
- 경제적 가치 확보 기술을 통한 핵심 수자원 확립

■ 연구내용 및 연계성

- 지하수 활용 홍수취약성 평가 기술 개발
  - ○ 지하수위 변동 평가 및 지하수 홍수 평가 알고리즘 개발
  - ○ 지하수 홍수 평가 알고리즘 현장 적용 및 모델 평가
  - ○ 지하수 홍수 취약성 평가 GIS 시스템 개발

  [차별성 및 연계성]: 기획 과제와 연계성이 없음

- 원격제어 지하수 계측 시스템 개발
  - ○ 관정 내장형 원격제어 시스템 개발
  - ○ 광학센서를 활용한 다항목 계측 기술 개발
  - ○ 원격 제어용 지하수 통합관측 시스템 개발 및 현장 실증

  [차별성 및 연계성] : 기획 과제에서는 주입정과 양수정은 물론 펌프와 관로에 대한 모니터링 및 원격제어 시스템 구축에 대한 기술개발을 추구하고 있음. 수변지하수활용고도화 연구와 크게 연관성은 없는 것으로 판단됨.

- SMART 기법을 활용한 지하수 관리 기술 개발
  - ○ AR(증강현실) 기술을 활용한 지하수 관리 시스템 개발
  - ○ 위치 기반의 지하수 활용 기술 개발
  - ○ 지하수 SMART 통합 관리 기술 개발 및 실증

  [차별성 및 연계성] : 기획 연구는 관망, 펌프, 전후처리시설, 주입과 양수, 수량과 수질에 대한 포괄적 관리 기술 개발이 목표이므로 수변지하수 연구와 차별성이 있음.

- 지하수 허가기준량 평가 기술 개발
  - ○ 지하수 허가기준량 영향인자 평가 및 기준 개발
  - ○ 지하수 허가기준량 평가 기준 현장 적용 및 모델 평가
  - ○ 지하수 허가기준량 평가 정책 제시

  [차별성 및 연계성] : 본 과제와 연계성이 없음.

- 국가 지하수자원의 경제적 활용가치 평가
  - ○ 국가 지하수 정보의 경제적 효과 분석 (시설, 계측 등)
  - ○ 수변지하수 고도화 연구의 경제적 효과 분석

  [차별성 및 연계성] : 기획과제는 인위적으로 조성된 지하수자원에 대한 법, 제도 경제성 연구가 포함되어 있으며 수변지하수의 경제성 연구와는 연계성이 없음.

▌수변지하수연구단 제 2 세부과제: 수변 충적층 지하수위 복원 기술

■ 목표

- 수변지하수 사용량의 20% 이상 재함양을 통한 지하수위 복원 및 갈수기 하천유량 증대

- 지하수-지표수가 연계된 수문 및 수질 통합 평가 기술 개발로 수변관리 매뉴얼 작성

■ 연구내용 및 연계성

- 수변 수막재배지역 지하수 환경 특성 평가 및 지하수위 복원 요소기술 개발
  - ○ 수변 수막재배지역 수문지질 인자 분석 고도화
  - ○ 수변 수막재배지역 지하수-지표수 상호교환량 평가
  - ○ 인공함양수 취수/운반 기술
  - ○ 정호주입식 인공함양 기술 개발
  - ○ 폐색관정 처리 기술 및 수질 기준 선정

  [차별성 및 연계성] : 기획 연구에서는 지하 60~80m 심도의 피압대수층을 대상으로 하기 때문에, 지하수-지표수 상호 교환량 평가는 중요치 않음. 인공함양수 취수 기술, 정호주입식 인공함양 기술 개발 및 폐색관정 처리 기술 및 수질 기준 선정은 약간의 유사성을 가지나 기획연구에서는 음용수 생산을 목표로 주입하므로 지하수위 복원 목표의 수변연구단 과제와 직접 연계되지 않음.

- 수변 수막재배 지역 지하수위 복원 통합 시스템 구축
  - ○ 연구지역 지하수 환경 모니터링 시스템 구축 및 평가
  - ○ 시설재배지 빗물 인공함양 시스템 구축
  - ○ 지하수 재순환 수막재배 시스템 구축
  - ○ 수변 수막재배지역 지하수위 복원 통합 시스템 구축

  [차별성 및 연계성] : 연구지역 지하수 환경 모니터링 시스템 구축 및 평가는 어느 정도 본 과제에서 활용 가능할 것으로 예상됨. 기타 연구는 연관성이 없음.

- 수변 지하수 인공함양용 수처리 장치 개발 및 시스템 구축
  - ○ 인공함양 시설의 주입수 수질 영향 평가
  - ○ 침지식 사여과 시스템 및 세척 시스템 개발

  [차별성 및 연계성] : 기획연구에서는 음용수 생산을 목표로 주입하므로 지하수위 복원 목표의 수변연구단 과제와 직접 연계되지 않음.

- 수변 지하수-지표수 통합 연계 해석 및 인공함양 효과 평가

○ 계측기반의 수변 수막재배지역의 지하수 유동 모형 개발
○ 지하수위 복원 인공함양 영향 장기 예측
○ 수계 위치별 특성에 최적화된 지하수-하천 상호작용 해석 기술

[차별성 및 연계성] : 본 과제에서는 지하 60~80m 심도의 피압대수층을 대상으로 하기 때문에, 연관성이 거의 없을 것으로 예상 됨.

▌수변지하수연구단 제 3 세부과제: 수변 지하수 대용량 간접취수 시공기술 선진화

■ 목표

- 수변지역 간접취수 시공 기술 개선을 통한 취수능력 20% 이상 증대
- 철/망간 현장 처리 실증 기술 개발

■ 연구내용 및 연계성

- 대용량 간접취수 시공기술 개발
  ○ 수직 우물통에 대한 잠함 공법 선진화 기술 개발
  ○ 잠함공법 시공 및 관측을 통한 공법 개발, 검증
  ○ 수평정(φ300mm) 시공 및 관측을 통한 공법 개발, 검증
  ○ 취수시설 유지관리 및 시설물 진단 기술 개발
  ○ 기타 시공 과정의 자체 신기술 개발

  [차별성 및 연계성] : 대용량 간접취수 시공기술의 연구결과는 기획 과제에서 활용하는 것으로 계획하고 있음.

- 간접취수 조사 설계 신기술 개발 및 표준화
  ○ 국내 강변여과 조사, 설계 및 시공자료 집대성 및 평가
  ○ 조사 시의 시료 채취 기술 및 in-situ test 기술 개발
  ○ 충적층 조사 기술 및 굴착 결과에 대한 평가 기술 개발
  ○ 국내 실정에 맞는 강변여과수 조사 설계 지침 작성

  [차별성 및 연계성] : 본 과제와는 연계성이 적을 것으로 예상됨.

- 정밀 모델링을 활용한 설계 시공 최적화 평가 기술
  ○ 현장 자료 기반의 지하수 유동 및 수질 환경 특성 평가
  ○ 집수정 시공 모델링을 통한 신공법 효율 평가
  ○ 수평정 시공 모델링을 통한 신공법 효율 평가

  [차별성 및 연계성] : 연구 결과를 본 과제에서 활용할 수 있을 것으로 예상됨.

- 간접취수 현장 철망간 처리 기술 개발 및 검증
  ○ 현장 규모 실증시험 시스템 구축 및 현장 시험

○ 주입량 및 주입 산소농도 평가 및 모델링
○ 현장 철망간 처리 지침 및 설계 기준 개발

[차별성 및 연계성] : 수리지질 특성에 따라 수질특성이 상이하므로 관련성은 향후 검토되어야함.

▌수변지하수연구단 제 4 세부과제: 수변지역 지질지하수 융합에너지 활용 기술

■ 목표

- 수변지역 대수층의 지하수열원 활용을 통한 천부 지열에너지 에너지 효율 10% 증대

- 지열공 관리를 위한 환경영향 평가 및 사후 유지관리 지침

■ 연구내용 및 연계성

- 수변 지하수열 추출 최적화 및 지열영향 저감 사후관리 기술
  ○ 수변 충적층 지하수열 활용 시스템의 대수층 열물질 순환 모니터링
  ○ 지하수열 시스템의 장단기 진단 및 예측 기법
  ○ 지하수열 시스템의 구조 및 운영 최적화 기법
  ○ 지하수열 시스템의 수량 수질 연계 순환량 분석 및 기준 마련
  ○ 지열공 환경영향 평가 기준 및 사후 유지관리 지침 개발

  [차별성 및 연계성] : 본 과제와 연계성이 없음.

- 수변 충적층 지하수열 활용저장 시스템 개발
  ○ 지하수열 활용·저장 시스템 구축, 운영 및 관련 지침(안) 수립
  ○ 지하수열 활용·저장 시스템을 위한 지중 설비 요소기술 개발
  ○ 지중설비 진단 및 제어기술 개발

  [차별성 및 연계성] : 본 과제와 연계성이 없음.

- 수변 충적층 지하수열 활용저장 시스템 지상설비 최적화 기술
  ○ 실증 시스템의 지상 및 부하 요소에 대한 최적 설계 기술 개발
  ○ 시스템 효율 제고를 위한 히트펌프 등 지상설비 개발
  ○ 시스템 운전 유형에 따른 설비 성능 평가 및 최적화 기술

  [차별성 및 연계성] : 본 과제와 연계성이 없음.

- 수변 충적층 지하수열 최적지 분석 기술 개발
  ○ 수변지역 충적층의 열물성, 수리적 물성 데이터 수집 및 측정
  ○ 지질-지하수 조건과 열물성의 관계 파악 및 인자별 DB 구축
  ○ 수변지역 충적층 지열부존량 분포도 작성
  ○ 지열부존량 분포 분석을 통한 개발 최적지 및 활용 방안 제시

  [차별성 및 연계성] : 본 과제와 연계성이 없음.

2. 기술 개발 계획의 우수성

▌수자원 확보를 위한 기존의 방법은 하천수 또는 댐수를 이용하는 전통적인 기술과 대안으로 고려되는 지하댐, 인공습지, 강변여과, 해수담수화 등을 들 수 있으며 대안 별 대비사항은 다음과 같음.

- 하천이나 댐에서 취수하는 방법은 대도시의 중앙집중형 시스템에 적합하나 경제와 사회가 발전함에 따라 사업에 따른 부정적 영향들이 더욱 크게 부각되며, 수질사고 발생 시에 대체방법이 없는 문제점이 있음. 최근 집중형 개발의 부정적 영향이 크게 부각되고 있으며, 지역 간 갈등(광역상수도 등에 대한)이 심화되어 사업추진이 어려워지고 있는 실정임.

- 지하댐을 제외한 대안들은 하천/댐에 비하여 양적인 측면에서는 불리하지만 일반적으로 질적인 측면에서는 유리함.

- 지하댐은 지하수자원을 거의 100% 활용이 가능하다는 점에서 유리하지만 적지가 많지 않고 수질이 지표면 오염에 취약하며, 종방향으로 분포된 함양 위치에 따른 상이한 대수층 체류시간으로 고른 수질개선효과를 기대할 수 없으며, 지하댐 건설에 상당한 비용이 소요되는 점이 단점임.

- 대안 중에서 가장 널리 이용되는 강변여과 기술은 우수한 수질개선 능력이 핵심 장점이며, 대하천 주변에 개발이 가능한 적지가 상대적으로 풍부함. 또한 주입정이 불필요하므로 기획연구기술보다 경제성에서 유리함. 다만 강변여과 취수량의 일부는 여과된 하천수가, 나머지는 배후 지하수가 차지함. 농경지 등에서 지하수가 많이 유입되면 강변여과의 수질개선 효과가 반감되는 단점이 있음. 또한 강변여과는 하천수질사고 시 취수를 중단하더라도 이미 형성된 동수경사로 인해 오염된 하천수는 지속적으로 강변으로 유입되므로 토양오염을 야기할 우려가 있음. 강변여과는 표토층을 활용하므로 지표면 오염에 취약하며 장기간 가동으로 하상의 토양에 미립자가 충진되면 하상의 투수성이 저하되어 배수 지하수 유입량이 증가하고, 하천수위가 과도하게 낮아지는 경우 취수가 중단되어야 하는 약점이 있음.

- 인공습지는 하천변에 친수공간을 조성할 수 있으며, 식생의 활발한 정화능력을 이용하는 장점이 있음. 인공습지의 한계는 식생의 생장이 거의 정지되는 동절기에 수질개선 효과를 볼 수 없으므로 토양여과를 거쳐야하며, 상대적으로 큰 부지면적이 소요되고 홍수 시에 관리가 어려운 단점이 있음. 또한 부지면적의 제약으로 저수량을 많이 확보할 수 없으며, 지상에 노출되어 있어 오염에 상당히 취약함.

▌지하저수지는 상술된 대안들의 단점을 상당 부분 극복하는 할 수 있음.

- 지하저수지는 지표댐의 수몰지역, 증발손실, 홍수 시 탁도, 여름 철 조류발생 등의 문제가 없음.

- 지하저수지는 물 수요지 인근에 설치될 수 있으므로 광역상수도에 비하여 장대관로가 필요 없으며, 지역 간 갈등의 소지가 적음.

- 지하저수지의 수질개선기작은 강변여과와 유사하나 배후 지하수의 유입을 차단하는 것이 용이하므로 대수층의 수질개선 효과를 100% 활용할 수 있다는 장점이 있음.

- 상시주입-상시양수 지하저수지는 상대적으로 균일한 체류시간으로 수질개선효과를 일관성 있게 유지할 수 있음. 또한 대수층 위에 점토층이 존재하는 경우 지표면의 오염으로부터도 보호되므로 전술된 대안들보다 유리함.

- 지하저수지는 지표수를 관정을 통하여 인공적 대수층에 주입하므로 주입시스템의 유지관리가 강변여과보다 상대적으로 유리함.
- 지하저수지는 대수층의 규모에 따라 상당한 규모의 저수량을 차수벽 없이 제공할 수 있으므로 지하댐보다 경제적임.

- 기존의 후처리 기술은 철·망간 처리에 중점을 둔 반면 지하수 용수처리 기술은 청정 지하저수지의 오염사고 및 염수 유입 시에도 적극적인 대응이 가능한 장점을 가지고 있음.

▌표 4.10 기존의 대체 수자원과 지하 저수지와의 비교

	청정 지하저수지	강변여과	인공습지
하천 수질사고 시	장기간 취수 가능.	취수 즉시 중단	최대 10일 정도 취수
수질 개선 능력	강변 여과와 유사하나 배후 (오염)지하수의 영향을 거의 받지 않음.	배후 (오염) 지하수의 영향을 받음.	동절기 수질 정화능력이 감소함.
지표면 오염	지표면 오염원이 점토층에서 차단되므로 안전함	상부 충적층은 지표면 오염에 대하여 취약함.	지상의 오염에 직접 노출되어있어 취약함.
일 생산량	주입정 관리를 통한 취수량 유지에 유리함.	하상 폐색 등으로 취수량 감소 우려	변동 요인 별로 없음.
부지 면적	주입정, 취수정, 관로 시설물이 분포됨.	하천변으로 국한되어 부지면적에서 가장 유리하고 주입정이 없어 경제성 우수.	하천 변 부지 면적 과대해짐.

3. 보유 기술 수준 및 개발성공 가능성

■ 개발 대상 기술의 핵심분야는 최적설계, 운영 및 유지관리, 그리고 수처리 분야이다. 지하수, 펌프 및 관망 분야의 최적설계의 기반이 되는 모델링과 최적화에 대한 국내 연구진의 기술은 해외 기술과 경쟁력을 갖추고 있음.

■ 지하 저수지가 도입되었거나 보급되고 있는 선진 국가들에서도 운영 및 유지관리 분야의 주입정 막힘 등 국부적인 분야를 제외하고는 기술 수준이 그다지 높지 않다. 따라서 주입정-대수층-양수정 전반에 대한 시스템적 운영기술 개발에서 시스템 모델링 및 최적화 기법의 기반기술확보는 매우 중요한 자산으로 작용함.

■ 2009년 한국과학기술평가원이 작성한 [중점녹색기술 수준 현황과 시사점] 보고서에 따르면 지속가능한 친환경 기술 부분에서 한국, 미국, EU, 일본, 중국 등 주요 5개국 중 미국이 세계 최고 수준의 기술을 가장 많이 소유하고 있는 것으로 조사되었으며, 한국과 중국은 세계 최고 수준의 기술은 보유하지 못한 것으로 나타났음(표 4.11). 특히 국내 수계 수질 평가기술 및 대체 수자원 확보 기술은 도입기 수준으로 선진국과의 기술 격차가 각각 6.8년과 4.9년으로 나타나고 있음.

▌표 4.11 지하 저수지 분야 국내외 기술비교

연구개발 내용	선진국 수준	국내 수준	차이
지하 저수지 적지 평가 기술	70	55	15
지하수 취수 및 주입 기술	75	30	45
지하 저수지 설계 및 운영기술	65	50	15
관정 유지관리 기술	60	30	30
지하수를 이용한 정수처리 및 운영기술	90	80	10
수질관리 기술	80	70	10
지하수 모니터링 및 시뮬레이션 기술	85	70	15

■ 본 기획연구를 통하여 지하 저수기 분야 국내외 기술비교가 수행되었으며 그 결과를 표 4.12에 제시하였음. 표 4.12에서 나타났듯이 정수처리기술 및 수질관리 기술의 수준은 높은 반면 지하 저수지 설계 및 운영 부분에 있어서는 선진국과 차이를 보여주고 있음. 하지만 국내 인공함양 부분의 특허에 있어서는 특허출원수가 일본에 이어 두 번째이며, 미국과 유럽보다 앞서 있다. 강변여과 부분에 있어서는 세계에서 가장 특허가 많은 것으로 조사되었으며 또한 특허 출원 증가율이 꾸준히 증가하고 있어 발전기 단계에 있는 것으로 평가됨. 그리고 지하 저수지 개발 부분은 세계 최초로 기술 개발되는 부분으로 향후 원천기술 및 설계분야, 유지관리 분야의 기술개발 및 특허출원이 크게 증가될 것으로 예상되며 따라서 향후 기존 기술과 차별화된 본 기술을 통하여 세계 물 시장에

서 경쟁력을 확보가 가능할 것으로 예상됨.

▌표 4.12 지하수 인공함양 분야 연구개발 대상기술의 국내외 기술비교

연구개발내용 지하수 인공함양 분야	선진국 수준	국내 수준	차이
1. 강변여과 활용기술			
강변여과수 모니터링 수질변화 예측 기술	100	80	20
충적대수층 유실 방지 기술	100	75	25
충적층 정밀조사 기술	100	55	45
취수시 지표수 지하수 연계이동 특성 규명기술	90	70	20
강변여과수 수처리 최적 기술 개발	90	70	20
강변여과수 시스템 설계 및 구축기술	100	65	35
2. 직접인공함양 활용 기술			
인공함양 적지 선정 평가 기술	70	55	15
인공함양 대수층 특성변화 예측 기술	50	15	35
인공함양 수질변화 모니터링 기술	50	15	35
직접인공함양 가능 주입수 평가 기술	100	75	25
직접인공함양 주입/회수 기술	80	30	50
인공함양관련 특수 취수 시스템 설계 및 구축기술	80	15	65
인공함양 막힘 과정 파악 기술	100	55	45
인공함양 운영 및 관리 기술	100	55	45

자료: 한국건설교통기술평가원, 수변지하수 활용 고도화 기획보고서 (2011)

■ 특히 강변여과수에 염수가 존재하거나 오염발생 시 현재의 정수처리 공법으로는 안정적인 먹는 물 생산에 한계가 있으며, 이러한 비상시 한계를 극복하기 위하여 저압 역삼투막 공정을 이용한 정수처리 기술을 개발할 필요가 있음.

제 3 절 경제적 타당성

1. 분석 개요 및 기본가정

가. 분석 개요

■ 경제성 분석은 예비 대상사업의 비용과 편익을 분석하여 투자의 최적화를 기하고 우선순위를 정할 객관적인 기준을 검토하는 것이며 이를 바탕으로 정책을 결정하게 됨. 이러한 경제성 분석에서 구체적으로 사업을 실시할 필요가 있는지, 투자에 따라 얼마의 순후생이 증가할 것인지, 투자의 적정규모는 얼마인지를 평가하게 됨. 여러 대안에서 투자의 우선순위 등을 평가하는 이론적 분석기술로는 비용·편익 분석(benefit cost analysis: BCA 또는 CBA)과 비용·효과 분석(cost effectiveness analysis)이 있음. 비용·효과 분석은 재원이 한정되어 있을 때 다양한 투자계획들 가운데서 어떤 것을 수행할 것인지를 선택할 수 있도록 도와주는 실무적인 방법이라고 할 수 있음.

■ 수자원 관련 사업에서 최적 규모는 순편익이 가장 큰 경우를 뜻하여 비용·편익 곡선상에서 최종추가분에 대한 편익과 비용의 증분이 동일해지는 규모를 말함. 그러나 계획입안 시 유의할 점은 순편익이 최대가 되거나 편익·비용비가 가장 큰 사업이 최적 규모가 아닐 수도 있다는 점임. 따라서 최적 규모로 결정된 시설규모에 대한 세밀한 계획을 기준으로 사업 전체에 대한 경제성 검토가 이루어져야 하며, 이와 같은 검토는 주로 순현재가치(net present value: NPV) 분석, 편익·비용비(benefit−cost ratio: B/C), 내부수익률(internal rate of return: IRR) 분석을 통해 이루어지고, 각각의 특징은 표 4.13과 같음.

▌표 4.13 경제성 평가지표의 특징

지표	정의	특징
순현재가치 (NPV : Net Present Value)	$\sum_{t=0}^{n}\frac{B_t-C_t}{(1+r)^t}$	•사업 실시에 의한 순 편익의 크기를 비교할 수 있음 •사회적인 할인율에 따라 값이 변화함
비용편익비율 (CBR : Cost Benefit Ratio)	$\frac{\sum_{t=0}^{n}\frac{B_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=0}^{n}\frac{C_t}{(1+r)^t}}$	•단위 투자 당 편익의 크기에 따라 사업의 투자 효율을 비교할 수 있음 •사회적인 할인율에 따라 값이 변화함. •사업 간의 비교에 이용하는 경우 각 비목(영업비용, 유지관리비용 등)을 편익 측면에 계산하거나 비용측면에서 계산할 때 주의가 필요함
내부수익률 (IRR : Internal Rate of Return)	$\sum_{t=0}^{n}\frac{B_t-C_t}{(1+r_0)^t}=0$이 되는 r_o	•사회적인 할인율과 비교하여 사업의 투자 효율성을 판단할 수 있음 •사회적인 할인율의 영향을 받지 않음

■ 경제성 판단의 지표는 편익 또는 수익과 비용을 동일한 비교기준으로 환산하여 적용하는데, 사업 분석기간의 총편익과 총비용을 현재가치화 할 수 있. 그러나 부속 구조물이나 시설물의 내용연한이 다르므로 연간균등비용과 연간균등편익을 기준으로 하는 것이 보다 일반적임. 연간균등비용과 연간균등편익은 총사업기간에 발생하는 일련의 비용과 편익을 각각 기준연도의 현재가치로 할인하고 이를 합산하여 전 기간 동안 균등하게 발생하도록 구한 연간 균등액을 뜻함. 개략적인 총사업비를 추정하기 위해서는 건설비, 보상비 등 시설구축을 위한 초기 투자비용과 유지관리비, 시설개량비 등 시설운영에 따르는 비용을 추정할 수 있어야 함. 필요한 경우 경제성 분석에 사용된 각종 추정치의 오차를 보완하기 위하여 수요, 비용단가, 할인율 등 주요 변수의 변화가 경제성에 미치는 영향에 대한 민감도 분석도 수행하게 됨.

▌경제적 타당성 분석항목 및 절차

■ 본 연구기획 단계에서는 개발 기술에 대한 구체적인 연구결과를 예측하기 어려우므로 실제 사업에 대한 현실적인 경제적 타당성 분석이 이루어지기는 어려움. 그러나 연구사업을 통한 기술개발 성과 예측을 통해 개략적인 경제적 타당성 분석을 실시함으로써 연구사업 추진의 타당성을 검증하고자 하였으며, 보다 객관적이고 전문성을 갖추기 위해 타당성 분석을 전문적으로 수행하는 기관에 의뢰하여 다음과 같은 내용으로 사업의 경제적 타당성 분석을 수행하고자 함.

- 수요의 추정
- 비용의 추정
- 편익의 추정
- 비용·편익 분석
- 민감도 분석
- 경제적 타당성 종합 평가



▌그림 4.8 경제성 분석항목의 절차

■ 수요의 추정

- 수자원사업의 경우 어떤 사업보다도 수요추정이 예비타당성조사에서 중요한 위치를 차지함.

- 이수사업의 경우 전체 유역과 해당 유역의 용수수요 자료를 토대로 각종 계량경제학적 방법을 통하여 향후의 용수수요를 추정하고, 물수지 분석 등을 통하여 용수공급계획을 수립하여야 함. 이수사업 이외의 경우에는 수자원사업의 유형별 편익에 상응하는 수요를 추정함. 예비타당성조사에서는 가급적 기존의 관련 계획이나 보고서를 중심으로 용수수급계획을 분석하는 것이 바람직함.

- 관련 자료로부터 대상지역의 용수수요를 예측하고 물수급 계획에 따라 장래 물 부족이 예상된다면 신규 수자원개발계획 등을 포함하여 유역의 전체적인 용수공급계획을 검토하도록 함. 다만, 급격한 수요 변화가 발생하는 경우 개발계획의 적절성 검토 및 수요추정방법론 검토와 같이 수요 변화의 원인을 파악할 수 있는 분석과 별도의 수요추정이 필요함. 단, 본 보고서에서는 특정지역을 대상으로 한 경제성 분석이 아니고, 생산규모(10만㎥/d)를 가정한 경제성분석이므로 수요의 추정은 생략하였음.

■ 편익의 추정

- 수자원사업으로 인하여 발생되는 편익 역시 크게 직접편익과 간접편익으로 구분 할 수 있음. 사업유형별로 명확하게 구분하는 것은 어려우나, 예를 들면 다목적댐의 경우 직접편익으로는 홍수조절, 용수공급, 수력발전, 내륙주운 및 하류 수질개선, 레크리에이션 기능 제공 편익 등을 들 수 있다. 한편, 간접편익으로는 발전용 유류대체효과, 연관사업의 파급효과, 토지이용 증가, 토사유입량 감소 편익 등을 들 수 있음.

- 한국개발연구원의 「수자원부문사업의 예비타당성조사 표준지침 수정·보완연구(제4판)」에 따르면, 수자원부문의 편익항목 및 산출방식은 표 4.14와 같음.

▌표 4.14 예비타당성조사 수자원부문 편익항목 및 산출방식

구분	예타 편익 반영	산출방식
수자원	용수공급 편익	생활용수, 공업용수, 농업용수, 발전용수별 가치를 측정
	홍수조절 편익	홍수발생확률과 피해액 자료로 산출
	관개 편익	관개로 인한 농업소득 증가와 시설유지관리 감소액을 반영
	발전 편익	시장가격, 행정적 결정가격(한전의 구매가격), 대체시설비용 기준(동일 용량 화력발전의 고정비와 변동비) 중 선택하여 적용

- 한편, 편익항목을 추정하는 방법론은 매우 다양함. 공공재 및 환경재의 경우 경제이론에 기반을 두고 환경개선에 대한 지불의사를 도출하는 방법은 크게 시장적 방법(market methods), 현시선호방법(revealed preference methods), 진술선호방법(stated preference methods), 모의시장분석법(simulated market approach), 편익이전(benefit transfer)등으로 구분할 수 있음. 시장적 방법은 환경이 제공하는 재화나 서비스의 시장이 직접 존재하는 경우 사용될 수 있음. 하지만, 환경이 제공하는 재화나 서비스의 시장이 존재하는 경우는 드물고, 따라서 시장접근법이 사용될 수 있는 경우도 매우 제한되어 있는 한계가 있음.

- 시장적 방법을 사용할 수 있을 정도의 시장자료가 갖추어지 않았다면, 비시장적 접근법인 현시선호방법, 진술선호방법, 모의시장분석법등의 방법론을 선택해야 함.

- 현시선호방법은 환경재의 시장자료가 존재하지 않기 때문에 대신 환경개선시 환경재와 관련된(related) 시장에서 발생하는 변화를 분석하여 환경개선에 대한 지불의사를 도출하는 방식임. 이 방식이 현시선호방법이라 불리는 이유는 각 개인이 관련시장에서의 행위를 통해 환경재에 대해 부여하는 가치나 선호를 현시(revealed)하였다고 볼 수 있기 때문임. 예로 같은 아파트라 하더라도 한강 전망이 보이는 아파트의 가격과 그렇지 않은 아파트의 가격의 차이는 결국 한강이라는 환경재의 가치를 나타낸다고 볼 수 있음.

- 이에 반해 진술선호법은 각 개인이 자신의 선호를 직접 말하게 하는 것임. 즉, 가상적인 시장을 만든 후 설문조사를 통하여 응답자들이 어떻게 반응하는지를 관찰하는 것임. 모의시장법은 실제 모의시장을 만들어 참가자들이 모의시장에 참여하여 실제로 거래행위를 하도록 하는 것이고, 편익이전이란 현재 존재하는 정보나 지식을 새로운 상황 또는 환경에 이전, 사용하는 것을 총체적으로 일컫는 용어임. 즉, 기존 편익 관련 연구를 이용하여 새로운 site에 적용하는 방법론이다. 각각의 편익추정법에 대한 분류는 표 4.15와 같음.

▌표 4.15 편익추정법의 분류

추정법	주요 분석모형	적용대상
시장적방법	피해함수(damage function) 생산함수(production function) 비용함수(cost function)	식량, 연료, 목재, 섬유 등 생태계가 제공하는 시장적 편익
현시선호법	휴양수요모형 recreational demand models	휴양가치, 경관가치
	특성임금모형(hedonic wage model)	사망위험성 감소, 질병위험성 감소
	특성가격모형(hedonic price model)	쾌적함, 휴양가치, 경관가치
	회피행위모형(averting behavior model)	사망 및 질병위험성, 쾌적함, 휴양 및 경관, 생태계 보존, 시설물 보존
진술선호법	가상가치평가법 (contingent valuation method, CVM)	모든 종류의 편익
	가상순위결정법 (contingent ranking method, CRM)	
	선택실험법(choice experiment, CE)	
혼합모형	현시선호법과 진술선호법의 혼합	현시선호법이 적용될 수 있는 모든 종류의 편익
모의시장 분석	실험경매법(experiment auction)	모든 종류의 편익
편익이전	가치이전, 함수이전, 메타분석	모든 종류의 편익

출처 :「환경경제학」(권오상, 2007)

■ 비용의 추정

- 비용은 사업의 실시로 발생하는 일체의 자원비용을 말함. 각 사업의 비용은 총 사업비와 유지관리비로 크게 구분되며, 총사업비는 다시 공사비와 부대비, 예비비, 용지보상비로 구분됨. 공사비는 사업의 성격에 따라 공종별로 나누어지며, 용지보상비는 사업지역의 토지 매입 및 지장물의 보상비를 말함.

- 유지관리비는 사업의 초기 투자비용뿐만 아니라 생애주기비용(life cycle cost)까지 고려하기 위해 추가되는 운영비 등을 말함. 사업비 추정의 불확실성을 고려하여 공사비, 부대비, 용지보상비의 10%를 예비비로 산정하도록 함.

■ 비용·편익 분석

- 편익·비용비는 현시점으로 할인된 총편익과 총비용의 비율을 나타내며 이 비율이 높은 사업일수록 경제적 타당성이 높은 것으로 평가하는 기준임. 비용·편익 분석은 공공사업의 투자타당성을 평가하는데 일반적으로 가장 널리 사용됨. 산정된 투자비용과 편익을 가장 높은 회수율(rate of return)을 얻을 것으로 판단되는 지표로써 평가하게 되는데, 여기에는 순현재가치(NPV), 편익·비용비(B/C ratio), 내부수익률(IRR) 등이 많이 사용되며 이들의 장단점을 비교하여 이용함. 만약 그 사업이 국가경제에 크게 관련되어 있지 않고 비용과 편익의 정량화가 가능하다면, 비용·편익 분석은 타당한 경제적 결정의 기초를 제공하게 됨. Sassone and Schaffer(1978)의 정의에 따르면, 비용·편익 분석이란 국가적인 차원에서 정해진 공공목표를 달성하기 위하여 예상되는 대안들(alternatives) 각각의 비용과 편익을 측정하고 비교·평가하여 최선의 대안을 도출하는 기술적 방법이라고 규정할 수 있음. 따라서 비용·편익 분석은 민간기업 차원의 재무성 분석(financial analysis)과는 달리 사회적 관점 또는 국민경제 전체의 관점에서 비용과 편익을 파악하게 됨.

- 공공사업의 비용·편익 분석은 민간 기업이 실제의 금전적 비용과 수입을 추정하고 이에 따른 재무적 수익률을 계산하여 타당성을 검토하는 것과 비교해 볼 때, 접근방식이 비슷하기는 하지만 비용과 편익을 추정하는 기본 개념에서 근본적인 차이점이 있음. 즉, 국민경제적 관점에서의 편익이란 특정 사업의 국민생산에 대한 공헌을 뜻하며, 비용이란 국가자원의 낭비(즉, 자원의 기회비용)를 뜻하게 된다. 비용·편익 분석의 몇 가지 중요한 특징을 소개하면 다음과 같음(김동건[1997]).

  첫째, 개별 정부투자사업을 평가하는 경제성 분석의 한 분야임.
  둘째, 사회적 관점이나 국민경제 전체의 관점에서 비용과 편익을 파악함.
  셋째, 기대되는 모든 비용과 편익을 장기적 시각에서 종합적으로 평가함.
  넷째, 현실적인 측면을 고려한 실무적인 분석방법임.

  편익·비용비는 아래 식과 같이 계산할 수 있음.

$$B/C = \sum_{t=0}^{n} \frac{B_t}{(1+r)^t} / \sum_{t=0}^{T} \frac{C_t}{(1+r)^t}$$

이 때, n = 계획의 시계
T = 사업의 기대수명
Bt = t기간 말의 편익
Ct = t기간 말의 비용
r = 할인율

■ 민감도 분석

– 경제성 분석에서 비용과 편익은 조건에 따라 달라지므로, 이러한 변화 경향을 미리 파악하여 편익과 비용에 대한 신뢰성을 검토하여야 함. 이 경우 사업의 내부수익률을 평가하는 것이 그 방법 가운데 하나임.

– 이 내부수익률의 오차 정도를 평가하기 위하여 민감도 분석을 하며 정책 결정자에게 유용한 자료로 활용됨. 내부수익률에 영향을 미치는 주요 인자는 투자비, 운영비, 산출량 등이며 이들 요소들을 독립적으로 변화시켜서 내부수익률의 변화 영향을 조사하게 됨. 이 변화 경향은 민감도지표(sensitivity index: SI)를 통해 알 수 있음. 민감도지표는 다음의 식과 같음. 민감도지표를 계산하여 그 결과가 1보다 크면 해당 주요 인자는 민감도가 크다고 판단하여 이에 대한 투자비 증가요인의 발생을 억제토록 하며, 민감도지표가 1보다 적은 경우에는 해당 주요 인자의 민감도가 낮으므로 경제성에 미치는 영향이 적다고 판단함.

민감도지표(SI) = 내부수익률의 변화율 (%) / 개별 주요 인자의 변화율 (%)

■ 재무성 분석 및 민자투자 추진 가능성 검토

– 재무성 분석 및 민자투자 추진 가능성 검토를 예비타당성조사에 있어서 모든 사업에 의무적으로 실시할 필요는 없으나, 편익-비용 비율이 1 이상으로 경제적 타당성이 있고, 사업성이 높아 민간이 스스로 참여할 가능성이 있는 사업 등에 대해서는 재무적 타당성 평가를 수행할 수 있음.

– 그러나 민간투자사업 추진의 적합성을 판단하는 데 있어 수익성 이외에 서비스 질 향상, 관리의 용이성, 위험분담 효과, 파급효과 등 정성적 요소를 종합적으로 고려하지 못하고 있어 민간투자사업 추진 가능성을 판단하기에 한계가 있음.

■ 경제적 타당성 종합 평가

- 계량화된 비용과 편익을 기준으로 비용-편익 비율(B/C), 순현재가치(NPV), 내부수익률(IRR) 등을 산정하여 종합적으로 경제적 타당성을 평가함.

- 경제성 분석을 위한 분석기간은 일반적으로 45년으로 하고, 사회적 할인율은 일반지침에 따라 운영 30년 동안은 5.5%, 그리고 향후 15년은 4.5%를 적용함.

2. 경제성 분석

■ 본 연구의 경제성 분석을 위한 비용·편익분석을 위해 대상기간 및 사회적 할인율에 대하여 다음과 같은 가정을 수립함.

■ 경제성 분석의 대상기간은 한국개발연구원(KDI)의 「수자원부문사업의 예비타당성조사 표준지침 수정·보완 연구(제4판)」의 지침에 따라 공사후 45년까지로 설정함.

■ 또한, 사회적 할인율은 공사완료후 30년까지는 5.5%, 이후 45년까지는 4.5%를 적용함

■ 연구비(R&D)비용은 포함하지 않음.

■ 분석기간동안의 재투자비용은 전기·기계장비에 대한 재투자비용이며, 총 공사비용의 40%를 가정하였고, 준공후 15년마다 투자되는 것으로 가정함(45년간 총 2회 재투자).

가. 비용분석

■ 비용 산출은 본 사업의 기획연구를 통해 산정된 R&D 소요예산(안) 및 연구단 운영비, 10만㎥/일 규모의 청정지하저수지 건설에 따른 공사비 산출(안) 비용, 청정지하수 건설을 위한 유지비용(동력비)가 포함됨.

▌청정지하저수지 공사비

■ 국내에서 청정지하저수지개발을 실시한 경험이 없기 때문에 실제 공사비를 산정하기가 어려움.

■ 따라서, 다음 표와 같이 생산량 100,000㎥/일, 저수량 10백만㎥일 경우를 가정하여 개략공사비를 산정하였음. 관정부문은 주입정(33개), 양수정(20개), 양수펌프, 관측정, 모니터링 web을 설치하는 것으로 하여 총 3,300백만원으로 추정하였고, 관망부문은 관망(5㎞), 도수펌프, 유량계(10개), 수압계(10개)를 설치하여 총 6,004백만원, 수처리부문은 전처리와 후처리시설을 설치하여 총 4,604백만원의 비용이 발생할 것으로 추정하여 총 13,908백만원의 개략공사비를 산정하였음.

▌표 4.16 지하저수지(10만㎥/일 규모)개발 개략 공사비 (단위:백만원)

구분		개수	단가	총액	사양	비고
관정부문	주입정	33	70	2,310	3,000㎥/d/공, 심도 70m	유량계 및 우물자재포함, 투수계수 80m/d
	양수정	20	75	1,500	5,000㎥/d/공, 심도 70m	유량계 및 우물자재포함,
	양수펌프	20	20	400	10kW	
	관측정	50	25	1,250	60m	EC, T, GWL센서 포함
	모니터링 web	1	150	150	관측정 및 관망자료	
관망부문	관망	5,000 m	1	4,030	900㎜, 총연장 5㎞	
	도수펌프	1	1,939	1,939	200kW	주입정 연결
	유량계	10	100	1,000		
	수압계	10	10	100		
수처리부문	전처리	1	3,663	3,663	10만㎥/d	침전 및 소독
	후처리	1	941	941	10만㎥/d	소독등
합계				17,283		

주) 전처리는 정수시설 중 응집지 및 침전지로 가정하였고, 후처리는 정수지로 가정함

■ 또한, 기계장치 및 전기장비의 경우 내구연한이 15년이기 때문에, 45년간 2번의 재투자 비용이 발생하게 됨. 기계장치 및 전기장치의 비용은 총 공사비의 40%로 가정하였으며, 45년간 재투자비용은 총 13,826백만원(6,913백만원×2회)으로 추정됨.

▌청정지하저수지 유지관리비용

■ 청정지하저수지 유지관리비용은 인건비, 동력비, 약품비만을 가정하고, 이에 따른 발생비용만을 산정함.

■ 인건비 산정의 경우, 환경부의 「정수장 운영 및 관리실태 평가규정」의 '정수장 적정 운영·관리인력 기준'에 따르면, 10만㎥/일의 시설규모일 경우 20명으로 규정하고 있으나, 운전수준에 따라서 적정인력을 조정할 수 있음. 따라서, 본 연구는 공정자동운전을 가정, 적정인력의 60%를 적용하여 인력은 12명으로 결정하고, 인건비는 행정안전부의 「2010년 지방공기업 결산 및 경영평가」자료를 바탕으로 전국 상수도 평균인건비 46,328천원을 적용하여 연간 총 인건비는 약 556백만원으로 추정함.

■ 약품비는 인건비와 마찬가지로 「2010년 지방공기업 결산 및 경영평가」자료를 이용하여 전국 평균 약품비 ㎥당 9.4원을 적용하여 연간 약품비는 약 343백만원이 소요될 것으로 추정함.

■ 청정지하저수지의 동력비는 실제 취수장의 동력비와 비교하여 비용이 높을 것으로 추정되나, 본 분석에서는 춘천시의 소양취수장과 용산취수장의 평균 동력비 단가(31.5원/㎥)를 적용함[13].

▌표 4.17 동력비 단가 산정

구분	소양취수장	용산취수장	평균값
연간생산량(㎥)	24,618,395	6,391,173	15,504,784
생산원가(원)	1,076,882,494	411,290,018	744,086,256
㎥당원가(원/㎥)	43.7	64.4	54.0
동력비용(원)	773,222,766	203,389,574	488,306,170
동력비 단가(원/㎥)	**31.4**	**31.8**	**31.5**

■ 따라서, 10만㎥/일 규모의 유지관리비는 연간 약 1,149백만원이 소요될 것으로 추정됨.

■ 청정지하저수지 10만㎥/일 규모를 유지관리하기 위한 비용은 인건비, 동력비, 약품비를 적용하였고, 연간 유지관리비용은 약 2,048백만원으로 추정됨.

▌표 4.18 연간유지관리비 추정액 **(단위:백만원)**

구분	인건비	동력비	약품비	총액
연간 유지관리비	556	1,149	343	2,048

▌총 비용 추정

■ 청정지하저수지 개발에 따른 비용은 본 연구사업과 관련된 R&D소요예산, 총 공사비, 유지관리비용으로 구분할 수 있으며, 총 R&D 소요예산은 약 160억원, 총 공사비는 10만㎥/일 시설용량을 가정할 경우 약 172억원, 연간유지관리비용으로 약 20억원이 소요될 것으로 추정됨.

▌표 4.19 총 비용추정 값 **(단위:백만원)**

구분	총공사비	연간유지관리비 (인건비, 약품비, 동력비)
비용 추정값	31,109	2,048

13) 통계상의 동력비는 취수, 정수, 송수, 배급수등 모든 비용을 포함한 동력비임. 따라서, 취수장만의 동력비를 산출하기 위해 환경부의 「지방상수도 급수체계조정사업 재원마련 및 공급단가 산정」보고서에서 춘천시 취수장(소양, 용산)의 동력비를 적용하였음.

3. 편익분석

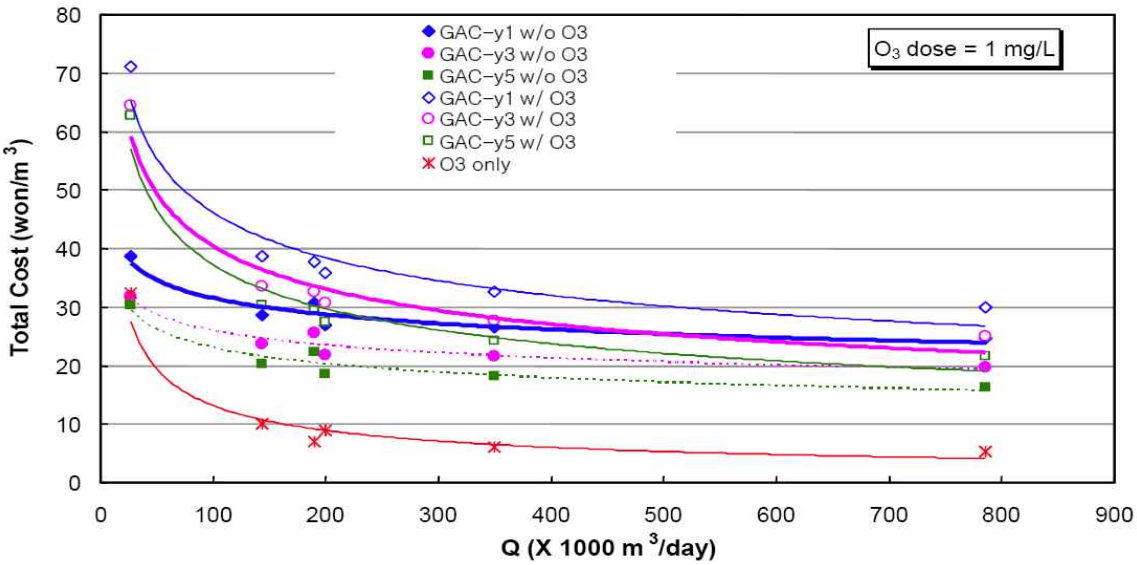
■ 10만㎥/일규모의 청정지하저수지를 건설할 경우의 계량화가 가능한 편익은 다음과 같이 3가지 편익이 발생할 것으로 판단됨.

- 원수수질의 향상에 따른 고도정수처리비용 절감
- 기존 취수장의 가동중지에 따른 생산원가 절감 편익
- 대체된 원수로부터 제조된 수돗물을 소비하는 사람들이 얻는 소비자 편익

▌고도정수처리비용 절감 편익

■ 취수원 수질 개선을 통한 기존 고도정수처리장(오존, 활성탄 등) 운영비용 절감은 K-water연구원(2011)자료를 근거로 다음과 같이 추정함.

- 시설용량 50,000㎥/일 : 약 47~56원/㎥
- 시설용량 100,000㎥/일 : 약 37~46원/㎥



▌그림 4.9 시설용량에 따른 총 비용 절감 효과

■ 시설용량 10만㎥/일에 대한 고도정수처리 운영비용 절감에 따른 단가는 ㎥당 46원으로 가정하고, 계산하면 연간 약 1,679백만원의 절감비용이 발생할 것으로 추정됨.

▌기존 취수장 가동정지에 따른 원가절감 편익

■ 새로운 청정지하저수지라는 취수시설이 생김에 따라 기존의 취수장은 청정지하저수지가 생산하는 원수만큼 가동이 중지됨에 따른 원가절감 편익이 발생할 것으로 예상됨.

■ 취수체계조정대안 적용시 자체생산과 광역정수구입방안을 비교하는 경우의 생산원가를 산정하기 위한 생산원가는 다음과 같이 추정함.

■ 취·정수 생산원가는 지방상수도 생산과정별 원가계산연구용역(2004, 한국수도경영연구소)자료를 활용하였으며, 취·정수 생산원가 중 감가상각비 및 원정수구입비를 제외한 생산원가만을 고려함.

■ 시설규모 및 가동률의 차이로 인하여 생산원가는 지자체별로 상당한 차이가 발생하고 있으며 원가차이를 조정하기 위하여 비교 표시된 6개 지자체의 평균생산원가를 산정하고 평균생산단가인 96.88원/㎥을 적용함.

■ 단, 년도별 원가차이를 조정하기 위하여 년도별 소비자물가상승률을 적용하여 산정된 113.13원/㎥으로 추정함.

▌표 4.20 취·정수 생산원가 산정 **(단위:천원, 천㎥)**

취.정수	금산군	함평군	양산시	고령군	보령시	구미시	평균
생산원가	467,627	407,329	1,978,986	479,369	862,981	2,842,039	592,574
생산량	5,977	2,789	16,202	2,260	4,129	41,204	6,116
단가(원)	78.24	146.05	122.14	212.11	209.00	68.97	96.88

출처: 지방상수도 생산과정별 원가계산연구용역(2004, 한국수도경영연구소)

■ 결론적으로 10만㎥/일 규모의 취·정수시설의 생산원가 절감비용은 연간 약 4,129백만원으로 추정됨.

▌소비자 편익 추정

■ 청정지하저수지 개발은 기존 하천수의 오염에 따른 수돗물 불신을 낮출 수 있을 뿐만 아니라, 실제 정화되어진 원수를 공급하는 것이기 때문에 소비자의 편익이 발생함.

■ 이를 화폐가치로 추정하기 위해서는 시민들에게 지불의사금액(willingness to pay)를 조사해야 하고, 이와 유사한 방법론으로 추정한 연구는 기존 「남강댐 재개발사업 및 부산·경남권 광역상수도사업」에서 부산광역시와 인근 지자체 500명에게 취수원을 기존 낙동강하구에서 남강댐의 광역상수도로 변경할 경우에 따른 지불의사를 설문하였음.

■ 그 결과, 1㎥당 약 87.43원의 지불의사가 있는 것으로 추정하였고, 이를 10만㎥/일 규모로 적용하면, 연간 약 3,191백만원의 편익이 발생하는 것으로 추정됨.

▌연간 총 편익 추정

■ 청정지하저수지 개발에 따른 편익은 고도정수처리비용 저감편익, 기존 취·정수장 가동중지에 따른 원가절감편익, 원수 수질 개선에 따른 소비자 편익등으로 구분할 수 있으며, 이를 화폐가치로 계량화한 연간 총 편익은 약 8,999백만원으로 추정됨.

▌표 4.21 연간 총 편익추정 값 (단위:백만원)

구분	고도정수처리비용 저감편익	취정수장 중지에 따른 원가절감편익	원수 수질개선에 따른 소비자 편익	합계
편익 추정값	1,679	3,191	4,129	8,999

4. 비용-편익 분석

■ 앞에서 도출된 비용분석 자료와 추정된 편익 값을 통해 45년간 사업기간을 가정한 비용-편익분석(B/C 비율)을 수행한 결과 다음과 같은 결과가 도출됨.

▌표 4.22 총 비용 및 총 편익 분석 결과 (단위 : 백만원)

총 비용	총공사비	총유지관리비(45년간)
123,288	17,283	92,178

총 편익	고도정수비용 저감	취정수장 원가절감	소비자 편익
404,974	75,555	185,816	143,603

▌표 4.23 비용-편익 비율 도출 (단위:백만원)

구분	총비용의 현재가치 (A)	총편익의 현재가치 (B)	B/C ratio (B/A)	순현재가치 (NPV)
청정지하저수지 개발사업	59,560	164,957	2.77	105,396

5. 경제사회적 파급효과

가. 고용증대효과 및 산업유발효과

▌분석방법

■ R&D 투자의 경제사회적 파급효과 중 생산유발효과 및 고용촉진효과는 한국은행의 2006년 산업연관표(2010년 기준 가장 최신 연도에 발표된 산업연관표) 활용하여 분석을 실시함.

■ 본 조사에서 활용한 산업연관표는 국내 산업에 미치는 영향만을 구분하기 위해 수입을 제외한 순수 국내 산업간 거래관계를 나타내는 국산 거래표를 활용함.

▌분석결과

▪ 고용유발효과 분석결과 2013~2017년 기간 동안 R&D 투자지출 중 간접비를 제외한 약 160억 원의 투입으로 총 237명의 고용유발효과가 있는 것으로 나타남

▪ 또한, 생산유발효과 분석결과 2013~2017년 기간 동안 R&D 투자지출 160억원의 투입으로 총투자지출액의 약 2.01배인 323억 원의 생산유발효과가 나타남

▌표 4.24 고용유발효과 산출 값(건설업기준) **(단위 : 명/10억)**

산업분류	고용유발계수	1차년도	2차년도	3차년도	4차년도	계
농림수산품	0.0283	0.1	0.1	0.1	0.1	0.5
광산품	0.0551	0.2	0.3	0.3	0.2	0.9
음식료품	0.0217	0.1	0.1	0.1	0.1	0.3
섬유 및 가죽제품	0.0413	0.1	0.2	0.2	0.1	0.7
목재 및 종이제품	0.107	0.3	0.5	0.5	0.3	1.7
인쇄 및 복제	0.0226	0.1	0.1	0.1	0.1	0.4
석유 및 석탄제품	0.0091	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1
화학제품	0.1967	0.6	0.9	0.9	0.6	3.1
비금속광물제품	0.3843	1.2	1.8	1.8	1.2	6.1
제1차 금속제품	0.1742	0.6	0.8	0.8	0.6	2.8
금속제품	0.5866	1.9	2.8	2.8	1.9	9.4
일반기계	0.2204	0.7	1.1	1.1	0.7	3.5
전기 및 전자기기	0.1954	0.6	0.9	0.9	0.6	3.1
정밀기기	0.0228	0.1	0.1	0.1	0.1	0.4
수송장비	0.0229	0.1	0.1	0.1	0.1	0.4
기타제조업제품	0.0557	0.2	0.3	0.3	0.2	0.9
전력,가스 및 수도	0.0354	0.1	0.2	0.2	0.1	0.6
건설	10.426	33.4	50.0	50.0	33.4	166.8
도소매	0.6116	2.0	2.9	2.9	2.0	9.8
음식점 및 숙박	0.1452	0.5	0.7	0.7	0.5	2.3
운수	0.3164	1.0	1.5	1.5	1.0	5.1
통신 및 방송	0.0443	0.1	0.2	0.2	0.1	0.7
금융 및 보험	0.2418	0.8	1.2	1.2	0.8	3.9
부동산 및 사업서비스	0.6553	2.1	3.1	3.1	2.1	10.5
공공행정 및 국방	0.0056	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1
교육 및 보건	0.0958	0.3	0.5	0.5	0.3	1.5
사회 및 기타서비스	0.1116	0.4	0.5	0.5	0.4	1.8
계	14.8328	47	71	71	47	237

■ 또한, 같은 방법으로 생산유발효과를 분석한 결과 총투자지출액의 약 2.01배인 323억원의 생산유발효과가 있는 것으로 분석됨.

▌표 4.25 생산유발효과 산출 값(건설업기준) **(단위 : 천원)**

산업분류	생산유발계수	1차년도	2차년도	3차년도	4차년도	계
농림수산품	0.006972	22,310	33,466	33,466	22,310	111,552
광산품	0.01112	35,584	53,376	53,376	35,584	177,920
음식료품	0.007713	24,682	37,022	37,022	24,682	123,408
섬유 및 가죽제품	0.005738	18,362	27,542	27,542	18,362	91,808
목재 및 종이제품	0.023313	74,602	111,902	111,902	74,602	373,008
인쇄 및 복제	0.003067	9,814	14,722	14,722	9,814	49,072
석유 및 석탄제품	0.050756	162,419	243,629	243,629	162,419	812,096
화학제품	0.076067	243,414	365,122	365,122	243,414	1,217,072
비금속광물제품	0.095845	306,704	460,056	460,056	306,704	1,533,520
제1차 금속제품	0.177208	567,066	850,598	850,598	567,066	2,835,328
금속제품	0.105894	338,861	508,291	508,291	338,861	1,694,304
일반기계	0.048211	154,275	231,413	231,413	154,275	771,376
전기 및 전자기기	0.062196	199,027	298,541	298,541	199,027	995,136
정밀기기	0.003398	10,874	16,310	16,310	10,874	54,368
수송장비	0.008202	26,246	39,370	39,370	26,246	131,232
기타제조업제품	0.008724	27,917	41,875	41,875	27,917	139,584
전력,가스및수도	0.023878	76,410	114,614	114,614	76,410	382,048
건설	1.004276	3,213,683	4,820,525	4,820,525	3,213,683	16,068,416
도소매	0.052569	168,221	252,331	252,331	168,221	841,104
음식점 및 숙박	0.012573	40,234	60,350	60,350	40,234	201,168
운수	0.037804	120,973	181,459	181,459	120,973	604,864
통신 및 방송	0.01466	46,912	70,368	70,368	46,912	234,560
금융 및 보험	0.039134	125,229	187,843	187,843	125,229	626,144
부동산 및 사업서비스	0.096611	309,155	463,733	463,733	309,155	1,545,776
공공행정 및 국방	0.000549	1,757	2,635	2,635	1,757	8,784
교육 및 보건	0.006558	20,986	31,478	31,478	20,986	104,928
사회 및 기타서비스	0.010549	33,757	50,635	50,635	33,757	168,784
기타	0.026273	84,074	126,110	126,110	84,074	420,368
계	2.019859	6,463,546	9,695,318	9,695,318	6,463,546	32,317,728

6. 도서지역 물 공급 대안별 경제성 및 안정성 분석

가. 경제성

- 도서지역의 물 공급 대안 별 경제성을 분석하였음. 식수 전용 지표수 저수지, 해수담수화, 해저관로 등을 대상으로 분석하였음. 대안간 비교를 위하여 공급량 100m^3/d당 건설비용을 산정하고 비교하였음.
- 단위 공급량 당 분석 결과 지표수 저수지는 14억원~50억원, 해저 관로는 10억원~60억원 등 유사한 범위를 나타냄. 해수담수화 시설은 9억원~10억원으로 건설비가 비교적 저렴하게 나타났음. 다만 담수화는 고 에너지 소비 공정으로 1m^3 생산 비용이 8,000원을 초과함 (문유리 등 2010).
- 지하저수지는 건설 사례가 없으므로 여기서는 개략 산정하였음. 단위 공급량 당 건설비는 5억원 이내일 것으로 추정됨. 지하저수지는 지하수 관정 1~2개, 간이 정수시설, 그리고 수요지 인근 설치가 가능하므로 1km 이내의 관로 부설 등 시설 설치가 비교적 적음.

도서지역 용수 공급 대안 별 건설비용 비교

	도서명	공급량 (m^3/d)	부대시설	년도	비용 (백만원)		출처
					전체	100m^3/d 당비용	
소규모 저수지	연도	200	관로 7.5km 정수장	2010	10,150	5,075	문유리 등 (2010)
	도초도	800	관로 431m 정수장	2003	16,717	2,099	
	백령도	1300	관로 12.4km 정수장	1998	18,620	1,432	
	17개 도서			2002	369,000		디지탈 보사 2002.10.17
해수 담수화	선유도	100	염지하수공 2공 RO, 건축물	2006	1,000	1,000	문유리 등 (2010)
	대연평도	200	염지하수공 2공 RO, 건축물	2007	1,850	925	
해저 관로	대포작도 소포작도 어의도	150	해저관로 1.6km 50mm		2,100	1,400	신안신문 2007.11.14
	우도		배수지, 관로 육상 10.2km, 해저 3.1km		10,000		미디어제주 2008.8.29
	삼마도	50	해저 관로 3.8km		3,000	6,000	KBS 순천 2009.4.8
지하 저수지	-	50	관정 1~2개 육상관로(<1km) 간이 정수시설			< 500	안전율 고려 개략산정 금액

나. 용수 공급의 안정성

- 도서지역의 물 공급 대안별 안정성을 분석하였음. 대안별 장단점과 특기 사항을 표로 제시하였음. 가장 안정적인 용수 공급 방안은 해저 관로로 분석됨. 다만 해저관로 도수 대안은 설치가능한 도서가 제한적임
- 지하저수지는 건기에 물 공급이 가능한 대안으로 고려되나 적용성 등에 대한 연구가 필

요함

	장점	단점	비고
소규모 지표 저수지	확보 수자원량 명확	-설치 가능 도서가 제한적 -하계 수온 상승으로 부영양화 등 수질 관리 어려움 -증발 손실	환경 피해 발생
빗물	수요지에서 물 확보 가능	-대형 저류조 필요. -수질 관리 어려움	가장 경제적
해수 담수화	안정적 용수 공급 가능	-시설 운영 및 유지관리의 어려움으로 오작동 및 고장 빈발	생산 단가 고가
해저 관로	가장 안정적 용수 공급 대안	-설치가능 도서가 제한적 -해저 관로 유지관리 어려움	해저 환경 피해
지하 저수지	-수요지에서 물 확보 가능 -단순한 시설	-대수층의 불균질성으로 인한 불확실성	

제 4절 과학기술적 파급효과

대규모 청정 지하저수지 개발 기술은 국내에서는 처음이고 외국에서도 시작단계에 있으므로, 사회적 및 경제적으로 큰 의의가 있음은 물론이고, 과학기술적으로도 그 파급효과가 매우 크다. 본 연구의 4개 세부과제에서 세세부과제별로 과학기술적으로 파급되는 효과는 다음과 같다.

1. 과제총괄 파급효과

지표수 - 지하수 연계활용의 고도화 기술 개발
ASR, ASTR 기술분야 국제경쟁력 향상

2. 세부과제별 파급효과

가. 1 세부과제: 대하천 하구 퇴적층에서 저수량 1,000만㎥ 확보를 위한 최적 설계기술

▌대하천 하구 퇴적층 부지특성 평가 기술

- 대규모 충적대수층의 수리적특성을 평가하는 수리지질학적 인자(유효공극율, 투수계수, 저류계수, 분산지수 등) 산출기술 개발
- 대규모 충적대수층에서 지하수 함양량 평가 기술 개발
- 충적대수층(미고결 퇴적층) 샘플링 기술 개발

▌주입 및 양수 시스템 최적 설계기술

- 충적대수층에서 효율적인 주입 기술 개발
- 충적대수층에서 효율적인 양수 기술 개발
- 상시주입-상시양수 관련 주입계통과 양수계통의 최적 설계기술 개발

▌지하저수지 모니터링 시스템 설계기술

- 주입정-양수정-감시정-하천수-해수의 수위 및 수질에 대한 종합적 모니터링 시스템 구축 기술 개발

▌주입수 거동 및 수질 평가 기술

- 주입수와 퇴적물의 수리역학적 및 지화학적 반응 규명
- 충적대수층의 수질 개선능력 평가기술 개발

나. 2 세부과제: 청정지하저수지 운영 및 유지관리 기술

▌지하 저수지 통합 운영 기술

- 다수의 주입정과 양수정이 결합된 용수공급 시스템 운영기술 개발

▌비상 시 지하 저수지 운영 기술

■ 주입 및 양수 장치에 대한 모니터링 시스템과 모바일 시스템을 결합한 상시용수 공급장치 원격모니터링 및 제어 시스템 개발
■ 시스템 오작동이나 재난시 지하저수지 운영기술 개발

▌시스템 유지관리 기술

■ 주입정 및 양수정의 효율적인 폐색 관리기술 개발

▌지반변형 해석 및 방지(저감) 기술

■ 다수의 미고결 퇴적층으로 구성된 충적 피압대수층의 지반변형 예측 및 방지 기술 개발

다. 3 세부과제: 청정용수 공급을 위한 수질관리 및 활용기술

▌음용수로서의 신뢰도 확보를 위한 청정 지하저수지의 수질위해요소 사전관리 기술

■ 위해성 물질의 대수층 유입과 거동에 대한 데이터 구축 및 해석 기술개발
■ 지하수 위해성 관련 평가에 필요한 기준 구축

▌청정 지하저수지의 지속가능한 운영을 위한 주입수 전처리 기술

■ 원수 수질에 대응한 적정 전처리 기술 개발
■ 원수수질에 따른 막힘현상 제어 기술개발
■ 인공함양 주입수 수질기준 도출

▌먹는물 공급을 위한 플랜트 최적 설계 · 운영 · 유지관리 통합 기술

■ 전처리공정 및 후처리공정 연계 시스템 개발
■ 주입수 수질이 인공함양수 수질에 미치는 영향 규명

▌물리 · 지화학적 대수층 수질의 개선 특성 평가 기술

■ 피압대수층에서의 물리.지화학적 유기물의 거동특성 규명
■ 주입수 및 배경지하수, 대수층 지질에 따른 오염물 이동 예측기술 개발

▌대수층 수질의 생물학적 개선특성 평가 기술

■ 수질개선을 위한 대수층 주입미생물 도출
■ 자연분해 메커니즘 및 프로토콜 개발

라. 4 세부과제: 건기에 30일 이상 – 50m^3/d 이상 생산능력의 지하저수지 기술

▌우기주입-건기회수 지하저수지 설계 기술

■ 기후변화 대응 수자원확보 기술 수준 향상

▌소규모 지하저수지 운영 및 유지관리 기술

■ 마을 상수도 등 소규모 수도 시설관리 기술 향상

제 5 절 기술개발의 필요성

1. 지속가능한 친환경 기술

■ 용수확보를 위한 신규 댐 건설은 비용측면에서는 보상비용 증가, 댐건설 지역과 용수공급 지역과의 거리증가에 따른 도수관로 설치비용 증대, 그리고 토목공사로 인한 건설비용의 증가와 같은 이유로 인한 총 사업비 증대가 나타날 수 있음. 사회적 측면으로는 수몰지역 발생에 의한 민원발생, 그리고 댐건설 지역과 용수공급지역의 상이함, 지역간 수자원 이용의 불균형에 따른 사회적 갈등이 나타날 수 있으며, 환경적 측면에서는 육상 생태계를 수장하고 하천 생태계를 단절하여 생물의 다양성을 감소시키거나 특정 생물은 멸종되게 됨. 그리고 안개 발생을 증가시켜 인근 지역의 농작물의 성장에 피해를 줄 수 있음. 마지막으로 수질적 측면으로는 넓은 유역면적에 걸쳐 다양한 오염원에 노출되고 자정능력 낮은 특징으로 양질의 수질 확보가 어려울 수 있으며 녹조와 같은 부정적 현상을 증가시킬 수 있음. 이러한 다양한 원인으로 지표수 위주의 댐건설과 같은 취수원 개발은 한계에 다달음.

■ 따라서 지구상의 가장 큰 담수자원으로 직접적으로 사용가능한 지하수 개발이 활발하게 이뤄지고 있지만 이러한 지하수의 이용 역시 대부분 지속 불가능한 방식으로 이뤄져 지하수 고갈이 현실화 되고 있으며, 또한 지하수 고갈로 인하여 지반침하, 지하 대수층 축소, 홍수 취약성 증가, 지표수 공급 부족과 같은 부작용이 나타나고 있음. 이에 기존의 지하수 개발의 한계를 극복할 수 있는 인공 주입에 의한 지하 저수지 개발 기술이 요구되어 지며, 이러한 기술 개발을 통하여 안정적이고 지속가능한 대체 수자원 개발을 수행할 수 있으며 기존의 댐건설 시 발생되는 환경적/ 사회적 문제를 해결 할 수 있는 친환경 대체 수자원 개발 기술로서 미래 공공 수요에도 적극적인 대응이 가능함.

2. 물부족 현상의 대응

■ 물부족 현상은 지속적으로 증가하고 있는 추세임. 이는 산화업화와 불투수층 증가에 따른 물 순환이 왜곡, 인구증가 및 기후변화가 주된 원인임. 기존의 대체 수자원 기술은 물순환 왜곡을 개선하기 보다는 취수원 다변화를 통한 수자원 개발에 집중됨. 따라서 근본적인 문제 해결을 위해서는 물순환 왜곡을 억제하고 개선하여 근본적인 원인해결과 더불어서 외부의 급격한 변화나 충격시에도 취수부터 정수까지 안정적인 운영이 가능한 종합적인 물관리기술이 요구됨.

■ 본 연구에서 개발하고자 하는 지하 저수지 개발은 지표수와 지하수의 연계를 통한 원래 자연의 물순환 기능의 회복 및 가뭄, 홍수, 취수원 오염과 같은 재해에서도 안정적으로 종합적인 물관리 운영이 가능한 기술임.

3. 물산업 성장 동력

■ 세계 물 시장 규모는 2007년 3,620억 달러(약 420조원)에서 2025년 8,650억 달러(약 995조원)로서 연평균 6.5%씩 성장할 것으로 전망되고 있음(GWI, 2010). 특히 아시아와 중동, 그리고 아프리카를 중심으로 연간 10% 이상의 고성장이 나타날 것으로 예상되며 중국의 수처리 시장의 경우 2010년 480억 달러에서 2025년 1,520억 달러에 육박할 것으로 예상됨. 하지만 이러한 물 시장은 선진국의 몇몇 업체들이 독과점 될 것으로 예상되고 있는 실정임.

■ 특히 국내 수처리 기술력을 통한 해외 진출은 물 관련 부품·소재 분야는 기술장벽이 높고 운영관리 사업은 경험이 부족한 단점을 가지고 있음. 따라서 연구개발 투자를 강화를 통한 단점 극복이 필요하며 더불어 지하 저수지 개발과 같은 새로운 개념의 기술을 개발이 절실히 요구됨. 이와 같은 지하 저수지 기술 개발은 대체 수자원 개발 분야에서 설계, 시공, 운영 기술과 같은 종합적인 물관리 기술의 확보를 가능케 하여 기존 선진 업체와 기술경쟁에서 우위를 기대할 수 있음. 따라서 지하 저수지 국내 기술개발은 국내 물관련 기업들의 세계 물시장 진출의 증대를 기대할 수 있음.

가. 국내 수자원 현황 및 이슈

▌극단적인 이상기후로 인한 피해증가

■ 소방방재청에 따르면 2012년 5월에 강수량이 평년대비 37%수준으로 감소하여 가뭄피해가 발생하였고, 이후 6월부터 8월까지는 폭염으로 인해 10명이 사망하고, 579명의 환자가 발생하였으며, 닭과 오리등이 폐사하는 등 전국적으로 폭염으로 인한 피해가 잇따르고 있음. 5월부터 지속적인 폭염 및 강수량 부족으로 인해 낙동강 및 한강에도 남조류 현상까지 발생하여 시민들이 먹는 물에 대한 불안이 높아가고 있음.





▌그림 4.10 가뭄 및 남조류 현상

■ 이러한 이상기후는 발생빈도가 점점 잦아지고 있으며, 그 강도 또한 매우 강해지고 있음. 1990년대 이후 지역에 따라 2~3년마다 크고 작은 가뭄과 7년 주기의 극한 가뭄이 발생하는 것으로 나타났으며, 지구온난화에 의한 기후변화로 2061~2090년에는 1977~2006년과 비교시 가뭄발생기간이 3.4배 증가할 것으로 전망됨.

▌표 4.26 국내 가뭄피해 사례

가뭄년도	피해현황	비고(출처)
1967	가뭄면적 420,547ha, 피해액 6,266억원	가뭄기록 조사보고서(2002.6 건설교통부)
1968	가뭄면적 470,422ha, 피해액 7,009억원	
1981	가뭄면적 145,457ha, 피해액 2,167억원	
1982	가뭄면적 231,244ha, 피해액 3,445억원	
1994~1995	86개시군 가뭄면적 173,269ha	가뭄기록조사보고서(1995.12건설교통부)
2001	86개시군 304,815명 제한급수	2001년 가뭄기록조사보고서(2002.6 건설교통부)
2002	23개시군 92,838명 제한급수	
2008~2009	77개시군 1,227개 마을 제한급수 228,068명, 운반급수 51,800명	2008~2009 가뭄극복추진성과보고서(2009, 중앙재난안전대책본부, 소방방재청)

※ 출처 : 국토해양부(2011), 수자원장기종합계획(2011~2020)

■ 결국, 극단적인 이상기후로 발생하는 가뭄빈도의 증가와 같은 자연적 재난을 사전적으로 대처하기 위한 정부의 강력한 대책이 요구되고 있음.

▌지역적 물공급의 안정성 및 형평성 취약

■ 수자원장기종합계획에 따르면, 1990년대 이후 가뭄에 의해 3회이상의 물부족을 경험한 상습가뭄피해지역은 약 48개지역이고, 특히 소하천 및 계곡수등을 수원으로 하는 지방상수도 또는 마을상수도등의 공급지역은 3개월이상 가뭄시 수원고갈등 물 이용이 취약함.

■ 현재 국내 농어촌지역의 경우 상수도보급율이 50%미만이고, 물공급 안전도가 10년이하 가뭄에만 견딜수 있기 때문에 타 지역에 비해 가뭄에 매우 취약한 구조를 나타내고 있음.

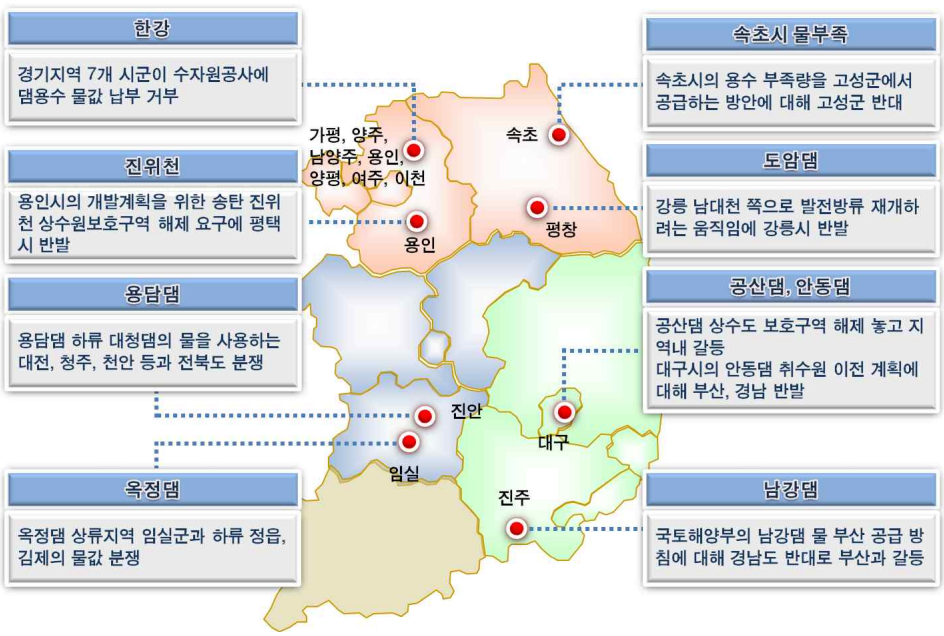
▌표 4.27 공급시설별 수원 및 물 공급 안전도

공급시설	광역상수도	지방상수도	간이상수도
수 원			
공급시설	다목적댐, 광역 및 지방상수도	하천, 용수전용댐 및 지방상수도	소하천, 지하수, 마을상수도등
물 공급 안전도	30~40년 가뭄	10년 가뭄	10년 가뭄 이하
주공급지역	시지역	읍지역	면(농어촌)
상수도보급율	98%	86%	45%

▌지역간 수자원 관련 갈등 및 수리권 분쟁

- 물 분쟁은 공공의 목적이라는 당위적 개념과 소수 피해자 입장, 수리권으로 인한 주민 사이의 갈등, 이·치수 개념과 생태계 보전 사이의 정책적 갈등 등 다양한 형태의 사례가 존재하고 있음. 따라서, 물 분쟁을 해결하기 쉽지 않고, 이러한 분쟁을 해결하기 위해 환경분쟁조정위원회가 설립되어 조정(調整)하고 있음.

- 국내 수자원 관련 정부, 공기업, 지역 간 물 분쟁은 2000년도 이후 현재까지 58건으로 연평균 6건에 달함.



▌ 그림 4.11 국내 수리권 분쟁이 발생하고 있는 지역 사례

■ 수자원 관련 분쟁 사례를 살펴보면, 예전에는 댐건설등과 관련한 분쟁이 많았던 반면, 최근에는 수자원 확보와 관련한 취수관련 분쟁사례가 점차 늘어나고 있는 실정임.

▌표 4.28 국내 수자원 관련 분쟁 사례

구 분	분쟁내용	주요쟁점
개발행위 금지·완화	•제천시 평창강 취수에 대한 영월군의 반대 •경남·부산권의 황강 취수와 합천군의 반대 •대구시 위천공단 조성에 대한 경남·부산시의 반대 •경산시 물 부족분을 화북댐에서 공급받을 계획을 군위군에서 반대 •전주시의 오원천 상수원 사용에 대한 임실군의 반대 •광주시의 황룡강 취수기간 연장에 대한 장성군의 반대	•하천 유지유량 감소로 하천환경 파괴 •하천 유지유량 감소로 하천환경 파괴 •낙동강 수질오염 •하천 유지유량 감소로 하천 건천화 우려 •하천오염과 영농차질 우려 •식수원으로 인한 개발행위 제한으로 장성군의 지역발전 저해
댐 건설	•대구·영천시의 임하~영천댐도수로 건설과 안동시 반대 •용담댐건설과 관련한 전북과 충남간 물분쟁 •포항시의 영천댐건설에 따른 금호강 하천 유지 유량 감소를 이유로 대구시 반발	•댐건설로 인한 기후변화와 지역 낙후 •하천 유지유량 감소로 하천환경 파괴 •하천 유지유량 감소로 하천환경 파괴
수질보전 경비부담	•한강 하류부 수질보전 경비 부담문제로 서울·경기와 강원·충북간 갈등	•상수원 보호구역 유지관리비 부담
	•주암댐 수질 관리 대책에 대해 광주시와 전남 11개 시·군간 갈등 •안계댐 수질 악화로 인한 포항시와 경주시간 갈등	•상수원 수질개선 특별조치법에 수혜자부담 근거 마련 •안계댐 상류에 장애인시설 건축으로 인한 안계댐 수질 악화

▌취수원 수질악화 및 수질사고 증대

■ 경제가 발달함에 따른 생활용수, 공업용수, 농업용수등의 사용량이 증가하고 이에 따른 오염원이 증가하고 있음. 즉 취수원의 오염으로 인해 국민들의 수돗물 불신이 높아지고 수질사고의 확률이 높아짐에 따라 정부차원에서 이를 대비하고 예방하는 것이 중요함.

■ 국내 상수원 신규오염물질은 지속적으로 검출되고 있음, 2004년에는 97개 정수장 취수원수 조사결과 Giardia 9.3%, Cryptosporidium 7.0% 검출되었고, - 2009년에는: 미량유해물질 72종 조사결과 브로모포름 등 22종 검출되었고, 같은해 생활하수 처리수에서 항생제(린코마이신등)등 잔류의약 물질 검출되어, 수돗물에 대한 불신이 높아지고 있음.

▌표 4.29 상수원 오염사고를 일으킬 수 있는 수질오염원 및 수질항목

수질오염원	상수원 오염사고시 발생가능한 문제 수질항목
산업폐수	•유기화합물질 : Benzene, Toluene, Xylene, Dichloromethane, Ethylbenzene •무기물질 : 금속산화물, 염화물, 탄산염, 황산염, 불소 등 •중금속 : Fe, Mn, Cd, Ba, Pb, Cr(6가), Hg 등 •냄새유발물질 : 조류번식 등 •탁도 및 색도유발물질 등
생활하수	•MBAS •단백질, 지방, 탄수화물의 분해산물로서의 유기물질 •$KMnO_4$ 소비물질
축산폐수 및 분뇨처리수	•암모니아성 질소 •대장균군 및 일반세균
기타	•농업폐수에 의한 농약 : 유기인계 농약 등에 의한 SOCs •가두리양식장의 인 부하 및 비료 등에 의한 수질문제 •Bisphenol-A 등 내분비계 장애물질 •Giardia 및 Cryptosporidium 등 염소내성 미생물 검출

■ 국내 수질사고는 대부분 유류 유출사고 많으나, 폐하수 유입, 수환경변화등이 원인이 되고 있고, 지역적으로는 낙동강권역에서 수질사고 빈도가 높음.

▌표 4.30 국내 주요 수질사고 발생 이력 및 정부대책

연도	문제발생개요	정부대책
1989	중금속 검출 파동	•민관합동 상수도 수질정밀조사 추진 : 국민불안감 해소, 수질보전 투자 우선순위 결정 (총리실 주관)
1990	THM 문제	•정수처리수에 THM 검출확인 (감사원, 건설부, 보사부)
1991	낙동강 Phenol 유출사고	•대구지역 피해보상으로 두산그룹이 대구시에 200억 기부 : 고도정수처리시설 투자비에 포함
1994	낙동강 하류부 정수장 악취문제	•"수질관리 개선대책" 수립추진 (관계부서 합동)
2001	중소규모 정수장 바이러스 검출	•"수돗물 수질관리 강화 종합대책" 마련, 시행(환경부)
2006	낙동강 퍼클로레이드 검출	
2009	낙동강 1,4-다이옥산 검출	•9개 화섬업체 다이옥신 함유 폐수 위탁처리 추진

▌국내 물산업 육성 측면

■ GWI 발표에 따르면 세계 물 시장 규모는 2007년 3,620억 달러(약 420조원)에서 2025년 8,650억 달러(약 995조원)로서 연평균 6.5%씩 성장할 것으로 전망하였음. 특

히 아시아와 중동, 그리고 아프리카를 중심으로 연간 10% 이상의 고성장이 나타날 것으로 예상되며 중국의 수처리 시장의 경우 2010년 480억 달러에서 2025년 1,520억 달러에 육박할 것으로 예상되고 있음. 하지만 이러한 물 시장은 선진국의 몇몇 업체들이 독과점 될 것으로 예상되고 있음.

- 국내·외 기존 수자원 개발의 한계와 기존 취수원 및 인근 해안의 오염으로 인하여 깨끗한 취수원의 확보가 어려운 상황임. 이러한 환경적/사회적 변화에 적극적으로 대응하여 몇몇 업체들의 독과점으로 이뤄져 있는 신규 세계 수처리 시장에서 경쟁할 수 있도록 청정 지하저수지 기술개발을 통한 용수확보 및 용수처리 기술의 선점이 필요함.

- 국내의 물 부족량은 2020년 9.16억㎥/년으로 예상되며, 물 관련 시장은 2030년 9.7억 달러 규모를 형성할 것으로 예상됨. 특히 국내의 경우 지표수 위주의 취수원 개발이 이뤄져 있어 신규 취수원 개발은 어려운 상황이며, 따라서 대체 수자원 개발이 요구되고 있다. 한 예로 부산의 경우는 상수원 오염으로 인하여 고도처리가 도입되어 현재 부산시의 정수처리 생산단가는 833원/㎥ 까지 상승하였음. 하지만 지하 저수지 기술을 이용한 정수처리 시 생산단가가 700원/㎥이하로 16% 이상 절감되며 수질의 향상도 함께 기대할 수 있음. 지하 저수지 개발과 같은 지속가능한 대체수자원 기술의 확보는 기존 시설의 확충이나 신규개발보다 경제적이므로 국내 수자원 문제 해결 뿐만아니라 전 세계적인 수자원 확보기술의 핵심 전략이 될 것임.

- 지하 저수지 개발은 위에서 나타낸 것과 같은 수출증가, 수처리 비용 절감과 같은 직접적인 경제적 편익 뿐만 아니라 가뭄과 같은 재해를 예방함으로써 공업용수, 농업용수, 생활용수를 확보하여 재해에 의한 경제적 손실을 최소화 할 수 있으며, 나아가 대체 수자원 개발을 통하여 지역 및 국가 간의 물관련 분쟁을 억제할 수 있어 사회적 비용을 절감하는 효과를 기대할 수 있음.

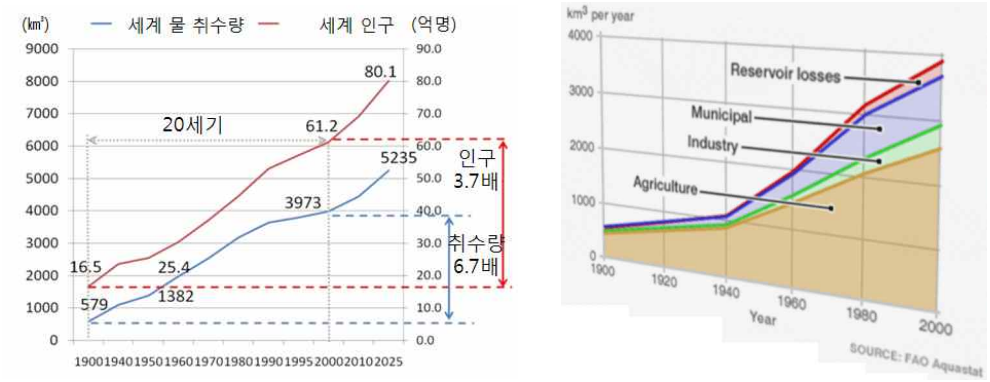
- 한편, 국내 수처리 기술력을 통한 해외 진출은 물 관련 부품·소재 분야는 기술장벽이 높고 운영관리 사업은 경험이 부족한 단점을 가지고 있음. 따라서 연구개발 투자를 강화를 통한 단점 극복이 필요하며 더불어 지하 저수지 개발과 같은 새로운 개념의 기술을 개발이 절실히 요구됨. 이와 같은 지하 저수지 기술 개발은 대체 수자원 개발 분야에서 설계, 시공, 운영 기술과 같은 종합적인 물관리 기술의 확보를 가능케 하여 기존 선진 업체와 기술경쟁에서 우위를 기대할 수 있음. 특히물산업이 성장하기 위해서는 현재와 같이 주로 시공 및 건설분야(플랜트)에 집중되어 부문을 운영관리를 포함한 Total Service 제공이 필요함.

나. 국외 수자원 환경 및 이슈

▮물 사용량의 지속적 증가 및 물 관련 재해

- 20세기 동안 전세계 물사용량은 6.7배 증가하였음. 1900년 579㎦에서 2000년 3,973㎦로 늘어난 것임. 이러한 급격한 증가는 주로 인구증가, 도시화, 산업화 등에 따른 것으

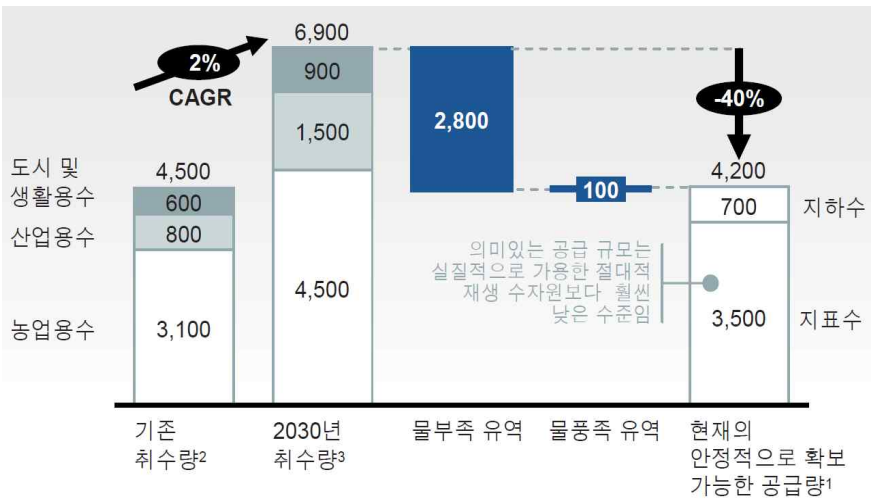
로, 결과적으로 20세기 동안 물사용량은 세계 인구가 3.7배 증가한 것 보다 훨씬 더 많이 늘어난 것임.



▌그림 4.12 20세기 물사용량 증가

※ 출처 : 일본경제산업성(2010), 물인프라 해외진출 방안

■ 2009년 이루어진 중장기 물수요 추정은 더욱 심각한 상황을 보여줌. 세계적인 컨설팅 그룹인 맥킨지가 발간한 보고서[14]에 따르면, 2030년까지 평균 경제성장 시나리오 하에서 효율성 개선이 전무하다고 가정할 경우, 전세계 물수요는 현재의 4,500㎦에서 6,900㎦로 증가할 것으로 추산되고, 이는 현재 안정적으로 확보 가능한 공급량에서 무려 40%를 초과하는 양임. 이 전망치에는 회귀수가 포함되었으며, 환경적 요구량으로 보존해야 할 공급량의 일정 부분이 감안된 것임.



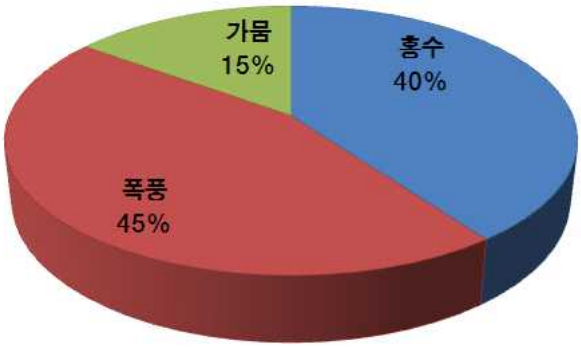
▌그림 4.13 2030년 전세계 취수량 변화 전망(단위 : 10억㎥)

■ 향후 전 세계적으로 경제가 발전함에 따라 물 수요는 급격히 증가할 것이고, 이에 따른 수원의 확보는 무엇보다 중요하나, 지표수 위주의 취수원 개발은 이미 한계에 다달았으며, 따라서 지구상의 가장 큰 담수자원으로 직접적으로 사용가능한 수자원의 90%에 육

14) 2030 WATER RESOURCES GROUP, "Charting Our Water Future", 2009

박하는 지하수 개발에 관심이 돌려지고 있음. 하지만 이러한 지하수의 이용 역시 대부분 지속 불가능한 방식으로 이뤄져 지하수 고갈이 현실화 되고 있으며, 또한 지하수 고갈로 인하여 지반침하, 지하 대수층 축소, 홍수 취약성 증가, 지표수 공급 부족과 같은 부작용이 나타나고 있음. 이에 기존의 지하수 개발의 한계를 극복할 수 있는 인공 주입에 의한 지하 저수지 개발 기술이 요구되어 지며, 이러한 기술 개발을 통하여 안정적이고 지속가능한 대체 수자원 개발을 수행할 수 있으며 미래 공공 수요에도 적극적인 대응이 가능함.

- 물 관련 재해와 관련해서는 지난 30년간 전 세계적으로 증가하고 있는 추세임. 재해 증가의 원인으 로는 고도성장 및 불투수층 증가로 인한 물 순환의 왜곡, 인구의 증가, 기후변화 등으로 나타낼 수 있음. 아래 그림 4.3에서 나타냈듯이 폭풍, 홍수, 가뭄 순으로 물 순환 재해가 나타나고 있음. 이와 같이 가뭄은 중요한 물 관련 재해 중 하나이며, 이로 인하여 나타나는 경제적 손실과 인명 피해 등을 최소화하기 위해서는 지하 저수지 개발과 같은 지속가능한 대체 수자원의 확보가 절실히 요구됨.



▌그림 4.14 80~09년 기간의 물 관련 재해 구분

- 특히, 2011년 3월 일본 동북아 대지진으로 인해 최대 2,350억 달러의 피해가 발생 및 경제성장률이 0.5% 후퇴할 것으로 전망되고, 피해를 복구하는데는 약 5년이 소요될 것이며, 재건을 위해 2012년에만 약 120억달러의 정부 예산이 지출될 것이라고 세계은행은 발표하였음. 이러한 큰 재해를 겪은 일본은 전기, 가스, 수도등 사회인프라에 대한 의식이 전과 비교하여 바뀌고 있음. 특히, 수도시설에 대한 내진화율을 높이기 위한 노력을 하고 있으나, 소요 사업비가 막대하여 이를 달성하기 위해서는 정책의 변화가 필요함. 일본의 공립종합연구소에 따르면[15], 기존 수도서비스의 수질의 향상정책으로 인해 일반 소비자의 맛있는 물에 대한 욕구를 충족시키고 있으나, 일상생활에서 사용하는 수돗물 약 300리터/일 중 약 70%는 화장실, 목욕탕, 세탁등에 사용되고, 대부분이 음용수가 되고 있지 않음을 감안하면, 지금 이상의 품질을 추구할 필요가 있는지 검토해야 한다고 주장하고 있음. 즉, 기준 수질향상에 투입되었던 자본을 내진화 및 수원을 다양화하는데 투자해야 한다는 것임.

15) 「수도의 안전과 안심」, 공립종합연구소, 2011.



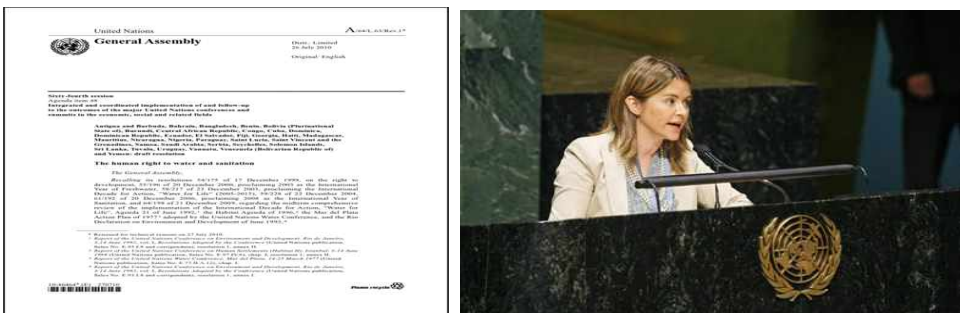
▌그림 4.15 일본 동북아 대지진 당시와 현재 모습

▌UN의 「물 인권」(The Right to Water)

- 1999년 9월 볼리비아의 코차밤바주(州)는 벡텔등 다국적 기업과 40년간 양여계약을 하게 되나, 수탁기업인 벡텔이 무리한 사업(Misicuni 프로젝트)을 위한 자금을 확보하고자 수도요금을 과대하게 인상함에 따라, 2000년에 NGO를 중심으로 물 민영화 반대 시위가 발생하게 됨. 볼리비아의 물 민영화 반대운동은 국제공공노련(PSI)와 일부 시민단체와 연계하여 전 세계적으로 확산되었고, 2010년에는 볼리비아가 주도하여 UN에 「물 인권」(the Right to water and sanitation) 의결안을 제출함. 결국, 2010년 7월 28일 UN총회에서 표결을 거쳐 「물 인권」(the Right to water)를 공식 채택하였고, 현재 UN에서는 각국 정부에 물인권 법제화 및 정책 실시를 적극적으로 독려 중이고, 실제 남아프리카공화국에서는 헌법에 물인권을 규정하여 가구당 월 6㎥을 무상공급

- 물에 대한 인권이란 뜻의 「물 인권」은 “깨끗한 물을 마실 수 있는 권리, 차별받지 않고 물을 향유할 수 있는 권리는 인간의 기본권이다.”라는 기본개념에서 발전되었고, UN 전 사무총장인 코피아넨은 2001년 세계 물의 날 행사에서 "안전한 물을 이용하는 것은 인간이 근본적으로 필요로 하는 것이므로 인간의 기본적인 권리이다.”라고 연설하였음

- 결국 인권으로서의 물, 물 자원을 보존하여 지속가능하게 지켜나가는 것은 인간의 권리이자 의무이고, 국가와 사회는 물을 깨끗하고 안전하게 보편적으로 공급해야 할 의무를 갖는다는 것이 중요한 지침이고, 따라서 우리나라에서도 모든 국민이 안전하고 깨끗한 물을 지속적이고 안정적으로 공급받을 수 있도록 국가는 지속적인 투자를 해야 함.



▌그림 4.16 물인권 의결안 Draft 및 UN 물인권 담당관

제 6 절 정부지원의 타당성

▌물산업 육성 측면

- 세계 물산업의 규모는 연평균 5% 이상 성장하고 있으며 2007년의 3,630억 달러에서 2025년에 8,650억 달러까지 확대될 전망임. 물산업의 구조는 자국시장에서 안정적인 사업기반을 확보한 경험을 바탕으로 중국, 중동, 동유럽, 아시아 등의 신흥지역의 물 시장을 개척하는 해외 산업으로 대형화되고 있는 추세임.

- 세계 물 시장은 다국적 물 전문기업들을 중심으로 성장해왔으며, 2005년 기준으로 세계 물시장의 81.5%를 세계 10대 기업이 점유하고 있는 것으로 나타났음. 특히 1980년대 중반 이후 세계의 상하수도 시장에 개입한 프랑스의 Veolia와 Suez는 지속적으로 1,2위를 차지하고 있으며, 해외사업에 높은 비중을 두면서 1억명 넘는 인구에서 서비스를 제공하고 10조원의 매출을 올리고 있음. 최근 Suez가 스페인의 Agbar를 인수함으로 인해 Veolia와 비슷한 규모로 성장했음.

- 한편, 중국의 Shanghai Industrial Holdings, Beijing Capital, Beijing Enterprises Water와 같은 기업은 최근 자국의 시장을 바탕으로 매우 크게 성장하고 있음. Veolia, Suez, FCC등 거대 물 기업은 중국, 중동, 북아메리카의 물시장 참여를 위하여 적극적인 투자를 수행하고 있음.

▌표 4.31 세계 10대 물기업 현황(2011년 기준)

순위	기업명	모국가	해외사업 비중
1	Veolia Environment	프랑스	81%
2	Suez Environment	프랑스	90%
3	FCC	스페인	52%
4	Sabesp	브라질	0%
5	Shanghai Industrial Holdings	중국	0%
6	Beijing Capital	중국	0%
7	RWE	독일	28%
8	ACEA	이탈리아	35%
9	Beijing Enterprises Water	중국	0%
10	American Water Works	독일	2%

- 최근에는 자국의 전문 물기업의 육성 및 경쟁력 강화를 위해 많은 국가들이 정부의 정책적 지원을 수행하였음. 그 결과 전문 물기업의 수가 1999년에 비하여 2009년에는 2배 이상 증가하였음. 따라서 국내에서도 정부의 정책적 지원 뿐만아니라 기술발전단계에 있는 대체 수자원 확보 기술과 수계 수질 평가기술과 같은 영역에서는 민간과 정부가 함께 주도하여 관련 기술의 개발이 절실히 요구되며, 이를 통한 선진국과의 기술격차의 감소는 국내 기업의 세계 물 시장 진출로 나타날 것으로 예상됨.

■ 청정 지하저수지 기술은 지역간·국가간 물분쟁, 가뭄에 대한 경제적, 사회적 손실, 지표수 수질악화에 따른 처리비용의 증대 및 먹는 물에 대한 사회적 불신 증가, 신규 수자원 개발의 난항 등의 부분을 저비용 친환경적으로 해소할 수 있음. 그리고 본 연구의 결과는 신규 수자원의 개발로 이어지며 이는 국가의 자산 증가 및 국가정책의 기반이 되는 자료들이 생성되게 됨. 따라서 본 기술개발 연구는 중앙정부의 주도하에 개발되는 것이 타당함. 또한 본 기술개발이 성공하면 새로운 물 산업 분야가 창출될 수 있으며 그에 따라 국제적 경쟁력을 확보할 수 있음.

▌이상기후로 인한 수자원공급의 안정성 확보 측면

■ 기후변화로 인해 국내외적으로 수자원의 개발과 정책방향에 대한 변화가 일어나고 있으며, 이로 인해 미국과 유럽 그리고 일본과 같은 주요 선진국에서는 저탄소 개발, 지속가능한 개발, 신재생에너지 기술 개발을 위해 연구개발이 활발하게 진행 중에 있음.

■ 국내에서 발생하는 기후변화의 특징은 국지성 집중호우와 무강우 일수의 증가가 대표적이며, 이에 따른 갈수기 수자원 확보를 위해 지하수 개발의 필요성이 증대되고 있는 실정임. 1993년 지하수법 제정 이후 지하수의 효율적 이용 증대를 위한 노력이 지속적으로 이루어지고 있으나, 아직까지 기후변화에 능동적으로 대처할 수 있는 지하수자원의 역할이 미흡한 실정임. 따라서 기후변화와 지속가능한 성장의 패러다임에 적합한 지하수자원의 개발, 이용과 관리에 대한 연구개발이 시급한 실정임.

■ 최근 연구 자료에 따르면 우리나라의 기후변화로 인해 한강수계에서는 강수량이 증가하는 양상을 나타내나 금강수계에서는 유지 또는 소폭 감소 그리고 영산강, 섬진강 및 낙동강수계에서는 상당히 감소되는 강우량으로 인해 물 부족이 심화되는 등 지역적 편차가 증가하며, 이로 인해 지역(지자체)간의 갈등이 발생될 수 있을 것으로 예상하고 있음. 이러한 기후변화로 인한 지역 간의 물 부족으로 인한 갈등을 해소하기 위해서는 지표수 이외에 지역적 특성에 맞는 지하수자원 개발을 위한 기술개발이 필요함.

■ 국내 지하수 이용량은 매년 증가해 오다가 2000년 중반 들어 지하수 활용에 대한 인식이 높아지면서 무분별한 개발과 지하수 오염을 방지하기 위해 신규개발이 일정 수준에 머무르고 있는 실정임. 그러나 하천 및 댐 저수지와 같은 지표수로부터의 직접적인 취수가 어려우며, 이를 대처하기 위한 방법으로 강변여과수와 같은 수변지역으로부터의 간접취수원 개발이 현재 활성화되고 있음. 하지만 이러한 간접취수원은 1991년에 발생한 낙동강 페놀 오염과 같은 하천수질사고가 발생할 경우 즉시 취수를 중단해야 하므로 원활하고 지속적인 용수공급에 문제가 있는 반면 본 연구에서 개발하고자하는 지하저수지의 경우 하천수질사고의 영향 없이 수개월의 장기간 동안 취수할 수 있으며, 이로 인해 지속적이며, 안정적으로 용수를 공급할 수 있는 수자원으로 활용될 수 있음.

■ 지하저수지 관련 전 기술 분야에서 신뢰성과 경쟁력 있는 기술을 개발하기 위해서는 현장중심의 연구 및 기술검증이 필요한 실정임. 현장중심의 연구는 시험설비 운영을 통한 설계인자 도출, 그리고 시험설비 시설에서의 기술검증이 이뤄져야 함. 따라서 이와 같은 현장중심 연구는 대학 및 기업이 단독 수행하기는 한계가 있으므로 성공적인 연구성과 도출을 위해서는 대학, 산업체, 그리고 관련 지자체 및 정부 간의 긴밀한 협조

와 지원이 절실히 필요함.

▌지방상수도사업자의 재정적 측면

■ 2010년 기준 공기업결산을 하고 있는 113개 지방상수도의 재정현황을 살펴보면 다음과 같다.[16)]

▌표 4.27 지방상수도 규모별 재정현황 **단위 : 백만원**

구분	7대 특광역시	50만이상	50만~30만	30만~10만	10만미만
지자체수(개)	7	13	11	34	48
급수수익(A)	194,849	48,083	30,787	13,907	4,470
현금영업비용(B)	137,425	38,567	22,932	11,089	4,398
현금성영업흐름 (C=A-B)	57,425	9,517	7,854	2,818	72
감가상각비(D)	55,661	8,491	7,270	3,837	2,089
영업손익(E=C-D)	1,764	1,025	585	-1,020	-2,016

■ 총괄원가를 구성하는 영업비용 중 감가상각비를 제외하면, 매년 현금지출이 수반되는 현금성 영업비용이며, 급수수익이 현금성 영업비용에 미달하게 되면 현행 상수도사업을 유지하기가 어려운 상황임.

■ 한편, 급수수익이 감가상각비를 포함하는 영업비용을 초과하게 되면, 현재 생산량과 유수율을 유지할 수 있는 일상적인 수준의 투자가 가능하게 됨.

■ 7대광역시를 비롯한 30만이상 지자체의 경우 현금성 영업흐름 및 영업손익 모두 양호한 것으로 판단되나, 30만미만의 지자체의 경우 현금성영업비용은 정(+)의 값으로 양호하나, 감가상각비를 포함한 영업손익의 경우 부(-)의 값으로 영업손실을 나타내고 있어 신규투자를 위한 자금을 확보하기가 어려울 것으로 판단됨.

■ 따라서, 급수인구 30만미만 지역인 82개 지역과 그 외에 비공기업인 소규모 지자체의 경우 대부분 비상연계시설을 구축하기 위한 자체 재원을 통한 확보는 어려운 상황임.

■ 결론적으로 대부분의 지자체의 경우 총괄원가에 미치지 못하는 요금을 받고 있기 때문에 재정부문에서 대부분 적자를 면치 못하고 있으며, 이를 해결하기 위해 일반회계에서 보조금을 받아 인건비, 동력비등 소모성 비용만을 충당하는 경우가 적지 않음. 결국, 지방상수도 사업자에게 대체수자원을 개발하기 위한 자체적인 사업은 불가능할 것으로 판단되며, 지방상수도 사업자의 재정적 여력은 현실적으로 매우 취약하므로 정부의 지원이 필수적임.

16) 공기업 전환 기준은 시설용량 15,000㎥이상인 지자체를 대상으로 함.

제 7 절 종합평가 및 결론

1. 종합평가

(1) 정책적 타당성 (정부 지원의 타당성)

▌ 청정 지하저수지 개발기술의 국가 차원의 정책지원의 필요

- 간접취수 및 대체 수자원 개발을 통한 국가 안보 물부족 관련 국가 안보 확립
- 국제 기술경쟁력 확보를 통한 세계 물 시장 진출

▌ 청정 지하저수지 개발기술의 상위정책과의 부합성

- 수자원 분야 최상위 계획인 수자원 장기종합 계획과의 부합성
  - 대체수자원 개발에 대한 중요도 높음 (지하수개발, 강변여과수 등)
  - 청정 지하저수지 기술은 물 부족, 홍수, 수질오염 등을 해결 가능 (관련 기술을 선진국 대비 90% 이상 기술력 확보)
- 국토해양부, 환경부 수자원 관리 정책과의 부합성
  - 청정 지하저수지 기술 개발을 통한 세계 물 시장 경쟁력 확보 (물 전문기업 육성, 국제적 협력체제 구축, 기술개발 투자 확대 등)
  - 청정 지하저수지 기술 개발을 통한 지속가능한 수자원 개발 및 미래 공공수요 대응

(2) 기술적 타당성

▌ 청정 지하저수지 기술의 우수성

- 기존 기술의 한계를 보완할 수 있는 기술
  - 강변여과수 및 지하댐 기술의 한계 및 단점을 보환함 (지하수위 변화에 따른 구조 및 취수에 대한 안정성 감소, 지중 구조물 설치로 인한 경제성 감소 등)
- 경제성과 친환경성을 갖춘 용수공급 기술
  - 증발 손실 및 약품소모량이 적으며, 인공구조물의 최소화 가능한 기술
- 사회적 갈등 최소화
  - 수몰지역이 발생하지 않으며, 규모에 따라 지역 내 설치 가능하므로 사회적 문제 최소화가 가능한 기술
- 수질개선 효과가 뛰어난 용수공급 기술
  - 홍수 시 탁도 및 여름철 조류발생 등의 수질문제 해결 가능한 기술
  - 유기물 저감을 통한 원수 수질개선이 가능한 기술

▌ 청정 지하저수지 기술의 독창성

- 수계 수질평가 및 관리기술과 대체 수자원 확보기술은 세계최고 기술보유국과의 기술격

차 발생

- 청정 지하저수지 기술의 경우 세계 최조 기술 개발되는 부분으로 향후 개발될 원천기술 및 설계분야, 유지관리 분야의 기술의 기존 기술과 차별을 통하여 세계 물 시장에서 경쟁력 확보가 가능할 것으로 예상

▌청정 지하저수지 기술개발 계획의 우수성

- 핵심설계 기술개발을 위한 세부 기술 도출의 적절성을 확보
- 성공적인 기술개발을 위한 과제구성 및 과제간의 연계성과 연구기관 간의 체계적인 역할 설정됨

(3) 경제적 타당성

▌청정지하저수지 관련 국·내외 시장의 지속적인 성장

- 미래 공공수요 대응 및 지속가능한 대체 수자원으로 청정 지하저수지 기술은 향후 국내외 관련시장에서 크게 성장할 것으로 예상됨

▌청정지하저수지 기술의 경제적 우수성

- 청정지하저수지를 약 10만㎥/일 규모로 건설할 경우 B/C ratio는 2.77로 경제적으로 타당한 것으로 나타남
- 공급원의 안정성, 안전성과 수질의 개선에 따른 국민 건강의 편익 증진과 물 분쟁 저감, 먹는 물에 대한 국민의 신뢰성 확보 등 정성적인 편익을 감안하면 실제 편익비용비는 더 높을 것으로 예상됨

▌청정지하저수지 기술의 경제사회적 파급효과

- 경제사회적 파급효과에서 고용유발효과는 약 14.8배, 생산유발효과는 약 2.0배의 증가를 가져올 것으로 예측됨에 따라 IT, NT 등의 분야와 융·복합을 통한 기술개발로 인하여 각 기술 분야에 있어 다양한 파급효과를 가져올 것으로 예상됨

(4) 과학기술적 파급효과

- 대규모 청정 지하저수지 개발 기술은 국내에서는 처음이고 외국에서도 시작단계에 있으므로, 사회적 및 경제적으로 뿐만 아니라, 과학기술적으로도 그 파급효과가 매우 큼. 본 연구를 통하여 지표수와 지하수 연계활용의 고도화를 위한 기술 개발, 그리고 ASR, ASTR 기술분야에서 국제경쟁력을 향상시키어 해외시장에 진출할 수 있음.
- 대규모 청정 지하저수지는 대하천 하구에 두께 60~80m로 발달된 충적 피압대수층에서 개발되므로, 이 연구를 통하여 충적대수층의 수리적 특성을 평가하는 수리지질학적 인자(유효공극율, 투수계수, 저류계수, 분산지수 등) 산출기술 개발, 지하수 함양량 평가기술 개발, 충적대수층(미고결 퇴적층) 샘플링 기술 개발 등 아직 국내외적으로 완성되지 못한

중요한 기술을 개발할 수 있음.

- 충적대수층에서 상시주입-상시양수 관련 주입계통과 양수계통의 최적 설계기술 개발, 주입정-양수정-감시정-하천수-해수의 수위 및 수질에 대한 종합적 모니터링 시스템 구축 기술 개발, 주입수와 퇴적물의 수리역학적 및 지화학적 반응 규명, 그리고 충적대수층의 수질 개선능력 평가기술 개발 등 청정 지하저수지 개발과 관련된 주요 핵심기술을 개발할 수 있음.
- 본 연구를 통하여 다수의 주입정과 양수정이 결합된 용수공급 시스템 운영기술, 주입 및 양수 장치에 대한 모니터링 시스템과 모바일 시스템을 결합한 상시용수 공급장치 원격모니터링 및 제어 시스템 기술, 청정 지하저수지의 지속가능한 운영을 위한 주입수 전처리 기술, 먹는물 공급을 위한 플랜트 최적 설계·운영·유지관리 통합 기술, 대수층 수질의 생물학적 개선특성 평가 기술 등을 개발할 수 있다. 또한 도서 산간지역에 대하여 기후변화 대응 수자원 확보 기술 수준과 마을 상수도 등 소규모 수도 시설관리 기술의 향상을 도모할 수 있음.

2. 결론

▌이상과 같이 청정 지하저수지 개발 과제의 사전 타당성 조사를 실시하였으며, 최종 결론은 각 상위계층인 정책적, 기술적, 경제적 측면에서 모두 사업 시행이 타당한 것으로 평가되었음.

제 5 장 인력투입계획 및 소요예산 산정

제 1 절 연구일정에 따른 전체사업 및 세부과제별 인력투입계획

청정 지하저수지 개발기술 연구단	1차년도	2차년도	3차년도	4차년도	5차년도	합 계
전체 투입인력	69	107	112	105	97	490
총괄	17	18	18	17	17	87
대하천 하구 퇴적층에서 저수량 1,000만㎥ 확보를 위한 최적설계 기술	21	28	27	27	26	129
청정지하저수지 운영 및 유지관리 기술	11	18	26	20	20	95
청정용수공급을 위한 수질관리 및 활용기술	8	25	25	25	21	104
건기에 30일 이상 - 50m^3/d 이상 생산능력의 지하저수지 기술 개발	12	18	16	16	13	75

제 2 절 소요예산 산정

1. 전체사업 소요예산

(단위:백만원)

청정 지하저수지 개발기술 연구단	1차년		2차년		3차년		4차년		5차년		합계	
	정부	민간	정부	민간	정부	민간	정부	민간	정부	민간	정부	민간
전체 예산	700	200	5500	1900	3000	1000	1500	500	1300	400	12000	4000
총괄	300	90	3850	1330	850	285	400	131	400	120	5800	1956
총괄-1 청정지하저수지 구축을 위한 total solution 개발	20	4	150	50	130	43	130	42	135	40	565	179
총괄-2. 시험설비 구축 및 운영	260	80	3620	1250	630	207	180	59	185	57	4875	1653
총괄-3. 지하저수지 관련 법, 제도 및 경제성 연구	20	6	80	30	90	35	90	30	80	23	360	124
1. 대하천 하구 퇴적층에서 저수량 1,000만㎥ 확보를 위한 최적 설계 기술	150	41	550	200	480	160	300	100	250	69	1730	570
1-1 대하천 하구 퇴적층 부지 특성 평가 기술	100	26	350	120	180	60	60	20	50	14	740	240
1-2 주입 및 양수 시스템 최적 설계기술	20	5	50	20	150	50	100	35	55	15	375	125
1-3 지하저수지 모니터링 시스템 설계기술	15	5	50	20	50	15	90	30	95	30	300	100
1-4 주입수 거동 및 수질 평가 기술	15	5	100	40	100	35	50	15	50	10	315	105
2. 청정 지하저수지 운영 및 유지관리	90	24	250	86	570	190	360	120	400	130	1670	550
2-1 지하 저수지 통합 운영 기술	30	5	70	26	160	60	100	40	150	50	510	181
2-2 비상 시 지하 저수지 운영 기술	20	0	40	0	100	0	60	0	50	0	270	0
2-3 시스템 유지 관리 기술	20	9	70	30	160	65	100	40	100	40	450	184
2-4 지반변형 해석 및 방지(저감) 기술	20	10	70	30	150	65	100	40	100	40	440	185
3. 청정용수 공급을 위한 수질관리 및 활용기술	90	22	300	105	790	260	440	147	430	140	2050	674
3-1 청정 지하저수지 수질위해요소 사전관리 기술	30	12	70	20	150	45	70	15	65	20	385	112
3-2 지하저수지의 지속가능 운영을 위한 주입수 전처리 기술	15	5	75	30	170	55	90	35	85	25	435	150
3-3 먹는 물 공급을 위한 플랜트 최적 설계·운영·유지관리 통합 기술	15	5	75	40	190	60	105	40	90	25	475	170
3-4 물라지화학적 대수층 수질의 개선 특성 평가 기술	20	0	40	5	140	50	90	30	90	40	380	125
3-5 대수층 수질의 생물학적 개선특성 평가 기술	10	0	40	10	140	50	85	27	100	30	375	117
4. 건기에 30일 이상-50m^3/d 이상 생산능력의 지하저수지 기술	70	23	250	85	260	86	100	33	70	23	750	250
4-1 우기주입-건기회수 지하저수지 설계기술	40	13	150	50	110	36	50	17	30	10	380	126
4-2 한국형 소규모지하저수지 운영 및 유지관리 기술	30	10	100	35	150	50	50	16	40	13	370	124

2. 세부과제별 소요예산

가. 총괄 연구비

예산항목	세부항목	단가(년급여)	예산내역(천원) 1차년도 인원(명)	1차년도 참여율(%)	2차년도 인원(명)	2차년도 참여율(%)	3차년도 인원(명)	3차년도 참여율(%)	4차년도 인원(명)	4차년도 참여율(%)	5차년도 인원(명)	5차년도 참여율(%)	소계	비율(%)
인건비	위원급	90,000	1	5	1	5	1	5	1	10	1	10	31,500	0.4
	책임급	75,000	1	5	1	5	1	5	1	5	1	5	18,750	0.2
	선임급	65,000	2	10	2	15	2	15	2	10	2	10	78,000	1.0
	원급	48,000	2	10	2	15	2	15	2	10	2	10	57,600	0.7
	보조원	36,000	2	10	2	15	2	15	1	10	1	5	34,200	0.5
	박사과정	30,000	1	5	2	15	2	15	2	15	2	10	34,500	0.5
	석사과정	21,600	4	15	4	20	4	20	4	15	4	15	73,440	1
	학부과정	12,000	4	10	4	15	4	15	4	15	4	15	33,600	0.5
소계			57,310		86,430		86,430		68,110		63,310		361,590	4.8
직접비	기자재/시설비		85,000		4,000,000		700,000		150,000		200,000		5,135,000	66.2
	재료비		40,000		60,000		60,000		61,000		61,000		282,000	4.0
	시작품 제작비		-		-		-		-		-		0	0.00
	여비		50,000		95,000		35,000		20,000		20,000		220,000	2.8
	수용비/수수료		50,000		130,000		135,000		20,000		30,000		365,000	4.7
	기술정보활동비		60,000		60,000		60,000		60,000		60,000		300,000	3.9
	연구수당		40,000		40,000		40,000		40,000		40,000		200,000	2.6
소계			325,000		4,385,000		1,030,000		351,000		411,000		6,502,000	84.2
간접비			7,690		708,570		18,570		111,890		45,690		892,410	11.0
위탁연구개발비			-		-		-		-		-		0	0
합계			390,000		5,180,000		1,135,000		531,000		520,000		7,756,000	100.0

시험설비 소요예산 내역

구분	항목	단위	수량	금액(백만원)		규격	비고
				단가	소계		
관정	주입정	개	10	40	400	300mm*80m	우물자재 포함
	양수정	개	5	40	200	300mm*80m	우물자재 포함
	관측정	개	30	20	600	75mm*120m	
	수중펌프	개	15	8	120	7.5hp	
	우물설비	개	15	5	75		
행정절차		회	15	5	75		인허가, 수질검사, 영향조사
시추조사 및 시험	양수시험, 수질검사 등	회	45	10	450		양수시험, 공내 검층 등
관망	주입관로	식	1	400	400	300mm	관로연장 1500m
	양수관로	식	1	300	300	300mm	관로연장 1000m
수처리설비	전처리(침전)	식	1	250	250		2000m^3/d
취수설비		m^3/d	1	100	100		2000m^3/d
모니터링	관정센서	개	45	5	225	수위, 온도, tds, 등	
	디지털유량계	개	15	15	225	전동	
	관로센서	개	25	4	100	수압	
제어	전동밸브	개	30	20	600		
	actuator	개	30	15	450		
원격측정시스템		식	1	80	80		관정센서, 유량계, 밸브, 수중펌프
홍보관 및 운전실	홍보공간	m^2	50		75		
	통제센터	m^2	35		75		
	회의공간	m^2	25		20		
운영 및 유지관리비	시스템 전반	회	30	20	600		6회/년*5년
총계					5,420		

나. 1 세부과제

예산항목	세부항목	예산내역(천원)												비율(%)
		단가(년급여)	1차년도		2차년도		3차년도		4차년도		5차년도		소계	
			인원(명)	참여율(%)	인원(명)	참여율(%)	인원(명)	참여율(%)	인원(명)	참여율(%)	인원(명)	참여율(%)		
인건비	위원급	90,000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0%
	책임급	75,000	1	7	1	8	1	8	1	8	1	5	27,000	1.2%
	선임급	65,000	1	5	1	10	1	20	1	15	1	15	42,250	1.8%
	원급	48,000	1	5	2	10	1	20	1	20	1	20	40,800	1.8%
	보조원	36,000	2	10	2	35	2	35	2	25	1	10	79,200	3.4%
	박사과정	30,000	4	15	6	35	6	40	6	27	6	20	237,600	10.3%
	석사과정	21,600	6	15	8	38	8	40	8	30	8	30	257,904	11.2%
	학부과정	12,000	6	15	8	35	8	30	8	30	8	30	130,800	5.7%
소계			66,340		209,564		223,720		172,590		143,340		815,554	35.5%
직접비	기자재/시설비		10,000		20,000		20,000		20,000		10,000		80,000	3.5%
	재료비		12,000		98,503		81,447		50,743		36,493		279,186	12.1%
	시작품 제작비		-		-		-		-		-		-	-
	여비		10,000		41,800		40,000		20,000		20,000		131,800	5.7%
	수용비/수수료		11,000		61,800		61,000		25,000		20,000		178,800	7.8%
	기술정보활동비		9,827		60,000		48,000		20,000		20,000		157,827	6.9%
	연구수당		15,000		50,000		42,500		25,000		16,000		148,500	6.5%
소계			67,827		332,103		292,947		160,743		122,493		976,113	42.4%
간접비			26,833		108,333		103,333		66,667		53,167		358,333	15.6%
위탁연구개발비			30,000		100,000		20,000		-		-		150,000	6.5%
합계			191,000		750,000		640,000		400,000		319,000		2,300,000	100.0%

다. 2 세부과제

예산항목	세부항목	예산내역(천원)												비율(%)
		단가(년급여)	1차년도		2차년도		3차년도		4차년도		5차년도		소계	
			인원(명)	참여율(%)	인원(명)	참여율(%)	인원(명)	참여율(%)	인원(명)	참여율(%)	인원(명)	참여율(%)		
인건비	위원급	90,000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0
	책임급	75,000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0
	선임급	65,000	0	15	0	20	4	20	2	35	2	35	143,000	6.44
	원급	48,000	0	15	2	20	4	20	2	35	2	35	124,800	5.62
	보조원	36,000	0	15	2	15	4	20	2	35	2	35	79,200	3.57
	박사과정	30,000	0	15	2	30	2	15	2	35	2	35	57,000	2.57
	석사과정	21,600	7	30	8	40	8	40	8	40	8	40	321,840	14.5
	학부과정	12,000	4	30	4	40	4	30	4	30	4	30	76,800	3.46
소계			59,760		136,320		211,720		186,020		208,820		802,640	36.15%
직접비	기자재/시설비		2,000		10,000		50,000		30,000		30,000		122,000	5.50
	재료비		488		10,216		48,936		20,776		23,416		103,832	4.68
	시작품 제작비		500		20,000		100,000		10,000		-		130,500	5.88
	여비		9,500		30,000		55,000		45,000		50,000		189,500	8.54
	수용비/수수료		2,000		15,000		50,000		30,000		40,000		137,000	6.17
	기술정보활동비		5,000		20,000		50,000		25,000		30,000		130,500	5.86
	연구수당		11,952		27,264		42,344		37,204		41,764		160,528	7.23
소계			31,440		132,480		396,280		197,980		215,180		973,360	43.85%
간접비			22,800		67,200		152,000		104,000		58,000		448,000	20.0
위탁연구개발비			-		-		-		-		-		0	0
합계			114,000		336,000		760,000		480,000		530,000		2,220,000	100.0

라. 3 세부과제

예산항목	세부항목	단가(년급여)	예산내역(천원)											비율(%)
			1차년도		2차년도		3차년도		4차년도		5차년도		소계	
			인원(명)	참여율(%)	인원(명)	참여율(%)	인원(명)	참여율(%)	인원(명)	참여율(%)	인원(명)	참여율(%)		
인건비	위원급	90,000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-	
	책임급	75,000	0	0	1	20	1	35	1	20	1	20	71,250	2.6
	선임급	65,000	1	20	4	20	4	35	4	20	3	30	266,500	9.8
	원급	48,000	2	20	6	15	6	35	6	20	3	30	264,000	9.7
	보조원	36,000	0	0	5	15	5	30	5	20	5	20	153,000	5.6
	박사과정	30,000	2	10	3	15	3	30	3	20	3	30	91,500	3.4
	석사과정	21,600	3	10	4	15	4	35	4	20	4	30	92,880	3.4
	학부과정	12,000	0	0	2	20	2	35	2	20	2	20	22,800	0.8
소계			44,680		168,460		337,690		200,680		210,420		961,930	35.3
직접비	기자재/시설비		3,000		20,000		70,000		30,000		25,000		148,000	5.4
	재료비		11,420		20,540		102,310		40,920		70,580		245,770	9.1
	시작품 제작비		3,500		40,000		160,000		88,000		25,000		316,500	11.6
	여비		15,000		10,000		40,000		20,000		20,000		105,000	3.9
	수용비/수수료		6,000		10,000		25,000		15,000		30,000		86,000	3.2
	기술정보활동비		3,000		10,000		25,000		15,000		15,000		68,000	2.5
	연구수당		3,000		5,000		40,000		20,000		20,000		88,000	3.2
소계			44,920		115,540		462,310		228,920		205,580		1,057,270	38.9
간접비			22,400		71,000		200,000		107,400		104,000		504,800	18.5
위탁연구개발비			-		50,000		50,000		50,000		50,000		200,000	7.3
합계			130,000		1,150,000		460,000		640,000		360,000		2,740,000	100.0

마. 4 세부과제

예산항목	세부항목	단가(년급여)	예산내역(천원)											비율(%)
			1차년도		2차년도		3차년도		4차년도		5차년도		소계	
			인원(명)	참여율(%)	인원(명)	참여율(%)	인원(명)	참여율(%)	인원(명)	참여율(%)	인원(명)	참여율(%)		
인건비	위원급	90,000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0
	책임급	75,000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0
	선임급	65,000	1	10	2	30	2	20	2	20	2	15	117,000	11.7
	원급	48,000	1	10	2	20	2	20	2	15	2	15	72,000	7.2
	보조원	36,000	1	10	1	15	1	10	1	5	1	5	16,200	1.6
	박사과정	30,000	1	10	3	25	2	15	3	15	2	10	54,000	5.4
	석사과정	21,600	4	20	5	25	5	20	5	20	3	15	97,200	9.7
	학부과정	12,000	4	20	5	20	4	20	3	10	3	10	38,400	3.8
소계			44,780		125,100		89,000		80,900		55,020		394,800	39.5
직접비	기자재/시설비		10,000		60,000		15,000		15,000		8,000		108,000	10.8
	재료비		5,000		20,000		10,000		7,500		9,000		51,500	5.2
	시작품 제작비		-		-		-		-		-		0	0.0
	여비		5,000		35,000		8,000		8,000		5,000		61,000	6.1
	수용비/수수료		5,000		6,000		5,000		5,000		3,000		24,000	2.4
	기술정보활동비		4,000		10,000		4,000		5,000		1,500		24,500	2.5
	연구수당				19,000		10,000		10,000		5,000		44,000	4.4
소계			29,000		150,000		52,000		50,500		31,500		313,000	31.3
간접비			19,220		59,900		205,000		1,600		6,480		292,200	29.2
위탁연구개발비			-		-		-		-		-		0	0
합계			93,000		335,000		346,000		133,000		93,000		1,000,000	100.0

제 6 장 과제 제안요구서(RFP)

제 1 절 과제 제안요구서

1. 연구단 RFP

연구과제명	청정 지하 저수지 개발 기술 (변경 과제명: 지표수의 대수층 인공주입을 통한 청정 용수확보 기술)
1. 연구개발 목표	
▌**청정 지하저수지 설계, 운영 및 유지관리, 수질관리를 위한 토탈솔루션 기술의 성공적 개발 및 검증을 위한 연구단 운영**	
2. 연구개발 필요성 및 기술동향	
□ **연구개발의 필요성**	▌**현재 댐으로 대표되는 집중형 대용량 수자원 확보 기술은 경제성 측면에서는 우수한 경쟁력을 가지나 사회적, 정치적, 환경적 측면에서는 다음과 같은 단점을 가지고 있음.** ■ 지역 간 물 이전으로 야기되는 갈등 ■ 악화되는 지표수 수질과 수질 사고 등으로 인한 국민의 불안 및 불만 ■ 비상시 (극한 가뭄, 지표수 수질사고) 심화되는 수질 및 수량 문제 ■ 약간의 가뭄에도 발생하는 군소 지방 도시나 도서지역의 물 부족 사태 ■ 따라서 용수원 다변화와 양질의 수자원 확보를 위한 지하저수지도입이 필요함. ▌**우리나라 대부분의 대도시들은 댐수를 기반하여 취수하고 있는 반면 대구 및 부산의 경우는 하천 표류수 의존도가 무척 높음.** ■ 부산시의 경우 하천 수 의존도가 94%를 초과하여 상류지역 오염시 대처가 어려운 지리적 취약점과 강수량 감소 시 취수 자체가 어려워 안정적인 취수가 불가능해지는 단점을 가지고 있음. ▌**하천 하류에서 원수를 취수하고 있는 부산광역시의 취수장이 있는 낙동강 물금 지점의 89년부터 13년간 월평균 수질을 BOD, COD,**

총 인등의 3개 지표별로 구분하면 3급수가 가장 빈번하며, 4급수를 초과하는 수질(특히 COD 농도)도 빈발하는 것으로 나타남.

■ 주목할 부분은 95년-97년 사이의 가뭄 시에 모든 지표가 3급수 이하의 나쁜 수질을 보였다는 점임. 향후 기후변화로 심화될 것으로 예상되는 가뭄은 낙동강 하류의 수질에 심각한 악영향을 끼칠 것으로 예상됨. 따라서 양질의 원수를 확보할 수 있는 방안이 시급한 실정임.

▌지방의 군소 도시나 도서지방에서는 수질은 차치하고, 수량마저도 부족한 실정임.

■ 우리나라는 대수층 발달이 빈약하지만 우기의 잉여 지표수를 주입하고 건기에 회수하는 소규모 지하저수지는 다수 설치될 수 있을 것으로 판단됨.

▌따라서 국가 물 안보도 제고, 물 복지 실현 및 물 산업 발전을 위하여 지하저수지 기술 연구가 필히 수행되어야함.

□ 기술동향

▌현장 시험설비 연구

■ 해외의 많은 인공함양 프로젝트는 본격 시행 전 장기간에 걸친 상당한 규모의 현장 시험이 수행되고 있음. 첫 ASR 시험으로 알려진 Cederstrom (1947) 이후 Goyal 등 (2008), Ward 등 (2008), Miontlinski (2011), Pavelic 등 (2006), CDM (2004) 등은 다양한 규모의 주입/양수 시험을 수행하였음.

■ 현재까지 알려진 첫 ASR 실험은 1946년 중반에 Cederstrom (1947)이 기수를 함유하고 있는 염대수층에 담수를 주입하고 회수하는 실험을 수행하였음. 그는 담수와 염지하수의 완전한 혼합으로 담수 회수가 어려울 것이라는 우려는 기우에 불과하다고 결론내린 바 있음.

■ 미국 워싱톤 주에서는 건기의 첨두 물수요를 충족하기 위하여 다수의 인공함양이 진행되거나 계획되고 있다(Washington State, 2000). 시애틀 시 남쪽에 위치한 Lakehaven시 수도국은 1991년부터 10여년간 ASR 파일롯 연구를 수행하고 있음.

■ Goyal등(2008)은 인도에서 수자원의 연계관리의 효과를 평가하기 위하여 ASR 기법을 제안하고 현장 시험을 수행하였다. 전기전도도가 28,400μS/cm에 달하는 염 지하수가 부존된 피압대수층에서 인공주입시험을 수행하였음.

■ Pavelic 등(2006)은 호주에서 수행한 ASR 연구에서 투수계수가 약 3m/d 정도인 피압대수층에 7개월에 걸쳐 900~1300m^3/d의 유량으로 주입하고 4개월의 저장 기간 후에 1300m^3/d의 양수량으로 회수를 시행하였음.

■ Miontlinski 등(2011)은 호주 멜버른에서 도심의 우수를 투수성이 낮은 균열암반 피압대수층에 주입하고 회수하는 시험을 수행한 바 있다. 대수층에는 전기전도도가 2400-2700μS/cm 정도의 기수가 부존되어 있었음.

■ 유럽연합의 덴마크, 벨기에, 네덜란드, 스웨덴, 핀란드, 스페인, 독일의 7개 국가에서 9개 기관이 1996년부터 3년간 수행한 '지하수 인공함양'이라는 국가간 연구과제에는 파일롯 스터디가 7개소에서 수행한 바 있음 (Stuyfzand and Timmer, 2001).

■ 포르투갈에서는 가뭄에 대비한 통합수자원관리 차원에서 지하수인공함양의 타당성을 검토하기 GABARDINE Project에서 남부 Algrave 지역에 3개의 시험시설을 운영하고 있음. (Lobo-Ferreira and Oliveira, 2007).

▌국내 기술동향

■ 하경오(2007)는 수막재배로 인하여 낮아진 지하수위를 복원하기 위하여 함양지 방법과 관정 주입 방법을 이용한 지하수 인공함양 파일롯 연구를 수행하고 주입정의 성능을 평가한 바 있다. 국토해양부의 지원으로 수행되고 있는 수변지하수 활용 고도화 연구단(2011)에서도 수막재배로 인하여 수위가 낮아진 비닐하우스 경작지의 지하수위를 복원하기 위한 인공함양 연구를 수행하고 있음.

■ 프론티어 사업단의 인공함양 연구에서는 제주도 제주시 한천에 인공함양정 20개를 개발하였음. 이 연구에서는 함양정을 천변 저류지에 설치하여 홍수 시에 유입된 하천수가 저류지에서 일정 수심을 초과하면 밸브를 개방하여 자연유하식으로 인공함양이 시작되는 시스템임.

■ 프론티어 사업단의 강변여과수 연구는 경상남도 창원시 소재 기존 시설을 활용한 수리수문학적 특성을 중심으로 연구가 수행되었음. 구체적으로는 개발 대상지역의 수리지질학적 평가, 개발가능량 평가를 위한 수치모델링, 그리고 지하수계 생태조사, 지하수위 및 수질변화 조사 등이 수행되었음.

■ 수변지하수 활용 고도화 연구단(2011-2016)에서는 "수변 충적층 지하수위 복원 기술" 세부과제에서 수막재배로 인하여 낮아진 지하수위를 회복시키기 위하여 인공함양 기술의 적용에 대한 연구를, "수변 지하수 대용량 간접취수 시공기술 선진화" 세부과제에서는 대용량 지하수 취수에 대한 연구의 일환으로 시험현장이 계획되어 있음.

▌실험실 수리모형 연구

■ 실험실 모래 수리모형에서 이루어진 실험은 염수가 존재하는 모래층에서 지하수 양수 또는 해수 쐐기 제어를 위한 담수 주입에 대한연직 단면 실험위주로 이루어져왔음.(Boufadel, 2000; Goswami and Clement, 2007; Nakagawa et al., 2005; Simmons et al., 2001, Werner et al., 2009; Mao et al., 2006; Oswald and Kinzelbach, 2004; Thorenz et al., 2002; Watson et al., 2002; Zhang et al., 2001; 강정옥 등, 2005; 이소정 등, 2008).

■ 염수가 존재하는 대수층에서 담수를 개발할 때 염수 쐐기의 반응 평가에 필요한 3차원 수조의 해수침투/지하수 개발 실험은 프론티어사업단 (2007) 연구 외에는 파악되지 않았음.

▌법, 제도 및 경제성 연구

■ 1974년 미국의 안전한 음용수법(Safe Drinking Water Act)에서는 지하주입제어계획 (UIC)에서 실행 근거 제시, 2007년 기준 16개 주가 지하수 인공주입 관련 법제도를 보유하고 있음.

■ 미국의 UIC 프로그램은 지하수 음용원수 수질관리 차원에서 주입 관정 관리에 대한 법제도만을 제정하고 있으며, 저장, 양수 등의 운영에 대한 법제도는 매우 미비한 것으로 판단됨. 몇몇 주가 특정 대수층 내에서 주입수 체류 시간, 이동 시간 및 거리 등에 대한 법제도개발을 진행하고 있으나 생물학적, 화학적, 물리학적 대수층간 다양성을 반영하지 못하고 있음.

■ 미국의 EPA 주도하에 획일적인 UIC 프로그램 관리에 대한 적절성에 대한 의구심이 일고 있으며, 지역별 청정지하저수지 개발 혜택, 비용 및 위험요인 등을 고려한 포괄적인 정책 개발 필요성이 요구되고 있음(US NRC, 2008).

■ 호주의 경우 지하저수지 개발을 위한 인허가 제도에 대한 법안으로 환경보호법안 (Environment Protection Act)과 개발법안 (Development Act) 등을 포함하여 다수의 법안들이 제정되었으나, 지하저수지의 주입수 저장, 양수 및 활용 등에 대한 권한, 소유권규정 사항은 매우 미비한 것으로 조사됨(Ward and Dillon, 2011; Water for Good, 2012).

■ 호주의 남호주와 빅토리아 주에서는 지하저수지 개발에 필요한 요구사항과 역할 및 책임을 기술한 대수층함양관리 (MAR) 가이드라인을 자체적으로 개발하여 활용하고 있으며, 도시계획단계에서 부터의 대수층 함양관리시설의 적용을 검토하고 있음(Water for Good, 2012).

■ 일본의 경우 환경기본법의 환경기준 설치 근거를 고시하고, 수질오탁방지법을 통해 일정 배출 기준을 넘는 유해물질의 지하 침투를 금지하고 있음.

- 본 연구 과제는 대규모 주입과 양수가 동시에 필요한 데, 외국에서는 시작단계이며, 국내에서는 처음 시도됨.
- 국내에서 강변여과수의 개발로 충적 대수층에서 양수정 개발에 대한 설계기술은 발달되어 있으나, 주입정의 설계기술은 개발되지 않았음.
- 대규모 청정 지하저수지 개발에 있어서, 에너지 절감을 위한 효율적인 주입정, 양수정, 펌프 및 이들을 연결하는 관로 배열에 대한 설계는 외국에서는 시작단계이며, 국내에서는 처음 시도됨.
- 주입정, 양수정, 관측정과 하천수의 수위와 수질, 조석변동 및 지반변위에 대한 총괄적인 모니터링 시스템의 원격제어 기술은 국내 IT 기술로 충분할 것으로 예상
- 국내에서는 지하수의 인공주입에 대한 시도가 없었기 때문에, 주입수의 지하 저수지내에서의 거동과 수질의 변동에 대한 분석 기술이 개발되어 있지 않음. 외국에서도 인공주입이 시작단계이므로 이 분야의 연구는 많지가 않음.

대하천 하구 퇴적층 부지 특성 평가 기술 개발

▌대하천 하구 퇴적층의 형성과정 연구

- 서해안의 소규모 퇴적층이나 대륙붕의 퇴적층에 대한 퇴적환경에 대한 연구는 어느 정도 이루어졌으나, 대하천 하구의 대규모 퇴적층에 대한 연구(김원형과 이형호, 1980; 류춘길 외, 2005; 유동근 등, 2004; 류춘길 외, 2011)는 아직 소수임.
- 낙동강 유역의 퇴적층에 대한 형성과정 연구(김원형과 이형호, 1988; 류춘길, 2003; 오건한, 1994; 유동근 등, 1997; 류춘길 외, 2011)는 약간 있으나, 기타 대하천(한강, 금강, 영산강, 섬진강)에 발달된 퇴적층의 형성과정 연구는 거의 없음.
- 국내에서 낙동강, 한강 등 대 하천 제방에서의 대규모 강변여과수 개발은 활발하게 진행되고 있으나, 대하천 하구 퇴적층에서 대규모 지하수 개발은 이루어지지 않았음.

▌ 대하천 하구 퇴적층의 수문학적 특성 연구

- 대부분의 지하수 함양량 산출은 하천유역의 자유면 대수층을 대상(김남원 등, 2006; 김만일 등, 2006; 김철겸 등, 2007; 안정훈 등, 2008; Chung et al., 2010; Hollander et al., 2009; Houston, 2001) 으로 하고 있음. 본 연구에서는 피압 대수층에서의 지하수 함양량산출을 필요로 함.
- 동위원소분석을 이용하여 많은 연구에서 청정 지하수의 기원, 연령, 순환과정, 해수의 혼합비율 등이 산정되었음(김규한 등, 2008; 김건영 등, 2007; 윤 욱 등, 2003; 고용권 등, 2000; Aeppli et al., 2010; Aji et al., 2008; Chen et al, 2011; Choi et al. 2010; Millit et. al., 2012; Subyani, 2004; Stewart, 2012; Vanderzalm

et al., 2011; Z.Katta, 2010).

- 지하수 수위변동, 하천수 수위변동, 해수 조위변동의 특성을 규명하고, 이들간의 상관성이 분석되었음(Cay, T. and Uyan, M., 2009; Butera et al., 2009; Liu et al., 2012).
- Chung et al. (2010)은 통합 지표수-지하수 모형인 SWAT-MODFLOW 모형을 이용한 물수지 성분해석 기반의 지하수 함양량 추정기법을 이용하여 한국의 미호천유역에 적용하였음. 이 기법의 장점은 계산된 함양량과 관측 지하수위간의 상관성을 고려하여 지체시간을 결정하는 매개변수를 최소화할 수 있는 장점이 있으나, 이 기법은 타 기법에 비하여 지하수 함양량이 크게 나타나는 경향이 문제임.

▌대하천 하구 퇴적층의 수리지질학적 특성 연구

- 국내에서 현재까지는 대부분이 소규모의 충적 자유면대수층에서 지하수 개발이 이루어졌으며, 대규모의 지하수 개발은 주입기능이 없이 양수만 하는 강변여과수 개발방식이 수행되고 있음. 낙동강 강변여과수의 경우 심도 30~40m 내외의 자유면대수층을 이용하고 있음.
- 과학기술부 주관의 "수자원의 지속적 확보 기술개발 사업"(과학기술부, 2004)에서 외국사례를 중심으로 ASR(인공주입 및 회수)에 대한 기본적인 연구를 수행하였으며, 그 결과 인공주입 방식의 인공함양이 새로운 수자원 확보 또는 처리 및 공급 방식으로 활용될 가능성이 매우 높은 것으로 평가되었음.
- 과학기술부 주관의 "수자원의 지속적 확보 기술개발 사업"(과학기술부, 2011)에서 현무암의 자유면대수층으로 구성된 제주도에 ASR 기법을 도입하여 인공함양지를 건설하였음. 그런데 이 인공 함양지는 강우의 저류보다는 홍수조절이 주 목적임.
- 미국 오레곤주의 Salem시에서는 2003년 기준으로 4개의 ASR 정호를 이용하여 34,065㎥/일의 용수를 공급하고, 오레곤주의 Beaverton 시에서는 현무암 대수층에 ASR을 개발하여 11,355 ㎥/일의 용수를 공급함. 기타 오레곤주의 Tigard 시에서도 ASR 방식으로 용수를 공급하고 있음(과학기술부, 2004).
- 남부 아프리카지역에서는 결정질 균열암반에 ASR 정호를 개발하여 용수를 공급하며(Murray and Tredoux, 1988, 2002), 대표적인 사례가 4개소 있음. 즉, Windhoek 지역은 규암 대수층에 195일 동안 214㎥/hr 속도로 주입, Karkams 지역은 편마암 대수층에 138일 동안 47.6㎥/day의 속도로 총 6,567 ㎥ 주입, Polokwane 지역은 충적층 및 편마암 대수층(충적층 두께 20m, 풍화대 두께 60m)에 하수 처리수 주입, Calvinia 지역의 각력파이프는 실린더 모양의 파쇄암이며, 105,000㎥ 정도의 저류능력을 갖고 있는데 하

천수를 주입하였음(과학기술부 2004).

주입 및 양수 시스템 최적 설계기술

▌상시주입-상시양수 지하저수지 주입계통과 양수계통의 최적 설계모델 개발

- Pyne (1995), Rasmussen (2008), Maliva와 Missimer (2010)는 지하수 흐름 모델링이 시스템 계획과 운영, 대수층의 불확실성 평가, 최소 비용으로 목표 달성 등을 위한 ASR 설계의 핵심적인 요소라 하였으나 모델링 s/w로 MODFLOW를 제시한 바 있음. MODFLOW는 널리 사용되고 있지만 적용 범위가 밀도가 일정한 지하수 흐름으로 국한되는 기본모델이므로, 해안 지역에서처럼 해수와 담수가 상호작용을 하는 지역에서는 적용할 수 없음.
- Bloetscher 등 (2005)은 모델링이 ASR 시스템의 위험도 및 회수율 평가 등에 밀도 차이를 고려한 지하수흐름 모델링이 필요한데 이러한 내용의 의미있는 모델링이 수행된 프로젝트가 별로 없으며 이 분야의 연구가 필요하다고 지적하였음.
- 해안 지역 지하수 개발에 대한 최적개발 연구는 지하수 흐름에 대한 해석해와 최적화 기법을 접목시킨 연구 (Park과 Aral, 2003; Cheng 등, 2000)이 있음. 해석해보다 제약이 적은 경계면 모델이 사용된 연구도 여러 연구자에 의하여 수행되었음 (Mantoglou와 Ppantoniou, 2008; Ayvaz와 Karahan, 2008; Park과 Hong, 2006 등; Alnahhal 등, 2010; Bhattacharjya와 Datta, 2005). 해안 지역 지하수 흐름에 대한 시뮬레이션 모델로는 흐름과 용질 수송 모델이 가장 진보된 기술이나 해석 시간이 오래 걸려 최적기법과 접목시키는 데는 현실적 제약이 있음.
- 박남식 등(2003)과 홍성훈 등(2009)은 수자원의 지속적 확보기술개발 프론티어 사업단 연구의 일환으로 해안 지역의 지하수 개발 및 관리에 대하여 담수-해수 경계면 흐름 모델과 최적화기법을 사용하여 최적해를 도출하는 연구를 수행한 바 있음. 동 연구에서는 해수침투 제어를 위한 담수 주입정 또는 해수 양수정의 최적 설계에 대한 연구를 수행하였음.

주입수 거동 및 수질평가 기술

▌대수층의 광물학적 특성 및 배경 지하수의 수지구화학적 특성분석 기술

- 충적층 지하수의 수질은 충적층 지질매체의 지질/지화학 특성에 의해 조절됨. 즉, 실트질 충적층 환경 보다는 사질 충적층이 분포하는 지역일수록 영양염류 등에 의한 오염취약성이 현저히 높은데,

그 이유는 사질 충적층일수록 오염물질의 직접 침투가 보다 용이하고 지하수는 상당한 심도까지 산화환경을 유지하기 때문임(Min et al., 2003; Chae et al., 2004, 2009). 반면, 실트질 충적층(범람원 충적층)이 분포하는 지역에서는 환원성 환경이 지배적으로 조성되어 탈질, 탈황 등의 환원반응이 일어나지만 철과 망간의 함량이 증가하게 되는 철-망간 환원이 발생함(Kim et al., 2009).

- 해외에서는 충적층 지질매체의 분포 및 공간변화에 관한 지도를 작성하고, 이를 안정적인 수질을 갖는 취수원 확보에 활용하고 있음. 즉, 다양한 지질매체에서의 다양한 오염물질의 변화와 저감 과정에 대한 연구가 많이 되어 있음.

▌주입수 거동 및 수질변화 분석 기술

- 주입수의 수화학 특성은 지하저수지 활용기술에 의한 수질 개선효과 및 주입정 관리(클로깅 발생 등)에 절대적으로 중요하여 반드시 상세히 분석·평가되어야 함(Brown and Misut, 2010; Bekele et al., 2011). 상기 주제에서 평가된 충적층 지질매체 지화학 특성자료를 활용하여 성분이 알려진 주입수(산화상태)와 모의 반응(simulation)함으로써, 주입수의 이동과 생지구화학 거동 및 수질변화를 예측할 수 있음. 이러한 결과는 최적 부지 선정과 선정된 부지에서의 최적 수질개선과 시설관리를 위한 주입 공정 설계에 활용됨.

- 본 연구에서는 주입수-충적층 지질매체 반응에 의한 시공간적 수질 변화를 창의적으로 모의함으로써, 모니터링 최적 설계에 활용코자 함.

▌주입수-지하수-지질매체 지화학 상호작용 분석 기술

- 청정 지하저수지 입지 지역에서의 주입수-지하수-지질매체(충적층) 간 상호작용은 recovered water의 수질(특히, 산화-환원에 민감하거나 관련되는 탄산염, 황산염 및 중금속 이온), 관정 효율의 변화(특히, 탄산염광물 침전에 의한 클로깅 발생) 뿐 아니라 저장대상 지층의 수리지질 특성 변화(특히, 2차광물의 침전에 의한 저류성 변화)와도 매우 밀접히 관련됨(Brown and Misut, 2010; Page et al., 2011).
- 모니터링 관정에서 주기적인 수화학 모니터링과 동위원소 모니터링을 수행함(Kattan et al., 2010). 수화학 모니터링 자료의 해석을 통하여 주입수의 이동 양상(혼합비 분포), 지하수-지질매체-주입수 상호반응에 의한 주입수의 수질 변동(개선효과), 2차 생성물질(이온성 물질과 2차 침전물)의 종류와 분포 등을 평가하게 됨. 일부 선행사례에서는 주입수의 성분과 주입율을 조절하면서 체

계적인 모니터링을 실시하고 이를 토대로 최적 운전조건을 제시함.

■ 지화학모델링(Phreeqc), 특히 반응성 용질이동 모델링을 창의적으로 활용하여 주입수-지하수-지질매체(충적층) 간 상호작용을 사전 예측함으로써, 수질 예측을 고려한 시설 설계 및 적정 운영(주입수 수질, 주입율 등) 에 지침을 제공함.

▌지하 저수지 통합운영관리 기술

■ 대규모 청정지하저수지 통합운영관리 기술개발을 위해서 목표생산량과 목표수질을 달성하는 운영방안에 따른 전반적인 시스템 운영 및 제어관리기술이 개발되어야 하며 이를 위해서 무선자동자료수집 및 모니터링 시스템 운영기술이 개발되고 실시간 모니터링의 편의성과 자료 분석 결과에 따른 신속한 대응을 위해 실시간 모바일 기반 모니터링 시스템이 개발됨.

■ 시스템의 전반적인 제어관리기술이 개발되기 위해서는 주입정, 양수정, 관측정으로부터의 지하수위, 온도, 수질, 압력, 전기전도도 등의 자료 측정과 함께 자동무선송수신 모듈과 실시간 모니터링 시스템을 개발하여 목표생산량과 목표수질을 확보하는 시스템 정상운영 상태를 확인할 수 있게 함과 동시에 전송된 자료들의 분석결과에 따라서 시스템에 생기는 문제점에 대해서 자동 및 수동으로 신속하게 대처할 수 있도록 함. 또한 모바일 기반의 실시간 모니터링 시스템을 개발하여 시스템 운영 담당자의 위치와 관계없이 실시간 모니터링이 가능할 수 있도록 하여 신속하고 정확한 대처를 가능하게 함.

■ 본 연구는 기존의 연구와 비교해 볼 때 ASR이나 ASTR 시스템과 유사한 바가 있지만 이러한 시스템에서는 주입정과 양수정에서 주입량, 양수량, 수질에 대한 여러 가지 항목에 대해서 정기적인 단순한 측정을 실시하고 결과를 분석해서 운영에 반영하게 됨.

■ ASR 또는 ASRT에 관련된 연구는 최근 활발히 진행되고 있음 (Page et al., 2007, Page et al., 2010, Barry et al., 2005, Harris et al., 2005, Herrman, 2005, Pavelic et al., 2005, Pyne, 2005, Rinck-Pfeiffer et al., 2005, Stuyfzand et al., 2005, Baski, 2007). Page et al.(2010)의 연구에서 Managed Aquifer Recharge(MAR) 사례를 소개하고 여러 가지 수질측정 항목들에 대한 자료를 제시하였음. Harris et al.(2005)와 Stuyfzand et al.(2005)의 논문에서는 수질측정과 ASR 중의 수질변화에 대해서 다루고 있고 Page et al.(2007)는 ASTR에서 재해분석을 수질에 대해서 실시하였음. Harris et al.(2005)는 ASR 양수량 증대에 대한 연구를 실시하였고 Herrman(2005)은 비피압대수층에서 ASR 양수량 최적화에 대한 연구를 하였음.

■ Pavelic et al.(2005)는 여러 관정분포의 경우에서 ASTR 모델링

을 실시하였고, Pyne(2005)은 최근 미국에서의 ASR 기술에 대해서 소개하였음. Rinck-Pfeiffer et al.(2005)는 도시지역의 홍수 발생 시 ASR 또는 ASRT를 제안하였음. Baski(2007)는 ASR 관정에 대한 비교적 자세한 설명과 함께 관정에 설치되는 각종 센서 및 자료수집 및 분석 장치에 대해서 소개하고 시스템 운영상의 내용이 간단히 소개되어 있음. 그러나 Baski(2007) 논문을 제외한 기존의 모든 보고서와 논문에서 용수확보를 위해서 ASR 또는 ASTR을 적용한 사례는 소개하고 있으나 세부적인 장비나 시스템적인 운영에 대한 언급은 전무한 실정임. Baski(2007)의 논문은 참고문헌이 한 편도 제시되지 않은 점으로 보아 ASR 장비나 운영에 대한 이전의 참고할 만한 공식적인 자료가 없었음을 시사함.

▌주입정 및 양수정 유지관리 기술

■ 주입정 및 양수정에서의 주요 문제 중에 하나는 폐색(또는 공 막힘)현상으로 이는 물리적, 화학적 그리고 생물학적 과정 중 하나 또는 둘 이상을 통해 발생됨. 지금까지 수행된 주입정 폐색현상에 대한많은 연구에 따르면 주입정에서의 폐색현상은 대부분 물리적 폐색(physical clogging)인 주입되는 물에 포함되어 있는 부유물질에 기인한다고 제시하였음(Harpaz, 1971; Hauser and Lotspeich, 1967; Vecchioli, 1972; Olsthoorn, 1982). 부유물질 다음으로 주입정 폐색의 주요 요인은 생물학적 폐색 (biological clogging)임(Oberdorfer and Peterson, 1985). 만약 주입되는 물이 살균 처리되지 않았을 경우 세균 또는 미생물들이 포함될 수 있으며, 이는 주입정 근처 대수층에 영양영분을 제공하는 환경이 조성될 수 있음. 주입정 근처에서의 미생물의 여과와 재성장은 주입정 운영에 있어 중요한 요소가 될 수 있음. 주입과 양수 사이에 중단이 발생되었을 때 주입시 사전염소처리가 된 물을 주입하였다 할지라도 양수된 지하수내에 높은 개체의 대장균 존재할 수 있음 (Rebhun and Schwarz, 1968)을 제시하였음.

■ 국내에서 폐색에 관한 연구로 추창오 등(2012)은 부산 금정산 일대 지하수 관정 내에서의 폐색현상을 일으키는 물질의 특성과 형성원인을 조사하였으며, 대표적 물질은 철수산화물로 관정 재질로부터 기인하였다고 평가한 바 있음.

■ 주입정에서 발생되는 폐색현상은 주입수의 전처리 과정(침사지 이용 등)을 통해 상대적으로 큰 입자의 유사 또는 부유물질, 유기물질,

영양염류 등을 분리한 후 주입하고 주입정 내에서 압력의 변화양상을 모니터링하여 주기적으로(주로 일단위) 주입수보다 높은 압력의 역세척(backwashing), 서어징(surging), 에어콤프레셔를 동반한

jetting 등의 기계적인 방법을 통해 저감하고 화학적 방법은 염소와 같은 산화제(oxidizing agent)와 염화칼슘과 같은 응집제를 주입하며, 화학적 폐색이 심한 경우에는 산(acid)을 주입함(Olsthoorn, 1982; Pyne, 1995; Perez-Parico and Carrera, 1999; Bouwer, 2002; Pavelic et al., 2007).

■ 최근 관정 내에서의 폐색현상 저감에 대한 연구로 함세영(2012)은 폐색현상 제거 기술개발에서 고압수 분사방식, 공기-브러쉬 방식, 고압가스 분사방식, 폭약방식 등을 다수의 관정에 적용하였으며, 취수량 평가를 평가하였음. 충적대수층에서는 고압가스 분사가 암반대수층에서는 현장 상태에 따라 제시된 방법별 효과가 달라질 수 있다고 제안하였음.

■ 지하 저수지의 장기간 동안 지속적으로 효율적이고 안정적으로 운영되기 위해 유지관리 차원에서 주입정과 양수정으로 이루어진 관정 시스템 내에서의 폐색현상에 대한 진단을 할 필요가 있으며, 이를 위해 관정 시스템 내 유량 및 압력 변화와 같은 수리학적 거동 등을 모니터링을 할 필요가 있음(Gonzalez-merchan et al., 2010).

■ 폐색현상을 예측하기 위해 많은 기법들이 개발되어져 왔으며, 주요 기법에 대한 요약은 다음과 같음.

- 실내 column 실험: 토양과 대수층을 구성하는 코어(core) 매질 그리고 주입 원수를 이용하는 실내 column 연구는 폐색의 정도, 주입 원수의 전처리에 대한 필요성을 확인할 수 있음(Rinck-Pfeiffer et al, 2000; Wood et al., 2005). 그러나 지하대수층 특성의 공간적 변동성(variability) 때문에 이러한 작은 규모의 실내 column 실험은 단지 정성적인 가이드만을 제공하며, 현장 규모에서의 관정 성능을 정확하게 예측하기 위해 적용되기 어려움이 있음.
- 도해적 기법: 폐색을 예측하기 위한 단순한 도해적 기법이 개발되어져 왔으며, Hutchinson and Randall(1995)는 대수층의 투과율(transmissivity)과 MFI(Membrane Filtration Index) 자료를 이용하여 주입정의 물리적인 폐색율을 예측하기 위한 표준곡선(type curve)을 개발하였음. 또한 Taylor and Jaffe(1990)는 실내column 실험으로 얻어진 결과를 이용하여 다공성 매질 내에서의 바이오매스의 정도에 따른 투수성의 상대적인 감소를 결정하였음.
- 수치 또는 물질 수지(mass balance) 모델링: 공극율과 투수성 변화에 대한 현장 예측을 위해 생물지화학적 반응(biogeochemical reaction)에 대해 흐름과 수송(flow and transport)이 결합된 정교한 수치 모델링 코드들이 개발되어 적용되어 오고 있음(Perez-Parico and Carrera, 1998). 그러나 이러한 코드는 매우 복잡하고 많은 양의 자료를 입력해야 할 필요가 있으며. 현재까지

연구목적으로 이용되고 있음. Pavelic et al(2007)은 물리적, 화학적 또는 미생물학적 과정이 투수성에 미치는 영향을 분석하기 위해 보다 단순한 물질 수지 모델링을 수행한 바 있음. 물리적인 폐색과정을 보다 정량적으로 수치적 분석을 위해 Lu et al.(2011)은 미세립자 퇴적의 시공간적 분포와 동수역학을 결합한 수치모형을 개발하였음.

▌지반침하 저감 기술

- 대수층을 구성하는 토양은 탄성적이지 않으며, 이로 인해 지반 침하와 융기는 지하수의 양수와 주입의 양에 직접적으로 비례하지 않음. 일반적으로 압밀된 토양에서 지하수 수위의 변화가 유사할지라도 지반 융기의 양은 침하의 양과 동일하지 않음(Budhu and Adiyaman, 2010). 일반적으로 균질의 압밀된 토양에서의 지반 융기의 양은 유사한 유효응력 크기 하에서 지반 침하의 양에 20~30% 정도 밖에 되지 않음(Budhu and Adiyaman, 2010).
- 지하수 양수에 의한 지반 침하에 대한 연구는 지난 수십년 전부터 광범위하게 연구되어 왔으나(Gambolati and Freeze, 1973; Gambolati et al., 1973; Booker et al., 1985; Booker and Carter, 1986; Small and Booker, 1984; Leake, 1990; Leake, 1991; Leake, 1992; Leake and Prudic, 1991; Burbey, 2006; Harada and Yamanouchi, 1983), 아직까지 신뢰할 만한 예측도구는 아직 개발되지 않았음. 이러한 주요 원인은 a) 지반 침하/융기에 대한 불완전한 이해, b) 대수층의 복잡한 지질학적 구조, c) 관정의 위치, 밀도 및 깊이 그리고 양수양에 대한 최적의 기준의 결핍 그리고 d) 종합적인 자료의 부족임.
- 지반 침하를 예측하기 위한 대부분의 연구는 주로 공개 프로그램인 MODFLOW 모형을 이용하여 수행되어져 왔음(Leake, 1990; Leake, 1991; Leake, 1992; Leake and Prudic, 1991; Hill et al., 2000).
- 주입정 내로 물의 주입함에 의해 발생되는 지반 융기는 지반 침하에 비해 매우 드물게 일어나는 현상이며(Teatini et al., 2010), 이에 대한 연구는 극히 미비한 실정임. 이에 대한 이유로 지반 융기는 환경적인 위험이 발생하지 않을 만큼 매우 작으며, 실제로 지반 융기에 대한 값 비싼 모니터링 시스템을 구축할 필요가 없다고 여겨졌기 때문임. Teatini et al.(2010)은 주입에 의한 지반 융기의 매커니즘에 대한 열-공극-탄성 이론을 제시하였으며, 미국, 캐나다 그리고 유럽 주요 ASR(Aquifer Storage and Recovery) 지역에서 발생된 지반 융기 관측 및 분석에 대한 사례연구를 제시하였음 Schmidt와 Burgmann (2003)은 InSAR(Interferometric

Synthetic Aperture Radar)를 이용하여 관측된 1992년부터 1999년까지 발생된 미국 캘리포니아 주 Santa Clara 계곡 내 ASR 지역에서의 지반 융기의 결과를 제시하였음. 최대 지반 융기는 4cm이며, 이는 피압대수층의 poroelastic 반응을 반영하는 것임. 계곡 남쪽의 남동부에서는 계절적인 지반 융기 신호가 오랜 기간에 걸쳐 중첩되는 현상을 나타내었음. 장기간 그리고 계절적 지반 변형은 대수층 내에서의 지하수 수두의 변화에 의한 것으로 판단하였음. Amelung et al.(1999)와 Bell et al. (2008)은 미국 네바다 주 Las Vegas 계곡에 위치한 ASR 지역에 대해 Persistant Scatter InSAR을 이용하여 지반융기를 관측한 결과 계절적 최대 지반 융기는 인공함양의 첨두 기간 동안 매년 1월부터 3월까지 발생하였다고 제시하였음.

▌음용수로서의 신뢰도 확보를 위한 대규모 청정 지하저수지의 수질 위해요소 사전관리기술 개발

- 위해요소 관리는 전통적인 산업분야에서 이뤄졌으며, 발전소, 제조공장, 폐기물 처리, 식품 및 의약품 외 여러 분야에서 사용적용 되고 있음. WHO(World Health Organization)는 식품안전성을 위한 HACCP 이외에 먹는물, 재이용수, 폐기물처리 등에 관한 위해요소 관리 기준을 설정하고 매뉴얼을 배포하고 있음. 그리고 먹는물 안전확보방안 매뉴얼(WHO)을 통해 안전한 음용수 제공을 위한 관리방안 등을 제공하고 있음.
- 특히 Greece의 Aspropyrgos 정수장에서는 수처리 및 공급과정 관리에 HACCP를 적용하는등 위해요소관리의 적용분야가 점차 넓어지고 있는 추세임.

▌1급수 지하저수지의 지속가능한 운영을 위한 주입수 전처리 기술 개발

- 미국 내 ASR 적용 사례에 따르면 73% 이상이 전처리 없이 인공주입수를 대수층에 함양하는 것으로 나타남. 하지만 최근 ASR 적용사례를 보면 주입수의 다변화에 따라 다양한 고도처리 공정들이 적용되고 있는 추세임.
- 그리고 전처리공정을 통하여 원수의 수질을 개선할 경우 대수층 내 clogging 발생이 상당부분 감소되는 연구결과들이 보고되고 있다. 따라서 인공 주입 및 추출의 운전의 안정성 증대를 위해 물리·화학·생물학적인 전처리 기술의 적용이 점차 증가되고 있으며 또한 전처리 공정을 통한 주입수 내 특정 오염물을 제거하는 연구가 이뤄지고 있음.

▌인공주입수를 음용수 수질기준으로 처리할 수 있는 플랜트 최적 설계·운영·유지관리 통합 기술개발

■ 국내의 경우 과학기술부(21세기 프론티어연구개발사업-수자원의 지속적 확보기술 개발사업)와 지식경제부(지질자원 요소기술을 이용한 기후변화대응/지구환경보전 기술개발) 등을 중심으로 강변여과 및 후처리에 대한 연구가 진행되었으며, 수처리 부분은 철·망간 및 입자성 물질 제거에 초점을 맞추어 연구되었음.

■ 국내·외 지하수 용수처리 공정의 실제 적용사례로 한국 창원에서는 강변여과수를 폭기, 급속여과, 활성탄여과 후 정수처리수로 사용하고, 독일의 뒤셀도르프와 뮐하임, 그리고 퀠른라인 정수장은 오존과 활성탄여과지, 그리고 소독공정 이후 정수처리수로 공급한다고 보고되고 있음. 일반적으로 간접취수원을 이용한 정수처리 공정은 기존 고도정수처리공정을 일반 정수처리공정으로 전환이 가능하므로 최소한의 정수처리 공정으로 구성되게 됨.

■ 미국의 ASR 정수처리 공정의 경우 57% 이상이 추가적인 정수공정이 없는 것으로 나타났으며, 추가적인 정수처리 공정이 들어간 경우는 철 · 망간, 그리고 pH 조절 등으로 나타났음.

▌물리 · 지화학적 대수층 수질의 개선 특성 평가 기술 개발

■ 비피압대수층(unconfined aquifer)을 대상으로 한 자연형 수처리 기술인 SAT는 양질의 수자원이 부족한 미국 arizona 지역과 이스라엘 등에서 연구개발이 활발히 이루어짐. SAT를 통해 포화도가 다른 지중 구간(불포화대 및 포화대)에서 용존유기물, 질소계 오염물, 인 등에 대한 정화효과를 오염물질의 거동(fate)관점에서 평가되고 있으며, 유럽 및 미국에서는 최근 SAT에 의한 신종유해물질(약물질, 환경호르몬) 제거효과에 대한 연구가 보고됨.

▌대수층 수질의 생물학적 개선특성 평가기술 개발

■ 피압대수층에서 NOM의 생분해와 철과 망간의 생물학적 전환에 대한 연구 결과가 보고됨. Cyanotoxins과 병원균의 제거/분해가 물리적 요인과 생물적 요인들의 조합으로 제거될 뿐만 아니라, 대수층 환경에서 병원성미생물들이 생존능을 상실하거나 포식자에 의한 포식 또는 토착미생물과 먹이에 대해 경쟁함에 따른 연구결과가 보고됨.

▌환경부에서는 1997년부터 도서지역 식수원 공급사업을 시행 중에 있음. 1단계 사업으로 97년부터 2004년까지 23개 시군, 123개 도서에 국고 2181억원을 투자하여 수원지 및 해수담수화 시설, 정수시설, 지하수 관정, 관로 등 사업 시행 (문유리 등, 2009).

▌2005년부터 2009년까지 시행된 2단계 사업에서 21개 시군 109개 도서의 상수도 확충사업을 위하여 총 3980억원 투자하였음. 사업 내

용으로는 관정, 수원개발, 정수시설, 해수담수화 시설 등이 포함됨. 시설 운영 및 유지를 위한 전문인력 부족, 운영비 과다 등의 사유로 41개 시설을 수자원공사에 위탁 운영 (문유리 등, 2010)

▌2010년부터 2014년 사이에 시행되는 2단계 수정 사업에서 19개 시군에서 102개 상수도 확충 사업에 총 4075억원의 사업비 추정. 2단계 수정사업에서는 거주인구가 30인 이상인 도서에 소규모 수도 시설 사업비 지원. 주요 사업내용으로는 수원지 및 정수시설 설치, 배수지 및 관로, 지하수 개발, 해수담수화시설 등이 포함됨.

- 2008년 현재 전국 유인도서 482개의 거주인구는 82만명임(행정안전부, 2008). 이중 상수도를 공급받는 인구는 29%에 불과하며 나머지는 간이급수시설, 우물, 지붕수 등에 의존하고 있음.
- 문유리 등(2010)은 도서지역에서 이용가능한 용수원별 특성 비교, 분석을 통하여 물 공급 계획의 수립절차를 제안하고 시범 적용한 바 있음.
- 이정호 등(2007)은 서남해안 지역의 지하수 이용 현황 및 관리 실태를 조사분석하고 그를 토대로 해안지역 수자원관리 개선방안에 대한 연구를 수행하였음. 연구내용에는 기존 문헌 분석을 통한 해안 지역 지하수 해안유출량 및 개발 가능량 평가 방법, 지하수 모델링 방법, 그리고 해수침투 관측현상 등이 포함됨.
- 문유리 등(2009)은 도서지역의 안정적 용수공급방안의 기반을 닦기 위해 용수 이용 현황 및 관리 실태를 조사하고 문제점을 분석하였음. 연구는 문헌조사와 설문조사를 위주로 수행되었음. 조사결과공급량 기준으로는 지표수 비중이 가장 컸으나 도서 개수 기준으로는 지하수가 가장 비중이 크게 나타났음. 또한 대부분의 도서가 단일 용수원에 의존하고 있어 비상상황에 취약한 것으로 나타났음. 수원별 주요 문제점으로는 지하수의 경우 용수량 부족이나 해수침투가, 지표 저수지의 경우 유기물 유입과 높은 수온으로 인한 부영양화가, 해수담수화 시설의 경우 전문 관리 부재 및 고가의 운영유지관리비 등이 파악되었음.
- 한수영(2003)과 박남식(2004)은 Darcy 법칙을 이용한 지하수 해안유출량을 평가기법을 제시하였음. 한강권역을 제외한 낙동강, 영산강, 섬진강, 금강 권역에서 평가된 지하수 해안유출량은 권역 강수총량의 0.5%에서 3.2%로 평가되었음. 이를 바탕으로 권역의 지하수함양율을 평가하였으며 이는 9.2%~13.4%의 범위로 나타났음.
- 박남식(2011)은 한국수자원공사에서 위탁 관리하고 있는 서남해안 도서지역 해수담수화 시설 40여 곳에 대한 비용을 분석하고 절감방안을 제시하였음. 2005년부터 5개년 동안의 비용분석 결과 유지보수비가 50.6%, 인건비가 36.9%, 그리고 에너지비가 7.8%의 순으로 나타났음. 염도는 에너지 비용에는 물론, 가장 큰 비중을 차

지하는 유지보수 비용에도 직접적 영향을 끼치는 것으로 조사되었음. 담수화 비용 절감을 위해서는 저염도 원수 확보가 필요함.

3. 연구개발 내용

▌총괄

- 대규모 청정 지하저수지 구축을 위한 통합기술
- 시험설비 구축 및 운영
- 지하저수지 관련 법, 제도 및 경제성 연구

▌대하천 하구 퇴적층에서 저수량 1,000만㎥ 확보를 위한 최적설계 기술

- 대하천 하구 퇴적층 부지 특성 평가 기술
- 주입 및 양수 시스템 최적 설계기술
- 지하저수지 모니터링 시스템 설계기술
- 주입수 거동 및 수질 평가 기술

▌청정지하저수지 운영 및 유지관리 기술

- 지하 저수지 통합 운영 기술
- 비상 시 지하 저수지 운영 기술
- 시스템 유지관리 기술
- 지반변형 해석 및 방지(저감) 기술

▌청정 용수 공급을 위한 수질관리 및 활용기술

- 음용수로서의 신뢰도 확보를 위한 청정 지하저수지의 수질위해요소 사전관리기술 개발
- 청정 지하저수지의 지속가능한 운영을 위한 주입수 전처리 기술개발
- 먹는물 공급을 위한 플랜트 최적설계 · 운영 · 유지관리 통합 기술 개발
- 물리 · 지화학적 대수층 수질의 개선 특성 평가 기술 개발
- 대수층 수질의 생물학적 개선특성 평가기술 개발

▌건기에 30일 이상 - 50m^3/d 이상 생산능력의 지하저수지 기술 개발

- 우기주입-건기회수 지하저수지 설계 기술
- 소규모 지하저수지 운영 및 유지관리 기술

4. 연구개발 추진방법

□ 추진전략

▌핵심원천 기술 확보를 위한 세부과제 연구의 독립성 부여와 total solution 확보를 위한 세부과제 간 유기적 연계를 균형있게 추진함. 핵심추진전략은 다음과 같음.

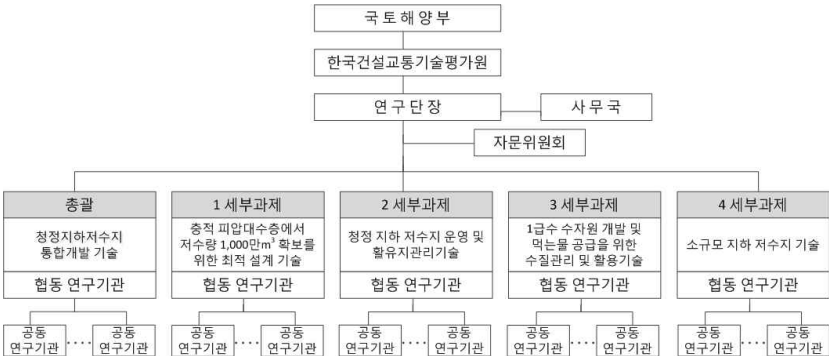
- 핵심 원천기술 확보 중심
- 지하저수지 시험시설에서의 기술 검증

▌핵심 추진전략 실행을 위한 전략적 접근 방법

- 국내외 학연산관 전문가 최대한 활용
- 세부과제의 행정적 업무 최소화를 통한 연구집중도 제고
- 세부과제 및 협동과제의 유기적 연계
- 수도 및 지하수 분야 산업체의 적극적 참여 유도
- 중앙정부, 광역 및 기초 지방자치 정부와 긴밀한 협조

□ 추진체계

- 연구단 체계로 추진
- 연구단은 총괄과제, 4개 세부과제와 18개 세세부과제로 구성



5. 최종 성과물

▌지하저수지 시스템 토탈솔루션

- 청정 지하저수지 설계, 구축, 운영 및 유지관리 기술
- 청정 지하저수지 설계, 구축, 운영 및 유지관리 매뉴얼

▌통합 기술 검증 보고서

- 실험실 수리모형 검증 보고서
- 시험설비 기술 통합 검증 보고서
- 설계저수량 및 생산량 실적

▌연구단 운영 결과보고서

- 세부과제 진행 상황 평가 및 연계 실적
- 연구단의 세부과제 별 연구 상황 모니터링 및 관리 실적

■ 성과 홍보 실적
■ 자문위원회 및 기획위원회 운영 실적
■ workshop 및 conference 개최 실적
■ 연구목표의 연차별 단계별 달성 점검 실적

▌시험설비 구축 및 운영 보고서

■ 부지 선정 및 조사
■ 시험설비 인허가
■ 세부과제 기술 검증 업무 지원
■ 시험설비 운영
■ 시험설비 성능 분석

▌홍보시설 운영 실적

■ 수리모형
■ 홍보 동영상
■ 대민, 대관, 대언론 홍보 전략

6. 기대효과 및 파급효과

▌사회적 측면

■ 지진, 지진해일, 원전사고 등의 재난과 수질 사고 또는 범죄 등으로부터 안전한 수원확보
■ 물 이전에 대한 지역 간 갈등(예: 부산과 경남)요인 제거
■ 약간의 가뭄에도 물 부족이 빈발하는 해안, 도서 및 산지에서 물 부족 해소에 기여
■ 기후변화로 예상되는 가뭄의 강도 및 빈도의 증가에 대비한 친환경적 수자원확보에 기여
■ 깨끗한 원수 확보로 국민들의 불신 요인 제거
■ 취수원 다변화로 물 안보 제고

▌경제적 측면

■ 정수처리 생산비용 절감이 기대됨. (지하 저수지를 이용한 정수처리 단가 16% 이상 절감, 833원 -> 700원/㎥이하)
■ 지자체 관내 시설설치 및 기존 송수시설 이용으로 장대 관로 및 지상시설 설치 비용, 수몰지 보상비용 절감 (예: 남강댐 광역상수도의 경우 1조 5천억원으로 예상)
■ 저렴한 생산원가로 수돗물값의 인상 억제
■ 세계 물 시장 규모는 연평균 6.5%씩 성장하고 있음 (GWI). 특히

신흥개발국에서는 연간 10%이상의 고성장이 이뤄질 것임. 중국의 경우 2010년 480억 달러였으며, 2025년 1,520억 달러에 달하여 3배 이상 성장할 것으로 예상됨. 지하저수지 기술로 신규시장 진입 및 선점이 가능함.

■ 국내외 대 하천 하구의 델타지역에서 보편적으로 적용이 가능하여 시장규모가 큼.

▌기술적 측면

■ 지하저수지 최적 설계 및 운영 기술 독자적 확보
■ 인공주입정 관리 기술 자립
■ 주입전 수처리 기술 확보
■ 장기 가뭄 대처 기술 확보
■ 지하수 정수처리 및 탈염기술 경쟁력 제고
■ 강변여과수나 인공습지에 비하여 저수용량이 훨씬 큼
■ 충적대수층의 유하를 통한 수질의 자연정화 가능
■ 지표수, 저수지와 달리 홍수시 탁도, 갈수시 조류 발생 등 수질오염이 없고, 수온이 거의 일정
■ 지상시설의 규모가 적고, 환경오염 발생이 거의 없음
■ 철, 망간 등의 오염물질 제거기술을 개발하여, ASTR 기법과 강변여과수 기법에 의한 용수확보 활성화
■ 유기성 오염물 감소에 따른 소독부산물 발생에 대한 우려 감소
■ 하천수 수질 변화에 관계없이 안정적인 취수원 확보 및 처리수질의 안정성 확보
■ 지하수 정수처리 시 질소 및 기타 무기물과 미량독성물질을 처리할 수 있어 먹는 물에 대한 신뢰성 제고

7. 사업기간 및 소요예산

▌사업기간

■ 협약일로부터 5년

▌소요예산

■ (정부출연금) 12,000백만원

2. 세부과제별 RFP

가. 총괄과제

연구과제명	청정 지하저수지 기술
1. 연구개발 목표	
	▌**수질사고, 재난 등으로부터 안전하며, 깨끗한 물을 안정정으로 공급할 수 있는 청정 지하 저수지의 설계, 구축, 운영 및 유지관리에 필요한 핵심원천 기술과 total solution 기술 개발 및 검증** ■ 요소기술들의 상호 호환성을 확보 및 요소 연구성과들을 통합하여 지하저수지 토탈솔루션 구축 ■ 백만㎥의 저수량과 2000㎥/d 생산량 규모의 시험시설 구축 ■ 사업개발 환경 및 지속가능한 운영 여건 마련을 위한 모델 법제도(안) 개발과 이에 필요한 경제성 평가 지침 개발
2. 연구개발 필요성 및 기술동향	
□ **연구개발의 필요성**	■ 대규모 청정 지하저수지에 대한 통합기술 개발을 위해서는 여러 가지의 요소 원천기술의 개발이 필요함. 요소기술들을 통합하여 통합기술을 구성하기 위해서는 요소기술연구의 결과는 물론 연구 과정이 상호 유기적으로 진행되는 것이 매우 중요하며, 총괄과제에서는 각 세부과제의 연구가 유기적으로 상호연계되어 진행되도록 세부과제들을 총괄하고 요소기술들을 통합하여 통합기술을 개발하여야 함. ■ 총괄세부과제에서 수행하는 기술적 측면의 세부과제들에서 개발되는 원천기술들의 연구 과정과 결과, 그리고 시험설비 검증 과정을 총괄하고, 지하저수지의 원활한 보급을 위한 제도적 연구의 지원에는 민간보다는 정부의 역할이 더 커야함. ■ 청정 지하저수지는 다양한 원천기술들이 체계적으로 적용될 때 그 효과가 극대화됨. 따라서 시험시설을 통한 원천기술의 검증이 필요하며, 그 과정에서 원천기술의 보완과 개선도 필수적임. 하나의 시험시설에서 시도될 원천기술들의 연구내용과 범위, 일정, 목적 등이 다양하므로 전체 시험과정에 대한 관리가 필요하며, 이를 위하여 시험시설의 구축 및 운영을 총괄세부과제에서 진행해야 함. ■ 대수층 함양관리[인공함양]에 대한 전 세계적으로 20여 가지가 넘는 다양한 활용사례와 성공 및 실패 사례 등이 존재하며 (MAR, 2011; GWI March, 2010), 인공함양 개발기술의 필요성과 활용가치가 점점 커짐에 따라 이에 대한 지침, 법제도, 정책적 연구가 필요함. ■ 청정지하저수지 개발 및 운영은 다양한 기관간의 여러 기술적, 행정적 작업 요소 (표 1 참조)를 포함하고 있으므로 효율적이고 적법한

권한 및 책임 분담이 필요하며, 이러한 일련의 작업들이 표층수 관리와 지하수 관리로 이원화된 현재의 법제도 체계 내에서 양립할 수 있는 법제도(안) 개발이 필요함.

■ 청정 지하저수지의 성공적 보급을 위해서는 나머지 세부과제에서 다루는 기술적 측면 외에도 법적 제도적 뒷받침이 따라야 함. 이를 위해서는 현행 법령의 분석과 지하저수지 보급 활성화를 위한 정책연구가 필요하며 이 연구는 총괄세부과제에서 수행되는 것이 이상적임.

■ 물산업의 경우 정부에서 차세대 성장동력으로 육성하고 있고, 세계적으로 물시장의 규모가 연평균 4.9%정도 증가하고 있어, 새로운 원천기술 개발로 인한 물산업 진출 기틀을 마련함.

□ 기술동향

▌현장 시험설비 연구

■ 해외의 많은 인공함양 프로젝트는 본격 시행 전 장기간에 걸친 상당한 규모의 현장 시험이 수행되고 있음. 첫 ASR 시험으로 알려진 Cederstrom (1947) 이후 Goyal 등 (2008), Ward 등 (2008), Miontlinski (2011), Pavelic 등 (2006), CDM (2004) 등은 다양한 규모의 주입/양수 시험을 수행하였음.

■ 현재까지 알려진 첫 ASR 실험은 1946년 중반에 Cederstrom (1947)이 기수를 함유하고 있는 염대수층에 담수를 주입하고 회수하는 실험을 수행하였음. 그는 담수와 염지하수의 완전한 혼합으로 담수 회수가 어려울 것이라는 우려는 기우에 불과하다고 결론내린 바 있음.

■ 미국 워싱톤 주에서는 건기의 첨두 물수요를 충족하기 위하여 다수의 인공함양이 진행되거나 계획되고 있다(Washington State, 2000). 시애틀 시 남쪽에 위치한 Lakehaven시 수도국은 1991년부터 10여년간 ASR 파일롯 연구를 수행하고 있음.

■ Goyal등(2008)은 인도에서 수자원의 연계관리의 효과를 평가하기 위하여 ASR 기법을 제안하고 현장 시험을 수행하였다. 전기전도도가 28,400μS/cm에 달하는 염 지하수가 부존된 피압대수층에서 인공주입시험을 수행하였음.

■ Pavelic 등(2006)은 호주에서 수행한 ASR 연구에서 투수계수가 약 3m/d 정도인 피압대수층에 7개월에 걸쳐 900~1300m^3/d의 유량으로 주입하고 4개월의 저장 기간 후에 1300m^3/d의 양수량으로 회수를 시행하였음.

■ Miontlinski 등(2011)은 호주 멜버른에서 도심의 우수를 투수성이 낮은 균열암반 피압대수층에 주입하고 회수하는 시험을 수행한 바 있다. 대수층에는 전기전도도가 2400-2700μS/cm 정도의 기수가 부존되어 있었음.

■ 유럽연합의 덴마크, 벨기에, 네덜란드, 스웨덴, 핀란드, 스페인, 독일의 7개 국가에서 9개 기관이 1996년부터 3년간 수행한 '지하수 인

공함양'이라는 국가간 연구과제에는 파일롯 스터디가 7개소에서 수행한 바 있음 (Stuyfzand and Timmer, 2001).

- 포르투갈에서는 가뭄에 대비한 통합수자원관리 차원에서 지하수인공함양의 타당성을 검토하기 GABARDINE Project에서 남부 Algrave 지역에 3개의 시험시설을 운영하고 있음. (Lobo-Ferreira and Oliveira, 2007).

▌국내 기술동향

- 하경오(2007)는 수막재배로 인하여 낮아진 지하수위를 복원하기 위하여 함양지 방법과 관정 주입 방법을 이용한 지하수 인공함양 파일롯 연구를 수행하고 주입정의 성능을 평가한 바 있다. 국토해양부의 지원으로 수행되고 있는 수변지하수 활용 고도화 연구단(2011)에서도 수막재배로 인하여 수위가 낮아진 비닐하우스 경작지의 지하수위를 복원하기 위한 인공함양 연구를 수행하고 있음.
- 프론티어 사업단의 인공함양 연구에서는 제주도 제주시 한천에 인공함양정 20개를 개발하였음. 이 연구에서는 함양정을 천변 저류지에 설치하여 홍수 시에 유입된 하천수가 저류지에서 일정 수심을 초과하면 밸브를 개방하여 자연유하식으로 인공함양이 시작되는 시스템임.
- 프론티어 사업단의 강변여과수 연구는 경상남도 창원시 소재 기존 시설을 활용한 수리수문학적 특성을 중심으로 연구가 수행되었음. 구체적으로는 개발 대상지역의 수리지질학적 평가, 개발가능량 평가를 위한 수치모델링, 그리고 지하수계 생태조사, 지하수위 및 수질 변화 조사 등이 수행되었음.
- 수변지하수 활용 고도화 연구단(2011-2016)에서는 "수변 충적층 지하수위 복원 기술" 세부과제에서 수막재배로 인하여 낮아진 지하수위를 회복시키기 위하여 인공함양 기술의 적용에 대한 연구를, "수변 지하수 대용량 간접취수 시공기술 선진화" 세부과제에서는 대용량 지하수 취수에 대한 연구의 일환으로 시험현장이 계획되어있음.

▌실험실 수리모형 연구

- 실험실 모래 수리모형에서 이루어진 실험은 염수가 존재하는 모래층에서 지하수 양수 또는 해수 쐐기 제어를 위한 담수 주입에 대한 연직 단면 실험위주로 이루어져왔음.(Boufadel, 2000; Goswami and Clement, 2007; Nakagawa et al., 2005; Simmons et al., 2001, Werner et al., 2009; Mao et al., 2006; Oswald and Kinzelbach, 2004; Thorenz et al., 2002; Watson et al., 2002;

Zhang et al., 2001; 강정옥 등, 2005; 이소정 등, 2008).

- 염수가 존재하는 대수층에서 담수를 개발할 때 염수 쐐기의 반응 평가에 필요한 3차원 수조의 해수침투/지하수 개발 실험은 프론티어사업단 (2007) 연구 외에는 파악되지 않았음.

▌법, 제도 및 경제성 연구

- 1974년 미국의 안전한 음용수법(Safe Drinking Water Act)에서는 지하주입제어계획 (UIC)에서 실행 근거 제시, 2007년 기준 16개 주가 지하수 인공주입 관련 법제도를 보유하고 있음.
- 미국의 UIC 프로그램은 지하수 음용원수 수질관리 차원에서 주입관정 관리에 대한 법제도만을 제정하고 있으며, 저장, 양수 등의 운영에 대한 법제도는 매우 미비한 것으로 판단됨. 몇몇 주가 특정 대수층 내에서 주입수 체류 시간, 이동 시간 및 거리 등에 대한 법제도 개발을 진행하고 있으나 생물학적, 화학적, 물리학적 대수층간 다양성을 반영하지 못하고 있음.
- 미국의 EPA 주도하에 획일적인 UIC 프로그램 관리에 대한 적절성에 대한 의구심이 일고 있으며, 지역별 청정지하저수지 개발 혜택, 비용 및 위험요인 등을 고려한 포괄적인 정책 개발 필요성이 요구되고 있음(US NRC, 2008).
- 호주의 경우 지하저수지 개발을 위한 인허가 제도에 대한 법안으로 환경보호법안 (Environment Protection Act)과 개발법안 (Development Act) 등을 포함하여 다수의 법안들이 제정되었으나, 지하저수지의 주입수 저장, 양수 및 활용 등에 대한 권한, 소유권규정 사항은 매우 미비한 것으로 조사됨(Ward and Dillon, 2011; Water for Good, 2012).
- 호주의 남호주와 빅토리아 주에서는 지하저수지 개발에 필요한 요구사항과 역할 및 책임을 기술한 대수층함양관리 (MAR) 가이드라인을 자체적으로 개발하여 활용하고 있으며, 도시계획단계에서 부터의 대수층 함양관리시설의 적용을 검토하고 있음(Water for Good, 2012).
- 일본의 경우 환경기본법의 환경기준 설치 근거를 고시하고, 수질오탁방지법을 통해 일정 배출 기준을 넘는 유해물질의 지하 침투를 금지하고 있음.

3. 연구개발내용	

▌시스템 통합 기술 개발

- 세부과제에서 개발된 요소 기술들의 집적을 통한 토탈솔루션 구축
- 청정 지하저수지 설계, 구축, 운영 및 유지관리 매뉴얼 작성

▌통합 기술 검증

- ■ 실험실 수리모형 구축 및 예비 평가
- ■ 시험설비 기술 통합 검증 및 보완 연구 관리
- ■ 설계저수량 및 생산량 평가

▌연구단 운영

- ■ 세부과제 진행 상황 평가 및 연계
- ■ 연구단의 세부과제 별 연구 상황 모니터링 및 관리
- ■ 성과 홍보
- ■ 자문위원회 및 기획위원회 운영
- ■ workshop 및 conference 개최
- ■ 연구목표의 연차별 단계별 달성 점검

▌시험설비 구축 및 운영

- ■ 부지 선정 및 조사
- ■ 시험설비 인허가
- ■ 세부과제 기술 검증 업무 지원
- ■ 시험설비 운영
- ■ 시험설비 성능 분석

▌홍보시설

- ■ 수리모형 설치
- ■ 홍보 동영상 제작
- ■ 대민, 대관, 대언론 홍보 전략 수립

▌청정지하저수지 개발 및 운영 관련 모델 법제도 개발

- ■ 해외 청정지하저수지의 다양한 활용 및 응용 사례, 성공적 활용 및 실패사례 조사를 통한 핵심성공요인과 실패요인 도출
- ■ 청정지하저수지 개발, 주입, 저장, 양수, 모니터링 및 지속적 운영에 필요한 제반 법제도 구축 현황 해외 사례 조사

▌지하저수지 관련 법, 제도 및 경제성 연구

- ■ 지하 저수지 보급을 위한 정책적 제안 사항 연구
- ■ 지하 저수지 보급을 위한 관련 법규 개선방안 연구

■ 지하 저수지의 경제성 정밀 분석
■ 지하 저수지 해외 수출을 위한 시장 및 현지 여건 조사
■ 실용화 방안

▌청정지하저수지 개발 기술의 경제성 평가 가이드라인 및 사업화 방안 구축

■ 청정지하저수지개발기술의 비용분석
■ 청정지하저수지개발기술의 편익분석
■ 청정지하저수지 경제성 평가 가이드라인 개발
■ 청정지하저수지개발기술의 사업화 방안

4. 연구개발 추진방법

□ 추진전략

▌기술정보 수집 및 전문가 확보

■ 국내외 각종 전문학술지 게재 논문자료
■ 국내외 인공주입 전처리 및 지하수 용수처리 업체를 통한 시공 및 운영 정보교류
■ 지하 저수지와 관련된 국제 학회 및 세미나 참석
■ 기존 자문위원회 활용 및 국내외 관련 신규 전문가의 지속적인 확보

▌기존연구 결과 활용

■ 기 수행되었거나 현재 수행되고 있는 연구개발 결과의 활용
■ 국내외 선진 기술 및 결과의 벤치마킹을 통한 국내에 적합한 기술의 조기개발

▌산학연관 공동연구 수행

■ 대학을 중심으로 원천 기술 개발을, 산업체는 상대적으로 우위를 점하고 있는 시설 구축 연구를, 연구소에서는 경제성 평가 연구를, 정부에 대해서는 제도 및 법 관련 자문을 통하여 연구를 수행함. 이와 같은 역할분담 및 효율적인 연구를 통하여 완성도 높은 통합 기술을 구축

▌개발기술의 검증

■ 시험설비 시설에서 공정 설계 및 유지관리 가이드라인을 바탕으로 설계 및 운영을 수행하여 가이드라인의 적절성 검증

□ 추진체계

■ 산·학·연 공동연구를 기본으로 하며, 필요 시 관련 분야에서 선도적 위치에 있는 해외 전문가와 공동연구를 추진할 수 있음.

■ 지자체, 공사, 기업 등 기술수요자의 측면에서 연구를 살펴 볼 수 있는 전문가가 연구에 참여해야 함.
■ 연구신청자는 과다한 기관수의 참여 및 연구계획 편성으로 인한 추진체계의 비효율성을 최대한 지양하고, 반드시 필요한 기관으로만 구성하여 연구추진의 효율성을 도모해야함.

5. 최종 성과물

▌통합기술 연구

■ 청정 지하저수지 설계, 구축, 운영 및 유지관리 매뉴얼
■ 통합 기술검증 보고서

▌시험 설비 연구

■ 백만㎥ 규모의 저수량과 2,000㎥/d 규모의 시험 지하저수지
■ 시험 지하저수지 운영보고서
■ 홍보관 운영 및 실적 보고서

▌법, 제도 및 경제성 연구

■ 대규모 및 소규모 청정지하저수지 경제성 평가 가이드라인
■ 국내외 유망지역 선정 및 시장진출 전략
■ 물산업 파급효과 분석 보고서

6. 기대효과 및 파급효과

▌사회적 측면

■ 지진, 지진해일, 원전사고 등의 재난과 수질 사고 또는 범죄 등으로부터 안전한 수원확보
■ 물 이전에 대한 지역 간 갈등(예: 부산과 경남)요인 제거
■ 약간의 가뭄에도 물 부족이 빈발하는 해안, 도서 및 산지에서 물 부족 해소에 기여
■ 기후변화로 예상되는 가뭄의 강도 및 빈도의 증가에 대비한 친환경적 수자원확보에 기여
■ 깨끗한 원수 확보로 국민들의 불신 요인 제거
■ 취수원 다변화로 물 안보 제고

▌경제적 측면

■ 정수처리 생산비용 절감이 기대됨. (지하 저수지를 이용한 정수처리 단가 16% 이상 절감, 833원 -> 700원/㎥이하)
■ 지자체 관내 시설설치 및 기존 송수시설 이용으로 장대 관로 및 지상시설 설치 비용, 수몰지 보상비용 절감 (예: 남강댐 광역상수도의

경우 1조 5천억원으로 예상)

- 저렴한 생산원가로 수돗물값의 인상 억제
- 세계 물 시장 규모는 연평균 6.5%씩 성장하고 있음 (GWI). 특히 신흥개발국에서는 연간 10%이상의 고성장이 이뤄질 것임. 중국의 경우 2010년 480억 달러였으며, 2025년 1,520억 달러에 달하여 3배이상 성장할 것으로 예상됨. 지하저수지 기술로 신규 시장 진입 및 선점 가능함.
- 국내외 대 하천 하구의 델타지역에서 보편적으로 적용이 가능하여 시장규모가 큼.

▌기술적 측면

- 지하저수지 최적 설계 및 운영 기술 독자적 확보
- 인공주입정 관리 기술 자립
- 주입전 수처리 기술 확보
- 장기 가뭄 대처 기술 확보
- 지하수 정수처리 및 탈염기술 경쟁력 제고
- 강변여과수나 인공습지에 비하여 저수용량이 훨씬 큼
- 충적대수층의 유하를 통한 수질의 자연정화 가능
- 지표수, 저수지와 달리 홍수시 탁도, 갈수시 조류 발생 등 수질오염이 없고, 수온이 거의 일정
- 지상시설의 규모가 작고, 환경오염 발생이 거의 없음
- 철, 망간 등의 오염물질 제거기술을 개발하여, ASTR 기법과 강변여과수 기법에 의한 용수확보 활성화
- 유기성 오염물 감소에 따른 소독부산물 발생에 대한 우려 감소
- 하천수 수질 변화에 관계없이 안정적인 취수원 확보 및 처리수질의 안정성 확보
- 지하수 정수처리 시 질소 및 기타 무기물과 미량독성물질을 처리할 수 있어 먹는 물에 대한 신뢰성 제고

7. 사업기간 및 소요예산

▌사업기간

- 협약일로부터 5년

▌소요예산

- (정부출연금) 4,909백만원

8. 기 타

나. 제 1 세부과제

연구과제명	대하천 하구 퇴적층에서 저수량 1,000만㎥ 확보를 위한 최적설계 기술 개발
1. 연구개발 목표	
	▌대하천 하구 충적 퇴적층에서 대용량 수자원 확보를 위한 부지 특성 평가 기술, 주입 및 양수 시스템 최적 설계기술, 모니터링 시스템 설계기술, 주입수 거동 및 수질 평가기술 등의 지하저수지 최적설계기술의 개발
2. 연구개발 필요성 및 기술동향	
□ 연구개발의 필요성	■ 청정 지하저수지 구축에 가장 적합한 부지를 확보하기 위하여 지질학적, 수문학적 및 수리학적 조사와 분석이 필요함 . ■ 대상 연구부지는 5 대강유역의 하류지역으로서 점토층, 모래층, 자갈층 등으로 구성되고 두께가 60~80m인 대하천 하구 퇴적층이므로,내륙의 결정질 암반대수층과는 다른 수리지질학적 특성을 갖고 있음. ■ 대하천 하구는 결정질 암반이 발달된 내륙과는 다른 지질학적 특성을 갖고 있음. 하구 충적층은 표토층, 점토층, 모래층, 모래자갈층, 암반 등으로 구성되었으며, 내륙의 충적층에 비하여 두껍게 형성되어 부존량 잠재성이 큼. ■ 청정 지하 저수지 개발은 국내는 물론 외국에서도 시작단계에 있는 기술이므로, 청정 지하수 생산을 위한 제 분야의 최적설계기술 개발이 필요함. ■ 에너지를 최소화하면서 최대의 청정 지하수를 채수할 수 있는 최적 운전장치 시스템을 설계하는 기술이 필요함. ■ 청정지하수 생산의 비용절감을 위하여 주입정, 양수정, 관측정 및 하천수의 수위와 수질, 조석변동 및 지반변위에 대한 총괄적인 모니터링 시스템 기술이 필요함. ■ 주입수의 지하 저수지내에서의 거동과 수질의 변동에 대한 분석을 통하여, 청정 지하수를 지속적이고도 안정적으로 채수하는 것이 필요함. ■ 충적 대수층에서 청정지하수 개발은 국내는 물론 외국에서도 시작단계에 있는 기술이므로, 정부지원하의 적극적인 연구개발이 필요함.
□ 기술동향	■ 본 연구 과제는 대규모 주입과 양수가 동시에 필요한 데, 외국에서는 시작단계이며, 국내에서는 처음 시도됨. ■ 국내에서 강변여과수의 개발로 충적 대수층에서 양수정 개발에 대

한 설계기술은 발달되어 있으나, 주입정의 설계기술은 개발되지 않았음.

- 대규모 청정 지하저수지 개발에 있어서, 에너지 절감을 위한 효율적인 주입정, 양수정, 펌프 및 이들을 연결하는 관로 배열에 대한 설계는 외국에서는 시작단계이며, 국내에서는 처음 시도됨.
- 주입정, 양수정, 관측정과 하천수의 수위와 수질, 조석변동 및 지반변위에 대한 총괄적인 모니터링 시스템의 원격제어 기술은 국내 IT 기술로 충분할 것으로 예상
- 국내에서는 지하수의 인공주입에 대한 시도가 없었기 때문에, 주입수의 지하 저수지내에서의 거동과 수질의 변동에 대한 분석 기술이 개발되어 있지 않음. 외국에서도 인공주입이 시작단계이므로 이 분야의 연구는 많지가 않음.

(1) 대하천 하구 퇴적층 부지 특성 평가 기술 개발

▌대하천 하구 퇴적층의 형성과정 연구

- 서해안의 소규모 퇴적층이나 대륙붕의 퇴적층에 대한 퇴적환경에 대한 연구는 어느 정도 이루어졌으나, 대하천 하구의 대규모 퇴적층에 대한 연구(김원형과 이형호, 1980; 류춘길 외, 2005; 유동근 등, 2004; 류춘길 외, 2011)는 아직 소수임.
- 낙동강 유역의 퇴적층에 대한 형성과정 연구(김원형과 이형호, 1988; 류춘길, 2003; 오건한, 1994; 유동근 등, 1997; 류춘길 외, 2011)는 약간 있으나, 기타 대하천(한강, 금강, 영산강, 섬진강)에 발달된 퇴적층의 형성과정 연구는 거의 없음.
- 국내에서 낙동강, 한강 등 대 하천 제방에서의 대규모 강변여과수 개발은 활발하게 진행되고 있으나, 대하천 하구 퇴적층에서 대규모 지하수 개발은 이루어지지 않았음.

▌ 대하천 하구 퇴적층의 수문학적 특성 연구

- 대부분의 지하수 함양량 산출은 하천유역의 자유면 대수층을 대상(김남원 등, 2006; 김만일 등, 2006; 김철겸 등, 2007; 안정훈 등, 2008; Chung et al., 2010; Hollander et al., 2009; Houston, 2001) 으로 하고 있음. 본 연구에서는 피압 대수층에서의 지하수 함양량산출을 필요로 함.
- 동위원소분석을 이용하여 많은 연구에서 청정 지하수의 기원, 연령, 순환과정, 해수의 혼합비율 등이 산정되었음(김규한 등, 2008; 김건영 등, 2007; 윤 욱 등, 2003; 고용권 등, 2000; Aeppli et al., 2010; Aji et al., 2008; Chen et al, 2011; Choi et al. 2010; Millit et. al., 2012; Subyani, 2004; Stewart, 2012; Vanderzalm et al., 2011; Z.Katta, 2010).
- 지하수 수위변동, 하천수 수위변동, 해수 조위변동의 특성을 규명하고, 이들간의 상관성이 분석되었음(Cay, T. and Uyan, M.,

2009; Butera et al., 2009; Liu et al., 2012).

■ Chung et al. (2010)은 통합 지표수-지하수 모형인 SWAT-MODFLOW 모형을 이용한 물수지 성분해석 기반의 지하수 함양량 추정기법을 이용하여 한국의 미호천유역에 적용하였음. 이 기법의 장점은 계산된 함양량과 관측 지하수위간의 상관성을 고려하여 지체시간을 결정하는 매개변수를 최소화할 수 있는 장점이 있으나, 이 기법은 타 기법에 비하여 지하수 함양량이 크게 나타나는 경향이 문제임.

▌대하천 하구 퇴적층의 수리지질학적 특성 연구

■ 국내에서 현재까지는 대부분이 소규모의 충적 자유면대수층에서 지하수 개발이 이루어졌으며, 대규모의 지하수 개발은 주입기능이 없이 양수만 하는 강변여과수 개발방식이 수행되고 있음. 낙동강 강변여과수의 경우 심도 30~40m 내외의 자유면대수층을 이용하고 있음.

■ 과학기술부 주관의 "수자원의 지속적 확보 기술개발 사업"(과학기술부, 2004)에서 외국사례를 중심으로 ASR(인공주입 및 회수)에 대한 기본적인 연구를 수행하였으며, 그 결과 인공주입 방식의 인공함양이 새로운 수자원 확보 또는 처리 및 공급 방식으로 활용될 가능성이 매우 높은 것으로 평가되었음.

■ 과학기술부 주관의 "수자원의 지속적 확보 기술개발 사업"(과학기술부, 2011)에서 현무암의 자유면대수층으로 구성된 제주도에 ASR기법을 도입하여 인공함양지를 건설하였음. 그런데 이 인공 함양지는 강우의 저류보다는 홍수조절이 주 목적임.

■ 미국 오레곤주의 Salem시에서는 2003년 기준으로 4개의 ASR 정호를 이용하여 34,065㎥/일의 용수를 공급하고, 오레곤주의 Beaverton 시에서는 현무암 대수층에 ASR을 개발하여 11,355 ㎥/일의 용수를 공급함. 기타 오레곤주의 Tigard 시에서도 ASR 방식으로 용수를 공급하고 있음(과학기술부, 2004).

■ 남부 아프리카지역에서는 결정질 균열암반에 ASR 정호를 개발하여 용수를 공급하며(Murray and Tredoux, 1988, 2002), 대표적인 사례가 4개소 있음. 즉, Windhoek 지역은 규암 대수층에 195일 동안 214㎥/hr 속도로 주입, Karkams 지역은 편마암 대수층에 138일 동안 47.6㎥/day의 속도로 총 6,567 ㎥ 주입, Polokwane 지역은 충적층 및 편마암 대수층(충적층 두께 20m, 풍화대 두께 60m)에 하수 처리수 주입, Calvinia 지역의 각력파이프는 실린더 모양의 파쇄암이며, 105,000㎥ 정도의 저류능력을 갖고 있는데 하천수를 주입하였음(과학기술부 2004).

(2) 주입 및 양수 시스템 최적 설계기술

▌상시주입-상시양수 지하저수지 주입계통과 양수계통의 최적 설계모델 개발

- Pyne (1995), Rasmussen (2008), Maliva와 Missimer (2010)는 지하수 흐름 모델링이 시스템 계획과 운영, 대수층의 불확실성 평가, 최소 비용으로 목표 달성 등을 위한 ASR 설계의 핵심적인 요소라 하였으나 모델링 s/w로 MODFLOW를 제시한 바 있음. MODFLOW는 널리 사용되고 있지만 적용 범위가 밀도가 일정한 지하수 흐름으로 국한되는 기본모델이므로, 해안 지역에서처럼 해수와 담수가 상호작용을 하는 지역에서는 적용할 수 없음.
- Bloetscher 등 (2005)은 모델링이 ASR 시스템의 위험도 및 회수율 평가 등에 밀도 차이를 고려한 지하수흐름 모델링이 필요한데 이러한 내용의 의미있는 모델링이 수행된 프로젝트가 별로 없으며 이 분야의 연구가 필요하다고 지적하였음.
- 해안 지역 지하수 개발에 대한 최적개발 연구는 지하수 흐름에 대한 해석해와 최적화 기법을 접목시킨 연구 (Park과 Aral, 2003; Cheng 등, 2000)이 있음. 해석해보다 제약이 적은 경계면 모델이 사용된 연구도 여러 연구자에 의하여 수행되었음 (Mantoglou와 Ppantoniou, 2008; Ayvaz와 Karahan, 2008; Park과 Hong, 2006 등; Alnahhal 등, 2010; Bhattacharjya와 Datta, 2005). 해안 지역 지하수 흐름에 대한 시뮬레이션 모델로는 흐름과 용질 수송 모델이 가장 진보된 기술이나 해석 시간이 오래 걸려 최적기법과 접목시키는 데는 현실적 제약이 있음.
- 박남식 등(2003)과 홍성훈 등(2009)은 수자원의 지속적 확보기술개발 프론티어 사업단 연구의 일환으로 해안 지역의 지하수 개발 및 관리에 대하여 담수-해수 경계면 흐름 모델과 최적화기법을 사용하여 최적해를 도출하는 연구를 수행한 바 있음. 동 연구에서는 해수침투 제어를 위한 담수 주입정 또는 해수 양수정의 최적 설계에 대한 연구를 수행하였음.

(3) 주입수 거동 및 수질평가 기술

▌대수층의 광물학적 특성 및 배경 지하수의 수지구화학적 특성분석 기술

- 충적층 지하수의 수질은 충적층 지질매체의 지질/지화학 특성에 의해 조절됨. 즉, 실트질 충적층 환경 보다는 사질 충적층이 분포하는 지역일수록 영양염류 등에 의한 오염취약성이 현저히 높은데, 그 이유는 사질 충적층일수록 오염물질의 직접 침투가 보다 용이하고 지하수는 상당한 심도까지 산화환경을 유지하기 때문임(Min

et al., 2003; Chae et al., 2004, 2009). 반면, 실트질 충적층(범람원 충적층)이 분포하는 지역에서는 환원성 환경이 지배적으로 조성되어 탈질, 탈황 등의 환원반응이 일어나지만 철과 망간의 함량이 증가하게 되는 철-망간 환원이 발생함(Kim et al., 2009).

- 해외에서는 충적층 지질매체의 분포 및 공간변화에 관한 지도를 작성하고, 이를 안정적인 수질을 갖는 취수원 확보에 활용하고 있음. 즉, 다양한 지질매체에서의 다양한 오염물질의 변화와 저감 과정에 대한 연구가 많이 되어 있음.

▌주입수 거동 및 수질변화 분석 기술

- 주입수의 수화학 특성은 지하저수지 활용기술에 의한 수질 개선효과 및 주입정 관리(클로깅 발생 등)에 절대적으로 중요하여 반드시 상세히 분석·평가되어야 함(Brown and Misut, 2010; Bekele et al., 2011). 상기 주제에서 평가된 충적층 지질매체 지화학 특성자료를 활용하여 성분이 알려진 주입수(산화상태)와 모의 반응(simulation)함으로써, 주입수의 이동과 생지구화학 거동 및 수질변화를 예측할 수 있음. 이러한 결과는 최적 부지 선정과 선정된 부지에서의 최적 수질개선과 시설관리를 위한 주입 공정 설계에 활용됨.

- 본 연구에서는 주입수-충적층 지질매체 반응에 의한 시공간적 수질 변화를 창의적으로 모의함으로써, 모니터링 최적 설계에 활용코자 함.

▌주입수-지하수-지질매체 지화학 상호작용 분석 기술

- 청정 지하저수지 입지 지역에서의 주입수-지하수-지질매체(충적층) 간 상호작용은 recovered water의 수질(특히, 산화-환원에 민감하거나 관련되는 탄산염, 황산염 및 중금속 이온), 관정 효율의 변화(특히, 탄산염광물 침전에 의한 클로깅 발생) 뿐 아니라 저장대상 지층의 수리지질 특성 변화(특히, 2차광물의 침전에 의한 저류성 변화)와도 매우 밀접히 관련됨(Brown and Misut, 2010; Page et al., 2011).
- 모니터링 관정에서 주기적인 수화학 모니터링과 동위원소 모니터링을 수행함(Kattan et al., 2010). 수화학 모니터링 자료의 해석을 통하여 주입수의 이동 양상(혼합비 분포), 지하수-지질매체-주입수 상호반응에 의한 주입수의 수질 변동(개선효과), 2차 생성물질(이온성 물질과 2차 침전물)의 종류와 분포 등을 평가하게 됨. 일부 선행사례에서는 주입수의 성분과 주입율을 조절하면서 체계적인 모니터링을 실시하고 이를 토대로 최적 운전조건을 제시함.
- 지화학모델링(Phreeqc), 특히 반응성 용질이동 모델링을 창의적으

로 활용하여 주입수-지하수-지질매체(충적층) 간 상호작용을 사전 예측함으로써, 수질 예측을 고려한 시설 설계 및 적정 운영(주입수 수질, 주입율 등) 에 지침을 제공함.

3. 연구개발 내용

▌1-1 대하천 하구 퇴적층 부지 특성 평가 기술

■ 대하천 하구 퇴적층의 형성과정 연구
■ 대하천 하구 퇴적층의 수리지질학적 특성 연구
■ 대하천 하구 퇴적층의 수문학적 특성 연구
■ 부지특성 평가 매뉴얼 작성
■ 부지특성 평가
■ 수문분석
■ 대수층 수리 특성 평가
■ 지하수 수질 특성 평가
■ 지하수 자료 정밀 분석
■ 델타부지 특성 평가 매뉴얼 작성

▌1-2 주입 및 양수 시스템 최적 설계기술

■ 상시주입-상시양수 지하저수지 주입계통과 양수계통의 최적설계모델개발
■ 실험실 수리모형 기술 검증 및 보완
■ 시험설비 기술 검증 및 보완
■ 주입 및 양수 시스템 최적 설계기술 매뉴얼 작성
■ 주입정 및 양수정 배치 최적 설계
■ 관로 및 펌프 최적 설계
■ 시험설비 가동을 통한 기술검증 및 보완
■ 운전장치 시스템 최적 설계 매뉴얼 작성

▌1-3 지하저수지 모니터링 시스템 설계기술

■ 관망, 관정, 대수층 내 흐름 및 수질 모니터링 시스템 설계기술 개발
■ 시스템 오작동 판단 기준 및 오작동 시 모니터링 대책 수립
■ 비상시 판단 기준 및 비상 시 모니터링 대책 수립
■ 모니터링 시스템 최적 설계 매뉴얼 작성

▌1-4 주입수 거동 및 수질 평가기술

■ 대수층의 광물학적 특성 및 배경 지하수의 수지구화학적 특성분석 기술
■ 주입수 거동 및 수질변화 분석 기술
■ 주입수-배경지하수-지질매체 지화학 상호작용 분석 기술
■ 매뉴얼 작성
■ 주입수와 배경 지하수 관계 분석
■ 주입수의 수질 변동 분석
■ 수위 및 수질 변동 분석 매뉴얼 작성

4. 연구개발 추진방법

□ 추진전략

▌단계별 연구목표를 수립하고, 그에 적합한 추진전략 및 일정계획 수립

■ 1단계(1~2차 년도, 24개월)
- 목 표: 청정 지하저수지 개발을 위한 기초 설계기술 및 시험 지하수 설계
- 추진전략: 대하천 하구 퇴적층의 부지 특성 평가 기초기술 개발, 부지특성에 적합한 주입 및 양수 시스템 제원 및 배치 설계, 운전장치 모니터링 계획 수립, 운전장치 원격제어 시스템 설계, 지하저수지내에서 주입수의 거동과 수질 변동 평가 기술

■ 2단계(3~5차 년도, 36개월)
- 목 표: 대하천 하구 퇴적층에서 저수량 1,000만㎥ 확보를 위한 청정 지하저수지 최적 설계기술 완성 및 매뉴얼 작성
- 추진전략: 대하천 하구 퇴적층 부지특성 평가 기술 완성 및 매뉴얼 작성, 시험설비의 가동을 통한 운전장치 시스템 설계기술 검증 및 보완, 운전장치 시스템 최적 설계 매뉴얼 작성, 운전장치 원격제어시스템의 오작동 및 비상시 감시 기능 설계, 원격 제어시스템 최적설계 매뉴얼 작성, 지하 저수지내에서 주입수의 거동과 수질 변동 평가 기술 완성, 수위 및 수질 변동 분석 매뉴얼 작성

□ 추진체계

■ 에너지를 최소화하면서 최대의 청정 지하수를 채수할 수 있는 최적 운전장치 시스템설계기술 개발
■ 청정지하수 생산의 비용절감을 위하여 주입정, 양수정, 관측정 및 하천수의 수위와 수질, 조석변동 및 지반변위에 대한 총괄적인 모니터링 시스템을 원격으로 제어하는 기술 개발
■ 주입수의 지하 저수지내에서의 거동과 수질의 변동에 대한 분석을 통하여, 청정 지하수를 지속적이고도 안정적으로 채수하는 기술 개발
■ 부지특성평가에서 시험시추, 지구물리탐사, 지구물리 검층, 양수시험 등은 관련 전문업체와 공동으로 추진
■ 방사성 및 안정 동위원소 연구는 분석이 가능한 국내외 연구소와

공동으로 수행

- 주입정 및 양수정의 제원과 배치에 대한 최적 설계, Pilot Plant 가동을 통한 기술검증 및 보완 등의 연구는 강변여과수 개발경험이 있는 국내외 기관의 자문과 협조를 받아서 추진
- 운전장치 모니터링 및 원격제어 시스템 구축을 위한 설계는 관련 전문업체와 공동으로 수행

5. 최종 성과물

▌대하천 하구 퇴적층 부지 특성 평가 기술

- 대하천 하구 퇴적층의 형성과정 연구: 충적대수층의 퇴적상 및 층서, 퇴적층의 물리적 성질(비중, 간극비, 비저항, 자연전위, 감마선량 등), 간극수(지하수)의 지화학적 특성(pH, Eh, Salinity, EC등)
- 대하천 하구 퇴적층의 수문학적 특성 연구: 지하수 연령, 지하수에 해수의 혼합율, 지하수 체류시간, 지하수 기원, 지하수 함양량, 지하수 개발가능량 등
- 대하천 하구 퇴적층의 수문학적 특성 연구: 수리지질도, 지층단면도, 수리상수(K, T, S), 분산지수와 유효공극율, 지하수 수질특성, 지하수 수위 및 유동 분포도, 지하수 수질(부유물질, Cl, SO4, NO3-N, Fe, Mn, TCE 등) 농도분포도, 3-D 지층 구조도, 지하수 함양량 산출, 델타부지 특성 평가 매뉴얼
- 부지 특성 평가 매뉴얼

▌주입 및 양수 시스템 최적 설계기술

- 주입정 및 양수정 최적 설계도, 관로 및 펌프 최적 설계도, 주입정-양수정-펌프-관로의 최적 배치도, 최적 설계를 위한 시뮬레이-최적화 통합 전산설계 프로그램, 시험설비 가동 기술검증서
- 최적 설계 매뉴얼

▌지하저수지 모니터링 시스템 설계기술

- 주입정/양수정/하천수/조위/지반변위 모니터링공의 제원 및 위치 설계도, 주입정 및 양수정 모니터링공의 원격제어 설계도, 펌프 및 관로 원격제어 설계도, 하천수 수위 및 수질 모니터링 원격제어 설계도, 조위 모니터링 원격제어 설계도, 지반변위 모니터링 원격제어 설계도, 오작동 및 비상시 모니터링 시스템 구축 설계도
- 모니터링 및 원격 제어 시스템 최적 설계 매뉴얼

▌주입수 거동 및 수질 평가 기술

- 대수층의 지화학 및 광물 특성분석 자료, 주입에 따른 배경 지하수 거동 도면, 포획구간 및 영향범위 설정 도면, 배경 지하수 수질분석 자료, 주입수 수질 변동분석 자료, 대수층의 수질개선 능력 평가 자료
- 주입수 거동 및 수질 평가 매뉴얼

6. 기대효과 및 파급효과

- 대하천 하구의 대하천 하구 퇴적층에서 용량의 지하저수지 개발 가능
- 대하천 하구 퇴적층에서 청정 지하저수지 구축에 가장 적합한 반 운전장치(주입정, 양수정, 펌프, 관로 등) 시스템 설계 가능
- 충적 대수층에서 대용량의 주입정 및 양수정에 대한 설계 가능
- 청정 지하저수지 설계기술을 외국에 수출 가능
- 최소 에너지를 이용하는 청정 지하저수지 개발 가능
- 델타 대수층에서 용량의 지하저수지 개발 가능
- 원격제어를 통한 청정 지하저수지 생산 가능
- 양질의 청정 지하수를 지속적이고도 안정적으로 이용 가능
- 자연정화를 이용한 양질의 지하수 생산 가능

7. 사업기간 및 소요예산

▌사업기간

- 협약일로부터 5년

▌소요예산

- (정부출연금) 2,080백만원

다. 2세부과제

연구과제명	청정 지하 저수지 운영 및 유지관리 기술

1. 연구개발 목표

▌중단 없이 목표 용수를 효율적이며, 안정적 그리고 지속적으로 공급하기 위한 유지관리 기술 개발

2. 연구개발 필요성 및 기술동향

□ 연구개발의 필요성

▌지하 저수지 통합 운영 기술 개발

- 주입정, 양수정, 관측정으로부터의 지하수위, 온도, 압력, 수질, 전기전도도 등의 자료 측정과 함께 자동무선송수신 모듈과 실시간 모니터링 시스템을 개발하여 평상 시 목표생산량을 확보하는 시스템 정상운영 상태를 확인할 수 있게 함과 동시에 system malfunction,주입수 수질사고, 극한 가뭄 등의 상황에서 자동 및 수동으로 신속하게 대처할 수 있도록 함.
- 또한 모바일 기반의 실시간 모니터링 시스템을 개발하여 시스템운영 담당자의 위치와 관계없이 실시간 모니터링이 가능할 수 있도록 하여 비상 시 신속하고 정확한 대처를 가능하게 함.

▌비상시 지하 저수지 운영 기술 개발

- 지하저수지 시스템에서 평상시와는 달리 생산 조건이 달라지는 비상시 운영기술 , 원수의 수질악화, 수량부족, 시스템 오작동, 자연재해, 수질사고 및 테러상황에 대비해서 각 상황에 대응하는 운영기술을 개발 그리고 시스템오작동이란 하드웨어 작동에 문제가 생겨서 생산에 차질이 생기는 경우를 의미하는데 정전과 같은 직접적인 원인도 있으나 모니터링 자료를 실시간으로 분석하여 하드웨어에 즉각적으로 문제가 생길 것이 예측되는 상태도 고려할 예정임.
- 가뭄 등에 의한 수질저하 및 취수량확보에 문제가 생기는 경우와 자연재해나 테러 등에 의한 취수원 확보가 불가능한 경우에 청정지하저수지 시스템을 운영하는 비상시 운영방안을 수립할 필요가 있음.

▌시스템 유지관리 기술 개발

- 지하 저수지의 기본적인 개념은 하천 하구 등에 위치한 모래와 점토로 구성되어 있는 충적대수층 내에 설치된 주입정과 양수정으

로 이루어진 관정 시스템을 통해 지하수를 용수로 공급하는 것임.

- 이러한 관정 시스템을 효율적이며 장기간 동안 지속적으로 목표공급용수량을 달성하기 위해서는 주입정 및 양수정에서의 폐색현상 저감하거나 방지할 필요가 있음. 이를 위해서는 우선적으로 주입정 폐색의 물리적, 화학적, 생물학적 폐색현상 요인을 분석하고 이에 대한 대책에 관련된 연구를 수행할 필요가 있음.
- 또한 폐색현상은 인공주입 시 주입되는 물에 포함되어 있는 유사와 그 외 부유물질 등에 의해 주입정 내의 압력을 증가시키고 이로 인해 주입량이 감소되며, 양수정의 경우 물리적 및 화학적 폐색현상으로 인해 양수정 스크린 주변 대수층의 투수성이 감소되며, 이로 인해 양수량이 감소됨. 따라서 지하 저수지 내 관정 시스템에서의 폐색현상을 최대로 저감시키기 위한 기술 및 폐색현상 예측에 관한 기술 개발이 필요함.
- 또한 지하 저수지의 장기간 동안 지속적으로 효율적이고 안정적으로 운영되기 위해서는 유지관리 차원에서 주입정과 양수정으로 이루어진 관정 시스템 내에서의 폐색현상 진단을 위해서는 관정 시스템 내 유량 및 압력 변화와 같은 수리학적 거동 등을 모니터링을 할 필요가 있으며, 이에 대한 최적의 설치 및 운영에 대한 기술 개발이 필요함.

▌지반변형 해석 및 방지(저감) 기술 개발

- 일반적으로 개발되지 않은 대수층은 충전(recharge)과 방출(discharge)이 균형을 이루고 있으나 인공적인 취수 또는 양수는 이러한 균형을 파괴시켜 지반침하를 일으키는 원인이 될 수 있음.
- 지하 저수지 내 물을 주입하고 또는 이로부터 양수를 하더라도 지반 내의 대수층을 통과하여야 하므로 지반의 투수계수와 대수층의 수두의 상태에 따라서 양수정에서 유출되는 유량은 변화하게 됨. 양수압이 걸린 대수층에는 지하수위 저감이 발생하게 되고 이는 지반의 유효단위중량을 증가시킴으로써 지반침하를 유발시키게 됨.
- 또한 한 개 이상의 양수정이 운영될 경우 지하수위 저감은 중첩하게 되며 이로 인해 지반 침하의 크기는 더욱 커지게 됨. 지반침하는 운영되는 시설물과 인접 중요시설물이 존재할 경우 사용성(serviceability)을 제한하거나 혹은 구조물의 부등침하를 통한 시설물의 손상을 야기 시킬 수 있음. 따라서 주입 혹은 양수에 따른 지하수위의 유동과 대수층내 한계유속이상의 압력수두 발생에 의한 토사유동에 따른 침하를 적절히 예측하고 이를 관리하는 기법이 필요함.
- 또한 주입정 내에서의 지하수위 상승이나 양수정 내에서의 감소에 따른 지반변형은 필연적으로 발생함. 지반변형에 의한 관정 시스템

의 사용성이나 구조적 손상을 방지하기 위해서는 전체적인 지반변형의 한계치를 설정된 대수층의 허용 총침하량 또는 허용 부등침하량이 만족되는지를 검토할 필요가 있음. 따라서 관정 시스템 내 주입과 양수에 의해 발생 가능한 지반침하의 영양 범위와 침하 혹은 융기의 정도는 반드시 비구조적 방법을 통해 예측될 필요가 있음.

■ 지반변형을 실시간적으로 모니터링 하는 것은 현재 방재분야에서 폭넓게 활용하고자 하는 분야임. 지반변형을 예측하기 위해 지하수위와 강우량을 실시간으로 모니터링 하는 시스템은 이미 보편화되어 있으나 인위적인 주입과 양수로 인해 발생 가능한 지반침하나 세립분의 이동에 따른 싱크홀과 같은 국부적인 지반붕락을 사전에 대비하기 위한 IT 분야와 접목한 지반변형 상황 모니터링 시스템 구축 방안을 강구하여 운영 및 관리체계를 고도화 할 수 있음.

□ 기술동향

▌지하 저수지 통합운영관리 기술

■ 대규모 청정지하저수지 통합운영관리 기술개발을 위해서 목표생산량과 목표수질을 달성하는 운영방안에 따른 전반적인 시스템 운영 및 제어관리기술이 개발되어야 하며 이를 위해서 무선자동자료수집 및 모니터링 시스템 운영기술이 개발되고 실시간 모니터링의 편의성과 자료 분석 결과에 따른 신속한 대응을 위해 실시간 모바일 기반 모니터링 시스템이 개발됨.

■ 시스템의 전반적인 제어관리기술이 개발되기 위해서는 주입정, 양수정, 관측정으로부터의 지하수위, 온도, 수질, 압력, 전기전도도 등의 자료 측정과 함께 자동무선송수신 모듈과 실시간 모니터링 시스템을 개발하여 목표생산량과 목표수질을 확보하는 시스템 정상운영 상태를 확인할 수 있게 함과 동시에 전송된 자료들의 분석결과에 따라서 시스템에 생기는 문제점에 대해서 자동 및 수동으로 신속하게 대처할 수 있도록 함. 또한 모바일 기반의 실시간 모니터링 시스템을 개발하여 시스템 운영 담당자의 위치와 관계없이 실시간 모니터링이 가능할 수 있도록 하여 신속하고 정확한 대처를 가능하게 함.

■ 본 연구는 기존의 연구와 비교해 볼 때 ASR이나 ASTR 시스템과 유사한 바가 있지만 이러한 시스템에서는 주입정과 양수정에서 주입량, 양수량, 수질에 대한 여러 가지 항목에 대해서 정기적인 단순한 측정을 실시하고 결과를 분석해서 운영에 반영하게 됨.

■ ASR 또는 ASRT에 관련된 연구는 최근 활발히 진행되고 있음 (Page et al., 2007, Page et al., 2010, Barry et al., 2005, Harris et al., 2005, Herrman, 2005, Pavelic et al., 2005, Pyne, 2005, Rinck-Pfeiffer et al., 2005, Stuyfzand et al., 2005, Baski, 2007). Page et al.(2010)의 연구에서 Managed

Aquifer Recharge(MAR) 사례를 소개하고 여러 가지 수질측정 항목들에 대한 자료를 제시하였음. Harris et al.(2005)와 Stuyfzand et al.(2005)의 논문에서는 수질측정과 ASR 중의 수질변화에 대해서 다루고 있고 Page et al.(2007)는 ASTR에서 재해분석을 수질에 대해서 실시하였음. Harris et al.(2005)는 ASR 양수량 증대에 대한 연구를 실시하였고 Herrman(2005)은 비피압 대수층에서 ASR 양수량 최적화에 대한 연구를 하였음.

- Pavelic et al.(2005)는 여러 관정분포의 경우에서 ASTR 모델링을 실시하였고, Pyne(2005)은 최근 미국에서의 ASR 기술에 대해서 소개하였음. Rinck-Pfeiffer et al.(2005)는 도시지역의 홍수발생 시 ASR 또는 ASRT를 제안하였음. Baski(2007)는 ASR 관정에 대한 비교적 자세한 설명과 함께 관정에 설치되는 각종 센서 및 자료수집 및 분석 장치에 대해서 소개하고 시스템 운영상의 내용이 간단히 소개되어 있음. 그러나 Baski(2007) 논문을 제외한 기존의 모든 보고서와 논문에서 용수확보를 위해서 ASR 또는 ASTR을 적용한 사례는 소개하고 있으나 세부적인 장비나 시스템적인 운영에 대한 언급은 전무한 실정임. Baski(2007)의 논문은 참고문헌이 한 편도 제시되지 않은 점으로 보아 ASR 장비나 운영에 대한 이전의 참고할 만한 공식적인 자료가 없었음을 시사함.

▌주입정 및 양수정 유지관리 기술

- 주입정 및 양수정에서의 주요 문제 중에 하나는 폐색(또는 공 막힘)현상으로 이는 물리적, 화학적 그리고 생물학적 과정 중 하나 또는 둘 이상을 통해 발생됨. 지금까지 수행된 주입정 폐색현상에 대한많은 연구에 따르면 주입정에서의 폐색현상은 대부분 물리적 폐색(physical clogging)인 주입되는 물에 포함되어 있는 부유물질에 기인한다고 제시하였음(Harpaz, 1971; Hauser and Lotspeich, 1967; Vecchioli, 1972; Olsthoorn, 1982). 부유물질 다음으로 주입정 폐색의 주요 요인은 생물학적 폐색 (biological clogging)임 (Oberdorfer and Peterson, 1985). 만약 주입되는 물이 살균 처리되지 않았을 경우 세균 또는 미생물들이 포함될 수 있으며, 이는 주입정 근처 대수층에 영양영분을 제공하는 환경이 조성될 수 있음. 주입정 근처에서의 미생물의 여과와 재성장은 주입정 운영에 있어 중요한 요소가 될 수 있음. 주입과 양수 사이에 중단이 발생되었을 때 주입시 사전염소처리가 된 물을 주입하였다 할지라도 양수된 지하수내에 높은 개체의 대장균 존재할 수 있음 (Rebhun and Schwarz, 1968)을 제시하였음.
- 국내에서 폐색에 관한 연구로 추창오 등(2012)은 부산 금정산 일대 지하수 관정 내에서의 폐색현상을 일으키는 물질의 특성과 형

성원인을 조사하였으며, 대표적 물질은 철수산화물로 관정 재질로부터 기인하였다고 평가한 바 있음.

■ 주입정에서 발생되는 폐색현상은 주입수의 전처리 과정(침사지 이용 등)을 통해 상대적으로 큰 입자의 유사 또는 부유물질, 유기물질, 영양염류 등을 분리한 후 주입하고 주입정 내에서 압력의 변화양상을 모니터링하여 주기적으로(주로 일단위) 주입수보다 높은 압력의 역세척(backwashing), 서어징(surging), 에어콤프레셔를 동반한 jetting 등의 기계적인 방법을 통해 저감하고 화학적 방법은 염소와 같은 산화제(oxidizing agent)와 염화칼슘과 같은 응집제를 주입하며, 화학적 폐색이 심한 경우에는 산(acid)을 주입함(Olsthoorn, 1982; Pyne, 1995; Perez-Parico and Carrera, 1999; Bouwer, 2002; Pavelic et al., 2007).

■ 최근 관정 내에서의 폐색현상 저감에 대한 연구로 함세영(2012)은 폐색현상 제거 기술개발에서 고압수 분사방식, 공기-브러쉬 방식, 고압가스 분사방식, 폭약방식 등을 다수의 관정에 적용하였으며, 취수량 평가를 평가하였음. 충적대수층에서는 고압가스 분사가 암반대수층에서는 현장 상태에 따라 제시된 방법별 효과가 달라질 수 있다고 제안하였음.

■ 지하 저수지의 장기간 동안 지속적으로 효율적이고 안정적으로 운영되기 위해 유지관리 차원에서 주입정과 양수정으로 이루어진 관정 시스템 내에서의 폐색현상에 대한 진단을 할 필요가 있으며, 이를 위해 관정 시스템 내 유량 및 압력 변화와 같은 수리학적 거동 등을 모니터링을 할 필요가 있음(Gonzalez-merchan et al., 2010).

■ 폐색현상을 예측하기 위해 많은 기법들이 개발되어져 왔으며, 주요 기법에 대한 요약은 다음과 같음.

- 실내 column 실험: 토양과 대수층을 구성하는 코어(core) 매질 그리고 주입 원수를 이용하는 실내 column 연구는 폐색의 정도, 주입 원수의 전처리에 대한 필요성을 확인할 수 있음(Rinck-Pfeiffer et al, 2000; Wood et al., 2005). 그러나 지하대수층 특성의 공간적 변동성(variability) 때문에 이러한 작은 규모의 실내 column 실험은 단지 정성적인 가이드만을 제공하며, 현장 규모에서의 관정 성능을 정확하게 예측하기 위해 적용되기 어려움이 있음.
- 도해적 기법: 폐색을 예측하기 위한 단순한 도해적 기법이 개발되어져 왔으며, Hutchinson and Randall(1995)는 대수층의 투과율(transmissivity)과 MFI(Membrane Filtration Index) 자료를 이용하여 주입정의 물리적인 폐색율을 예측하기 위한 표준곡선(type curve)을 개발하였음. 또한 Taylor and Jaffe(1990)는 실내column 실험으로 얻어진 결과를 이용하여 다공성 매질 내에서의 바이오매

스의 정도에 따른 투수성의 상대적인 감소를 결정하였음.

- 수치 또는 물질 수지(mass balance) 모델링: 공극율과 투수성 변화에 대한 현장 예측을 위해 생물지화학적 반응(biogeochemical reaction)에 대해 흐름과 수송(flow and transport)이 결합된 정교한 수치 모델링 코드들이 개발되어 적용되어 오고 있음(Perez-Parico and Carrera, 1998). 그러나 이러한 코드는 매우 복잡하고 많은 양의 자료를 입력해야 할 필요가 있으며. 현재까지 연구목적으로 이용되고 있음. Pavelic et al(2007)은 물리적, 화학적 또는 미생물학적 과정이 투수성에 미치는 영향을 분석하기 위해 보다 단순한 물질 수지 모델링을 수행한 바 있음. 물리적인 폐색과정을 보다 정량적으로 수치적 분석을 위해 Lu et al.(2011)은 미세립자 퇴적의 시공간적 분포와 동수역학을 결합한 수치모형을 개발하였음.

▌지반침하 저감 기술

- 대수층을 구성하는 토양은 탄성적이지 않으며, 이로 인해 지반 침하와 융기는 지하수의 양수와 주입의 양에 직접적으로 비례하지 않음. 일반적으로 압밀된 토양에서 지하수 수위의 변화가 유사할지라도 지반 융기의 양은 침하의 양과 동일하지 않음(Budhu and Adiyaman, 2010). 일반적으로 균질의 압밀된 토양에서의 지반 융기의 양은 유사한 유효응력 크기 하에서 지반 침하의 양에 20~30% 정도 밖에 되지 않음(Budhu and Adiyaman, 2010).
- 지하수 양수에 의한 지반 침하에 대한 연구는 지난 수십년 전부터 광범위하게 연구되어 왔으나(Gambolati and Freeze, 1973; Gambolati et al., 1973; Booker et al., 1985; Booker and Carter, 1986; Small and Booker, 1984; Leake, 1990; Leake, 1991; Leake, 1992; Leake and Prudic, 1991; Burbey, 2006; Harada and Yamanouchi, 1983), 아직까지 신뢰할 만한 예측도구는 아직 개발되지 않았음. 이러한 주요 원인은 a) 지반 침하/융기에 대한 불완전한 이해, b) 대수층의 복잡한 지질학적 구조, c) 관정의 위치, 밀도 및 깊이 그리고 양수양에 대한 최적의 기준의 결핍 그리고 d) 종합적인 자료의 부족임.
- 지반 침하를 예측하기 위한 대부분의 연구는 주로 공개 프로그램인 MODFLOW 모형을 이용하여 수행되어져 왔음(Leake, 1990; Leake, 1991; Leake, 1992; Leake and Prudic, 1991; Hill et al., 2000).
- 주입정 내로 물의 주입함에 의해 발생되는 지반 융기는 지반 침하에 비해 매우 드물게 일어나는 현상이며(Teatini et al., 2010), 이에 대한 연구는 극히 미비한 실정임. 이에 대한 이유로 지반 융기

는 환경적인 위험이 발생하지 않을 만큼 매우 작으며, 실제로 지반 융기에 대한 값 비싼 모니터링 시스템을 구축할 필요가 없다고 여겨졌기 때문임. Teatini et al.(2010)은 주입에 의한 지반 융기의 매커니즘에 대한 열-공극-탄성 이론을 제시하였으며, 미국, 캐나다 그리고 유럽 주요 ASR(Aquifer Storage and Recovery) 지역에서 발생된 지반 융기 관측 및 분석에 대한 사례연구를 제시하였음 Schmidt와 Burgmann (2003)은 InSAR(Interferometric Synthetic Aperture Radar)를 이용하여 관측된 1992년부터 1999년까지 발생된 미국 캘리포니아 주 Santa Clara 계곡 내 ASR 지역에서의 지반 융기의 결과를 제시하였음. 최대 지반 융기는 4cm이며, 이는 피압대수층의 poroelastic 반응을 반영하는 것임. 계곡 남쪽의 남동부에서는 계절적인 지반 융기 신호가 오랜 기간에 걸쳐 중첩되는 현상을 나타내었음. 장기간 그리고 계절적 지반 변형은 대수층 내에서의 지하수 수두의 변화에 의한 것으로 판단하였음. Amelung et al.(1999)와 Bell et al. (2008)은 미국 네바다 주 Las Vegas 계곡에 위치한 ASR 지역에 대해 Persistant Scatter InSAR을 이용하여 지반융기를 관측한 결과 계절적 최대 지반 융기는 인공함양의 첨두 기간 동안 매년 1월부터 3월까지 발생하였다고 제시하였음.

3. 연구개발 내용

▌2-1 지하 저수지 통합 운영 기술 개발

- 지하저수지의 목표 양수량과 목표수질기준을 달성하도록 제어하는 시스템 개발 및 지하저수지의 상시용수공급시스템으로서의 기능을 유지할 수 있는 기술 개발
- 지하저수지 시스템에 설치된 각종 센서로부터 측정된 자료의 무선 수신시스템과 모니터링 시스템, 그리고 자동 자료분석 시스템 모듈 개발 및 분석결과를 바탕으로 지하저수지 시스템 제어를 위한 무선송신 및 시스템 요소별 제어 모듈 개발
- 지하저수지 시스템 전체를 모니터링 할 수 있는 인터넷 또는 모바일기반의 모니터링 시스템 개발 및 실시간 모니터링 및 분석을 실시하면서 자료분석 결과를 바탕으로 지하저수지 시스템 제어가 필요한 경우 인터넷이나 모바일 기반에서 제어가능 기술 개발

▌2-2 비상 시 지하 저수지 운영 기술 개발

- 지하저수지 시스템의 각 하드웨어 요소들의 오작동 시 전체적인제어를 통해서 목표수량과 목표수질을 제어하고 유지하는 운영방안 확립 및 펌프 등 하드웨어의 오작동(malfunction) 또는 주입정 폐색등으로 시스템의 주요 요소가 작동이 불가한 경우 대응방안 확립

■ 주입수량 및 주입수질에 문제가 생겼을 경우 전처리 시설의 용량이나 능력을 고려한 최적운영방안 확립과 주입수량이 제한적으로 공급되는 비상 시 수질자료 모니터링을 통한 양수정 운영 방안 확립
■ 취수원의 수량과 수질에 심각한 문제가 생긴 경우 주입수량이 전혀 없는 경우에 양수정 운영 방안 확립 및 주입수 차단 시 실시간 수질 및 지반변형관련 관측자료 분석결과를 양수정 운영에 적용하는 방안 확립

▌2-3 시스템 유지관리 기술 개발

■ 주입정과 양수정으로 구성된 관정 시스템 내의 물리적, 화학적 그리고 생물학적 폐색현상 요인 분석 및 이에 대한 대책 방안 도출 및 도출된 대책 방안을 실증시설의 적용을 통한 검증 및 문제점 보완
■ 주입정 및 양수정에서의 부유물질에 의한 물리적 폐색현상 메카니즘 분석 및 수리모형실험을 통한 주입정 및 양수정 운영에 있어서의 최적 역세척 프로세스 기술 개발 그리고 실증시설을 통한 폐색저감 최적 운영 방안 검증 및 문제점 보완
■ 폐색현상 저감을 위한 관정 시스템 내 모니터링 시스템 구축 기술 개발과 수리모형실험을 통한 물리적 폐색현상 예측 모형 개발 또한 실증시설을 통한 물리적 폐색현상 예측 모형의 적용 및 보완

▌2-4 지반변형 해석 및 방지(저감) 기술 개발

■ 주입/양수에 의한 지반 융기/침하 원인 및 매커니즘 분석 및 주입/양수에 의한 지반 융기/침하 예측 기술 개발 및 검증
■ 지반 융기/침하 저감을 위한 주입정 및 양수정 운영 기술 개발 및 수리모형실험을 통한 주입정 및 양수정 운영 기술 검증 및 문제점 보안
■ 지반 융기/침하 감지를 위한 모니터링 구죽 방안 수립 및 모니터링을 통해 수집된 자료의 분석 및 지반 융기/침하 예측에 적용하는 방안 수립

4. 연구개발 추진방법

▌기술정보 수집 및 전문가 확보

■ 국내외 각종 전문학술지 게재 논문자료
■ 국내외 인공주입 전처리 및 지하수 용수처리 업체를 통한 시공 및 운영 정보교류
■ 지하 저수지와 관련된 국제 학회 및 세미나 참석
■ 기존 자문위원회 활용 및 국내외 관련 신규 전문가의 지속적인 확보

▌기존연구 결과 활용

- 기 수행되었거나 현재 수행되고 있는 수처리 및 오염물 저감특성 연구개발 결과를 활용하여 개선된 신규연구결과 도출
- 국내외 선진 기술 및 결과의 벤치마킹을 통한 국내에 적합한 기술의 조기개발

▌산학연 공동연구 수행

- 대학을 중심으로 오염물 저감 및 해석에 관한 핵심원천 기술 개발을 수행하며, 산업체는 상대적으로 우위를 점하고 있는 수처리 설계·운영 기술연구를 수행함.
- 이와 같은 역할분담 및 효율적인 연구를 통하여 완성도 높은 통합기술을 구축

▌개발기술의 검증

- 개발된 인공주입 전,후 수처리 기술의 현장 시험설비의 적용을 통한 성능의 검증 및 개선을 수행
- 시험설비 시설에서 공정 설계 및 유지관리 가이드라인을 바탕으로 설계 및 운영을 수행하여 가이드라인의 적절성 검증
- 시험설비 시설에서의 지층 및 체류시간별 유기물 농도 평가를 통하여 개발된 오염물 저감 모델링의 신뢰성 및 정확성 평가

▌개발기술의 수요처 확보를 통한 성과도출

- 효과적인 용수처리공정이 요구되는 국내외 인공함양 및 강변여과 적용 지역조사
- 추가적인 취수원 개발이 요구되는 지자체 및 관련기업 조사
- 물관련 산업 고성장이 이뤄지고 있는 아시아, 중동, 그리고 아프리카 지역 조사

5. 최종 성과물

▌지하저수지 통합 운영 기술

- 청정 대수층 저수지 개발 시스템 전반적 운영 및 관리 가이드라인
- 모바일 기반 모니터링 및 제어시스템 (software and hardware)

▌비상 시 지하저수지 운영 기술

- 시스템 오작동(System malfunction), 수량 및 수질문제, 재난상황 시 비상운영 가이드라인

▌시스템 유지관리 기술

- ■ 주입정 최적운영 및 시스템 유지관리 매뉴얼
- ■ 폐색현상 감지를 위한 모니터링 설비

▌지반변형 해석 및 방지(저감) 기술

- ■ 지하수 취수 및 양수로 인한 지반변형 해석 tool 및 유지관리 매뉴얼
- ■ 지반변형 모니터링 설비
- ■ 지반변형 저감을 위한 요소 기술 (특허 등)

6. 기대효과 및 파급효과

- ■ 대체수자원으로서 지하수 개발을 계획하고 있는 국내 지자체에 개발된 기술을 적용할 수 있음.
- ■ 동남아시아 등 하구에 발달된 충적 대수층으로 물을 이용하고자 하는 국가
- ■ 지하 저수지를 통한 대용량 취수 신공법과 이에 따른 신기술 등록을 통한 하구 지역 충적 대수층에 시공이 가능함.
- ■ 대규모 지하수 개발을 계획하고 있는 전 세계 대수층 발달 지역에 기술 수출 가능함.

7. 사업기간 및 소요예산

▌사업기간

- ■ 협약일로부터 5년

▌소요예산

- ■ (정부출연금) 2,085백만원

라. 3세부과제

연구과제명	청정용수 공급을 위한 수질관리 및 활용기술

1. 연구개발 목표

▌지속가능하고 신뢰성 있는 청정 수자원 개발 및 안전한 먹는물 공급을 위한 수질관리 및 경제성을 확보한 활용기술의 개발을 위해서 청정 지하저수지의 수질위해요소 사전관리 기술개발, 주입수 전·후처리 기술개발, 물리·지화학·생물학적 특성 평가 기술을 개발함.

2. 연구개발 필요성 및 기술동향

□ 연구개발의 필요성

▌음용수로서의 신뢰도 확보를 위한 청정 지하저수지의 수질 위해요소 사전관리기술 개발

■ 지표 공간에 한정되었던 수자원이 지하저수지로 확대됨에 따라 지하에 위치한 저수지의 직접 관리 및 오염 확인이 어려움. 오염발생 시 오염대처 또한 비용과 시간이 많이 소요됨. 따라서 청정 지하저수지의 관리를 위해서는 잠재 위해요소를 사전에 분석하여 효율적인 관리방안을 수립하고 적절한 모니터링이 필요함.

▌청정 지하저수지의 지속가능한 운영을 위한 주입수 전처리 기술 개발

■ 인공주입에 의한 지하저수지 기술은 본 연구를 통하여 최초로 제안된 기술이며 따라서 지하저수지 설계 및 운영 등의 제안된 기술의 원활한 적용을 위하여 주입 전처리 기술 및 지하수 용수처리 기술도 체계적인 연구의 수행이 필요함.

■ 주입 전처리 기술로 응집/침전, 오존처리, 여과등 다양한 물리·화학적 공정이 활용될 수 있으나, 경제성 및 유지관리성, 그리고 중복투자 등의 문제 등을 극복하기 위한 각 공정의 최적화 기술개발이 필요함. 또한 단일 공정에 대한 효율 평가 뿐만 아니라 전체 시스템의 효율 극대화를 위해서는 각 전/후 단위공정이 미치는 영향 분석 및 예측, 그리고 앞의 분석을 기반으로 한 최적 설계기술 개발이 필요함.

▌먹는물 공급을 위한 플랜트 최적 설계·운영·유지관리 통합 기술개발 (후처리 기술)

■ 기존 지하수 용수처리의 경우에는 철·망간 산화공정과 응집/여과등

의 최소한의 공정으로 구성되어 있어 대수층 내 염수유입 및 오염 발생 시 효과적으로 대응하기 어려운 단점을 가지고 있음. 이러한 수질문제에 적극적으로 대응할 수 있는 용수처리 설계, 운영, 유지관리기술을 확보할 필요가 있음.

- 기존 연구에서는 단위 공정 및 주요 오염원에 대한 처리 효율 평가에 집중되었음. 그러므로 각각의 단위공정이 합쳐질 경우 과잉된 설비 투자될 가능성이 있음. 따라서 본 연구에서는 각각의 단위공정을 통합 평가하여 각 세부공정의 전후 영향 및 처리효율을 평가하여 최적 설계방안의 도출이 필요함.
- 최적 설계된 청정 지하저수지 용수처리 기술은 간접 취수 관련 기술력 확보 및 기술의 완성도를 높여 신규 해외시장 진출을 위한 경쟁력 확보를 가능하게 할 것임.

▌물리 · 지화학적 대수층 수질의 개선 특성 평가 기술 개발

- 인공주입수의 수질변화예측과 이를 통한 지하저장수의 수질관리를 위해, 특성이 다른 지반내 미세환경에서 인공주입수의 수질변화에 대한 실험적 연구 필요. 이러한 대수층 내 정확한 수질거동 예측기술은 주입수 전처리 시설 및 인공함양수 후처리 시설의 과잉투자를 막고 청정 지하저수지의 수질 위해요소 사전관리기술을 보완하여 보다 안전한 상수원 개발에 필요함.

▌대수층 수질의 생물학적 개선특성 평가기술 개발

- 대수층 내의 생분해가 저하되면 미생물에 의해 저감되는 오염물의 양이 감소되며, 이는 수질관리에 있어서 문제점으로 나타나게 됨. 따라서 이러한 상황에 대한 대책으로 토착미생물의 생분해능을 활성화하는 적극적인 대응기술 개발이 필요함.
- 분석기법의 한계로 인하여 대수층의 미생물에 대한 정보는 제한적임. 하지만 생분해 기작을 이해하고 평가하기 위해서는 관련 미생물 군집에 대한 정보는 필수이며, 또한 특정 미생물 개체군(ex: 병원성 미생물)의 검출은 안정적이고 안전한 지하수질 확보에 필요함. 따라서 정밀도 높은 미생물 모니터링을 위한 분자생물학적인 기법의 개발이 필요함.
- 인공함양을 통한 대수층의 지하수를 상수원수로 확보하는 기술에 있어 biofouling은 본 기술의 운영에 있어 가장 큰 장애요인 중의 하나임. Biofouling에 의한 지하수의 회수율과 질을 저하를 방지하기 위한 biofouling control 기술의 개발이 요구됨.

□ 기술동향

▌음용수로서의 신뢰도 확보를 위한 대규모 청정 지하저수지의 수질 위해요소 사전관리기술 개발

■ 위해요소 관리는 전통적인 산업분야에서 이뤄졌으며, 발전소, 제조공장, 폐기물 처리, 식품 및 의약품 외 여러 분야에서 사용적용 되고 있음. WHO(World Health Organization)는 식품안전성을 위한 HACCP 이외에 먹는물, 재이용수, 폐기물처리 등에 관한 위해요소 관리 기준을 설정하고 매뉴얼을 배포하고 있음. 그리고 먹는물 안전확보방안 매뉴얼(WHO)을 통해 안전한 음용수 제공을 위한 관리방안 등을 제공하고 있음.

■ 특히 Greece의 Aspropyrgos 정수장에서는 수처리 및 공급과정 관리에 HACCP를 적용하는등 위해요소관리의 적용분야가 점차 넓어지고 있는 추세임.

▌1급수 지하저수지의 지속가능한 운영을 위한 주입수 전처리 기술 개발

■ 미국 내 ASR 적용 사례에 따르면 73% 이상이 전처리 없이 인공주입수를 대수층에 함양하는 것으로 나타남. 하지만 최근 ASR 적용사례를 보면 주입수의 다변화에 따라 다양한 고도처리 공정들이 적용되고 있는 추세임.

■ 그리고 전처리공정을 통하여 원수의 수질을 개선할 경우 대수층 내 clogging 발생이 상당부분 감소되는 연구결과들이 보고되고 있다. 따라서 인공 주입 및 추출의 운전의 안정성 증대를 위해 물리 · 화학 · 생물학적인 전처리 기술의 적용이 점차 증가되고 있으며 또한 전처리 공정을 통한 주입수 내 특정 오염물을 제거하는 연구가 이뤄지고 있음.

▌인공주입수를 음용수 수질기준으로 처리할 수 있는 플랜트 최적 설계 · 운영 · 유지관리 통합 기술개발

■ 국내의 경우 과학기술부(21세기 프론티어연구개발사업-수자원의 지속적 확보기술 개발사업)와 지식경제부(지질자원 요소기술을 이용한 기후변화대응/지구환경보전 기술개발) 등을 중심으로 강변여과 및 후처리에 대한 연구가 진행되었으며, 수처리 부분은 철·망간 및 입자성 물질 제거에 초점을 맞추어 연구되었음.

■ 국내·외 지하수 용수처리 공정의 실제 적용사례로 한국 창원에서는 강변여과수를 폭기, 급속여과, 활성탄여과 후 정수처리수로 사용하고, 독일의 뒤셀도르프와 뮐하임, 그리고 퀠른라인 정수장은 오존과 활성탄여과지, 그리고 소독공정 이후 정수처리수로 공급한다고 보고되고 있음. 일반적으로 간접취수원을 이용한 정수처리 공정은 기존 고도정수처리공정을 일반 정수처리공정으로 전환이 가능하므로 최소한의 정수처리 공정으로 구성되게 됨.

■ 미국의 ASR 정수처리 공정의 경우 57% 이상이 추가적인 정수공정이 없는 것으로 나타났으며, 추가적인 정수처리 공정이 들어간 경우는 철 · 망간, 그리고 pH 조절 등으로 나타났음.

▌물리 · 지화학적 대수층 수질의 개선 특성 평가 기술 개발

■ 비피압대수층(unconfined aquifer)을 대상으로 한 자연형 수처리 기술인 SAT는 양질의 수자원이 부족한 미국 arizona 지역과 이스라엘 등에서 연구개발이 활발히 이루어짐. SAT를 통해 포화도가 다른 지중 구간(불포화대 및 포화대)에서 용존유기물, 질소계 오염물, 인 등에 대한 정화효과를 오염물질의 거동(fate)관점에서 평가되고 있으며, 유럽 및 미국에서는 최근 SAT에 의한 신종유해물질(약물질, 환경호르몬) 제거효과에 대한 연구가 보고됨.

▌대수층 수질의 생물학적 개선특성 평가기술 개발

■ 피압대수층에서 NOM의 생분해와 철과 망간의 생물학적 전환에 대한 연구 결과가 보고됨. Cyanotoxins과 병원균의 제거/분해가 물리적 요인과 생물적 요인들의 조합으로 제거될 뿐만 아니라, 대수층 환경에서 병원성미생물들이 생존능을 상실하거나 포식자에 의한 포식 또는 토착미생물과 먹이에 대해 경쟁함에 따른 연구결과가 보고됨.

3. 연구개발 내용

▌3-1 음용수로서의 신뢰도 확보를 위한 청정 지하저수지의 수질 위해요소 사전관리기술 개발

■ 지하저수지 잠재 위해요소 분석
■ 모니터링을 통한 위해요소 예방 및 추적 기술 개발
■ 운영·관리 가이드라인 구축

▌3-2 청정 지하저수지의 지속가능한 운영을 위한 주입수 전처리 기술 개발

■ 주입수의 수질 및 지층 특성에 적합한 전처리 공정 도출
■ 고효율 전처리 시스템 개발을 위한 최적 설계, 운영, 유지관리 기술 도출

▌3-3 먹는물 공급을 위한 플랜트 최적 설계 · 운영 · 유지관리 통합 기술개발 (후처리 기술)

■ 용수 수준의 용수공급이 항시 가능하고 안정적으로 계획 공급수량을 처리할 수 있는 용수처리공정 도출

■ 고효율 용수처리 시스템 개발을 위한 최적 설계, 운영, 유지관리기술 도출

▌3-4 물리 · 지화학적 대수층 수질의 개선 특성 평가 기술 개발

■ 주입수와 배경지하수 수질차이, 대수층 구성물질에 따른 clogging 발생 특성 평가 및 예측기술
■ 인공주입수의 수질개선효과에 미치는 영향인자 규명 및 수질 예측기술 개발

▌3-5 대수층 수질의 생물학적 개선특성 평가기술 개발

■ 대수층의 생물학적 수질 개선특성조사
■ 대수층 미생물 모니터링 기술개발
■ 지하저수지의 biofouling 제어 기술개발

4. 연구개발 추진방법

▌기술정보 수집 및 전문가 확보

■ 국내외 각종 전문학술지 게재 논문자료
■ 국내외 인공주입 전처리 및 지하수 용수처리 업체를 통한 시공 및 운영 정보교류
■ 지하 저수지와 관련된 국제 학회 및 세미나 참석
■ 기존 자문위원회 활용 및 국내외 관련 신규 전문가의 지속적인 확보

▌기존연구 결과 활용

■ 기 수행되었거나 현재 수행되고 있는 수처리 및 오염물 저감특성 연구개발 결과를 활용하여 개선된 신규연구결과 도출
■ 국내외 선진 기술 및 결과의 벤치마킹을 통한 국내에 적합한 기술의 조기개발

▌산학연 공동연구 수행

■ 대학을 중심으로 오염물 저감 및 해석에 관한 핵심원천 기술 개발을 수행하며, 산업체는 상대적으로 우위를 점하고 있는 수처리 설계·운영 기술연구를 수행함. 이와 같은 역할분담 및 효율적인 연구를 통하여 완성도 높은 통합 기술을 구축

▌개발기술의 검증

- 개발된 인공주입 전,후 수처리 기술의 현장 시험설비의 적용을 통한 성능의 검증 및 개선을 수행
- 시험설비 시설에서 공정 설계 및 유지관리 가이드라인을 바탕으로 설계 및 운영을 수행하여 가이드라인의 적절성 검증
- 시험설비 시설에서의 지층 및 체류시간별 유기물 농도 평가를 통하여 개발된 오염물 저감 모델링의 신뢰성 및 정확성 평가

▌개발기술의 수요처 확보를 통한 성과도출

- 효과적인 용수처리공정이 요구되는 국내외 인공함양 및 강변여과 적용 지역조사
- 추가적인 취수원 개발이 요구되는 지자체 및 관련기업 조사
- 물관련 산업 고성장이 이뤄지고 있는 아시아, 중동, 그리고 아프리카 지역 조사

5. 최종 성과물

▌음용수로서의 신뢰도 확보를 위한 청정 지하저수지의 수질 위해요소 사전관리기술

- 광역 수질 모니터링 기술 및 오염물 역추적 기술
- 지하저수지의 연간 운영 지침 및 위기대응 시나리오
- 지하저수지 수질 안전성 확보를 위한 지하저수지 수질 위해요소 사전관리기술 매뉴얼

▌청정 지하저수지의 지속가능한 운영을 위한 주입수 전처리 기술

- 시스템 운영시 수질변화 특성 산출
- 전처리 시스템 설계 매뉴얼
- 전처리 시설 운영관리 매뉴얼
- 전처리 공정 기술검증 보고서

▌먹는물 공급을 위한 플랜트 최적 설계 · 운영 · 유지관리 통합 기술 (후처리 기술)

- 용수처리 시스템 기술 및 수질검증
- 유지관리 시스템 가이드라인
- 운영 프로그램(S/W)
- 최적설계 및 운영 기술검증 보고서

▌물리 · 지화학적 대수층 수질의 개선 특성 평가 기술

■ 대수층 내 오염물 거동 및 공극폐색 예측 모델 (전산 S/W)
■ 지층 특성별 오염물 물리 · 지화학적 거동 평가 보고서
■ 물리 · 지화학적 수질개선 특성 기술검증 보고서

▌대수층 수질의 생물학적 개선특성 평가기술

■ 부지 특이적 생분해 특성에 따른 생분해 진단 지침
■ 생분해 증진을 위한 적극적 대응방안
■ 생분해 메커니즘 평가 및 모델링 도구
■ Biofouling 방지 위한 최적화된 전처리 방법
■ 생물학적 수질개선 특성 기술검증 보고서

6. 기대효과 및 파급효과

■ GWI(Global Water Intelligence)에 따르면 2010년 4280억 달러규모로 추정되는 세계 물시장이 2025년에는 8650억 달러에 이를것으로 예측하고 있음. 이와 같은 규모는 반도체 산업이나 조선 산업보다 큰 것으로 예상되며, 동아시아와 중동, 중국, 북아프리카 지역의 10% 이상의 물산업 고성장에 기인된 것으로 분석되어 짐. 특히 지표수 중심의 취수가 아닌 미래 공공수요를 대응하고 지속가능한 지하 저수지 개발과 같은 대체 수자원 분야의 국내·외 미래성장이 크게 증가 될 것으로 예상됨.

■ 추가적인 상수원 개발이 필요 경우, 청정 지하저수지는 타 대안에 비하여 경쟁력이 확보된 기술로 평가됨. 또한 수질의 개선에 따른 국민 건강의 편익 증진과 물 분쟁 저감, 먹는 물에 대한 국민의 신뢰성 확보 등의 사회적 비용을 고려한다면 본 기술의 적용 확대가 클 것으로 기대됨.

■ 기 적용된 간접취수 시설과 연계된 용수처리 공정은 최소한의 공정이 적용된 것으로 염수 및 이온성 오염물, 그리고 대수층 오염이 발생된 경우와 같은 비상시에는 적절한 대응이 어렵기 때문에 국내·외 신규시설 및 이미 설치된 간접취수 시설과 연계하여 본 연구에서 개발하고자 하는 용수처리 공정의 도입이 증가될 것으로 기대됨.

7. 사업기간 및 소요예산

▌총 연구기간: 5년
▌(정부출연금) 1,905백만원

※ 총 정부출연금 및 당해연도 정부출연금은 향후 선정평가 결과 또는 정부예산 사정에 따라 조정될 수 있음

※ 기업참여시 기업부담금은 연차별로 “국토해양부소관 연구개발사업 연구규정”의 기준을 따름

마. 4세부과제

연구과제명	건기에 30일 이상 – 50m^3/d 이상 생산능력의 지하저수지 기술 개발
1. 연구개발 목표	
▌우기주입-건기회수 기술을 이용한 건기에 30일 이상 – 50m^3/d 이상 청정 용수를 생산할 수 있는 소규모 지하저수지 설계, 구축, 운영 및 유지관리 기술 개발	
2. 연구개발 필요성 및 기술동향	
□ 연구개발의 필요성	■ 우기주입-건기회수 기술은 우기와 건기가 뚜렷한 기후를 가진 지역에서 연중 이용가능한 지표수 발달이 빈약하여 발생할 수 있는 건기의 물 부족 현상을 해소하는 데 기여할 수 있는 기술임. 우리나라에서는 인구밀도가 낮은 도서 및 해안지역, 그리고 산간지역에서 유용한 수자원 확보 대안이 될 수 있음. ■ 상술된 지역에서도 우기에 발생하는 잉여 지표수를 대수층에 주입하고 건기에 회수하는 방법으로 건기의 물 부족을 완화시킬 수 있음. ■ 소규모 지하저수지의 주 수혜지역은 도서 및 해안지역, 그리고 산간 등의 낙후 지역임. 동 지역은 약간의 가뭄에도 급수가 제한되는 등 물 사정이 매우 열악함. 특히 도서 지역의 경우 다른 지역의 물을 공급하는 것이 아예 불가능하거나 매우 어려운 경우 약한 가뭄도 심각한 결과를 초래함. ■ 이러한 지역의 경우 대부분 인구밀도가 낮아 필요한 수자원량이 많지는 않지만 요구되는 수자원 개발의 경제성이 낮음을 의미함.따라서 국민의 기본권인 깨끗한 물을 공급받을 권리를 충족시키기 위한 연구에 정부가 주도적으로 지원해야함은 당연함. ■ 도서, 산간지역은 유역면적이 협소하고, 지표수 발달이 미약하여 안정적인 신규 용수공급원 개발 곤란 ■ 해안지역은 염수침입에 따른 지하수환경 훼손으로 양질의 지하수원 확보 곤란 ■ 따라서 산간, 도서·해안 등 지역특성을 고려하여 인공함양기술을 이용한 소규모 지하수자원 확보기술 개발이 필요함 ■ 지하수 인공함양은 자연적인 물의 순환계에서 하천을 통해 바다나 대기로 방출되는 물의 일부를 자연환경을 파괴하지 않고 포획하여 인위적으로 지하에 주입함으로써 지속적으로 지하수자원을 이용할 수 있는 녹색성장기술임 ■ 산간, 도서·해안지역에서는 대용량의 수원확보가 곤란하여 지역특성(지형/지질, 인구, 생활패턴 등)을 고려한 소규모 지하수원 확보

만으로도 효과를 높일 수 있음

- 홍수기 · 평수기 등 강우 발생 시에 지하저수지를 활용한 저류량 증대를 통해 갈수기나 가뭄에 대비한 지하수량 확보

□ 기술동향

▌환경부에서는 1997년부터 도서지역 식수원 공급사업을 시행 중에 있음. 1단계 사업으로 97년부터 2004년까지 23개 시군, 123개 도서에 국고 2181억원을 투자하여 수원지 및 해수담수화 시설, 정수시설, 지하수 관정, 관로 등 사업 시행 (문유리 등, 2009).

▌2005년부터 2009년까지 시행된 2단계 사업에서 21개 시군 109개 도서의 상수도 확충사업을 위하여 총 3980억원 투자하였음. 사업 내용으로는 관정, 수원개발, 정수시설, 해수담수화 시설 등이 포함됨. 시설 운영 및 유지를 위한 전문인력 부족, 운영비 과다 등의 사유로 41개 시설을 수자원공사에 위탁 운영 (문유리 등, 2010)

▌2010년부터 2014년 사이에 시행되는 2단계 수정 사업에서 19개 시군에서 102개 상수도 확충 사업에 총 4075억원의 사업비 추정. 2단계 수정사업에서는 거주인구가 30인 이상인 도서에 소규모 수도 시설 사업비 지원. 주요 사업내용으로는 수원지 및 정수시설 설치, 배수지 및 관로, 지하수 개발, 해수담수화시설 등이 포함됨.

- 2008년 현재 전국 유인도서 482개의 거주인구는 82만명임(행정안전부, 2008). 이중 상수도를 공급받는 인구는 29%에 불과하며 나머지는 간이급수시설, 우물, 지붕수 등에 의존하고 있음.
- 문유리 등(2010)은 도서지역에서 이용가능한 용수원별 특성 비교, 분석을 통하여 물 공급 계획의 수립절차를 제안하고 시범 적용한 바 있음.
- 이정호 등(2007)은 서남해안 지역의 지하수 이용 현황 및 관리 실태를 조사분석하고 그를 토대로 해안지역 수자원관리 개선방안에 대한 연구를 수행하였음. 연구내용에는 기존 문헌 분석을 통한 해안 지역 지하수 해안유출량 및 개발 가능량 평가 방법, 지하수 모델링 방법, 그리고 해수침투 관측현상 등이 포함됨.
- 문유리 등(2009)은 도서지역의 안정적 용수공급방안의 기반을 닦기 위해 용수 이용 현황 및 관리 실태를 조사하고 문제점을 분석하였음. 연구는 문헌조사와 설문조사를 위주로 수행되었음. 조사결과공급량 기준으로는 지표수 비중이 가장 컸으나 도서 개수 기준으로는 지하수가 가장 비중이 크게 나타났음. 또한 대부분의 도서가 단일 용수원에 의존하고 있어 비상상황에 취약한 것으로 나타났음. 수원별 주요 문제점으로는 지하수의 경우 용수량 부족이나 해수침투가, 지표 저수지의 경우 유기물 유입과 높은 수온으로 인한 부영양화가, 해수담수화 시설의 경우 전문 관리 부재 및 고가의 운영유지관리비 등이 파악되었음.

■ 한수영(2003)과 박남식(2004)은 Darcy 법칙을 이용한 지하수 해안유출량을 평가기법을 제시하였음. 한강권역을 제외한 낙동강, 영산강, 섬진강, 금강 권역에서 평가된 지하수 해안유출량은 권역 강수총량의 0.5%에서 3.2%로 평가되었음. 이를 바탕으로 권역의 지하수함양율을 평가하였으며 이는 9.2%~13.4%의 범위로 나타났음.

■ 박남식(2011)은 한국수자원공사에서 위탁 관리하고 있는 서남해안 도서지역 해수담수화 시설 40여 곳에 대한 비용을 분석하고 절감방안을 제시하였음. 2005년부터 5개년 동안의 비용분석 결과 유지보수비가 50.6%, 인건비가 36.9%, 그리고 에너지비가 7.8%의 순으로 나타났음. 염도는 에너지 비용에는 물론, 가장 큰 비중을 차지하는 유지보수 비용에도 직접적 영향을 끼치는 것으로 조사되었음. 담수화 비용 절감을 위해서는 저염도 원수 확보가 필요함.

3. 연구개발 내용

▌4-1 우기주입-건기회수 지하저수지 설계 기술

■ 인공함양을 통해 지하수 확보가 가능한 후보지점 선정
■ 효과적인 주입 및 저류가 가능한 함양기술 개발
■ 한국형 소규모 지하저수지 설계 기술 개발
- 암반 대수층 또는 소규모 충적층의 지하저수지 포텐셜 해석기술
- 주입 기간 및 주입량 설계 기술
- 대수층 유효저류량 및 저장 기간 해석 기술
- 회수 기간 및 회수량 해석 기술
- 수질 변화특성 분석 기술
- 시범설계 및 개발 가능 지역 평가

■ 실험실 수리모형 기술 검증
- 실험실 수리모형 설계 및 구축
- 다양한 시나리오 도출
- 실험 검증을 통한 기술의 완성도 제고

■ 배후 지하수 흐름과 주입 수의 상호관계
■ 수리지질 등 불확실성을 고려한 설계 기술
■ 위험도관리 기술

▌4-2 소규모 지하저수지 운영 및 유지관리 기술

■ 소규모 지하저수지 최적 운영기술
- 지역별 건기의 지속기간 및 물 부족 실태 조사
- 지역별 우기 강수량 패턴 분석을 통한 주입 기간 도출
- 우기 잉여 지표수 확보 방안 및 주입 방안 도출
- 배후 지하수의 흐름 특성 분석

- 회수율 극대화 방안

■ 단일공 주입-양수 성능 시간변화 평가 기술
- 주입 기간 및 주입량 설계 기술
- 대수층 저장 기간 해석 기술

■ 함양시설 유지관리 기술
- 주입(함양)량 및 양수량 지속을 위한 유지관리 기술
- 폐색(관정 및 함양지) 원인 분석 및 대책 수립

■ 주입, 저장 그리고 양수가 교차하며 주기적으로 이루어지는 관정의 운영기술

■ 수량 · 수질을 고려한 지하수 관리 최적화 시스템 개발

4. 연구개발 추진방법

□ 추진전략

▌핵심원천 기술 확보를 위한 세부과제 연구의 독립성 부여와 total solution 확보를 위한 세부과제 간 유기적 연계를 균형있게 추진함. 핵심추진전략은 다음과 같음.

■ 핵심 원천기술 확보 중심

■ 지하저수지 시험시설에서의 기술 검증

▌핵심 추진전략 실행을 위한 전략적 접근 방법

■ 국내외 학연산관 전문가 최대한 활용

■ 세부과제의 행정적 업무 최소화를 통한 연구집중도 제고

■ 세부과제 및 협동과제의 유기적 연계

■ 수도 및 지하수 분야 산업체의 적극적 참여 유도

■ 중앙정부, 광역 및 기초 지방자치 정부와 긴밀한 협조

□ 추진체계

■ 산·학·연 공동연구를 기본으로 하며, 필요 시 관련 분야에서 선도적 위치에 있는 해외 전문가와 공동연구를 추진할 수 있음.

■ 지자체, 공사, 기업 등 기술수요자의 측면에서 연구를 살펴 볼 수 있는 전문가가 연구에 참여해야 함.

■ 연구신청자는 과다한 기관수의 참여 및 연구계획 편성으로 인한 추진체계의 비효율성을 최대한 지양하고, 반드시 필요한 기관으로만 구성하여 연구추진의 효율성을 도모해야 함.

5. 최종 성과물

■ 우기주입-건기회수 기술을 이용한 건기에 30일 이상 - 50m^3/d 이상 청정 용수를 생산할 수 있는 소규모 지하저수지 설계, 구축, 운영 및 유지관리 토탈솔루션 기술 및 적용 매뉴얼

■ 국내 소규모 지하수저수지 조성 가능 후보지점

■ 지역특성에 적합한 맞춤형 소규모 인공함양기술
■ 수리모형 검증 보고서

6. 기대효과 및 파급효과

▌사회적 측면

■ 지진, 지진해일, 원전사고 등의 재난과 수질 사고 또는 범죄 등으로부터 안전한 수원확보
■ 약간의 가뭄에도 물 부족이 빈발하는 해안, 도서 및 산지에서 물부족 해소에 기여
■ 기후변화로 예상되는 가뭄의 강도 및 빈도의 증가에 대비한 친환경적 수자원확보에 기여
■ 깨끗한 원수 확보로 국민들의 불신 요인 제거
■ 취수원 다변화로 물 안보 제고

▌경제적 측면

■ 해수담수화, 해저관로, 지표 저수지 등의 현재 대안에 비하여 수원조성 비용 대폭 절감.
■ 저렴한 생산원가로 수돗물값의 인상 억제

▌기술적 측면

■ 단일 공 또는 복수 관정 지하저수지 최적 설계 및 운영 기술 독자적 확보
■ 인공주입정 관리 기술 자립
■ 주입전 수처리 기술 확보
■ 장기 가뭄 대처 기술 확보
■ 지표수, 저수지와 달리 홍수시 탁도, 갈수시 조류 발생 등 수질오염이 없고, 수온이 거의 일정
■ 지상시설의 규모가 적고, 환경오염 발생이 거의 없음.

7. 사업기간 및 소요예산

▌사업기간

■ 협약일로부터 5년

▌소요예산

■ (정부출연금) 936백만원

제 2 절 평가기준

▌제안 과제의 평가 전략은 다음과 같음.

- 본 기획연구에서 제안하는 RFP에서는 개발 기술이 도출되지 않고 개발 목표만을 제시하여 제안자로부터 좋은 아이디어를 유발할 수 있도록 제시됨.
- 제시된 목표를 얼마나 좋은 아이디어와 연구조직으로 달성할 수 있는지를 우선 평가함.
- 연구추진체계에서 제시된 개발목표를 달성하기 위해 해당분야의 적합한 기관이 참여를 하고 있는지와 개발 기술의 조기 실용화와 기술이전을 위해 적절한 기관이 개발단계부터 참여하고 있는지 평가함.
- 국외 전문기관이 참여시 가점 부여 필요함. 본 기술은 해외 물 시장 및 신도시 건설에 적용이 가능하므로 국외 전문기업 참여시 가점 반영 검토. 전문기관이 없을 시에는 전문가와의 국외 공동연구 또는 위탁연구 수행 바람직함.
- 본 RFP에서는 각 주요 요소기술별 성과지표와 연구개발 목표를 제시하므로 제안자는 그 최종목표 달성을 위해 어떠한 세부 목표를 설정하는지 그 적정성을 평가함.

▌표 6.1 제안서 평가 기준

평가 기준	세 부 항 목	배점
연구개발 목표 (15점)	■ 최종 목표 및 연차별 달성 목표의 명확성-타당성	5
	■ 연차별 성과지표의 목표 적정성	5
	■ RFP 연구목표와의 부합성	5
연구개발 내용 (30점)	■ 연구개발 내용의 목표실현 가능성	15
	■ 연구개발 내용의 독창성 및 차별성	15
추진전략 및 계획 (20점)	■ 연구추진 전략 및 체계의 적정성 (관련 전문기관이 각 세부별로 참여하는지 평가) (실용화를 위한 연구추진체계의 적정성)	15
	■ 연구기간 및 연구개발비의 적절성	5
국제공동연구 (10점)	■ 국제공동연구 또는 국외 전문가 활용계획의 적정성	10
연구성과물 활용계획의 구체성 및 달성가능성 (10점)	■ 연구성과물의 활용계획 및 방안의 구체성	5
	■ 연구성과물의 기대효과(정책적, 사회적, 경제적 파급효과)	5
연구진 구성의 전문성 (15점)	■ 연구진의 전문성 및 구성의 적정성	15

제 3 절 최종평가 의견을 반영한 연구단 RFP

▌최종평가 의견을 반영하여 수정된 연구단 RFP는 다음과 같음

연구과제명	대규모 청정 지하저수지 개발
1. 연구개발 목표	
	○ 청정 수도 원수 공급 및 세계 최고수준의 청정 지하저수지 토탈 솔루션 확보 - 천만 m3급 용수 저수 및 십만 m3/day급 청정용수 생산이 가능한 지하저수지 최적 설계·구축·운영·유지관리 기술 개발 - 백만 m3급 용수 저수 및 2,000 m3/day급 청정용수 생산 시험시설 구축 및 실증 - 건기에 30일간 50m3/day 이상 생산 가능한 우기주입-건기회수 지하저수지 설계·구축·운영·유지관리 기술 개발 ※ 청정지하저수지 : 하천 하구의 퇴적층이나 도서・해안・산간 지역의 대수층에 지표수를 주입하여 수자원을 추가 확보하고 양수를 통하여 청정용수를 생산하는 시설
2. 연구개발 필요성 및 기술개발 동향	
□ 연구개발 필요성	○ 현재 댐으로 대표되는 집중형 대용량 수자원 확보 기술은 경제적으로는 우수하나 사회·정치·환경적으로는 지역 간 물 분쟁으로 인한 갈등이나 악화되는 지표수 수질·수질 사고, 극한 가뭄시의 비상용수 대응 등에는 취약 ※ 우리나라는 가용 수자원 대비 물수요 비율이 40%이상으로 OECD국가 중 가장 심각한 물부족 국가(OECD, '2050 환경전망', '12.3) ○ 국내 일부지역에서는 지역 간 갈등으로 인해 지역간 물 이전이 사실상 어려워 지자체별로 심각한 어려움을 겪는 사례가 발생하고 있는 바, 물 수요지에서의 물확보 방안 마련이 시급 ※ 국내 수도권, 강원권, 호남권 등의 지역에서도 2000년 이후 국내 정부, 공기업, 지역 간 수자원관련 분쟁 건수는 58건으로 연 평균 6건에 달함 ※ 부산지역의 경우 용수원의 하천표류수 의존도가 94%에 달하고 있어 하천 상류 지역 오염시나 강수량 감소시 대처가 사실상 불가능

	○ 기후변화 등으로 인해 심화될 것으로 예상되는 가뭄과 지표수 환경 악화에 대비하기 위한 물 공급 안정성 제고와 용수원 다변화를 통한 물 안보도 제고가 필요함 ○ 이에 따라 양질의 비상용수원을 확보하고 상시용수량을 유지할 수 있는 대안으로 제시되고 있는 청정 지하저수지의 구축 및 운영을 위한 국내 순수기술의 개발 및 적용이 요구됨
□ 국외 기술동향	○ 전통적인 지표수 취수원에 대한 대안 중 하나로 지하수 인공함양에 대한 관심이 일찍부터 선진국에서는 있어왔으며, 다양한 방법의 지하 저수 및 활용기술에 대한 시도가 있어왔으나 대부분 인공함양, 강변여과 등의 1차적 방법에 그치고 있음 ○ 최근 10여년 사이 선진국에서는 지하 저수 기술에 대한 관심이 고조되면서 지하 저수 적용 사례가 빠르게 증가하는 추세임 ○ 전 세계적으로 ASR을 포함한 대수층 인공주입 시설의 용량은 10억 갤런/일(379만 m^3/d)이며, 2020년에는 용량은 50억 갤런/일 용량에, 평균 설계 및 설치비용은 $400 백만에 달 할 것으로 예상 (GWI 2010, Pyne) ※ ASR(Aquifer Storage and Recovery) 하나의 관정으로 인공주입/취수 수행 ○ 미국의 경우 1983년 미국 플로리다에서 최초로 상업적 용도로 사용된 이후 현재 95개 이상의 인공주입 시스템이 운영 중이며, 그중 미국 라스베가스에서 세계 최대용량(594,245 m^3/d))의 ASR 시스템을 비롯하여 캔사스주 Wichita시(150천㎥/day급), Okeechonee시의 연구용 ASR Pilot Plant(18,000㎥/day급), 플로리다 Paace River ASR 시설(68,000㎥/day급), 텍사스주 Kerrville ASR 시설(9,500㎥/day급) 등이 구축되어 운영 중으로, 미국에서는 ASR을 주로 음용수 공급 목적으로 활용하고 있음 ○ 미국의 ASR의 보급 확산에 대한 3가지 주요 이유는 정수처리시설 대비 저렴한 설치비용과 계절적 강우 차이의 효율적 활용, 각종 재난에 따른 정수처리시설 기능 불능시 부족한 음용수 공급, 그리고 처리공정 단순화에 따른 운영비용 절감 등임 ○ 미국내 ASR 적용사례의 73% 이상이 전처리 없이 인공주입수를 대수층에 함양하는데 이는 대수층에서 충분히 지표수의 오염물 제거가 가능하여 먹는물 수질기준에 적합한 용수가 생산되었기

	때문이었으나, 최근 들어 하천수 외의 강우유출수, 하수처리수 등 주입수의 다변화에 따라 다양한 고도처리 공정의 적용이 늘어나는 추세임 ○ 중동 지역에서는 담수 의존성이 높은 도시의 장기간 수자원 저장 공간 확보, 폐수 처리수의 재활용, 염수의 침입 방지 및 침투 경로 우회 목적으로 ASR을 도입, 활용하고 있음 ○ 아부다비 수전력청 (Abu Dhabi Water and Electricity Authority)은 아부다비 시와 인근 지역의 수자원 비상시를 대비하여 90일간 181,800 m^3/d 용량의 중동 최대 규모의 ASR 프로젝트를 진행중임
□ 국내 기술동향	○ 국내에서는 현재까지 강변여과수 개발, 지하수 인공함양 기술 개발 등의 분야에 연구가 치중되어 왔으며, 대수층을 활용한 지하저수 및 활용기술에 대한 연구사례는 없음 ○ 그동안 수행된 주요 연구개발로는, “프론티어 수자원의 지속적 확보기술사업단”(교육과학기술부, ’01~’11)의 하천수의 유도함양을 이용하는 강변여과수 기술 개발, “수변지하수활용 고도화(국토해양부, 2011~2016)” 연구 등이 있음 ○ 그 중 제주도 한천 저류지에 설치, 운영되고 있는 대규모 인공함양정은 홍수 저감용 저류지에 설치되어 용수확보보다는 유출저감효과에 초점이 맞추어져 있고, ‘수변지하수 활용 고도화’의 인공함양기술은 동절기 비닐하우스 농경지의 수막재배용 농업용수 추가 확보 및 지하수위 유지/복원을 위한 기술 개발로, 음용수 수준의 수질의 상시 저수량 및 비상용수 확보를 기술개발 목표로 하는 R&D는 그간 추진된 바 없음
3. 연구개발 내용	
	□ 총괄과제 : 청정 지하저수지 통합 관리 및 제도 연구 ○ 연구 개발, 기술검증 및 성과 총괄 관리 ○ 시험 시설 부지 확보 ○ 기술검증 연구 총괄 ○ 지하저수지 적용 활성화를 위한 법/제도 개선 방안 수립 및 경제성 평가, 시장 진출 전략 및 사업화 방안 개발 ○ 청정 지하저수지의 수질위해요소 사전관리기술 개발

○ 청정 지하저수지 DCOM (Design, Construction, Operation & Maintenance) Total Solution 매뉴얼 작성

□ 세부과제 1 : 대규모 청정 지하저수지 구축 기술 (목표 저수량 1,000만m^3급)

○ (1-1) 지하저수지 설계·운영·유지관리 기술 개발
- 대규모 청정 지하저수지 최적 설계기술 개발
- 지하 저수지 주입 및 양수 계통 통합운영 기술 개발
  ※ 비상 시 운영 및 유지관리, 폐색현상 발생 시 대응 운영 및 유지관리 기술 포함
- 주입 전/양수 후 음용수 기준 수처리 기술 개발
- 시험 시설 기술검증
- 대규모 청정 지하저수지 설계/운영/유지관리 매뉴얼 작성

○ (1-2) 지하저수지 시스템 시공 기술
- 대규모 청정 지하저수지 시스템 통합 시공 기술 개발
- 시험시설 (저수량 100만m^3 급-일 생산량 2천m^3 급, 단, 모니터링 계통은 제외) 구축 및 시범 운영
- 시험시설 운영보고서 작성
- 대규모 청정 지하저수지 시공 매뉴얼(시방서) 작성

□ 세부과제 2 : 대규모 청정 지하저수지 부지 특성 평가 및 모니터링 기술

○ (2-1) 지하저수지 수리지질 특성 및 수질개선 효과 평가 기술
- 하구 퇴적층 수문학적/수리지질학적 특성 조사 및 분석 기술 개발
  ※ 대수층의 3차원 구조 분석 기술, 지하수 수위/수질자료 정밀분석 기술 포함
- 하구 퇴적층 특성 평가 매뉴얼 작성
- 대수층 특성별 물리적 · 지화학적 · 생물학적 수질 개선효과 평가 및 예측 기술 개발
  ※ 오염물질 확산현상 분석 기법 개발 포함
- 주입정/양수정의 물리적·지화학적·생물학적 폐색현상 원인 분석, 예측 및 대응 기술 개발
  ※ 폐색현상 발생시 대응기술 개발 후 1-1세부와 연계하여 운영기술에 반영
- 대수층 수질변화특성 평가 매뉴얼 작성
- 국내외 대규모 청정 지하저수지 후보지 분석

- 수리지질 특성 분석기술 및 수질개선특성 분석기술 시험시설 적용
- 청정 지하저수지 시험시설 부지 특성 및 수질개선 특성 평가 매뉴얼 작성

○ (2-2) 지하저수지 모니터링 기술
- 지하저수지 최적 모니터링 기술 개발
- 시험시설 내 모니터링 시스템(지반변형 관련 장치 제외) 설치 및 기술 검증
- 지하저수지 모니터링 매뉴얼 작성

○ (2-3) 지하저수지 지반변형 특성 평가 기술 개발
- 주입/양수에 의한 융기·침하 등 지반변형 매커니즘 분석 및 예측기술 개발
- 지반변형 감시 모니터링 방안 수립
- 지반변형 평가 매뉴얼 작성

□ 세부과제 3 : 도서·산간지역 우기주입-건기회수 소규모 청정 지하저수지 구축 기술 (건기 30일 이상 50m^3/d 이상 생산규모)

○ (3-1) 우기주입-건기회수 소규모 지하저수지 설계 기술
- 대상지 선정기법개발
- 최적 규모, 최적 처리공정 선정기법 개발
- 수리지질 등 불확실성을 고려한 소규모 지하저수지 설계 기술 개발

○ (3-2) 소규모 지하저수지 운영 및 유지관리 기술
- 주입, 저장, 양수의 주기적 교차 운영이 가능한 관정 시스템 운영 및 유지관리 기술 개발
- Lab Scale 수리모형 실험을 통한 기술 검증

4. 연구개발 추진방법

□ 추진전략

○ 단계별 목표를 수립하고, 그에 적합한 추진전략 및 일정계획 수립

※ 본 과제는 단계별로 연구계획을 수립하여 다년도 협약 체결 예정

<1단계(1～3차 년도, 36개월)>
- 청정 지하저수지 개발을 위한 부지조사, 설계, 시공, 운영 및 유지관리 분야의 핵심요소기술 개발

	- 지하 저수지 시험시설 설계 및 시공 완료 <2단계(3～5차 년도, 24개월)> - 개발기술의 시험시설 적용 및 기술 보완 - 하구 퇴적층에서 저수량 1,000만㎥ 확보를 위한 대규모 청정 지하저수지 및 우기주입-건기회수 소규모 지하저수지 Total Solution 완성 ○ 핵심원천 기술 확보를 위한 세부과제 연구의 독립성 부여와 total solution 확보를 위한 세부과제 간 유기적 연계를 균형있게 추진 - 핵심추진전략 1 : 원천기술 확보 - 핵심추진전략 2 : 지하저수지 시험시설 기술 검증 ○ 연구성과의 실용화 성공률 극대화를 위한 전략 수립 - 연구내용, 개발기술, 성과물간 연계가 표출되는 기술개발 및 성과 로드맵 수립 - 개발기술의 현장적용을 통한 검증 강화 및 적용사례 확보 - 실직적인 기술사업화 추진을 위한 실시기업 연계 및 실시기업의 기술개발 참여도 확대전략 수립 ○ 각 단위과제별로 현장적용할 기술, 검증내용(달성목표), 검증방법, 검증시기, 현장적용 대상지(테스트베드 또는 시범사업)의 범위 등을 구체적으로 설정하고, 관계기관과 사전적·지속적 협조체계를 구축하는 등 개발기술의 현장적용을 위한 전략 수립 ○ 정부(지자체등) 및 관련 기업·공사 등 기술수요처와의 유기적 협조체제 구축 - 연구성과를 현장에 적용시킬 수 있도록 관련 기술수요처 의견수렴 - 현장 애로사항 및 의견을 연구개발에 반영 ○ 1세부 및 2세부의 기술개발 내용을 통합검증하고 보완하기 위한 시험시설물 구축 및 운영 ○ 기 수행(종료과제, 중단과제) 및 현재 수행중인 동 과제 관련 연구개발 결과와의 구체적인 연계·통합 및 활용방안을 연구계획에 포함 ○ 개발결과물의 특허출원 등을 통한 실수요처 기술이전 적극 추진 및 현장 활용성 도모
□추진체계	○ 본 공모과제는 기초·원천, 실용화 등 다양한 성격의 연구를 포함하므로, 산학연 공동연구진 구성을 지향함

※ 관련 기술을 확보한 연구기관 및 성과물을 활용할 수 있는 산업체 참여 유도

○ 참여기업은 참여하고자 하는 과제와 관련된 연구 또는 사업 수행실적이 있고, 과제추진시 역할(자료·기술조사 또는 제공, 시험시공 현장 제공 등)이 명확하여야 하며, 연구개발결과를 직접 활용하고자 하는 기업에 한함

○ 필요시 외국 전문가 또는 외국기관 활용

○ 각계 전문가 자문단을 구성하여, 연구개발의 기술적·정책적·경제적 보완사항에 대한 자문

○ 국토해양부 및 홍수통제소, 지자체 등 최종 수요처의 의견을 반드시 수렴하여 현장 활용이 가능한 형태로 성과 도출

○ 연구신청자는 과다한 기관수의 참여 및 연구계획 편성으로 인한 추진체계의 비효율성을 최대한 지양하고, 반드시 필요한 기관으로만 구성하여 연구추진의 효율성을 도모할 것

○ 연구진의 연구참여율을 높여 연구집중도 제고 필요

5. 최종 성과물

□ 주요 최종성과물

○ 천만 m^3급 용수 저수 및 십만 m^3/day급 청정용수 생산이 가능한 지하저수지 설계, 구축, 운영 및 유지관리 기술 패키지 (설계, 구축, 운영 및 유지관리 매뉴얼 포함)

○ 백만 m^3급 용수 저수 및 2,000 m3/day급 청정용수 생산 시험시설

○ 건기에 30일간 50 m^3/day 이상 생산 가능한 우기주입-건기회수 지하저수지 설계·구축·운영·유지관리 기술 패키지 (설계, 구축, 운영 및 유지관리 매뉴얼 포함)

□ 세부과제별 최종성과물

□ 총괄과제 : 청정 지하저수지 통합 관리 및 제도 연구

○ 연구단 운영 보고서
○ 제도개선 방안, 경제성 평가 및 사업화 방안보고서
○ 국내외 유망지역 선정 및 시장진출 전략 보고서
○ 수질위해요소 사전관리 매뉴얼
○ 청정 지하저수지 DCOM(Design, Construction, Operation & Maintenance) Total Solution 매뉴얼

□ 세부과제 1 : 대규모 청정 지하저수지 구축 기술 (목표 저수량

1,000만m^3급)

○ (1-1) 지하저수지 설계/운영/유지관리 기술
- 지하저수지 주입정-양수정-펌프-관망 계통 최적화 전산프로그램(s/w)
- 시험시설의 수처리 계통 및 주입정-양수정-펌프-관망 계통 설계도
- 시험 시설 기술 검증 보고서
- 설계, 운영 및 유지관리 매뉴얼

○ (1-2) 지하저수지 시스템 시공 기술
- 100만m^3급 저수량과 2000m^3/d급 일생산량의 시험 지하저수지 시설
- 시험시설 운영보고서
- 대규모 청정 지하저수지 시공 매뉴얼 (시방서)

□ **세부과제 2 : 대규모 청정 지하저수지 부지 특성 평가 및 모니터링 기술**

○ (2-1) 지하저수지 수리지질 특성 및 수질개선 효과 평가 기술
- 하구 퇴적층 수문수리지질 특성 현장조사 기법 및 분석 매뉴얼
- 대수층 특성별 물리적, 지화학적 및 생물학적 수질 개선효과 평가 및 예측 매뉴얼
- 시험시설 부지조사/분석, 수리지질 및 수질개선 특성 분석기술 적용 보고서

○ (2-2) 지하저수지 모니터링 기술
- 수처리계통, 주입/양수계통에 대한 모니터링 계통 설계, 시공 및 운영관리 매뉴얼
- 측정 자료 분석 및 평가 로직 보고서
- 시험시설 모니터링 계통 H/W 및 S/W

○ (2-3) 지하저수지 지반변형 평가 기술
- 주입 및 양수로 인한 지반변형 해석 프로그램(S/W) 및 유지관리 매뉴얼
- 시험시설 지반변형 모니터링 설비
- 시험시설 지반변형 기술 적용 보고서

□ **세부과제 3 : 도서·산간지역 우기주입-건기회수 소규모 청정 지하저수지 구축 기술(건기 30일 이상 50m^3/d 이상 생산규모)**

○ (3-1) 우기주입-건기회수 소규모 지하저수지 설계 기술
- 소규모 지하저수지 국내 대상지 선정 매뉴얼

- 소규모 지하저수지 설계 매뉴얼

○ (3-2) 소규모 지하저수지 운영 및 유지관리 기술
- 소규모 지하저수지 운영 및 유지관리 매뉴얼
- Lab Scale 수리모형 기술 검증 보고서

6. 기대효과 및 파급효과

□ 기술적 효과

○ 하류 지역 및 수자원 낙후지역에 델타하구층을 활용한 자연형 청정 용수 확보 기술 구축

○ 청정 지하저수지의 설계, 운영 및 유지관리 분야의 핵심 원천 기술 확보

○ 최적 지하저수지 설계를 위한 최적화모델링 기술 수준 제고

○ 지표수-지하수 연계 활용 고도화 기술 확보

○ 기후변화 대응 친환경 수자원관리 기술 확보

□ 경제적 효과

○ 연평균 6.5%씩 성장 추세인 세계 물 시장 중 대하천 하구 퇴적층 지역의 청정 지하저수지 기술시장 선점 가능

○ 정수처리 생산비용 절감

※ 지하 저수지를 이용한 정수처리 단가 16% 이상 절감(833원→700원/㎥이하)

○ 지자체 관내 시설설치 및 기존 송수시설 이용으로 장대 관로 및 지상시설 설치 비용, 수몰지 보상비용 절감 (예: 남강댐 광역상수도의 경우 1조 5천억원으로 예상)

○ 핵심 원천기술의 자체 개발을 통한 국제 시장 경쟁력 확보

○ 지하저수지 적용 실적 확보로 국제시장 진출 교두보 마련

□ 사회적 효과

○ 취수원 다변화로 물 안보도 제고

○ 지진, 지진해일, 원전사고 등의 재난과 수질 사고 또는 범죄 등

으로부터 안전한 수원확보

○ 물 이전에 대한 지역 간 갈등 해소

○ 해안, 도서 및 산지 등의 건기 물 부족 문제 해소

○ 원수 수질 확보로 국민 신뢰도 향상

7. 연구개발기간 및 소요예산

○ 총 연구기간 : 5년
- 1차년도 연구기간 : 2013.4～2014.4(12개월)

○ 총 정부출연금 : 115.03억원 이내
- 1차년도 정부출연금 : 6.71억원 이내

※ 각 단위과제별 정부출연금은 별첨 기획보고서의 예산편성에 준하여 제시할 것
※ 정부출연금은 향후 선정평가 결과 또는 정부예산사정에 따라 조정될 수 있음
※ 기업참여시 기업부담금은 연차별로 “국토해양부소관 연구개발사업 운영규정”의 기준을 따르되, 추가 부담 가능
※ 연구단과제는 세부과제별로 기업부담금 비율 준수
※ 연구비에 대한 구체적 산정내역을 제시해야 하며, 예산산정 근거가 불명확하거나 타당성이 부족할 경우 축소조정 가능

8. 기 타

○ 본 공모과제의 보안등급은 “일반과제”임

○ 연구단컨소시엄 신청시 연구단장 신청자는 반드시 세부과제의 주관연구책임자 또는 총괄과제의 연구책임자로 참여하여야 함
※ 연구단장은 연구단의 효율적 운영·관리를 위해 총괄과제 수행 가능

○ 타 연구과제(국토해양부, 타 부처, 민간 등 포함)와의 차별성 및 연계·활용방안을 반드시 검토하여 제시할 것

○ 필요시 공모된 연구과제명 외에 연구목표내용에 대한 대표성을 가지고 타 연구과제와 차별화되면서 알기 쉬운 연구과제명으로 수정하여 제안할 수 있음

○ 전체 연구단 및 세부과제별로 비전, 미션, 연구목표 및 전략체계 제시
- 핵심성과물 및 성과유형 제시
- 연구착수시점과 종료시점에 대하여 기술수준, 국산화율 등에 대한 대비가 가능하도록 “As-is”와 “To-be”를 구체화·가시화

하여 제시

○ 테스트베드나 시범적용 등 현장 대상 기술검증절차를 포함하는 경우에는 적용대상 기술 및 개략적인 소요예산 제시

○ 연구수행과정에서 실험이 필요한 경우, 국토해양기술연구개발사업으로 구축한 분산공유형 건설연구인프라(6대 실험시설) 적극 활용(www.koced.or.kr 참조)

○ 연구수행기관으로 선정 이후 필수 이행사항

- 연구개발 성과목표·지표별 달성목표치, 가중치 및 개발된 기술성과물의 목표수준 달성도를 확인할 수 있는 성과점검기준표 작성 및 제출
  ※ 성과점검기준표는 향후 진도점검·관리 및 평가 등의 근거자료로 활용
- 주기적 특허 및 시장 동향 조사 실시
- 총 연구기간 중 최소 2회(중간/종료 단계) 이상의 연구성과 점검 및 파급효과 분석을 실시(별도 보고서 제출, 예산계획에 반영요망)
- 실용화 대상 기술에 대한 기술설명서(SMK, Sales Marketing Kit)를 작성하여, 연구개발 완료시점에 제출

○ 기타 연구내용, 주요 성과물, 세부과제별 연구비(안) 등은 '대규모 청정 지하저수기 개발 기술' 기획보고서 참조

참고문헌

- 김원형, 이형호, 1980, 낙동강 하구지역의 퇴적물운반 및 퇴적에 대한 고찰. 지질학회지, 16 (3), 180-188.
- 김형수, Barry, J., Eaton, L. 2003 대수층 저장 및 회수 기법을 활용한 수자원확보 및 공급 방안 미국 Oregon 지역의 실제 공급 사례를 중심으로, 한국지하수토양환경학회 추계학술발표회.
- 이진영, 2007 인공신경망 이론을 이용한 사질토지반의 얕은 기초 침하예측 학위논문(석사), 경북대학교 산업대학원 : 산업대학원
- 오경훈, 2004 차수조건에 따른 지하수의 변화와 흙막이에 미치는 영향에 대한 연구, 학위논문(석사)- 한밭대학교 산업대학원: 토목공학과 . 8
- 류춘길, 강소라, 정성교, 전용문, 2011, 제4기 후기 해수면 변동에 의한 낙동강 삼각주 북부의 고환경 변화, 지질학회지, 47 (3), 213-233.
- 류춘길, 강소라, 정성교, 2005, 낙동강 삼각주 서부지역의 제4기 후기 고환경 변화, 한국지구과학회지, 26 443-458.
- 류춘길, 2003, 낙동강 하구 일원에 분포하는 홀로세 해성점토질 퇴적층의 토목지질학적 특성. 부산대학교 이학박사학위논문, 230 p.
- 오건환, 1994, 낙동강 삼각주 북부의 고환경. 한국제4기학회지, 8 (1), 33-42.
- 민건홍, 1994, 한반도 남동대륙붕의 플라이오세-현세 퇴적층의 층서 및 퇴적역사. 서울대학교 이학박사학위논문, 196 p.
- 오경훈, 차수조건에 따른 지하수의 변화와 흙막이에 미치는 영향에 대한 연구, 학위논문(석사)- 한밭대학교 산업대학원: 토목공학과 2004. 8
- 홍성훈, 시뢰, 최뢰, 박남식, 2009 Artificial Injection to Control Saltwater Intrusion in Groundwater - Numerical Study on a Vertical Cross Section, 대한지질공학회논문집, 19권 2호, 131-138.
- 김재홍, 김유성, 2011 부분포화토의 침투와 흙의 거동에 따른 유효응력 계수 분석, 한국지반공학회 논문집 제27권 12호 pp. 117 ~ 126
- 김용철, 김용제, 2011 지리정보시스템을 이용한 우리나라 인공함양 개발 유망지역 분석
- 김여상, 박수철, 1992, 한국 서해안 근홍만의 조간대퇴적층연구: 층서 및 형성과정. 한국지구과학회지, 13 (1), 41-52.
- 김여상, 박용안, 1988, 한국 서해 천수만 북동부에 발달한 제4기 현세 조간대층 하위의 퇴적층의 간월도층 연구. 한국제4기학회지, 2 (1), 13-24.
- 장순근, 이경신, 1983, 경기만조간대의 현생저서유공충과 그 의의. 지질학회지, 19 (3), 169-189.
- 김원형, 이형호, 1980, 낙동강 하구지역의 퇴적물운반 및 퇴적에 대한 고찰. 지질학회지, 16 (3), 180-188.
- 이소정, 박헌주, 성은혜?소명호?김창균, 2008 인공 대수층내에서 발생하는 해수침투의 지화학적 분석 및 병원성 지표 미생물의 사멸 특성, 대한환경공학회지 30권
- 박남식, 홍성훈, 심명근, 2009 유전자방법과 병렬처리를 이용한 해안지하수 최적양수량 결정모형개발, 대한토목학회논문집, 23권 5B호, 397-403
- 류춘길, 강소라, 정성교, 2005, 낙동강 삼각주 서부지역의 제4기 후기 고환경 변화, 한국지구과학회지, 26 443-458.
- 강정옥, 이소정, 김창균, 2005 인공하수 주입 및 양수에 따른 대수층의 수리학적 특성 연구, 대한환경공학회지 27권
- 임동일, 정회수, 엄인권, 2002, 한국 서해 천수만 선현세간월도 퇴적층의 퇴적환경. 한국해양학회지-바다, 7 (1), 32-42.
- 천종화, 한상준, 장진호, 1995, 황해 곰소만 조간대의 후기 플라이스토세 니질 산화대층의 퇴적환

경과 속성작용. 지질학회지, 31 (5), 546-559.
- 박용안, 최진용, 임동일, 최강원, 이영길, 1995, 한국 서해 남양만 조수 퇴적분지의 제4기 퇴적층서와 부정합. 한국해양학회지, 30 (4), 332-340.
- 하철윤, 김진훈, 권수열, 어성욱, 김영. 대한상하수도학회·한국물환경학회 2005 공동 추계학술발표회 논문집. C 115-116.
- 류춘길, 강소라, 정성교, 전용문, 2011, 제4기 후기 해수면 변동에 의한 낙동강 삼각주 북부의 고환경 변화, 지질학회지, 47 (3), 213-233.
- 박용안, 임동일, 최진용, 이영길, 1997, 한국 서남해 함평만 조간대 퇴적층의 제4기 후기 층서 연구. 한국해양학회지-바다, 2 (2), 138-150.
- 유동근, 장정해, 이호영, 김성필, 남승일, 공기수, 2004, 낙동강 하구 외해역 내대륙붕 홀로세 퇴적층의 층서 및 퇴적환경. 지질학회지, 40 (1), 395-407.
- 이정훈, 김정선, 이재관, 강임석, 김상단, (2012). 낙동강유역 난분해성 용존 유기탄소 배출 현황 분석, 한국물환경학회, 28(4), 538-550.
- 이창구, 박성직, 최낙철, 김성배 (2007). 철코팅 여재에서 박테리아의 부착 및 이동. 대한환경공학회지 29(7), 833-838.
- 하철윤, 김진훈, 권수열, 어성욱, 김영. 2005 대한상하수도학회·한국물환경학회 공동 추계학술발표회 논문집. C 115-116.
- 김형수, 백건하, 윤윤영, 한정상, 2004 균열 암반 대수층 활용 지하수 인공함양 주입 예비평가, 한국지하수토양환경학회 추계학술발표회, 전주대학교.
- 김형진, 김용철, 여인욱, 한병각, 2009 지하수 인공함양시 탁수 주입에 의한 막힘현상 특성연구, 지하수토양환경학회 학술발표회
- 박용안, 최진용, 임동일, 최강원, 이영길, 1995, 한국 서해 남양만 조수 퇴적분지의 제4기 퇴적층서와 부정합. 한국해양학회지, 30 (4), 332-340.
- 박용안, 임동일, 최진용, 이영길, 1997, 한국 서남해 함평만 조간대 퇴적층의 제4기 후기 층서 연구. 한국해양학회지-바다, 2 (2), 138-150.
- 이창구, 박성직, 최낙철, 김성배 (2007). 철코팅 여재에서 박테리아의 부착 및 이동. 대한환경공학회지 29(7), 833-838.
- 김형수, 백건하, 윤윤영, 한정상, (2004) 균열 암반 대수층 활용 지하수 인공함양 주입 예비평가, 한국지하수토양환경학회 추계학술발표회
- 유동근, 장정해, 이호영, 김성필, 남승일, 공기수, 2004, 낙동강 하구 외해역 내대륙붕 홀로세 퇴적층의 층서 및 퇴적환경. 지질학회지, 40 (1), 395-407.
- 이정훈, 김정선, 이재관, 강임석, 김상단, (2012). 낙동강유역 난분해성 용존 유기탄소 배출 현황 분석, 한국물환경학회, 28(4), 538-550.
- 성은혜, 한지선, 김창균 (2008). 염수계 철산화균 및 황환원균에 의한 금속 부식 및 최적 제어 방안. 대한환경공학회지. 30(8), 798-807.
- 추창오, 함세영, 이정환 등 2012 부산 금정산 일대 지하수공내 공막힘 물질의 특징과 형성원인, 지질공학회지 22,1
- 이봉주, 황세호, 지하수위 변동 특성에 근거한 해수침투 특성 평가: 영광 백수지역. 대한지질학회지 제44권 제2호 P233-240
- 김재홍, 김유성, 부분포화토의 침투와 흙의 거동에 따른 유효응력 계수 분석, 한국지반공학회논문집 제27권 12호 2011년 12월 pp. 117 ~ 126.
- 김용철, 김용제 (2010) 대수층 함양관리 기술의 세계적인 동향, 지질학회지 46권 5호 521-533.
- 김동식, 채영수 김영수 김현동 2007 인공신경망을 이용한 연약지반성토의 침하예측 연구, pp. 17~25 한국지반공학회 논문집 : Vol.23 No.7
- 강윤경(Won-Il Jang), 장원일(Yoon-Kyung Kang), 정진(Jin Jung), 2010 A Study on Subsidence of Soft Ground Using Artificial Neural Networks, 한국마린엔지니어링학회 2010년

도 공동학술대회 논문집, 341~342쪽(총2쪽)
- 채병곤(Byung-Gon Chae) ,김만일(Man-Il Kim), 불포화토 특성에 따른 강우침투 특성시험, 대한지질공학회 학술발표회논문집 Vol.2010 No.4 [2010] 81-85(5쪽)
- 하경오 2007 남강지역 충적대수층 내 지하수의 수위 관측과 인공함양을 위한 예비시험, 경상대학교대학원
- 이진영 인공신경망 이론을 이용한 사질토지반의 얕은기초 침하예측 학위논문(석사)-- 경북대학교 산업대학원 : 산업대학원 2007. 8 2007
- 김동식 채영수 김영수 김현동 인공신경망을 이용한 연약지반성토의 침하예측 연구, pp. 17~25 한국지반공학회 논문집 : Vol.23 No.7 발행년도 2007년
- 김용철과 김용제 2009 기후변화대응 지하수 인공함양기술, 물과 미래,
- 과학기술부, 2004, 수자원의 지속적 확보기술개발사업, 지속가능한 지하수 개발 및 함양기술 개발(과제번호: 3-4-1), 한국수자원공사.
- 김규한, 정윤정, 정찬호, 장미경개, 2008, 강화 석모도 지역 온천수와 지하수의 수리지구화학 및 동위원소 연구, 자원환경지질, 41권, 1호, 15-32.
- 김건영, 고용권, 배대석, 원종호, 정도환, 최병영, 2007, 경북 영천지역 지하수의 지구화학 및 환경동위원소 연구, 지하수토양환경, 12권, 4호, 35-53.
- 김남원, 정일문, 원유승, 이정우, 이병주, 2006, 시공간적 변동성을 고려한 무심천 유역의 지하수 함양량 추정, 지하수토양환경, 11권, 5호, 9-19.
- 김만일, 김진훈, 장광수, 석희준, 김형수, 2006, 지하수위 변동곡선 및 물수지분석 기법을 적용한 소유역 지하수 함양량 산정에 관한 연구, 한국지하수토양환경학회, 2006년도 총회 및 춘계학술발표회, 350-354.
- 김철겸, 김현준, 장철희, 임상준, 2007, MIKE SHE 모형을 이용한 경안천 유역의 지하수 함양량 산정, Journal of Korea Water Resources Association, 40권, 6호, 459-468.
- 고용권, 김천수, 배대석, 이동익, 2000, 문경지역 심부지하수의 수리화학 및 환경동위원소 연구, 자원환경지질, 33권, 6호, 469-489.
- 안정훈, 함세영, 이정환, 김남훈, 양대복, 황지광, 2008, 물수지 및 수리지질 분석을 통한 울산광역시 중괘천-보은천 지역의 지하수 함양량 산정, 자원환경지질, 41권, 4호, 427-442.
- Aeppli, C., Hofstetter, T. B., Amaral, H. I. F., Kipfer, R., Schwarzenbach, R. P., Berg, M., 2010, Quantifying In Situ Transformation Rates of Chlorinated Ethenes by Combining Compound-Specific Stable Isotope Analysis, Groundwater Dating, And Carbon Isotope Mass Balances, Environmental science & technology, vol.44, 10, 3705-3711.
- Aji, K., Tang, C., Song, X., Kondoh, A., Sakura, Y., Yu, J., Kaneko, S., 2008, Characteristics of chemistry and stable isotopes in groundwater of Chaobai and Yongding River basin, North China Plain, Hydrological processes, vol.22, 1, 63-72.
- Butera, I., Cotto, I, and Ostoreo, V., 2009, A geostatistical approach to the estimation of a solute trajectory through porous formations, Journal of Hydrology, 375 (3/4) 345-355.
- Cay, T. Uyan, Mevlut, 2009, Spatial and temporal groundwater level variation geostatistical modeling in the city of Konya, Turkey, Water Environmental Research, 81 (12), 2460-2470.
- Chen, L. M., Gui, H. R., Yin, X. X., 2011, Monitoring of flow field based on stable isotope geochemical characteristics in deep groundwater, Environmental monitoring and assessment, vol.179, 1, 487-498
- Chung, I.-M., Kim, N.-W., Lee, J., Sophocieous, M., 2010, Assessing distributed groundwater recharge rate using intergrated surface water-groundwater modeling: application to Michocheon watershes, South Korea, Hydrogeology Journal,18 (5), 1253-1264.
- Houston, J., 2002, Groundwater recharge through an alluvial fan in the Atacama Desert, northern Chile: mechanisms, magnitudes and causes, Hydrological processes, vol.16, 15,

3019-3035.
- Liu, L. C., Xu, X.,and Longcang, G.S., 2011, Use of hydrologic time-series data for identification of hydrodynamic function and behaviour in a karstic water system in China, Hydrogeology Journal, 19 (8), 1577-1585.
- Promma, K., Zheng, C., Asnachinda, P., 2007, Groundwater and surface-water interactions in a confined alluvial aquifer between two rivers: effects of groundwater flow dynamics on high iron anomaly, Hydrogeology journal, vol. 15, 3, 495-513.
- Subyani, A. M., 2004, Use of chloride-mass balance and environmental isotopes for evaluation of groundwater recharge in the alluvial aquifer, Wadi Tharad, western Saudi Arabia, Environmental geology, vol.46, 6, 741-749.
- Vanderzalm, J. L., Jeuken, B. M., Wischusen, J. D. H., Pavelic, P., Le Gal La Salle, C. Knapton, A., Dillon, P. J., 2011, Recharge sources and hydrogeochemical evolution of groundwater in alluvial basins in arid central Australia, Journal of hydrology, vol.397, 1, 71-82.
- Alnahhal, S., Afifi, S., Qahman, K., Dentoni, M. and Lecca, G., 2010 "A simulation/optimization approach to manage groundwater resources in the Gaza aquifer (Palestine)", XVIII International Conference on Water Resources, Barcelona
- Alternative urban water supplies regulatory review MAR 2006 보고서 MAR
- American Water Works Association (2002). Survey and Aanlysis of Aquifer Storage and Recovery (ASR) System and Associated Regulatory Programmes in the United States.
- American Water Works Association (1999). Reverse osmosis and nanofiltration-manual for water supply practices-M46, AWWA.
- American Water Works Association (2002). Survey and Aanlysis of Aquifer Storage and Recovery (ASR) System and Associated Regulatory Programmes in the United States.
- Amy, G., Wilson, G., Conroy, A., Chahbandour, J.,Zhai, W., and Siddiqui, M.(1993), "Fate of chlorination byproducts and nitrogen species during effluent recharge and soil aquifer treatment (SAT)," Water Environ. Res.,65(6), 726~734
- Andrew LH, Karen J.R, Peter J.D, Paul P, Karen E.B. 2004. Geochemical processes during five years of aquifer storage recovery. Groundwater(42) 438-445.
- Application of advanced borehole geophysical logging to managed aquifer recharge investigations 2009 논문 GP
- Aquifer recharge experiment termed "Proven Success" 1997 article AR
- Aquifer Recharge: A Natural Solution 1999 논문 AR
- Aquifer storage capacity and maximum annual yield from long-term aquifer fluxes 2007 논문 ASR
- Artificial groundwater recharge to a semi-arid basin: case study of Mujib aquifer, Jordan 2010 논문 AR
- Artificial Recharge Enhances Aquifer Capacity 1995 논문 AR
- ASCE 1994 Artificial Recharge of Groundwater, II: Proceedings of the Second International Symposium on Artificial Recharge of Ground Water, Orlando, FL, United States, ASCE, New York, NY, United States.
- ASR from a legal perspective 2008 article ASR
- Augmentation of seasonal low stream flows by artificial recharge in the Spokane Valley-Rathdrum Prarie Aquifer of Idaho and Washington, USA 2009 논문 AR
- Ayvaz, M. T. and Karahan, H. 2008 A simulation/optimization model for the identification of unknown groundwater well locations and pumping rates, J. of Hydrology, 357, 1-2

- Barraud S., Gibert J. , Winiarski T. et Bertrand Krajewski J.-L. (2002). Implementation of a monitoring system to measure impact of stormwater runoff infiltration. Water Science & Technology, 45 (3), 203-210.
- Baveye, P., Vandevivere, P., Hoyle, B. L., DeLeo, P. C., and de Lozada, D. S., (1998). Environmental Impact and Mechanisms of the Biological Clogging of Saturated Soils and Aquifer Materials, Environmental Science and Technology, 28(2), 123?191.
- Bekele, E., Toze, S., Patterson, B., Higginson, S. (2011). Managed aquifer recharge of treated wastewater: Water quality changes resulting from infiltration through the vadose zone, Water Research, 45, 5764-5772.
- Bertrand-Krajewski J.-L., Barraud S., Gibert J., Malard F., Winiarski T., Delolme C. (2008). Chapitre: 23. The OTHU case study: integrated monitoring of stormwater in Lyon, France. In Data Requirements for Integrated Urban Water Management, UNESCO International Hydrologic Program (IHP-VI). Edited by T. Fletcher & A. Deletic, UNESCO and Taylor & Francis, 303-314. ISBN 978-0-415-45345-5.
- Bhattacharjya, R. and Datta B., 2005 "Optimal management of coastal aquifers using linked simulation optimization approach," Water Resource Research, Vol. 36, pp. 2155-2165
- Bloetscher, F., Muniz, A. Witt, G.M., 2005, Groundwater Injection, Modeling, Risks and regulations, McGraw-Hill
- Bohlke, J.K., 2002. Groundwater recharge and agricultural contamination. Hydrogeol J 10, 153?179.
- Booker JR, Carter JP, Small JC. Prediction of subsidence caused by pumping of groundwater. Proceedings of the 21st Congress International Association of Hydraulic Research, Melbourne, 1985; 129?-134.
- Booker JR, Carter JP. Long term subsidence due to fluid extraction from a saturated anisotropic, elastic soil mass. Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics 1986; 39(Part 1):85?97.
- Boufadel, M. C., 2000. A mechanistic study of nonlinear solute transport in a groundwater?surface water system under steady state and transient hydraulic conditions. Water Resour. Res. 36(9), 2549-2565.
- Bournea, D.G., Blakeley, R.L., Riddles, P., and Jones, G.J.(2006) Biodegradation of the cyanobacterial toxin microcystin LR in natural water and biologically active slow sand filters. Water Research. 40(6), 1294?1302.
- Bouwer H (2002). Artificial recharge of groundwater: hydrogeology and engineering.
- Bouwer, H. (2002). Artificial recharge of groundwater: hydrogeology and engineering, Hydrogeology Journal, 10, 121?142.
- Boyd, E.S., Cummings, D.E. and Geesey, G.G. (2007).Mineralogy influences structure and diversity of bacterial communities associated with geological substrata in a pristine aquifer. Microbial Ecol. 54, 170-182.
- Bray, B.S. and Yeh, W.W-G 2008 Improving seawater barrier operation with simulation optimization in southern California, J. Water Resour. Plng. and Mgmt. 134, 2.
- Brown, C. J., Hatfield, K., and Newman, M., (2006). Lessons Learned from a Review of 50 ASR Projects from the United States, England, Australia, India, and Africa, UCOWR/NIWR Annual Conference: Increasing Freshwater Supplies, Santa Fe, NM, July 18-20.
- Brown, C.J., Misut, P.E. (2010), Aquifer geochemistry at potential aquiferstorage and recovery sites in coastal plain aquifers in the New York city area, USA. Applied

Geochemistry, 25, 1431-1452.

- Budhu, M. and Adiyaman, I.B. Mechanics of land subsidence due to groundwater pumping, International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2010, 34:1459-1478.
- Burbey TJ. Three-dimensional deformation and strain induced by municipal pumping, Part 2: numerical analysis. Journal of Hydrology 2006; 330(3?4):422?434.
- Burke, J.J. & Moench, M.H., 1999, Atelier Sous-Regional sur la Collecte des Eaux de Surface en Afrique de L'Ouest et du Centre, tenu a Niamey au Niger du 26-29 Octobre 1999 ?FAO RAF, Case studies: Nigeria, Cameroon, Burkina Faso, Niger, Mauritanie, Gambie and Tchad.
- Butera, I., Cotto, I, and Ostoreo, V., 2009, A geostatistical approach to the estimation of a solute trajectory through porous formations, Journal of Hydrology, 375 (3/4) 345-355.
- Byoung-Young Choi, Seong-Taek Yun, Bernhard Mayer, Gi-Tak Chae, Kyoung-Ho Kim, Kangjoo Kim, and Yong-Kwon Koh, 2010. Identification of groundwater recharge sources and processes in a heterogeneous alluvial aquifer: results from multi-level monitoring of hydrochemistry and environmental isotopes in a riverside agricultural area in Korea. Hydrological Processes 24, 317-330.
- Byoung-Young Choi, Seong-Taek Yun, Kyoung-Ho Kim, Kangjoo Kim, and Suk-Joo Choh, 2012. Geologically controlled, agricultural contamination and water-rock interaction in an alluvial aquifer: results from a hydrochemical study. Environmental Earth Science, in press.
- Cay, T. Uyan, Mevlut, 2009, Spatial and temporal groundwater level variation geostatistical modeling in the city of Konya, Turkey, Water Environmental Research, 81 (12), 2460-2470.
- CDM 2004b Comprehensive report addressing WAC173-157 requirements for Sammamish Plateau Water and Sewer District Plateau Aquifer System ASR application (R1-28191A), prepared for Sammamish Plateau Water and Sewer District.
- Cederstrom, D. J. 1947 Artificial recharge of a brackish water well, The Commonwealth, Dec. 31.
- Cederstrom, D. J. 1957 Geology and ground-water resources of the York-James peninsula, Virginia, US Geological Survey: 237
- Central Groundwater Board, 2002. Master Plan for Artificial Recharge to Ground Water in India. Ministry of Water Resources, New Delhi, India.
- Chae, G.T., Kim, K.J., Yun, S.T., Kim, K.H., Kim, S.O., Choi, B.Y., Kim, H.S., and Rhee, C.W., 2004. Hydrogeochemistry of alluvial groundwaters in an agricultural area: an implication for groundwater contamination susceptibility. Chemosphere 55, 369-378.
- Chae, G.T., Kim, K.J., Yun, S.T., Kim, K.H., Kim, S.O., Choi, B.Y., Kim, H.S., and Rhee, C.W., 2004. Hydrogeochemistry of alluvial groundwaters in an agricultural area: an implication for groundwater contamination susceptibility. Chemosphere 55, 369-378.
- Chae, Gi-Tak, Seong-Taek Yun, Bernhard Mayer, Byoung-Young Choi, Jang-Soon Kwon, and Soon-Young Yu, 2009. Hydrochemical and stable isotopic assessment of nitrate contamination in an alluvial aquifer underneath a riverside agricultural field. Agricultural Water Management 96, 1819-1827.
- Charlesworth, P. B., Narayan, K. A., and Bristow, K. L, (2002). The Burdekin Delta?Australia"s Oldest Artificial Recharge Scheme. In: Management of Aquifer Recharge for Sustainability (ed Dillon PJ), 2002. Sweets and Zeitlinger, Lisse. ISBN 90 5809 527 4.
- Cheng, A.H.-D., Halhal, D., Naji, A. and Ouazar, D., 2000 "Pumping optimization in

saltwater-intruded coastal aquifers", Water Resources Research, Vol. 36, No. 8, pp. 2155-2166

- Choi, Byoung-Young, Seong-Taek Yun, Bernhard Mayer, Gi-Tak Chae, Kyoung-Ho Kim, Kangjoo Kim, and Yong-Kwon Koh, 2010. Identification of groundwater recharge sources and processes in a heterogeneous alluvial aquifer: results from multi-level monitoring of hydrochemistry and environmental isotopes in a riverside agricultural area in Korea. Hydrological Processes 24, 317-330.
- Choi, Byoung-Young, Seong-Taek Yun, Kyoung-Ho Kim, Kangjoo Kim, and Suk-Joo Choh, 2012. Geologically controlled, agricultural contamination and water-rock interaction in an alluvial aquifer: results from a hydrochemical study. Environmental Earth Science, in press.
- Chung, I.-M., Kim, N.-W., Lee, J., Sophocieous, M., 2010, Assessing distributed groundwater recharge rate using intergrated surface water-groundwater modeling: application to Michocheon watershes, South Korea, Hydrogeology Journal,18 (5), 1253-1264.
- Committee on Restoration of the Greater Everglades Ecosystem, Board on Environmental Studies and Toxicology, Water Sciences and Technology Board, National Research Council, 2001, Aquifer Storage and Recovery in the Comprehensive Everglades Restoration Plan: A Critique of the Pilot Projects and Related Plans for ASR in the Lake Okeechobee and Western Hillsboro Areas
- Conn, K., Siegrist, R., Barber, L. and Meyer, M. (2010) "Fate of trace organic compounds during vadose zone soil treatment in an onsite wastewater system", Environ. Tox. Chem., 29(2), 285-293
- Connorton BJ and McIntosh P, 1994. EUREAU Survey on Artificial Recharge. In: Artificial Recharge of Groundwater, II (ed. Johnson AI and Pyne DRG). Proceedings of the 2nd International Symposium on Artificial Recharge of Groundwater. Florida, July 17-22, 1994. American Society of Civil Engineers, New York.
- Cordy, G., Duran, N., Bouwer, H., Rice, R., Furlong, E., Zaugg, S., Meyer, M., Barber, L. and Kolpin, D., (2004) "Do pharmaceuticals, pathogens, and other organic waste water compounds persist when waste water is used for recharge ?", Ground Water Monitoring & Remediation 24(2), 58-69
- Cost-effective Approaches for Sustainable Groundwater Management in Alluvial Aquifer Systems 2009 논문 AR
- CSM, (2009). Technical Assessment of Produced Water Treatment Technologies, prepared by the Colorado School of Mines as part of RPSEA Project 07122-12, November.
- Current practices in Aquifer Storage and Recovery 2009 발표 ASR
- Damikouka, I., Katsiri, A., Tzia, C. (2006). Application of HACCP principles in drinking water treatment. J. Desalination. 210, 138-145.
- Davies, S. H., and Morgan, J. J., (1989). Manganese(Ⅱ) oxidation kinetics on metal oxide surface, J. Colloid & Interface Science, 129(1), 63-77.
- Declan P, Konrad M, Peter D, Russel T, Steve W, Kerry L, Karen B, Paul P. 2011. Water quality requirements for sustaining aquifer storage and recovery operations in a low permeability fractured rock aquifer. Journal of Environmental Management(92) 2410-2418.
- Declan Page, et al., 2010, Managed aquifer recharge case study risk assessments, National Water Commission, Australian Government.
- Declan Page, Karen Barry, Antoine Chassagne, Paul Pavelic, Peter Dillon,
- Department of Water Affairs 2007 Artificial Recharge Strategy. (www.artificialrecharge.co.za)
- Desktop Feasibility Study for MAR: North Wyndham Vale, Ravenhall and Riyal Park 2010

보고서 MAR

- Devin L, Galloway Tomas J, Burbey. 2011. Regional land subsidence accompanying groundwater extraction. Hydrogeology Joumal(19) 1459-1486.
- Dillon PJ and Balkema AA eds, 2002, Management of Aquifer Recharge for Sustainability: 2002. Proceedings of the Fourth International Symposium on Artificial Recharge of Groundwater (ISAR-4), Adelaide, Australia.
- Dillon, P., Pavelic, P., Page, D., Beringen, H., Ward, J., (2009). "Managed Aquifer Recharge: An Introduction." Waterlines Reports Series No. 13, published by the Australian Government National Water Commission on Key Water Issues.
- Drewes, J. and Fox, P. (1999), "Fate of natural organic matter (NOM) during groundwater recharge using reclaimed water," Water Sci. Technol., 40(9), 241～248
- Drewes, J.E. and Jekel, M. (1998), "Behavior of DOC and AOX using advanced treated wastewater for groundwater recharge," Water Sci. Technol., 32(10), 3125～3133
- Duijvenbode van, S. W., and Olsthoorn, T. N., (2002). A Pilot Study of Deep-Well Recharge by Amsterdam Water Supply. In: Management of Aquifer Recharge for Sustainability (ed Dillon PJ), 2002. Sweets & Zeitlinger, Lisse, 35-40. ISBN 90 5809 527 4.
- Effects of Recharge of chlorinated State Water Project Waters to Grougnwaters in Lancaster area of California 2002 논문 ASR
- Eleuterio, L. and Batista, J.R. (2010). Biodegradation studies and sequencing of microcystin-LRdegrading bacteria isolated from a drinking water biofilter and a fresh water lake. Toxicon. 55, 1434-1442.
- EPA, 2009, Aquifer Storage & Recovery: Policy Considerations, Aquifer Storage & Recovery Experts Meeting, May 5-6 EPA Region 5 Office, Chicago
- EPA, 2009, Class V Fact Sheet, AR and ASR Wells
- Estiating potential costs and gains from an aquifer storage and recovery program in Australia 2008 논문 ASR
- European Commission, Directorate-General for Research. 2001 Artificial recharge of groundwater, EC project EVN4-CT95-0071.
- Excess air during aquifer storage and recovery in an arid basin (Las Vegas Valley, USA) 2010 논문 ASR
- Farnsworth, C.E. and Hering, J.G. (2011). Inorganic geochemistry and redox dynamics in bank filtration settings. Environ. Sci. Technol. 45, 5079-5087.
- Filella, M. (2009). Freshwaters: which NOM matters? Environmental Chemistry Letters. 7, 21-35.
- Flynn, T.M., Sanford, R.A. and Bethke, C.B. (2008). Attached and suspended microbial communities in a pristine confined aquifer. Water Resources Research. 44, W07425.
- Future management of aquifer recharge 2005 논문 MAR
- Gambolati G, Freeze RA. Mathematical simulation of the subsidence of Venice, 1, theory. Water Resource Research 1973; 9(3):721?733.
- Garinger, L. P., King, A. S., and Ziegler, A. C., (2011). Effects of Experimental Passive Artificial Recharge of Treated Surface Water on Water Quality in the Equus Beds Aquifer, 2009?2010, USGS.
- Gerges, N. Z, Sibenaler, X. P., and Howles, S. R., (1996). South Australian Experience in Aquifer Storage and Recovery. In: Artificial Recharge of Groundwater (ed Kivimaki A-L and Suokko T. Proceedings of an International Symposium. Helsinki,Finland, June 3 - 5, 1996. Nordic Hydrological Programme Report No. 38, pp 75-83.

- Gi-Tak Chae, Seong-Taek Yun, Bernhard Mayer, Byoung-Young Choi, Jang-Soon Kwon, and Soon-Young Yu, 2009. Hydrochemical and stable isotopic assessment of nitrate contamination in an alluvial aquifer underneath a riverside agricultural field. Agricultural Water Management 96, 1819-1827.
- Giao, N.P. and Nutalaya, P. Field experiment of artificial recharge through a well with reference to land subsidence control, Engineering Geology, 1998, 50:187-201.
- Giebler, C. and Lueders, T. (2009). Microbial biodiversity in groundwater ecosystems. Freshwater Biol. 54, 649-677.
- GIS-based multi-criteria ananlysis for potential wastewater aquifer recharge sites 2007 논문 AR
- Goff, M.D. 2010 A history of success: artificial recharge in las Vegas, Nevada, ISMAR 7, Abu Dhabi.
- Gonzalez-merchan, C., Barraud, S., Le Coustumer, S. and Fletcher, T. (2010). Monitoring of clogging evelution in the filtration system, NOVATECH 2010, pp. 1-10.
- Gordon, C.and Toze, S.(2003) Influence of groundwater characteristics on the survival of enteric viruses. J. Appl. Microbiol. 95(3), 536?544.
- Goswami, R. R., Clement, T. P., 2007. Laboratory-scale investigation of saltwater intrusion dynamics. Water Resour. Res. 43, W04418.
- Goyal, V., Jhorar, B.S., Malik, R.S., and Streck, T. 2008 Performance evaluation of ASR wells for conjunctive water management as influenced by buffer storage voume and storage time, Current Science, 94 (4).
- Graig J.B, Paul E.M. 2010. Aquifer geochemistry at potential auifer storage and recovery sites in coastal plain aquifers in the New York city area, USA. Applide Geochemistry(25) 1431-1452.
- Groundwater and Global Change: Trends, Opportunities and Challenges 2012 보고서 AS(T)R
- Groundwater balance, safe yield and recharge feasbility in a semi-arid environment: a case study from western part of Iran 2007 논문 AR
- Groundwater flow in the vicinity of two artificial recharge ponds in the Belgian coastal dunes 2007 논문 AR_ponds
- Groundwater recharge areas of a volcanic aquifer system inferred from hydraulic, hydrogeochemical and stable isotope data 2010 논문 AR
- Groundwater recharge: an overview of processes and challenges 2002 논문 AR
- Groundwater resources protection and aquifer recovery in China 2003 논문 AR
- Grutzmacher, G. Wessel, G., Klitzke, S. and Chorus, I. (2010). Microcystin elimination during sediment contact. Environ. Sci. Technol. 44, 657-662.
- Grutzmacher, G., Bottcher, G., Chorus, I. and Bartel, H. (2002). Removal of microcystins by slow sand filtration. Environ. Toxicol. 17(4), 386-394.
- Guidance for groundwater storage utilisation in water planning 2012 보고서 MAR
- GWI March, 2010. Market Profile: Aquifer storage and recovery, pp. 33~36.
- Gwo-Fong L, Guo-Rong C. 2005. Determination of aquifer parameters using radial basis function network approach. Chinese Institute of Engineers(28) 241-249.
- H.M.Hollander, R.Mull, S.N.Panda. 2009. A concept for managed aquifer recharge using ASR-wells for sustainable use of groundwater resources in an alluvial coastal aquifer in Eastern India. Physics and Chemistry of Earth(34) 270-278.
- Hank Baski, 2007, ASR well equipment, above and below ground, Proceedings of the 6th

Symposium on Management of Aquifer Recharge, pp.355-365.
- Harada Y, Yamanouchi T. Land subsidence in Saga Plain, Japan and its analysis by the quasi three-dimensional aquifer model. Geotechnical Engineering 1983; 14(1):23?54.
- Harpaz Y. (1971) Artificial Groundwater Recharge by means of wells in Israel. J. Hydraul. Div., pp. 1947-1964.
- Hatzinger, P.B., C. E. Schaefer, and E.E. Cox. (2008). Active bioremediation. In In Situ Bioremediation of Perchlorate. H Stroo and C.H. Ward. (Ed.). Springer, New York. pp. 91-131.
- Hauser V. L. and Lotspeich F. B. (1967) Artificial groundwater recharge through wells. Journal of Soil and Water Conservation, pp. 11-15.
- Heberer T., Massmann, G., Fanck, B. Taute, T., and Dunnbier, U. (2008) Behaviour and redox sensitivity of antimicrobial residues during bank filtration. Chemosphere. 73(4) 451?460.
- Heberer, T. and Adam, M., (2004) "Transport and attenuation of pharmaceutical redisues during artificial groundwater replenishment", Environ. Chem. 1(1), 22-25
- Herczeg, A.L., Rattray, K.J., Dillon, P.J., Pavelic, P., Barry, K.E., 2004. Geochemical processes during five years of aquifer storage recovery, Ground Water 42, 438-445.
- Hill MC, Banta ER, Harbaugh AW, Anderman ER. MODFLOW-2000, The U.S. geological survey modular groundwater model?user guide to the observation, sensitivity, and parameter-estimation processes and three post-processing programs. U.S. Geological Survey Open-File Report 00-184, 2000; 209.
- Hiscock, K. H., and Grischek, T. (2002). Attenuation of groudwater pollution by bank filtration, Journal of Hydrology, 266. pp. 139-144.
- Hiscocka, K. M., and Grischek, T., (2006). Attenuation of groundwater pollution by bank filtration, Journal of Hydrology, 266, 139?144.
- Hoa, E., (2010). Feasibility Study on Post-treatment Options after Riverbank Filtration in Delhi : Minimum requirements of post-treatment techniques, TECHNEAU, Berlin.
- Hoa, E., (2010). Feasibility Study on Post-treatment Options after Riverbank Filtration in Delhi : Minimum requirements of post-treatment techniques, TECHNEAU, Berlin.
- Hollander, R.Mull, S.N.Panda. 2009. A concept for managed aquifer recharge using ASR-wells for sustainable use of groundwater resources in an alluvial coastal aquifer in Eastern India. Physics and Chemistry of Earth(34) 270-278.
- Hongfei, Z., and Jianqing, G., 2012, Chaotic sequence opyimization algorithm for estimation of aquifer parameters from data of pumping test, Procedia Environmental Sciences, 12, A, 528-536.
- Humphreys, W.F. (2009). Hydrogeology and groundwater ecology: Does each inform the other? Hydrogeol. J. 17, 5-21.
- Huang, T., Pang Z., 2011, Estimating groundwater recharge following land-use change using chloride mass balance of soil profiles: a case study at Guyuan and Xifeng in the Loess Plateau of Ghina, Hydrogeology Journal, 19 (1), 177-186.
- Hung WC (2007) Taiwan land subsidence monitoring and surveying analysis, Report of Industrial Technology Research Institute (ITRI), Hsinchu.
- Hung. W.C., Hwang, C., Chang, C.P., Yen, J.Y., Liu C.H., and Yang, W.H. Monitoring severe aquifer-system compaction and land subsidence in Taiwan using multiple sensors: Yulin, the southern Choushui River Alluvial Fan, Environmental Earth Science, 2010, 59:135-1548.
- Hutchinson A and Randall R (1995). Estimation of injection well clogging with modified

fouling index (MFI). Proceedings of the 2nd International Symposium on Artificial Recharge of Groundwater, Johnson AI and Pyne RDG (eds), Orlando, Florida, July 1994, 710?.719.

- Impact of Treated Wastewater reuse on Agriculture and Aquifer recharge in a Coastal Area: Korba Case Study 2011 논문 AR
- Integrated Water Resource Management – through reuse and aquifer recharge 2002 논 문 AR
- Integrated Water Resource Management: looking at the whole picture 2003 논문 G
- Investigation of possible extra recharge during pumping in Nottingham Aquifer 1996 논 문 AR
- James D.W, Craig T.S, Peter J.D. 2007. A theoretical analysis of mixed convection in aquifer storage and recovery: How important are density effects?. Hydrology(343) 169-186.
- John A.I, Allen H,C, Mark W.N, Georage R.A. 2005. Inorganic, isotopic, and organic composition of high-chloride water from wells in a coastal southern California aquifer, Applied Geochemistry(20) 1496-1517.
- John C.E, Paul J.S. 2001. Key success factors in an ASR scheme. Engineering geology and hydrogeology(34) 399-409.
- Jonoski, A,.,Zhou, Y., Nonner, J. and Meijer, S., 1997 Model aided design and optimization of artificial recharge-pumping systems Hydrological Sciences Journal,
- Karren Barry and Peter Dillon, 2005, Domestic-scale ASR with rainwater at Kingswood, South Africa, Proceedings of the 5th Symposium on Management of Aquifer Recharge, pp.656-662.
- Katsoyiannis, L. A., and Zouboulis, A. I., (2004). Biological treatment of Mn(Ⅱ) and Fe(Ⅱ) containing groundwater; kinetic considerations and product characterization, Wat. Res. 38, 1922-1932.
- Katsoyiannis, L. A., and Zouboulis, A. I., (2004). Biological treatment of Mn(Ⅱ) and Fe(Ⅱ) containing groundwater; kinetic considerations and product characterization, Wat. Res. 38, 1922-1932.
- Kattan, Z., Kadkoy, N., Nasser, S., Safadi, M., Hamed, A., 2010. Isotopes and geochemistry in a managed aquifer recharge scheme: a case study of fresh water injection at the Damascus University Campus, Syria. Hydrological Processes 24, 1791-1805.
- Keller B, Ward A. 2001. Tectonic setting of the San Diego formation aquifer, considered for conjunctive use storage. Journal of South American Earth Sciences(14) 533-540.
- Khan, S., Mushtaq, S., Hanjra, M.A., and Schaeffer, J., 2008 Estimating potential costs and gains from an ASR program in Australia, Agr. Water Management, 95
- Kim H. C., Yu M. J., and Myung G. N. (2005). Characterization of Natural Organic Matter in Advanced Water Treatment Processes for DBPs Control, 2nd IWA Leading-Edge Conference on Water and Wastewater Treatment Technologies, pp.97 – 106.
- Kim, K., Kim, H.J., Choi, B.Y., Kim, S.H., Park, K.H., Park, E., Koh, D.C., Yun, S.T., 2008. Fe and Mn levels regulated by agricultural activities in alluvial groundwaters underneath a flooded paddy field. Appl. Geochem. 23, 44?57.
- Kim, K.H., Yun, S.T., Choi, B.Y., Chae, G.T., Joo, Y., Kim, K., Kim, H.S. (2009) Hydrochemical and multivariate statistical interpretations of spatial controls of nitrate concentrations in a shallow alluvial aquifer around oxbow lakes (Osong area, central Korea). Journal of Contaminant Hydrology, 107, 114-127.
- Kloppmann, W., Chikurel, H., Picot, G., Guttman, J., Pettenati, M., Aharoni, A., Guerrot, C.,

Millot, R., Gaus, I., and Wintgens, T.,2009, B and Li isotopes as intrinsic tracers for injection tests in aquifer storage and recovery systems, Applied Geochemistry, 24 (7), 1214-1223.

- Kolehmainen, R.E., Tiirola, M.A. and Puhakka, J.A. (2008). Spatial and temporal changes in Actinobacterial dominance in experimental artificial groundwater recharge. Water Research. 42, 4525-4537.
- Konikow, L.F., August, L.L., Voss, C.I., 2001. Effects of Clay Dispersion on Aquifer Storage and Recovery in Coastal Aquifers. Transport in Porous Media 43, 45-64.
- Kyoung-Ho Kim, Seong-Taek Yun, Byoung-Young Choi, Gi-Tak Chae, Yongsung Joo, Kangjoo Kim, and Hyoung-Soo Kim, 2009. Hydrochemical and multivariate statistical interpretations of spatial controls of nitrate concentrations in a shallow alluvial aquifer around oxbow lakes (Osong area, central Korea). Journal of Contaminant Hydrology 107, 114-127.
- L.F.Konikow, L.L.August, C.I.Voss. 2001. Effects of Clay Dispesion on Aquifer Storage and Recovery in Coastal Aquifers. Transport in Porous Media(43) 45-64.
- Langmark, J. (2004). Biofilms and microbial barriers in drinking water treatment and distribution. Doctoral thesis. Stockholm. Royal Inst. of Technology, Department of Land and Water Resources Eng. TRITA-LWR PHD. 1014, p67.
- Leake SA, Prudic DE. Documentation of a computer program to simulate aquifer-system compaction using the modular finite-difference ground-water flow model. U.S. Geological Survey Techniques of Water-Resources Investigations, 1991, book 6, chapter A2; 68.
- Leake SA. Computer simulation of land subsidence from groundwater withdrawal in unconfined aquifers. Proceedings of the International Workshop on Groundwater and Environment, Beijing, China, 16?18 August 1992; 286?292.
- Leake SA. Interbed storage changes and compaction in models of regional groundwater flow. Water Resources Research 1990; 26(9):1939-1950.
- Leake SA. Simulation of vertical compaction in models of regional ground-water flow. In Land Subsidence?Proceedings of the Fourth International Symposium on Land Subsidence, Johnson AI (ed.), vol. 200. International Association of Hydrological Sciences Publication: Houston, TX, 12?17 May 1991; 565?574.
- Lin, Gwo-Fong, Guo-Rong C. 2005. Determination of aquifer parameters using radial basis function network approach. Chinese Institute of Engineers(28) 241-249.
- Linlin, W., Xuan, Z. and Meng, Z. (2011). Removal of dissolved organic matter in municipal effluent with ozonation, slow sand filtration and nanofiltration as high quality pre-treatment option for artificial groundwater recharge, Chemosphere, 83(5), 693-699.
- Liu, L. C., Xu, X.,and Longcang, G.S., 2011, Use of hydrologic time-series data for identification of hydrodynamic function and behaviour in a karstic water system in China, Hydrogeology Journal, 19 (8), 1577-1585.
- Lixin, Y., Fang Z., He, X., Shijie, C. Wei, W., and Qiang, Y. Land subsidence in Tianjin, China, Environmental Earth Science, 2011, 62:1151-1161.
- Lobo-Ferreira, J.P. and Oliveira, L. 2007 Solution for integrated management of watersheds and aquifer systems under extreme drought scenarios, ASEMWATERNET.
- Lowry, C.S. and Anderson M.P. 2006 An assessment of ASR using Groundwater flow models, Ground Water
- Lysimeters assess regulatory compliance with recycled water recharge 2005 논 문 AR
- Maeng, S.K., Sharma, S.K., Lekkerkerker-Teunissen, K. and Amy, G.L. (2011). Occurrence and fate of bulk organic matter and pharmaceutically active compounds in managed aquifer

recharge: a review. Water Research. 45, 3015-3033.
- Mahesha, A 1996. Control of seawater intrusion through injection-extraction well system. Irrigation and drainage engineering(122) 341-317.
- Maliva, R.G and Missimer, T.M. 2010, Aquifer storage and recovery and managed aquifer recharge, Planning, hydrogeology, design and operation: methods in water resources evaluation series No. 2. Schlumberger Corporation, Houston, Texas
- Mantoglou A, Ppantoniou, M., 2008 Optimal design of pumping networks in coastal aquifers using sharp interface models, Journal of Hydrology, 361, 1-2
- Mao, X., Prommer, H., Barry, D.A., Langevin, C.D., Panteleit, B., Li, L., 2006. Three-dimensional model for multi-component reactive transport with variable density groundwater flow. Environ.Modell.Softw. 21, 615-628.
- MAR - Risks to groundwater dependent ecosystems - a review 2009 보고서 MAR
- MAR, 2011. Managed aquifer recharge ? examples of success, <Accessed at Sep, 10, 2012http://www.bebuffered.com/downloads/Action%20Research%20Worshop%2024%20Feb%202011%20Dillon%20CSIRO_LQ.pdf>
- Mark Purdie, Colin Pittman, Stephanie Rinck-Pfeiffer, Rudi Regel, 2007, Application of the Hazard Analysis and Critical Control Point (HACCP) risk management framework to managed aquifer recharge, Proceedings of the 6th Symposium on Management of Aquifer Recharge, pp.578-589.
- McQuarrie, J. P., and Carlson, K., (2003). Secondary Benefits of Aquifer Storage and Recovery: Disinfection By-Product Control, Journal of environmental engineering, 129(5), 412-418.
- American Water Works Association (2002). Survey and Aanlysis of Aquifer Storage and Recovery (ASR) System and Associated Regulatory Programmes in the United States.
- Merritt, M.L. 1986, Recovering fresh water stored in saline limestone aquifers, Ground Water, 24, 4,
- Methods for Integrating an extensive geodatabase with 3D Modeling and Data Management Tools for the Virttaankangas Artificial Recharge Project, Southwestern Finland 2008 논 문 AR
- Mhamdi, R. and Heilweil, V. 2007 A quantitative evaluation of the impacts of artificial recharge to the Mornag Aquifer system of Northern Tunisia, ISMAR6, Phoenix Arizona.
- Midwest city pilots aquifer recharge 1998 article AR
- Millit, N.P., Guerrot, R., Petelet-Giraud, C., Brenot, E., Malcuit, A., 2012, Heterogeneities and interconnections in groundwaters: Coupled B, Li and stable-isotope variations in a large aquifer, Chemical Geology, 296/297, 83-95.
- Min, J.H., Yun, S.T., Kim, K., Kim, H.S., Kim D.J., 2003. Geologic controls on the chemical behavior of nitrate in riverside alluvial aquifers, Korea. Hydrological Processes, 17, 1197-1211.
- Misut, P.E., Voss, C.I., 2007. Freshwater-saltwater transition zone movement during aquifer storage and recovery cycles in Brooklyn and Queens, New York City, USA. Journal of Hydrology 337, 87-103.
- Miontlinski, K., Dillon P.J., Pavelic P., Cook, P.G., Page, D.W, and Levett, K 2011, Recovery of injected freshwater to differentiate fracture flow in a low permeability brackish aquifer.
- Modelling the effects of groundwater-based urban suuply in low-permeability aquifers: application to the Madrid aquifer, Spain 2010 논문 AR

- Monterey Pennisula, 2011 Nationwide & international groundwater recharge projects.
- Murray, R. and Harris, J., (2010). Water Banking : A practical guide to using artificial groundwater recharge, Department of Water Affairs, Pretoria, S. Africa.
- Murray, R. and Ravenscroft, P. 2010 Potential Artificial Recharge Schemes: Planning for Implementation, WP9390 Department of Water Affairs, Rep. of South Africa.
- Nakagawa, K., Momii, K., Berndtsson, R., 2005. Saltwater intrusion in coastal aquifer ? comparison between the CIP and MOC simulation technique. Environ. Model. Assess. 10(4), 323-329.
- National Research Council 2001 Aquifer Storage and Recovery in the Comprehensive Everglades Restoration Plan: A Critique of the Pilot Projects and Related Plans for ASR in the Lake Okeechobee and Western Hillsboro Areas, National Academy Press.
- National Research Council, 2008, Prospects for Managed underground storage of recoverable water, National Academic Press
- NGWA, 2008, Enhanced Ground Water Storage, NGWA Information Brief, April 23 2008, National Groundwater Association
- NGWA, 2008, Enhanced Groundwater Storage, Information Brief, Westerville, Ohio.
- Nordic Hydrologic Programme 1996 Artificial Recharge of Groundwater, Proceedings of an International Symposium, Helsinki, Finalnd, Nordic Hydrologic Programme Report #38.
- Oberdorfer J. A. and Peterson F. L. (1985) Waste-water injection: geochemical and biogeochemical clogging processes. Ground Water 23(6), pp. 753-761.
- Okubo T. and Matsumoto J. (1983) Biological clogging of sand and changes of organic constituents during artificial recharge. Water Research 17(7), pp. 813-821.
- Olsthoorn T.N. (1982). "The clogging of recharge wells, main subjects", KIWA - Communications 72, p. 150.
- Osei-Bonsu K. (1996) Clogging by sediments in injected fluid ?owing radially in a confined aquifer. PhD-thesis, Flinders University of South Australia, School of Earth Sciences.
- Osei-Bonsu K. (1996) Clogging by sediments in injected fluid ?owing radially in a confined aquifer. PhD-thesis, Flinders University of South Australia, School of Earth Sciences.
- Oswald, S.E., Kinzelbach, W., 2004. Three-dimensional physical benchmark experiments to test variable-density flow models. J. Hydrol. 290, 22-42.
- Pacinim, V. A., Ingallinella, A. M., and Sanguinetti, G., (2005). Removal of iron and manganese using biological roughing up flow filtration technology, Wat. Res. 39, 4463-4475.
- Page, D. and Dillon, P. (2007). Measurement of the biodegradable fraction of dissolved organic matter relevant to water reclamation via aquifers. CSIRO, Water for a healthy country report series. p28.
- Page, D., Miotliński, K., Dillon, P., Taylor, R., Wakelin, S., Levett, K., Barry, K., Pavelic, P., 2011. Water quality requirements for sustaining aquifer storage and recovery operations in a low permeability fractured rock aquifer. Journal of Environmental Management 92, p. 2410-2418.
- Park, C.-H. and Aral, M.M., 2003 "Multi-objective optimization of pumping rates and well placement in coastal aquifers", Journal of Hydrology, Vol. 290, Issues 1-2, pp. 80-99
- Park, N.S. and Hong, S.H., 2006 Optimization model for groundwater development in coastal aquifers, Advances in Geosciences, Vol. 4, pp. 159-166
- Paul Pavelic, Peter Dillon, and Nerville Robinson, 2005, Modelling of well-field design and operation for an Aquifer Sorage Transfer and Recovery(ASTR) Trial, Proceedings of the 5th

Symposium on Management of Aquifer Recharge, pp.133-138.
- Paul Pavelic, Peter Dillon, and Nerville Robinson, 2005, Modelling of well-field design and operation for an Aquifer Sorage Transfer and Recovery(ASTR) Trial, Proceedings of the 5th Symposium on Management of Aquifer Recharge, pp.133-138.
- Pavelic P., Dillon P. J., Barry K. E., Herczeg A. L., Rattray K. J., Hekmeijer P. and Gerges N. Z. (1998) Aquifer Storage and Recovery 2117 Well clogging effects determined from mass balances and hydraulic response at a stormwater ASR site. In Third International Symposium on Artificial Recharge, Amsterdam, Holland, pp. 21-25 September.
- Pavelic, P., Dillon, P. and Robinson, N., 2004, Groundwater Modelling to Assist Well-Field Design and Operation for the ASTR Trial at Salisbury, South Australia, CSIRO Land and Water Technical Report No. 27/04
- Pavelic, P., Dillon, P. and Robinson, N., 2004, Groundwater Modelling to Assist Well-Field Design and Operation for the ASTR Trial at Salisbury, South Australia, CSIRO Land and Water Technical Report No. 27/04, September 2004
- Pavelic, P., Dillon, P.J. and Simmons, C.T., 2006 Multiscle characterization of a heterogeneous aquifer using an ASR operation, Ground Water, 44 (2).
- Pavelic, P., Dillon, P.J., Barry, K.E., Vanderzalm, J.L. Correll, R.L. and Rinck-Pfeiffer, S.M (2007). "Water quality effects on clogging rates during reclaimed water ASR in a carbonate aquifer", Journal of Hydrology, Vol. 334, pp. 1-16.
- Peerez-Paricio A and Carrera J (1999). Clogging Handbook. EU Project on Artificial Recharge of Groundwater, Research program on Environment and Climate, Contract ENV-CT95?.0071.
- Peerez-Paricio A and Carrera J (1998). A conceptual and numerical model to characterize the clogging of artificial groundwater recharge systems. Proceedings of the 3rd International Symposium on Artificial Recharge of Groundwater (TISAR'98), Amsterdam, 21?5 September, 1998, AA Balkema, Rotterdam, ISBN. 90 5809 017 5, 55?60.
- Peerez-Paricio A and Carrera J (1999). Clogging Handbook. EU Project on Artificial Recharge of Groundwater, Research program on Environment and Climate, Contract ENV-CT95?.0071.
- Peter D, Paul P, Simon T, Stephanie RP, Russell M, Anthony K, Don P. 2006. Role of aquifer storage in water reuse. Desalination(188) 123-134.
- Peter Dillon, Paul Pavelic, Gudrun Massmann, Karen Barry, Ray Correll. 2001 Enhancement of the membrane filtration index (MFI) method for determining the clogging potential of turbid urban stormwater and reclaimed water used for aquifer storage and recovery. Desalination, 140,2, 153-165
- Peters, JH, Balkema, AA 1998 Artificial Recharge of Groundwater, III: 1998. Proceedings of the Third International Symposium on Artificial Recharge of Ground Water, Amsterdam
- Pieter J. Stuyfzand, J. C. Wakker, and B. Putters, 2005, Water quality changes during Aquifer Storage and Recovery(ASR): Results from pilot Herten(Netherlands) and their implications for modeling, Proceedings of the 5th Symposium on Management of Aquifer Recharge, pp.164-173.
- Progress in MAR in Australia 2012 보고서 MAR
- Prospects for managed underground storage of recoverable water 2012 보고서 MUS
- Pyne R. D. G. 1995. Groundwater recharge and wells ?A guide to Aquifer Storage and Recovery. Lewis Publishing, Florida, USA.
- Pyne, R. D. G. (2005). Aquifer Storage Recovery: A guide to groundwater recharge through

wells. 2nd Edition. ASR Press, Gainesville, Florida.
- Pyne, R. D. G. 1995, Groundwater Recharge and wells, A guide to aquifer storage recovery, Lewis Publishers
- Pyne, R. D. G. 2005. Aquifer Storage Recovery: A Guide to Groundwater Recharge through Wells. Second ed. Gainesville, FL: ASR Press.
- Pyne, R.D. G. (2005). Aquifer Storage Recovery: A guide to groundwater recharge through wells. 2nd Edition. ASR Press, Gainesville, Florida.
- Pyne, R.D. G. (2005). Aquifer Storage Recovery: A guide to groundwater recharge through wells. 2nd Edition. ASR Press, Gainesville, Florida.
- Pyne. R. D. G., (1995). Groundwater Recharge and Wells: A Guide to Aquifer Storage and Recovery. Lewis Publishers, London / CRC Press, Florida, USA. ISBN 1-56670-097-3.
- Quanrud, D. M., Arnold, R. G., Lansey, K. E., Begay, C., Ela, W., and Gandolfi, A. J., (2003). Fate of effluent organic matter during soil aquifer treatment: biodegradability, chlorine reactivity and genotoxicity, Journal of water and health 1(1), 33-44.
- Quanrud, D., Arnold, R., Wilson, L., and Conklin, M. (1996) "Effect of soil type on water quality improvement during soil aquifer treatment," Water Sci. Technol., 33(10-11), 419~431
- Quanrud, D., Arnold, R., Wilson, L., Gordon, H., Grahan, D., and Amy, G.(1996) "Fate of organics during column studies of soil aquifer treatment," J. Environ. Eng., 122(4), 314~321
- Quanrud, D., Arnold, R., Wilson, L., and Conklin, M. (1996) "Effect of soil type on water quality improvement during soil aquifer treatment," Water Sci. Technol., 33(10-11), 419~431
- Quanrud, D., Arnold, R., Wilson, L., Gordon, H., Grahan, D., and Amy, G.(1996) "Fate of organics during column studies of soil aquifer treatment," J. Environ. Eng., 122(4), 314~321
- R. David G. Pyne, 2005, Recent advances in ASR technology in the United States, Proceedings of the 5th Symposium on Management of Aquifer Recharge, pp.139-144.
- R. David G. Pyne, P.E. ASR Systems LLC 2009, "Aquifer Storage Recovery: Economics and Recent Technical Advances."
- R.G. Maliva and T. M. Missimer, 2010, Hydrogeology of ASR - Lessons from Over 60 Years of Global Practice, Proceedings, 7th International Symposium on Managed Aquifer Recharge (ISMAR), Abu Dhabi
- Rangeragan R, Muralidharan D, Deshmukh S.D, Hodlur G.K, Gangadhara Rao T. 2005. Redemarcation of recharge area of stressed confined aquifers of Neyveli groundwater basin, India, through tritium tracer studies. Environ Geology(48) 37-48.
- Rasmussen, P. 2008, Adaptive Management of groundwater buffering capacity in a semiarid area, the upper Guadiana Basin Spain, The ASEMWaternet WP Basin Workshop 2008, Jeju, Korea
- Rebhun M. and Schwarz J. (1968) Clogging and contamination processes in recharge wells. Wat. Res. 4, pp. 1207-1217.
- Reese, R.S., 2004, Review of Aquifer Storage and Recovery in the Floridan Aquifer System of Southern Florida, U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey FS 2004-3128
- Remediating over-produced and contaminated aquifers by artificial recharge from surface waters 2009 논문 AR
- Remote sensing of soil moisture: implications for groundwater recharge 2002 논 문 AR
- Rinck-Pfeiffer S., Ragusa S., and Sztajnbok P., (2000). Interrelationships between biological,

chemical, and physical processes as an analog to clogging in aquifer storage and recovery (ASR) wells, Water research, 34(7) , pp.2110 – 2118.

- Rinck-Pfeiffer, S., Ragusa, S., Sztajnbok, P., and Vandevelde, T., (2000). Interrelationships between biological, chemical, and physical processes as an analog to clogging in aquifer storage and recovery (ASR) wells, Water research, 34(7), 2110-2118.
- Risk assessment of ASTR with urban stormwater for producing water of a potable quality 2010 논문 ASTR
- Robust Design for MAR in Australia 2009 보고서 MAR
- Robust policy design for management aquifer recharge 2011 보고서 MAR
- Role of aquifer storage in water reuse 2006 논문 ASR
- Rolf Herrmann, 2005, ASR well field optimization in unconfined aquifers in the Middle East, Proceedings of the 5th Symposium on Management of Aquifer Recharge, pp.109-114.
- Rosenbrand, E., (2010). Modelling biofilm distribution and its effect on two-phase flow in porous media, Stuttgart University.
- Rousk, J., Brookes, P.C., Glanville, H.C. and Jones, D.L. (2011). Lack of correlation between turnover of low-molecular-weight dissolved organic carbon and differences in microbial community composition or growth across a soil pH gradient. Appl. Environ. Microbiol. 77, 2791-2795.
- Sally Harris, Marcus Adams, and Michael Jones, 2005, NLARS: Evolution of an Artificial Recharge Scheme, Proceedings of the 5th Symposium on Management of Aquifer Recharge, pp.103-108.
- SAT – The Long-term Performance of the Dan Region Reclamation Project 2003 발 표 SAT
- Saving north america's greatest aquifer by fax 2002 article ASR
- Scheurer M., Storck F. R., and Brauch H., (2010). Performance of conventional multi-barrier drinking water treatment plants for the removal of four artificial sweeteners, Water research, 44(12), 3573 – 3584.
- Schottler, U., (1996). Artificial Recharge of Groundwater in Germany: State of the Art in Research and Practice. In: Artificial Recharge of Groundwater (ed Kivimaki A-L and Suokko T). Proceedings of an International Symposium, Helsinki, Finland.
- Sedighi, A., Klammler, H., Brown, C., Hatfield, K., 2006. A semi-analytical model for predicting water quality from an aquifer storage and recovery system. Journal of Hydrology 329, 403-412.
- SFWMD 2004 Aquifer Storage and Recovery in the Comprehensive Everglades Restoration Plan (CERP) ASR IV Conference, American Ground Water Trust.
- SHARJAH Electricity & Water authority 2010, “Economics of aquifer storage and recovery system(ASR) -Nizwa ASR pilot site”, ISMAR.
- Shaw J. C., Bramhill B., Wardlaw N. C. and Costerton (1985) Bacterial fouling in a model core system. Appl. Environ. Microbiol. 49(3), pp. 693-701.
- Simmons, C.T., Fenstemaker, T.R., Sharp, J.M., 2001. Variable-density groundwater flow and solute transport in heterogeneous porous media: approaches, resolutions and future challenges. J. Contam. Hydrol. 52, 245?275.
- Small JC, Booker JR. Surface deformation of a layered soil deposit due to extraction of water. Proceedings of the 9th Australian Conference on Mechanical Structural Materials, Sydney, Australia, 1984; 33?38.

- Smith, R.J., Jeffrie, T.C., Roudnew,B., Fitch, A.J. Seymour, J. R., Delpin, M.W., Newton, K., Brown, M.H. and Mitchell, J.G. (2012). Metagenomic comparison of microbial communities inhabiting confined and unconfined aquifer ecosystems. Environ. Microbiol. 14(1), 240−253.
- Stephanie Rinck−Pfeiffer, Colin Pitman, and Peter Dillon, 2005, Stormwater ASR in practice and ASTR(Aquifer Storage Transfer and Recovery) under investigation in Salibury, South Australia, Proceedings of the 5th Symposium on Management of Aquifer Recharge, pp.151−159.
- Stephanie Rinck−Pfeiffer, Santo Ragusa, Pascale Sztajnbok, Thierry Vandevelde. 2000 Interrelationships between biological, chemical, and physical processes as an analog to clogging in aquifer storage and recovery (ASR) wells Water Research, 34,7
- Stevik, T.K., Aa, K., Ausland, G., Hanssen, J.F.(2004) Retention and removal of pathogenic bacteria in wastewater percolating through porous media: a review. Water Research. 38(6), 1355?1367.
- Stewart, M.K., 2012, A 40−year record of carbon−14 and tritium in Christchunrch groundwater system, New Zealand: Dating of young samples with carbon−14, J. of Hydrology, 430−431, 50−68.
- Stuyfzand and Timmer, 2001, Description of test sites Langerak and Nieuwegein (Netherlands), in European Commission, Directorate−General for Research. 2001 Artificial recharge of groundwater, EC project EVN4−CT95−0071.
- Stuyfzand, P. J., and Doomen, A., (2004). The Dutch Experience with MARS (Managed Aquifer Recharge and Storage): A Review of Facilities, Techniques and Tools (Version 1). An NWP/PMC Groundwater Publication, KIWA Partners voor Water, The Netherlands.
- Stuyfzand, P. J., and Doomen, A., (2004). The Dutch Experience with MARS (Managed Aquifer Recharge and Storage): A Review of Facilities, Techniques and Tools (Version 1). An NWP/PMC Groundwater Publication, KIWA Partners voor Water, The Netherlands.
- Suk, H. 2006 Modeling approach for selecting optimum location of groundwater dam, International symposium on artificial recharge of groundwater, Seoul National University
- Sung, W., and Morgan, J. J., (1981). Oxidative removal of Mn(Ⅱ) from solution catalysed by the γ−FeOOH(lepidocrocite) surface, Geocheicaet Cosmochimica A cta, 45, 2377−2383.
- Taheri, T., Voudouris, K., and Basami, Y., 2012, Estimation of porosity and specific yield by application of geoelectrical method − A case study in western Iran, Journal of Hydrology, 454/455, 160−172.
- Taylor S. W. and Jaffe P. R. (1990) Biofilm growth and the related changes in the physical properties porous medium. Wat. Resour. Res. 26(9), pp. 2153−2159.
- Taylor, S.W., Lange, C.R., and Lesold, E.A. (1997). Biofouling of contaminated ground−water recovery Wells: characterization of microorganisms. Ground Water. 35(6), 1745−6584.
- Temporal variation of chemical and isotopic signals in major discharges of an alpine karst aquifer in Turkey 2007 논문 AR
- The Dutch experience with MARs 2004 보고서 MAR
- Thomure, Tim M. and Ralph Marra (2005), ""The Role of Recharge in Tucson''s Sustainable Water Future"", 12th Biennial Symposium on Groundwater Recharge, Tucson, AZ.
- Thorenz, C., Kosakowski, G., Kolditz, O., Berkowitz, B., 2002. An experimental and numerical investigation of saltwater movement in coupled saturated?partially saturated systems. Water Resour. Res. 38(6), 1069.
- Toze, S., Bekelec, E., Paged, D., Sidhua, J., Shackleton, M. (2010) Use of static quantitative microbial risk assessment to determine pathogen risks in an unconfined carbonate aquifer

used for managed aquifer recharge. Water Research. 44(4), 1038?1049.
- Tucson Water 2004, Water Plan: 2000-2050.
- U.S EPA (1998) Permeable reactive barrier technologies for contaminant remediation, Report # EPA 600-R-98-125
- U.S EPA (1999) Field application of in situ remediation technologies: Permeable reactive barriers, Report # EPA 542-R-99-002
- UNESCO-IHP and Central Ground Water Board, Govt. of India, 2000, Guide on Artificial Recharge to Ground Water. 2000. Central Ground Water Board, Govt. of India, New Delhi.
- United nations, 2000, Groundwater and Society: Resources, Tensions and Opportunities. Themes in groundwater management for the 21st century. United Nations Publications.
- US NRC (2008) Prospects for managed underground storage of recoverable water
- USEPA, (1990). Technology for Upgrading Existing or Designing New Drinking Water Treatment Facilities.
- USEPA, (2003). Water Treatment Technology Feasibility Support Document for Chemical Contaminants.
- Vandevivere P. and Baveye P. (1992) Saturated hydraulic conductivity reduction caused by aerobic bacteria in sand columns. Soil Sci. Soc. Am. J. 56(1), pp. 1-13.
- Vecchioli J. (1970) A note on bacterial growth around a recharge well at Bay Park, Long Island, New York. Wat. Res. 6, pp. 1415-1419.
- Vetter, A., Mangelsdorf, K., Wolfgramm, M., Rauppach, K., Schettler, G., Vieth-Hillebrand, A. (2012). Variations in fluid chemistry and membrane phospholipid fattyacid composition of the bacterial community in a cold storage groundwater system during clogging events. Appl. Geochem. 27(6), 1278?1290.
- Viswanathan, M., Al Senafy, M., Rashid, T, Al-Awadi, E., and Al-Fahad, K.(1999), "Improvement of tertiary wastewater quality by soil aquifer treatment," Water Sci. Technol., 40(7), 159~163
- Volmer B, Melissa G, White and Nicholas J, Souter. 2009. Injection of fresh river water into a sanline floodplain aquifer in an attempt to improve the condition of river red gum. Hydrological Processes(23) 3464-3473.
- Voudouris K, Diamantopoulou P, Giannatos G, Zannis P. 2006. Groundwater recharge via deep boreholes in the Patras Industrial Area aquifer system(NW Peloponnesus, Greece). Bulletin of engineering geology(35) 297-308.
- Voudouris, K. (2011). Artificial recharge via boreholes using treated wastewater: possibilities and prospects. Water. 3, 964-975.
- Ward J, and Dillon P 2011, Robust policy design for managed aquifer recharge, Waterlines report, National Water Commission, Canberra. Department of Water Affairs and Forestry, 2004. National Water Resource Strategy: First Edition.
- Ward, J and Dillong, P., 2011. Robust policy design for managed aquifer recharge. Waterlines Report Series No 38.
- Ward, J.D., Simmons, C.T., Dillon, P.J. 2008 Variable-density modelling of multiple-cycle ASR: importance of anisotropy and layered heteroeneity in brackish aquifers, J. of Hydrology, 356.
- Washington State, 2000, Summary of major ASR projects in Washington, Washington State Dept. of Ecology.
- Water for Good, 2012. MAR Regulation in South Australia. <Accessed at Sep 10, http://www.waterforgood.sa.gov.au/stormwater-wastewater/managed-aquifer-recharge/mar-reg

ulation-in-south-australia/>

- Watson, S.J., Barry, D.A., Schotting, R.J., Hassanizadeh, S.M., 2002. Validation of classical density-dependent solute transport theory for stable, high-concentration-gradient brine displacements in coarse and medium sands. Adv. Water Resour. 25, 611-635.
- Weiss, W. J., Bouwer, E. J., Ball, W. P., O' Melia, C. R., LeChevallier, M. W., Arora, H., and Speth, T. F. (2003). Riverbank filtration-fate of DBP precursors and selected microorganisms, Journal of American Water Works Association, 95. pp. 68-81.
- Werner, A.D., Jakovovic, D., Simmons, C.T., 2009. Experimental observations of saltwater up-coning. J. Hydrol. 373 (1-2), 230-241.
- WHO (2006). Water Safety Plan Manual.
- WHO (2012. 8.), http://www.who.int
- Wilson, L., Amy, G., Gerba, C., Gordon, H., Johnson, B., and Miller, J. (1995), "Water quality changes during soil aquifer treatment of tertiary effluent," Water Environ. Res., 67(3), 371~376
- Wood M, Le Gal La Salle C, Dillon PJ, Hutson J, Fallowfield H and Rinck-Pfeiffer SM (2005). Effect of grain size on biological clogging in porous media leached with synthetic nutrient solutions. In: Proceedings of the 5th International Symposium on Management of Aquifer Recharge (ISMAR5), Berlin, Germany, 11?.16 June 2005.
- Z.Katta, N.Kadkoy, S.Nasser. M.Safadi, A.Hamed. 2010. Isotopes and geochemistry in a managed aquifer recharge scheme: a case study of fresh water injection at the Dmascus University Campus, Syria. 24, 1791-1805.
- Zhang, Q., Volker, R.E., Lockington, D.A., 2001. Influence of seaward boundary condition on contaminant transport in unconfined coastal aquifers. J. Contam. Hydrol. 49(3-4), 201-215.
- Zhu, I.X., Getting, T. and Bruce, D. (2010). Review of biologically active filters in drinking water applications. J. American Water Works Association. 102(12), 67-77.