

# ‘청정 지하저수지 개발 연구단’ 소개 및 개요



**박 남 식** ▶▶▶

청정지하저수지 개발 연구단장  
동아대학교 토목공학과 교수  
nspark@dau.ac.kr



**김 혜 정** ▶▶▶

청정지하저수지 개발 연구단 사무국장  
hjtensi@dau.ac.kr



**이 승 휘** ▶▶▶

우리엔지니어링 수공부 연구실장  
lshwave@donga.ac.kr

〈청정 지하저수지 개발 연구단〉은 국토교통과학기술진흥원의 물관리연구사업의 연구비 지원으로 2013년 6월 15일에 발족되었으며 5년의 기간으로 기술 개발 및 검증 연구를 수행할 예정이다. 본 특집은 연구단 전반에 대한 기사 1편과 세부과제별 기사 3편 등 총 4편의 기사로 구성된다. 본 기사의 주요 내용은 필자가 책임연구자로 작성했던 청정 지하저수지 기획연구보고서(국토해양부와 한국건설교통기술평가원, 2012)에서 발췌되었다.

## 1. 서론

### 1.1 지하저수지의 개념 및 정의

‘지하저수지’란 ‘관정이나 함양지 등의 인공적인 수단을 이용하여 지표수를 대수층에 충전시키고 일정 기간 저장시키거나 유하시킨 후 양수하여 사용하기 위한 목적으로 활용되는 대수층과 일련의 시설’을 가리킨다. 여기서 시설에는 주입/함양 및 양수 시설, 관망, 전후처리 시설, 시스템 감시 및 운영 시스템 등이 포함되지만 터널, 지하저류조, 또는 지하댐 등의 대형 인공 구조물은 포함되지 않는다. 따라서 본 연구단에서 추구하는 지하저수지는 대수층의 자연 상태를 활용하여 일정 규모의 저수량 확보와 수질 개선을 꾀한다는 점에서 기존의 수자원 확보 기술과 차별성을 가진다. 청정 지하저수지는 지표수 수자원과 지하수 수자원의 장단점을 활용/보완하는 적극적이며 능동적인 지표수-지하수 연계 활용기술이며 이는 지표수 문제 발생 시 지하수를 개발하는 소극적이고 수동적인 통상의 지표수-지하수 연계활용과 차별화된다.

본 연구단의 연구 목표는 계획 단계부터 설계, 시공, 운영 및 유지관리 단계에까지 지하저수지 생애 주기 전반에 필요한 토탈 솔루션 기술 개발과 기술 검증에 있다.

## 1.2 시장 동향

지하저수지 기술은 지하수 인공함양 기술의 한 분야이다. 인공함양이 일찍이 시작된 미국을 포함하여 해외 국가들에서는 2000년대 들어 인공함양 시설이 급증하고 있다. 이는 인공함양 기술이 수자원 확보의 새로운 수단으로 대두되고 있음을 나타내며 세계의 인공함양 시장은 도입기에 있음을 의미한다.

UNESCO가 운영하고 있는 국제지하수자원평가센터 (International Groundwater Resources Assessment Centre, IGRAC)는 인공함양에 대한 국가별 자료를 조사한 바 있다. 지구 상의 255개 국가 중에서 어떤 형태로든 인공함양이 시행되고 있는 국가는 57개국이며 건 수는 총 468건이라고 조사결과를 제시한 바 있다. 그런데 상기 자료는 실제보다 과소 평가된 것으로 판단된다. 예를 들면 우리나라의 경우 제주도 한천에 인공함양 관정이 20개가 설치되어 있으나 상기 조사결과에는

“무”로 집계되어 있었다. 따라서 상기 자료는 전 세계에서 인공함양이 시행되고 있는 최소한의 사례를 보여주고 있다고 판단된다.

GWI(2010)는 전 세계의 ASR (aquifer storage and recovery) 용량은 379만 $m^3/d$ 이며, 2020년에는 5배로 증가하며 설계 및 설치비용은 \$400백만에 달 할 것으로 예상한 바 있다.

1983년 미국 플로리다에서 최초로 상업적 용도로 사용된 이후 현재 미국에서만 95개 이상의 ASR 시스템이 운영되고 있으며(GWI 2010) Pyne(2005)은 1983년에 3개에 불과했던 ASR 시스템이 2005년에는 72개로 증가했으며 최소한 100개가 개발 중이라고 보고한 바 있다 (그림 1).

해외에서 지하수 인공함양은 상당 부분 실용화 되었으나 기술 수준은 그다지 높지 않다. 연구단에서 확보한 300여 종의 관련 자료를 분석한 결과 기존의 인공함양 시설은 두 세가지 안에 대하여 지하수 흐름 모델을 적용하여 안을 선택했던 몇몇 사례를 제외하고는 대부분 설계자의 경험과 직관에

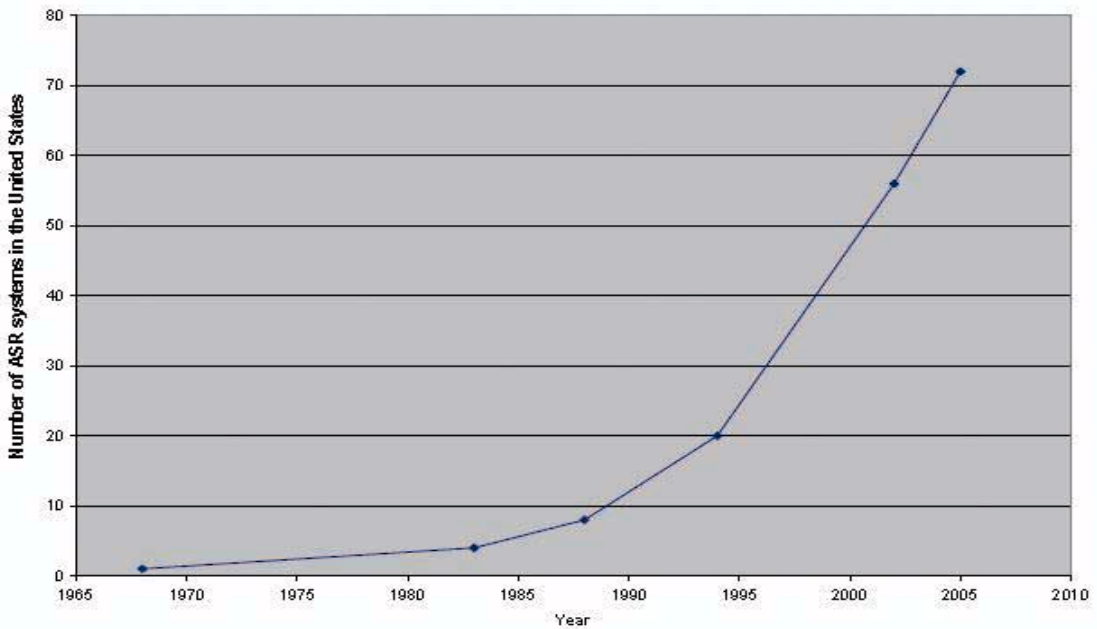


그림 1. 1968-2005 미국 내 지하수 ASR 시스템 개수의 변화 (Pyne, 2005)

의하여 주입정과 양수정 등 주요 시설물이 결정되고 운영되고 있는 것으로 나타났다. 다만 대수층 수질 변화와 주입정의 막힘 현상에 대해서는 상당한 연구와 기술 개발이 수행된 것으로 나타났다. 본 연구단에서는 선진국에서도 초보 단계에 있는 설계 및 운영관리 기술을 고도화 시키는 데 그 목적을 두고 있다.

## 2. 수자원 현황 및 위협요소

### 2.1 수자원 현황

우리나라 대부분 대도시의 경우 용수를 댐수에 의존하고 있는 반면 대구광역시 및 부산광역시의 경우는 하천 표류수 의존도가 무척 높다 (표 1). 부산광역시의 경우 하천수 의존도가 94%를 초과하여 상류지역 오염 시 대처가 어려운 지리적 취약점과 강수량 감소 시 취수 자체가 어려워 안정적인 취수가 불가능해지는 단점을 가지고 있다.

지표수 수자원은 다른 형태의 수자원에 비하여 경제성은 우수하나 환경 훼손, 시공간적 변동성에 대한 취약성, 각종 수질 위협요소에 노출되는 단점

표 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

표 2. 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

을 가지고 있다.

### 2.2 수질

경제규모의 팽창에 따른 생활용수, 공업용수, 농업용수 등의 사용량이 증가하고 이에 따른 오염원의 증가와 수질 오염사고가 증가하고 있다. 국내 수질사고는 유류 유출사고가 많으나, 하폐수 유입, 수환경 변화 등도 사고의 주요 원인으로 나타나고 있다. 지역적으로는 낙동강권역에서 수질사고 빈도가 높게 나타난다 (표 2). 2004년에는 97개 정수장 취수원수 조사결과 Giardia와 Cryptosporidium이 다수 원수 샘플에서 검출되었다. 또한 상수원 신규 오염물질이 지속적으로 추가되고 있다. 2009년에는 미량유해물질 72종에 대한 조사 결과 브로모포름 등 22종이, 생활하수 처리수에서 항생제 (린코마이신등)등 잔류의약 물질 검출되어 지표수 수질에 대한 불안감이 가중되고 있다.

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 농

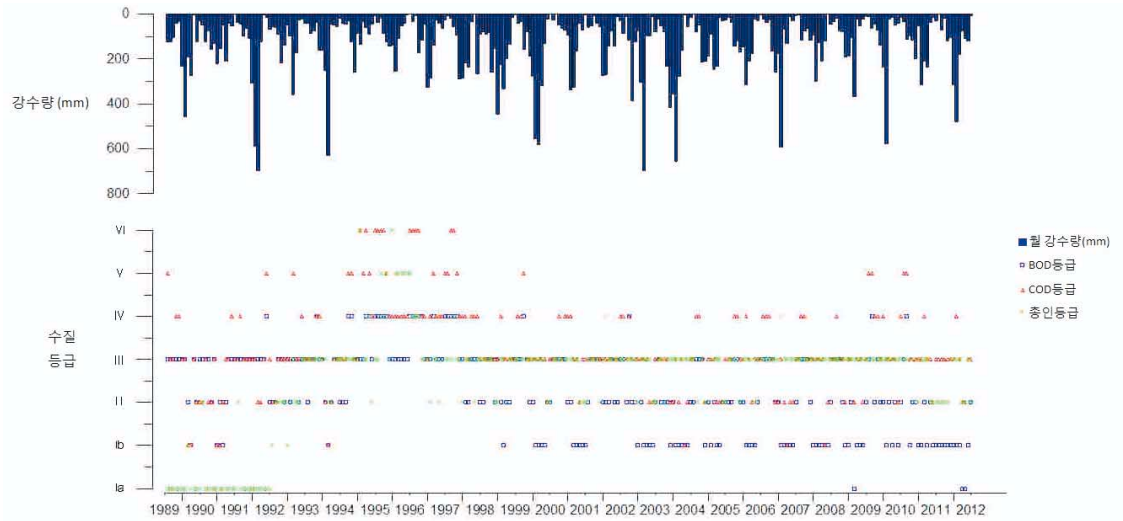


그림 2. 낙동강 물금 지점의 89년부터 13년간 월평균 수질

도)도 빈발하는 것으로 나타난다 (그림 2).

주목할 부분은 95년~97년 사이의 가뭄 기간 중 거의 전 기간 동안 대부분 수질 지표가 3급수 이하를 기록하였다. 기후변화로 빈도와 강도가 가중될 것으로 예상되는 가뭄과 4대강 사업으로 건설된 8개 보가 유속을 현저하게 감소시켜 낙동강 하류의 수질은 더욱 심각한 위험에 처해 있다고 판단된다.

### 2.3 가뭄

최근 우리나라에서 가뭄의 발생빈도가 증가하고

있으며, 강도 또한 강해지고 있다. 1990년대 이후 지역에 따라 2~3년마다 크고 작은 가뭄과 7년 주기의 극한 가뭄이 발생하는 것으로 나타났으며, 지구온난화에 의한 기후변화로 2061~2090년에는 1977~2006년과 비교할 때 가뭄발생기간이 3.4배 증가할 것으로 전망되고 있다. 공식 집계된 가뭄 피해 사례는 표 3과 같다.




수자원장기종합계획에 따르면, 1990년대 이후 가뭄에 의해 3회 이상의 물부족을 경험한 상습 가뭄피해지역은 48개 지역이고, 특히 소하천 및 계곡수 등을 수원으로 하는 지방상수도 또는 마을상

표 3. 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)

표 4. 수원 별 물 공급 안전도

공급시설	광역상수도	지방상수도	간이상수도
수원			
공급시설	다목적댐, 광역 및 지방상수도	하천, 용수전용댐 및 지방상수도	소하천, 지하수, 마을상수도등
이수 안전도	30~40년 가뭄	10년 가뭄	10년 가뭄 이하
주공급지역	시 지역	읍 지역	면 (농어촌)
상수도보급율	98%	86%	45%

수도 등의 공급지역은 3개월 이상 가뭄 시 수원고갈 등으로 물 부족 현상을 겪고 있는 것으로 조사되었다. 국내 농어촌지역의 경우 상수도 보급율이 50% 미만이고, 이수 안전도가 10년 빈도 가뭄(표 4)에 맞추어져 있어 빈번한 가뭄 피해를 감수해야 한다.

## 2.4 물 분쟁

우리나라는 다양한 원인에 기인한 물 분쟁 사례를 겪은 바 있다. 다수의 이익 대 소수의 피해, 물 이전으로 인한 지역간 갈등, 개발 대 보존 등 다양한 이슈에서 첨예한 대립이 있었다. 이러한 분쟁을 해결하기 위해 환경분쟁조정위원회가 설립되어 조

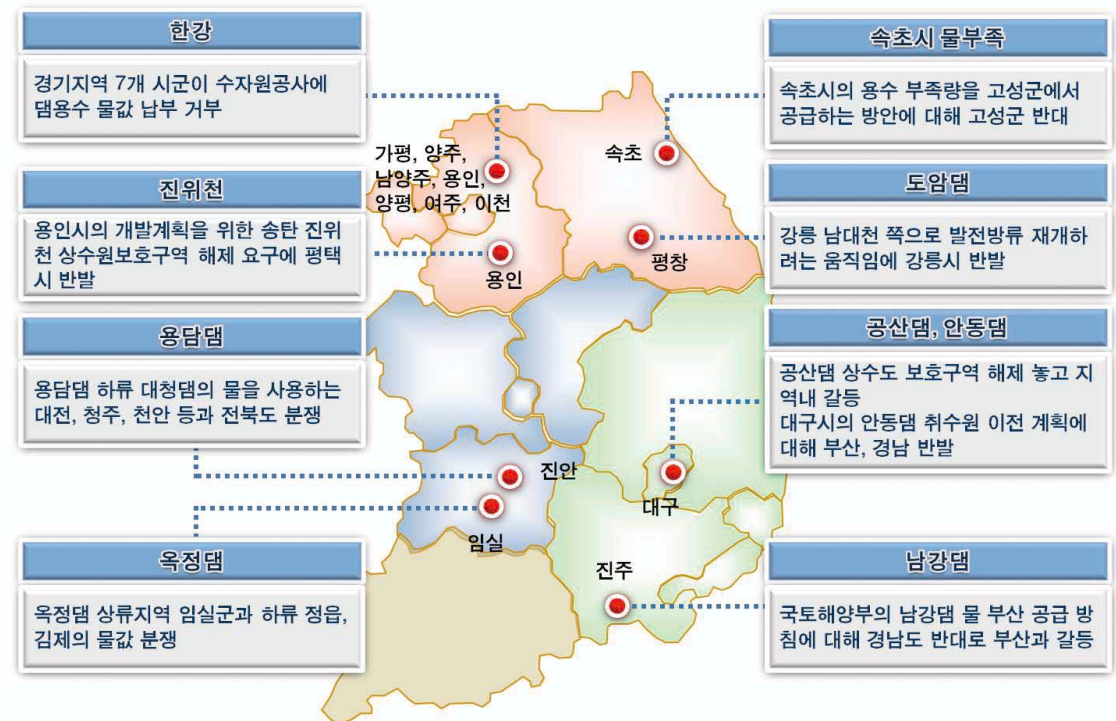


그림 3. 국내 수리권 분쟁이 발생하고 있는 지역 사례

정 노력을 하고 있으나 대립 당사자들간의 상호 불신은 쉽게 해소되기 어렵다. 현재도 논란이 지속되고 있는 4대강 사업을 제외하더라도 국내에서 물 관련 정부, 공기업, 지역 간 물 분쟁은 2000년도 이후 현재까지 58건으로 연평균 6건에 달하는 것으로 나타났다. 수자원 관련 분쟁 사례를 살펴보면, 예전에는 댐 건설등과 관련한 분쟁이 많았던 반면, 최근에는 수자원 확보와 관련한 취수관련 분쟁사례가 점차 늘어나고 있는 실정이다 (그림 3).

### 3. 지하저수지 기술

#### 3.1 지하저수지의 형식

본 연구단에서는 지하저수지를 상시주입-상시양수 형식과 우기주입-건기양수 형식으로 구분하여 연구를 추진하고 있다. 각 형식에 대한 특징은 다음과 같다.

상시주입-상시양수 형식의 지하저수지는 주입과 양수가 연중 이루어지는 형식으로 수질은 불량해도 주입할 수 있는 지표수가 연중 확보될 수 있으며 대수층이 발달한 지역에 설치될 수 있다. 동형식의 지하저수지 후보지로 하천의 선상지나 하구의 퇴적층을 들 수 있다. 특히 대하천 하구 삼각주는 통상 뚜렷한 층서의 대수층이 대규모로 발달

되어 있으므로 지하저수지의 좋은 후보지가 될 수 있다. 국내에서는 낙동강 하구 등 대 하천 하구에 충적층이 발달되어 있으며 후보지에 따라 수억 $m^3$  이상의 저수량 확보가 가능할 것으로 판단된다.

삼각주 퇴적층에서는 점토와 실트층과 같은 난투수성 지층은 상부에, 모래와 자갈층과 같은 투수성 지층은 하부에 피압대수층 형태로 나타나는 경우가 많다. 피압대수층은 난투수성 지층에 의하여 지표면의 오염물로부터 보호될 수 있으므로 수질 측면에서 더 유리하다. 삼각주에서는 형성 이력에 따라 대수층에 염도가 높은 지하수가 존재할 수 있는데 이러한 경우 지하저수지 조성을 위해서는 염 지하수를 담수로 치환하며 담수체를 조성하는 고도의 기술이 필요하지만, 통상 기득 지하수 수리권이 존재하지 않으므로 저수지 구성에 더 유리한 측면도 있다.

그림 4와 5에 상시주입-상시양수 지하저수지의 개념을 평면도와 연직단면도로 도시하였다. 하천에서 취수된 지표수는 주입정 막힘 현상을 저감하기 위하여 약간의 전처리 과정을 거쳐 주입정을 통하여 대수층으로 주입된다. 대수층의 흐름을 거쳐 수질이 개선된 주입수는 양수정에서 양수되어 약간의 후처리 후 (소독 등) 정수로 공급될 수 있다. 이 때 대수층에 목표 규모의 저수량을 확보할 수 있다. 따라서 지하저수지의 핵심 성능 목표는 저수량과 수질 개선 정도이다. 저수량은 대수층의 두께

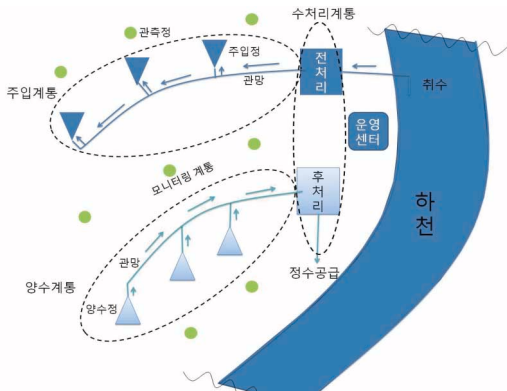


그림 4. (상시주입-상시양수) 지하저수지의 개념도 (평면)

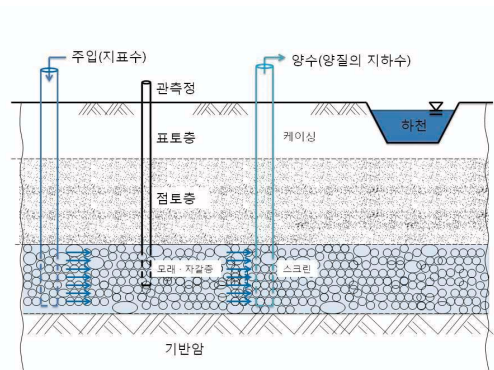


그림 5. (상시주입-상시양수) 지하저수지의 개념도 (단면)

및 분포 면적 그리고 유효공극율 등에 의하여 결정된다. 예를 들어, 두께 15m, 면적이 4km<sup>2</sup>, 그리고 유효공극율이 0.2(모래/자갈층)인 경우 저수량이 약 1,200백만m<sup>3</sup>이 된다.

지하저수지의 성능을 좌우하는 설계 변수에는 저수량, 주입량 및 양수량 (일 생산량), 관정의 분포, 비상 시 운영 방안 등이 있다. 주입량과 양수량은 대수층의 투수계수와 저류계수 등의 수리지질 특성과 관정특성 및 지하저수지 운영방식 등에 의하여 결정된다. 지하저수지는 하천 수질 사고, 재난, 또는 범죄/테러 시 주입을 전면 중단한 상태에서 저수량을 이용하여 일정 기간 양수를 지속할 수 있으며 비상시 양수량 및 양수기간도 설계 요소로 결정되어야 한다.

두 번째 지하저수지 형식은 우기주입-건기양수이다. 이 형식은 잉여 지표수가 우기에만 발생하는 지역을 대상으로 한다. 하천 발달이 빈약한 산간, 도서 및 해안 지역이 주 대상이며 이러한 지역에서는 대수층의 규모가 빈약하여 소규모 지하저수지로 규모가 제한되는 경우가 많다. 여기서도 해안 및 도서지역의 후보 대수층에는 염도가 높은 지하수가 존재할 수 있다.

그림 6과 7에는 해안 및 도서지역 또는 산간 지역의 우기주입-건기회수 지하저수지의 개념도를 제시하였다. 산간 지역의 경우 통상 지하수 동수경사가 크므로 우기 주입시설의 위치는 저장기간 동안의 유하거리를 고려하여 양수정의 상류에 설치해야 한다. 해안지역의 경우 지하수의 동수경사가 작으면 단일 관정에서 주입과 회수가 시행될 수 있

으나 동수경사가 큰 경우에는 주입정과 양수정을 구분해야 한다.

동수경사가 큰 지역의 경우 우기에 관정이나 함양지를 통하여 대수층으로 충전된 지표수는 암반층 상부에 지하수 마운드를 형성하며 사면 경사를 따라 흘러내린다. 건기에 하류의 양수정에 도달한 마운드에서 지하수를 취수하는 시스템이 우기주입-건기양수 형식의 지하저수지의 작동 원리이다. 설계변수는 주입량, 주입기간, 유하기간, 양수량, 양수기간 등이며 성능은 양수량, 양수기간 등으로 평가될 수 있다. 이때 주입정과 양수정 사이의 간격은 유하기간과 대수층의 수리지질특성에 의하여 결정된다.

지하수 동수경사가 작은 해안 지역 등에서는 한 개의 관정을 이용하여 주입 및 양수를 시행하는 우기주입-건기회수 형식이 적용될 수 있다. 통상 ASR(aquifer storage and recovery)로 알려져 있는 이 형식의 지하저수지는 우기에 형성된 지하수 마운드가 저장기간 동안 그다지 멀리 이동하지 않는 조건일 때 적용될 수 있다. 역시 이 형식에서도 주입량, 주입기간, 저장기간, 양수량, 양수기간 등이 주요 변수이다.

본 연구단의 최종목표는 지표수의 대수층 저장을 통하여 수자원을 확보하고 청정 용수를 생산할 수 있는 지하저수지 기술의 개발과 기술 검증이다. 연구단의 지하저수지 형식 별 목표는 다음과 같다.

- 천만 m<sup>3</sup>급 용수 저수 및 십만 m<sup>3</sup>/day급 청정 용수 생산이 가능한 상시주입-상시양수 지하저수지 계획, 설계, 구축, 운영 및 유지관리

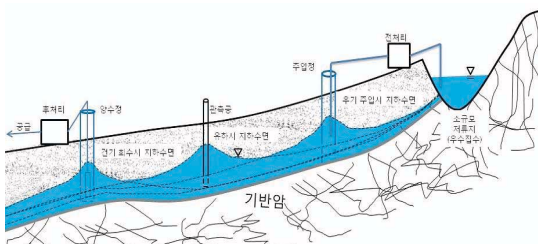


그림 6. 산간 지역 소규모 지하저수지 개념도 (연직 단면)

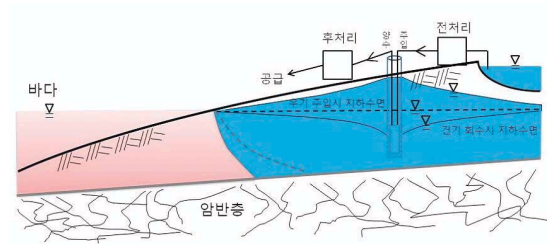


그림 7. 해안지역 소규모 지하저수지 개념도 (연직 단면)

기술 개발

- 백만 m<sup>3</sup>급 용수 저수 및 2,000 m<sup>3</sup>/day급 상시주입-상시양수 시험 지하저수지에서 기술 검증
- 건기에 30일간 50 m<sup>3</sup>/day 이상 생산 가능한 우기주입-건기회수 지하저수지 설계, 구축, 운영 및 유지관리 기술 개발

3.2 과제의 구성 및 목표 성과

우리나라의 전문 인력의 가용성을 고려하여 상술된 목표를 효율적으로 달성하기 위하여 다음 표 5와 같이 연구단 운영을 위한 총괄과제와 기술 연구를 위한 3개의 세부과제로 연구과제를 구성하였다. 연구진은 5년의 연구를 통하여 다음과 같은 핵심 성과물을 제시하고자 한다.

- 천만m<sup>3</sup>급 저수량 및 십만m<sup>3</sup>/day급 생산을 위한 대규모 (상시주입-상시양수) 청정 지하저수지 토탈 솔루션 패키지
- 저수량 백만m<sup>3</sup>와 일 생산량 2천m<sup>3</sup>/day 대규모

모 지하저수지 시험 시설

- 건기에 30일간 50m<sup>3</sup>/day 이상 생산을 위한 소규모 청정 지하저수지 토탈 솔루션 패키지

토탈 솔루션 패키지는 전술한 바와 같이 지하저수지의 계획 단계에서부터, 설계, 시공, 운영 및 유지관리 단계까지 지하저수지의 생애주기 전반에 필요한 기술을 포함한다. 구체적으로는 다수의 주입정과 양수정의 위치 및 주입량의 가능한 조합(수백만 가지 이상의 가능성)으로 구성되는 결정변수 공간을 효과적으로 탐색하는 simulation/optimization 기법으로 유사 전역 극치(near global optimum)를 탐색하는 기술로 주입계통과 양수계통의 (관망, 주입정, 양수정) 최적 설계 기술, 정밀 모델링 기술을 바탕으로 운영 및 유지관리 기술, 대수층의 생지구화학적 수질 개선 능력을 고려한 맞춤형 주입 전 수처리 기술, 그리고 지하저수지 활성화 법/제도 개선 방안 수립 및 수질 위해성 사전관리 기술, 부지 조사기술, 시공 기술, 지하수 및 지반변형 모니터링 기술 등이 포함된다.

표 5. 과제 구성 및 연구진

세부과제	기술 개발 내용	책임자	소속
총괄 연구단 운영	• 청정 지하저수지 연구단 운영	박남식	동아대학교
1세부 상시주입-상시양수 지하저수지 토탈솔루션 기술 개발	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 지하저수지 최적 설계 기술 개발 및 제도개선 연구</li> <li>• 평상시 및 비상 시 지하저수지 운영 기술 개발</li> <li>• 지하저수지 성능 유지관리 기술 개발</li> <li>• 지하저수지 전/후 수처리 기술 개발</li> <li>• 지하저수지 지화학적 수질 개선 기술 개발</li> </ul>	박남식 최재호 안영희 양정석 정우창 홍성호 이승학 윤성택	동아대학교 국민대학교 경남대학교 송실대학교 KIST 고려대학교
2세부 상시주입-상시양수 지하저수지 시험시설 구축 기술 개발	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 지하저수지 부지특성 평가 기술 개발</li> <li>• 지하저수지 설치 기술 개발</li> <li>• 지하저수지 원격 모니터링 및 제어 시스템 기술 개발</li> <li>• 지하저수지 지반변형 감시 시스템 기술 개발</li> </ul>	정상용 정재훈 이영동 최진오	부경대학교 (주)팬아시아워터 (주)지오텍엔컨설턴트 이피에스엔지니어링(주)
3세부 우기주입-건기양수 지하저수지 구축 기술 개발	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 도서·산간지역 우기주입-건기회수 소규모 청정 지하저수지 구축 기술 개발</li> </ul>	김용성 고병련 이재원	지오그린21(주) 제주국제대학교 동아대학교



시험 지하저수지는 낙동강 하구 델타 지역의 하천 부지(제외지)에 설치하는 것으로 계획하고 있다. 낙동강 하구에는 충적층의 두께가 60~100m의 분포를 보이며 20~30m 두께의 점토층 하부에 30~40m 두께의 모래 자갈층이 넓은 지역에 분포하는 것으로 조사되어 우수한 지하저수지 후보지이다. 연구 개시 약 2년 이내에 토탈 솔루션 기술을 이용하여 시험시설을 구축하고 그 후 약 2년의 기간에 걸쳐 기술 검증 및 보완 연구를 수행할 계획이다.

#### 4. 맺음말

청정 지하저수지 개발 연구단은 지하수 인공함양 기술의 불확실성을 축소시키고 경제성을 향상시키기 위한 고도화된 기술을 개발하고자 한다. 연

구가 성공하면 청정지하저수지는 기존의 대체 수자원으로 고려되고 있는 지하수, 강변여과수, 해수담수화, 빗물 활용 등에 비하여 수량과 수질 측면에서 우수한 대안으로 고려될 수 있을 것으로 판단된다. 또한 지하저수지는 기후변화로 더욱 심화될 것으로 예상되는 강수분포의 변동성, 대형 재난, 수질 사고 또는 범죄 등에 직접 노출되어 있는 지표수에 대한 의존도를 축소시켜 물 안보도를 제고시키고, 수자원 개발 관련 지역간 갈등 요소도 사전에 제거할 수 있는 대안이 될 것으로 판단한다.

#### 사사

본 기사는 국토교통부 물관리연구개발사업의 연구비지원(과제번호 13AWMP-B066761-01)에 의해 수행되었습니다. 🌊

#### 참고문헌

국토해양부 건설교통기술평가연구원(2012.10). 대규모 지하저수지 기술 개발 기획연구보고서