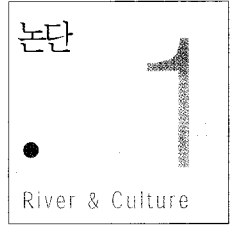


## 1. 서론

물은 인간의 생명 유지를 위한 가장 기본적인 물질로서 우리는 물을 마시고, 물에서 성장하며, 물과 더불어 살아간다. 음식을 먹지 않고 3주 이상을 살 수 있지만 물을 마시지 않으면 3일도 안되어 생명을 잃을 수 있다. 그리스 철학자 탈레스는 '물은 우주의 근본 물질이며, 그것으로부터 모든 것이 생성되었고 마침내는 그것으로 돌아간다'라고 말하였다. 그러나 지금 우리는 물의 위기에 당면해 있다. 인구증가, 산업발달, 도시화에 의한 물수요량의 증가와 기후변화에 따른 가뭄·홍수 등이 전 세계적으로 물 위기를 가중시키고 있다. IPCC(국제연합 기후변화에 관한 정부 간 위원회)에 의하면 산업혁명이 시작된 1830년대부터 현재까지 지구의 평균기



김용제 | 한국지질자원연구원  
지구환경연구본부  
(yjkim@kigam.re.kr)



김용철 | 한국지질자원연구원  
지구환경연구본부  
(yckim@kigam.re.kr)

# 기후변화 대응 녹색기술 J-ART

온은 0.6℃ 상승하였으며(IPCC, 2007), 우리나라의 경우 과거 100년 동안 서울의 기온은 1.3℃ 증가한 것으로 나타났다. 지구 온난화의 영향은 극지역 기온 상승, 사막화, 강수 패턴 변화, 해수면 상승, 기상이변 현상으로 나타나고 있으며 우리나라도 예외는 아니다. 21세기 우리나라의 여름철 기상현상을 살펴보면 6~7월 발생하는 전통적인 개념의 장마철이 점차 사라지고 집중호우 또는 극지역 계절라성 호우가 이를 대신하고 있으며, 큰 비를 동반한 대규모의 태풍도 자주 발생하여 홍수로 인한 인명피해와 재산 손실은 해를 거듭할수록 증가되고 있다. 반면에 가을부터 이듬해 봄 사이에는 강수량 및 강수일수의 부족으로 가뭄이 자주 발생하고 있으며 이에 대한 응급조치로 긴급한 지하수 개발에 매년 수백~수천억원의 예산이 투입되고 있다. 우리나라는 댐이나 저수지 등의 지표수자원 중심의 수자원 정책으로 대도시와 4대강 중심의 이수과 치수를 적절히 수행해왔다. 그러나 미래의 이상기후 현상을 장담할 수 없는 현재의 기상예측 수준과 순

간의 대처가 필요한 홍수와 장기간의 대비가 필요한 가뭄이 동시에 발생하는 기상패턴 상황에서는 기후변화에 민감한 지표수자원 중심의 수자원정책으로는 가뭄과 홍수를 해결하는데 한계가 있다. 이러한 피해는 상수도 보급이 취약한 산간/도서지역 및 농업 밀집 지역에서 주로 발생하다보니 아직까지 대도시에 거주하는 대다수 일반인들은 실감하지 못하는 경우가 많지만, 2008년 말부터 2009년 초에 발생한 강원도 태백시의 사례는 가뭄피해가 대도시에까지 미치는 일이 발생할 수 있는 좋은 예라 하겠다.

빗물이 지표를 통과해서 불포화대를 지나 대수층에 도달하여 형성되는 지하수는 지표수와 달리 기후변화에 대한 반응이 민감하지 않아 수량변화폭이 작고 변화가 서서히 일어난다. 풍수기 유출량 증가와 가뭄일수의 증가 등으로 지표수자원 관리가 더욱 어려워질 것으로 예상되는 현재의 상황에서 지표수와 더불어 지하수의 연계 이용은 기후변화로 인한 수자원의 불확실성에 대비할 수 있는 측면에서 중요성이

더욱 커지고 있다. 그러나 기후변화로 인한 자연함양량의 감소와 장기양수와 같은 인위적인 영향이 누적될 경우 지하수 또한 고갈될 수 있다. 우리나라의 경우 과거 10년간 국가지하수 관측정 112개를 대상으로 자유면 대수층 지하수의 변동추세를 분석한 결과 수위강하는 전체의 50%에 달하며, 향후 15년 후에는 58cm의 지하수위 저하 및 43억 $m^3$ 의 지하수 저류량이 감소할 것이라고 예상됨에 따라 지하수 역시 지속 가능한 수자원으로서 안전한 것만은 아니다. 따라서 기후변화에 따른 가뭄·홍수 등 물 위기에 적극적으로 대응 할 수 있는 녹색기술 개발이 절실히 요구되고 있다.

## 2. 국내·외 물 위기

오늘날 전 세계 60억 인구 중 약 11억 명(18%) 이상이 깨끗한 물을 마시지 못하고 있고, 약 24억 명(40%)은 기본적인 공중위생설비조차 없는 환경에서 살고 있다. 브롬드 디플로마티크(2009)의 보고에 의하면 전 세계 수자원 분포 현황은 지역에 따라 큰 차이를 보인다. 담수의 60%가 몇몇 국가에 집중되어 있는 반면에 세계인구의 60% 이상이 살고 있는 아시아는 30%의 담수만을 보유하고 있다. 물 부족은 터키-수단-파키스탄을 연결한 삼각지대에서 구조적인 문제로 대두되었다. 이 지역의 1인당 연간 물 사용량은 1,000 $m^3$  이하로서 만성적 물 부족 문제를 겪고 있다.

지구 전체의 수자원량은 변함이 없지만 2000년대에 60억 명인 세계 인구는 2025년에 80억명으로 증가할 것으로 전망됨에 따라 1인당 연간 물보유량은 1/3 가량 줄어든다는 전망이다. 국제연합에 따르면 물 소비 증가추세가 지속될 경우 20년 후에는 18억 명의 인구가 물이 고갈된 지역에 살게 될 것이고, 50억 명은 물의 공급이 수요를 충족하기 힘든 지역에서 살게 될 것이라고 한다. 2009년도 스위스 다보스에서 열린 세계경제포럼에서도 물 부족에 대한 경고가 있었다. 수자원 이니셔티브 보고서를 통해 해마다 고갈되어 가고 있는 화석연료와 같이 수자원도 고갈 위험에 직면해 있으며, 현재 상황이 지속될 경우 수자원 부도(water bankruptcy)에 직면할

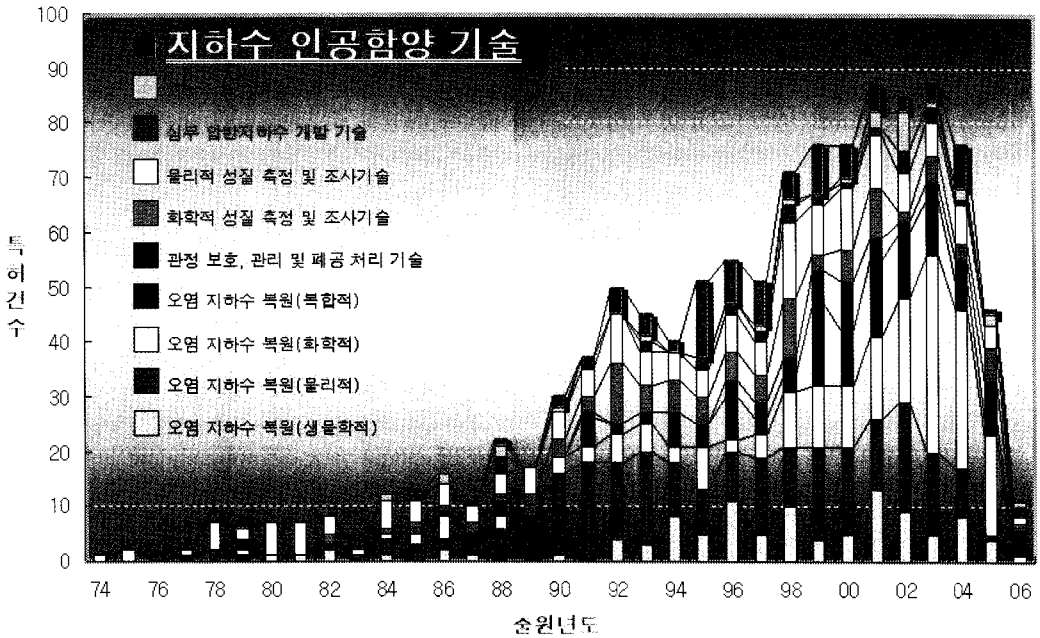
수밖에 없음을 따라 과학적이고 합리적인 수자원 관리와 보전의 중요성을 언급했다.

기후변화에 의한 가뭄으로 인해 발생하는 물 부족 문제는 우리나라 역시 예외가 아니다. 우리나라는 풍수기와 갈수가 뚜렷한 계절별 강우특성, 국토의 70%가 산악지형이고 하천경사가 급한 지리적·지질학적 특성 등에 의해 비가 오면 대부분 물이 바다로 빠져나가고 지하수로 함양되는 물의 양은 매우 적은 게 현실이다. 특히, 높은 인구밀도로 인해 연평균 강수량(1,245mm)은 세계 평균 강수량(880mm)의 1.4배로 높지만 1인당 연강수총량(2,591 $m^3$ )은 세계 평균(19,635 $m^3$ )의 13% 수준에 불과하다. 또한, 1인당 물 사용 가능량은 1,471 $m^3$ 로 국제연합국제인구행동연구소(PAI)는 우리나라를 물부족 국가로 분류하였다.

## 3. 대수층 지하수 인공함양 기술

지하수 인공함양은 강수, 지하수 및 하수처리수의 여유수자원을 관정, 인공함양분지 및 습지, 수로, 지하댐, 우수 침투 시설 등 인위적인 시설 또는 지표조건을 변경하여 강제로 지하로 침투시키거나, 불포화대 및 충적층의 투수성 및 정화능력을 이용하여 양질의 수자원을 확보하는 기술을 말한다(김형수, 2003; 김용철 외, 2008). 전 세계적으로 미국, 호주, 인도 및 아프리카 일부 국가(UNESCO 사업)에서 능동적 개념의 수자원 관리 기술로 적용하고 있다. 인공함양기술개발과 관련하여 미국, 일본, 유럽 등 선진국가들의 특허출원 동향(그림 1)을 살펴보면, 1980년대 후반까지는 특허출원 활동이 저조하였으나 1990년대 초반부터 점진적인 증가세를 보이고 있다.

인공함양 기술은 함양방법에 따라서 직접함양과 간접함양으로 구분하는데, 직접함양은 협의의 인공함양기술을 의미하며 잉여 지표수자원을 대수층으로 바로 주입하는 방법이고, 간접함양은 대수층의 여과나 흡착의 물리적 특성 및 자정작용의 생화학적 특성을 간접적으로 활용하는 방법이다. 직접함양법은 하천이나 호소의 지표수 또는 지상 구조



(그림 1) 미국, 일본, 유럽 등 선진국들의 지하수 인공함양기술에 대한 연도별 특허출원 경향

물의 지붕으로부터 포집한 강수를 관정을 통하여 직접 주입하는 관정주입 방식과 함양분지나 수로, 도랑, 범람 등을 통하여 지하로 침투하게 하는 포수방식이 있다. 관정 주입방식은 주입정이 주 대수층을 관통하는 습식형과 불포화대에 머무는 건식형으로 구분된다. 특히, 주입과 회수를 동시에 수행할 수 있는 대수층 저장회수법(ASR: Aquifer Storage and Recovery)과 대수층 저장이송회수법(ASTR: Aquifer Storage, Transfer, and Recovery)은 관정주입방식의 대표적인 예라 할 수 있다. 간접함양법은 유도함양이라고도 하며 가장 대표적인 방법으로는 강변여과방식(river bank filtration)과 지하댐(subsurface dam or storage dam)처럼 대수층의 부분적 차수를 통한 저류 방식이 있다(Huisman and Olsthoorn, 1983; 김형수, 2003; Pyne, 2005; UNESCO IHP, 2005; 김용철 외, 2008).

인공함양의 목적은 지하저장을 통한 수자원 확보, 지하수 위 회복, 지반침하 방지, 지하수 염수화 방지, 대수층 축열이용, 수온 조절 등의 물리적 분야와 관개용수 개선, 수질 개선, 지하오염원 제어의 화학적 분야로 나눌 수 있다(부성안

외, 2005; 김용철 외, 2008). 풍수기에 지하수를 인위적으로 함양시켜 지하수위를 회복시킴으로써 과잉채수지역의 대수층 고갈을 막거나 갈수기의 부족한 수자원을 확보해주고, 해안 대수층의 염수침입을 방지하고, 도심지역의 지반의 침하를 방지하기 위한 목적으로 인공함양은 이용될 수 있다. 또한 인공함양을 통해 연수화, 황화수소 감소, 부영양화 물질 및 세균 감소, 물리적 입자제거, 독성물질 제거 등의 수질개선 효과와 지하수 오염원의 확산을 막거나 희석하여 오염저감 효과를 기대할 수 있다.

우리나라의 경우 1990년대 후반부터 빗물수확, 강변여과, 지하댐, 정호주입법 등 인공함양연구를 시작하여 월드컵경기장 빗물이용시설 및 제주도 온실단지 빗물함양, 창원시 강변여과방식 용수공급, 속초시 쌓천 지하댐 등 실용화사업이 일부 추진되었다. 그러나 정호주입에 의한 대수층 지하수 인공함양은 국내에서는 아직 실용화된 사례가 없으며, 현재 국내 최초로 한국지질자원연구원이 제주도를 시범연구지로 선정하여 실용화사업을 수행 중이다.

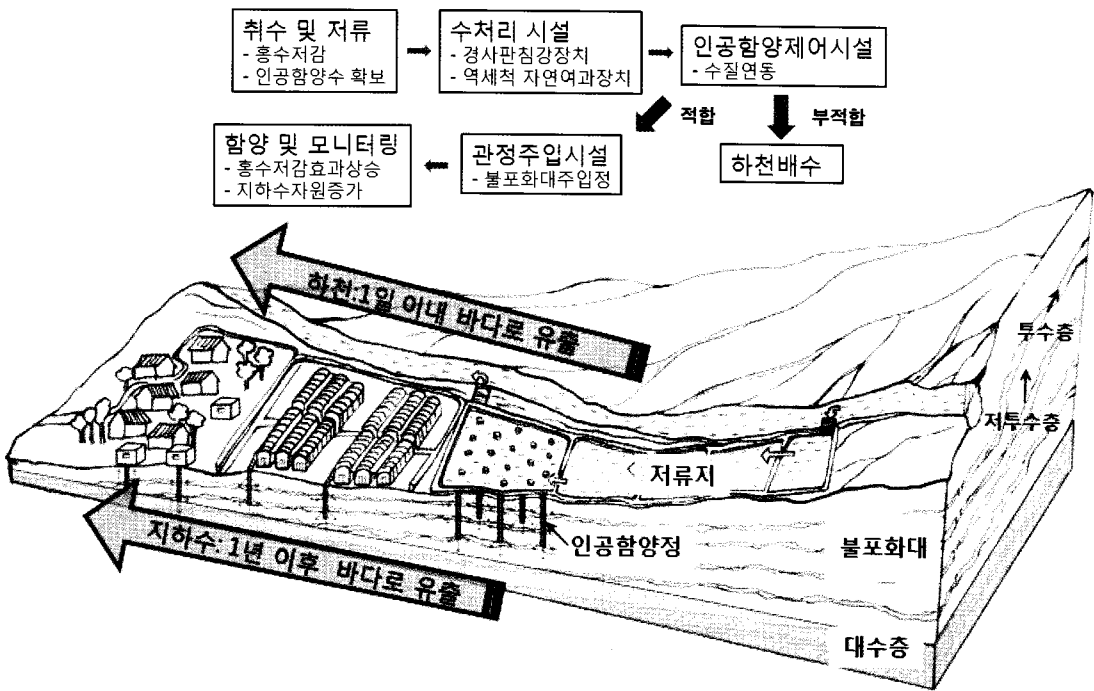
#### 4. J-ART

21세기 프론티어 연구개발사업 중 「수자원의 지속적 확보기술개발 사업단」의 일환으로 제주도에서 수행되고 있는 인공함양기술 실용화 사업은 J-ART라는 제주 친화형 대수층 인공함양 기술(Jeju-friendly Aquifer Recharge Technology) 개발을 통해 지속가능한 수자원 확보 및 이용에 목표를 두고 연구 중에 있다. J-ART는 고지대 하천에서 강수에 따른 돌발유출이 발생할 때, 하류 하천 생태 및 자연적인 함양현상에 영향을 주지 않는 범위에서 하천 유출수의 일부를 취수하여 적절한 수처리를 거친 후 불포화대에 위치한 주입정을 통하여 주입하여 오랜 시간동안 대수층을 통하여 흐르게 함으로써, 바다로 버려지는 하천수를 지속적으로 이용 가능한 수자원으로 전환하는 기술이다(한국지질자원연구원, 2008).

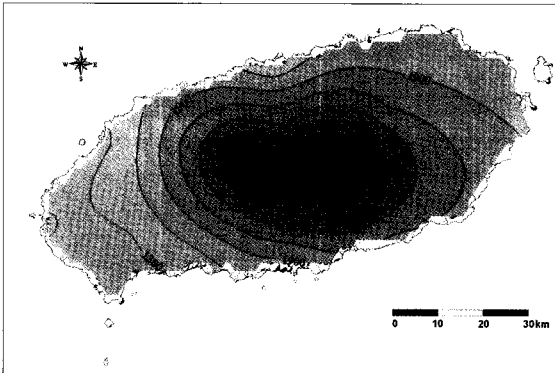
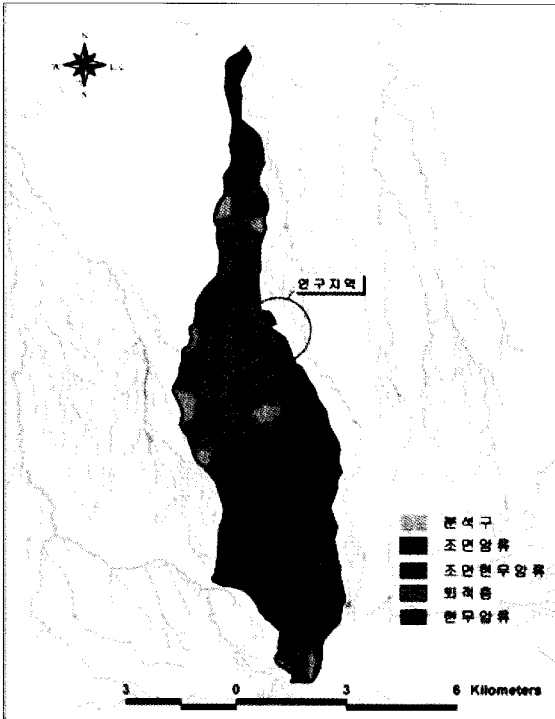
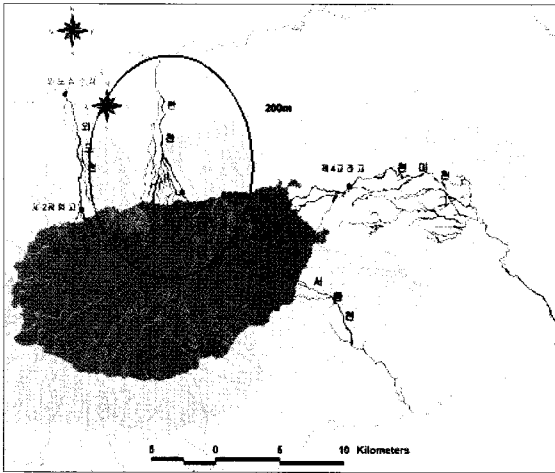
J-ART는 제주도의 지질학적, 수리지질학적 특성 및 수문학적 특성을 고려하여 제주도에 적합한 방식의 시스템으로 디자인하였다(그림 2). 연구지역은 제주시 해발 280~370m에 위치한 한천 상류지역으로 주 구성암석은 현무암과 조면현

무암류이며, 유역면적 35.0km<sup>2</sup>, 평균고도 704m, 유역평균강수량 2,397mm의 수문지질학적 특성을 가진다(그림 3).

2007년 9월 태풍 나리에 의해 제주시 한천이 범람하면서 홍수에 의한 극심한 피해가 발생한 이후 제주시에서 추진하는 홍수저감용 저류지와 연계한 인공함양시스템 구축을 위한 연구를 수행하고 있다(그림 4). J-ART 인공함양시스템 실용화를 위하여 연구지역에 대한 수리지질학적 특성 조사, 하천의 수위/유속/유출 특성 및 하천수질 분석, 불포화대에서의 지하수 유동 관측, 하천 유출수의 탁도 저감 기술, 안정 동위원소를 이용한 지하수 순환 속도 평가, 인공함양 실용화 평가를 위한 모델링 등 다양한 연구방법과 요소기술개발을 통해 J-ART 시스템의 최적화를 위해 연구 중이다. 시범 연구지역인 한천 제2저류지 부근은 150m 이상 되는 두꺼운 불포화대가 형성되어 있는데, 2008년 말 450mm 지름의 관정에서 실시한 주입시험에 의하면 지표 하 50m 깊이의 관정을 통해 하루 15,000m<sup>3</sup> 이상의 물을 주입할 수 있는 것으로 조사되었다. J-ART 시스템을 통한 지하수 인공함양은 10개 공의 함양정을 통해 약 105만m<sup>3</sup>/년 이상의 수자원을 확보할 수 있을 것으로 추정된다(한국지질자원연구원, 2009). 유출발생



(그림 2) 홍수저감용 저류지와 연계한 J-ART 시스템 흐름도 및 개념도



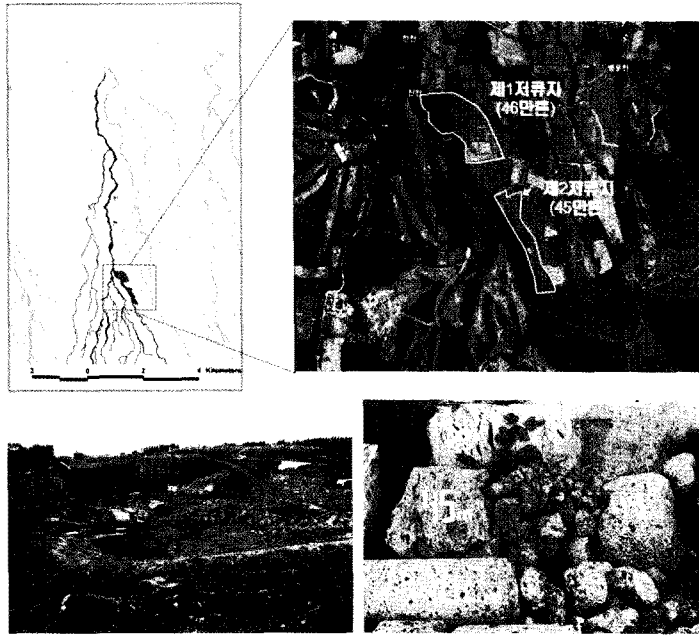
(그림 3) J-ART 실용화 시범연구지역 위치, 지질특성 및 연평균 강수량 분포

시 약 20시간 후에 바다로 흘러가 버려질 물을 J-ART 시스템을 통해 지하대수층에 저장해둠으로써 미래 이용가능한 수자원으로 바꿀 수 있다. 또한 인공함양을 통해 지하로 주입된 용량만큼 홍수저감용 저류지 용량(45.3만 $m^3$ )을 간접적으로 높이는 효과가 있어서 저류지의 홍수저감기능이 상승하는 효과가 있을 것으로 기대된다.

### 5. 결론

수자원은 에너지와 더불어 국가 경제발전을 위한 전략자원으로 그 가치가 매우 크다. 기후변화에 의한 가뭄과 홍수, 인구 증가, 산업발달에 따른 이용 가능한 지표수자원의 고갈과 오염으로 인해 전 세계 수자원 파산, 물자원 부도위기, 물전쟁 등 물 부족에 따른 경제사회적 문제는 세계적인 현상이 되었다. 우리나라의 경우 지구온난화로 인해 지표수 자원의 증발산에 의한 손실이 커지고, 가뭄과 홍수의 예측 불확실성으로 인해 지표수 저장시설을 통한 수자원 확보와 홍수피해 저감을 이루기가 점점 어려워지고 있다. 이에 따라 지속가능한 수자원으로서의 지하수자원에 대한 중요성이 크게 부각되고 있으나, 지하수자원 역시 장기간의 기후변화 및 인위적인 영향으로 인해 고갈될 수 있으므로, 지표수와 연계한 지하수 자원 이용 및 관리 방안이 절실하다. 지하수 인공함양 기술은 이런 측면에서 대기변화에 민감하지 않은 지하공간을 활용하고 대수층의 완충작용 및 자정작용을 이용하는 적극적인 수자원 확보 기술이다.

J-ART(제주친화형 대수층 인공함양 기술)는 지하수 의존도가 절대적으로 높은 제주 화산섬의 지하수 자원을 늘리고, 홍수저감 효과 및 극심한 가뭄에 대비해 미리 준비해두는 수자원 확보 녹색기술이다. J-ART 시스템은 관정주입식 인공함양이라는 기본기술을 제주도의 수리지질학적 특성과 수문학적 특성을 고려하여 제주도에 적합한 방식으로 디자인하였다. 관정주입식 인공함양 기술을 내륙의 산간지역에 적용한다면 소규모 시설을 통한 마을 용수 공급 시스템이 가능할 것이고, 비닐하우스 밀집 농업지역에 적용한다면 수막재



(그림 4) 홍수저감용 저류지 시설과 연계한 J-ART 시스템(제주시 한천 중상류, 해발 280~370m)

배로 인한 지하수위 고갈 문제 회복 및 농업용수를 확보할 수 있을 것이며, 산업지역에 적용한다면 지반침하 방지와 공업용수의 안정적 확보를 가능케 할 것으로 기대한다.

기후변화에 따른 가뭄 대응 관련 지하수 연구 및 관측 확대, 하천과 지하수의 상호작용 규명을 통한 하천 고갈의 문제점 해결, 지하수 수원의 공공급수원으로의 자리 매김, 깨끗하고 풍부한 지하수자원의 관리, 보전, 정책 등을 위한 노력이 정부와 지자체의 적극적인 관심과 지원 하에 산-학-연 통합 연구가 지속됨으로서 깨끗하고 풍부한 수자원을 국민들에게 제공할 수 있을 것이다. ●

-사사-

이 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비 지원(과제번호 3-2-3)에 의해 수행되었다.

**참고문헌**

김용철, 김용재, 문덕철, 강봉래, 고기원, 박기화(2008), 제주천화형 대수층 인공함양 기술, 제 7회 제주지하수 학술세미나 자료집.  
 김형수(2003), 한국에서의 인공함양 적용 사례 및 개발 방안, “지속가능한 지하수 개발 및 함양기술 개발” 연구성과 발표 및 지하수 인공함양 국제 심포지움 자료집.

르몽드 디플로마티크(2009), 르몽드 세계사: 우리가 해결해야 할 전지구적 이슈와 쟁점들, 르몽드 디플로마티크 기획, 254p.  
 부성안, 송성호, 이규상, 김진성, 김혜빈(2005), 해수침투확산방지법 및 지하수인공함양에 관한 연구, 농업기반공사 농어촌연구원, 59p.  
 지하수관리기본계획(2007), 국토해양부.  
 한국지질자원연구원(2008), 지하수-지표수 연계 순환/유동 시스템 해석기술 실용화: 21세기 프론티어 연구개발사업 중 수자원의 지속적확보기술 개발사업 3단계 1차년도 보고서, 교육과학기술부, 121p.  
 한국지질자원연구원(2009), 지하수-지표수 연계 순환/유동 시스템 해석기술 실용화: 21세기 프론티어 연구개발사업 중 수자원의 지속적확보기술 개발사업 3단계 2차년도 보고서, 교육과학기술부, 109p.  
 Huisman, L. and T. N. Olsthoorn(1983), Artificial Groundwater Recharge, Pitman Press, 320p.  
 IPCC(2007), Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Group I, II and III to the Fourth Assessment Report of the International Panel on Climate Change [Core Writing Team, Pachauri, R.K and Reisinger, A.(eds.)], IPCC, Geneva, Switzerland, 104p.  
 Pyne, R. D. G(2005), Aquifer Storage Recovery: A Guide to Groundwater Recharge Through Wells (2nd ed.), ASR Systems, 608p.  
 UNESCO IHP(2005), Strategies for Managed Aquifer Recharge (MAR) in Semi-arid Area, UNESCO, 30p.