

기후변화 대응 지하수 인공함양 기술



김 용 철 |

한국지질자원연구원 지구환경연구본부 선임연구원
yckim@kigam.re.kr



김 용 제 |

한국지질자원연구원 지구환경연구본부 책임연구원
yjkim@kigam.re.kr

1. 지구환경의 변화와 지하수자원

국제연합의 기후변화에 관한 정부 간 위원회(International Panel on Climate Change: IPCC)에 의하면 산업혁명이 시작된 1830년대부터 현재까지 지구의 평균기온은 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, 이상기상 현상으로 나타나고 있으며 우리나라도 예외는 아니다. 2000년대 이후 우리나라의 여름철 기상현상을 살펴보면 6월에서 7월 사이 발생하는 전통적인 개념의 장마가 점차 사라지고 집중호우 및 국지적 격렬라성 호우가 이를 대신하고 있으며, 큰 비를 동반한 대규모의 태풍도

자주 발생하여 홍수 피해액은 해를 거듭할수록 늘어나고 있다. 반면에 가을부터 이듬해 봄 사이에는 강수량 및 강수일수의 부족으로 가뭄 또한 자주 발생하고 있으며 이에 대한 응급조치로 긴급한 지하수 개발에 매년 수백억 원의 예산이 투입되었다.

우리나라는 댐이나 저수지 등의 지표수자원 중심의 수자원 정책으로 대도시와 4대강 중심의 이수과 치수를 적절히 수행해오고 있다. 그러나 미래의 기상상황을 장담할 수 없는 현재의 기상예측 수준과 순간의 대처가 필요한 홍수와 장기간의 대비가 필요한 가뭄이 동시기에 발생하는 기상패턴 상황 하에서는 대기의 기후변화에 민감한 지표수자원 중심의 수자원정책으로는 가뭄과 홍수를 동시에 해결하는데 한계를 드러내고 있다. 이러한 피해는 상수도 보급이 취약한 산간/도서지역 및 농업 밀집 지역부터 발생하다보니 아직까지 대도시에 거주하는 대도시 국민들은 실감하지 못하는 경우가 많지만, 2008년 말부터 2009년 초에 발생한 강원도 태백시의 사례는 가뭄피해가 대도시에까지 미치는 일이 발생할 수 있는 좋은 예라 하겠다.

빗물이 지표를 지나 불포화대를 통해 대수층에 도달하여 형성되는 지하수는 지표수와 달리 기후변화에 대한 반응이 민감하지 않아 수량변화폭이 작고 변화가 서서히 일어난다. 풍수기 유출량 증가와 가뭄일수의 증가 등으로 지표수자원 관리가 더 어려워질 것으로 예상되는 상황에서 지표수와 더불어

지하수의 연계 이용은 기후변화로 인한 수자원의 불확실성에 대비할 수 있는 측면에서 중요성이 커지고 있다. 그러나 기후변화로 인한 자연함양량의 감소와 장기양수와 같은 인위적인 영향이 누적될 경우 지하수 또한 고갈될 수 있는 수자원이므로 지하수 인공함양과 같은 대체수자원 확보의 노력으로 지하수자원의 지속가능성을 유지해야 할 것이다.

2. 지하수 인공함양 기술¹⁾

2.1. 지하수 인공함양 기술개요

지하수 인공함양은 강수, 지하수 및 하수처리수의 여유 수자원을 관정, 인공 함양분지 및 습지, 수로, 지하댐, 우수 침투시설 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).

지하수 인공함양 기술은 함양방법에 따라서 직접함양과 간접함양으로 구분하는데, 직접함양은 협의의 인공함양기술을 의미하며 여유 수자원을 외부로부터 대수층으로 바로 주입하는 방법이고 간접함양은 대수층의 여과나 흡착의 물리적 특성 및 자정 작용의 생화학적 특성을 간접적으로 활용하는 방법이다. 직접함양법은 하천이나 호소의 지표수 또는 지상 구조물의 지붕으로부터 포집한 강수를 관정을 통하여 직접 주입하는 관정주입 방식과 함양분지나 수로, 도랑, 범람 등을 통하여 지하로 침투하게 하는 포수방식(spreading basin method)이 있다. 관정 주입방식은 주입정이 주 대수층을 관통하는 습식형과 불포화대에 머무는 건식형이 있다. 특히 주입과 회수를 동시에 수행할 수 있는 대수층 저장

회수법(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 크게 지하저장을 통한 수자원 확보, 지하수위회복, 지반침하방지, 지하수 염수화 방지, 대수층 축열이용, 수온조절 등의 물리적 분야와 관개용수 개선, 수질개선, 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 지하 오염원의 확산을 막거나 희석하여 오염저감 효과를 기대할 수 있다.

2.2. 국내외 적용 사례

국외에서 지하수 인공함양은 유럽, 미국, 호주, 이스라엘, 일본과 같은 선진국뿐만 아니라 건조기후나 반건조기후대의 이란, 인도, 이집트, 쿠웨이트와 같은 개발도상국가 및 후진국에서도 다양한 방법으로 활용되고 있다. 유럽의 대표적인 사례로는 독일, 네덜란드, 헝가리의 강변여과 방식이 있으며

1) 본 내용은 “김용철, 김용제, 문덕철, 강봉래, 고기원, 박기화, 2008, 제주친화형 대수층 인공함양 기술, 제 7회 제주지하수 학술세미나 자료집”내용을 요약하였음.

(김형수 외, 1999), 미국의 경우는 서부의 캘리포니아 주, 오리건 주와 동부의 플로리다 주 및 중부의 콜로라도 주와 애리조나 주에서 대수층저장회수(ASR) 방식이 있다(USGS, 2002; GSI, 2005; Pyne, 2005). 호주는 관개용수 확보를 위해 강수 유출을 대수층에 저장하는 관정주입방식을 사용하고 있고, 스페인의 남부 시에라네바다 지역에서는 3월에서 6월 사이 풍부한 눈 녹은 물을 관개수로망을 통해 대수층에 주입하여 농업용수와 음용수를 마을에 공급하고 있다. 이외에 이란의 Kaftari 지역의 홍수유출수-함양지 방식(floodwater-spreading method)을 통한 관개용수공급, 인도의 Rajasthan 지역의 빗물수확(rainwater harvesting) 방식을 통한 수자원 부족 문제 해결 사례를 들 수 있다(UNESCO IHP, 2005).

우리나라의 경우 '90년대 후반부터 빗물수확, 강변여과, 지하댐, 관정주입방식의 인공함양 기술이 연구되기 시작하여 월드컵 경기장의 빗물 이용 시설 및 제주특별자치도의 온실단지 빗물함양시설, 창원시 강변여과 방식 용수공급, 속초시 쌍천 지하댐 등 실용화 사업이 일부 추진되었다. 그러나 관정주입에 의한 대수층 인공함양은 국내에서 아직 실용화된 사례가 없으며, 현재 국내 최초로 한국지질자원연구원이 제주도를 시범연구지로 선정하여 실용화사업을 추진 중이다.

3. 제주친화형 대수층 인공함양 기술

3.1 제주도의 수리지질학적 특성

제주도의 지질은 투수성 토양, 현무암류, 현무암류 하부의 고결 또는 준고결의 화산쇄설성 퇴적암류인 서귀포층, 이 층의 하부에 미고결의 U층이 분포하고 있다(박기화 외, 2006). 지표토양은 강수의 40%가 넘는 지하수를 함양 가능케 하는 투수성을 갖고 있다. 현무암류는 용암류 경계의 투수층 특히



그림 1. 지표에 노출된 클링커(clinker) 노두

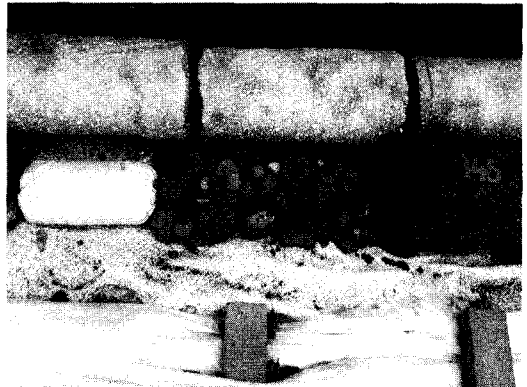


그림 2. 시추코어에서 회수된 클링커층(B.G. 135-145m)

아아(Aa) 용암류의 경계면에서 잘 형성되는 클링커(clinker)(그림 1, 그림 2), 스코리아층, 수중화산쇄설성퇴적암(hyaloclastite), 용암터널과 같은 고투수층과 습식분출에 의한 응회암층 및 퇴적층, 아아 및 파호이호이(Pahoehoe) 용암류(그림 3), U층(그림 4)와 같은 저투수층이 수직적으로 반복해서 나타난다. 지하에 비교적 넓게 분포하고 있는 응회구 및 응회암질퇴적층은 저투수층역할을 하여 주 대수층의 최하부를 형성한다. 투수층은 내륙의 화성암 및 변성암 파쇄대에 비해 수심에서 수천 배 이상 높은 투수계수 값을 갖고 있어 지하수 흐름속도가 빠르고, 우물효율 및 관정 주입효율이 매우 높아 지하수 개발은 물론 인공함양용 관정개발에도 매우 유리한 장점을 갖고 있다. 투수층과 저투수층의 반복적인 분포는 자연함양 또는 인공 함양된 빗물이 이



그림 3. 시추코어에서 회수된 용암류들

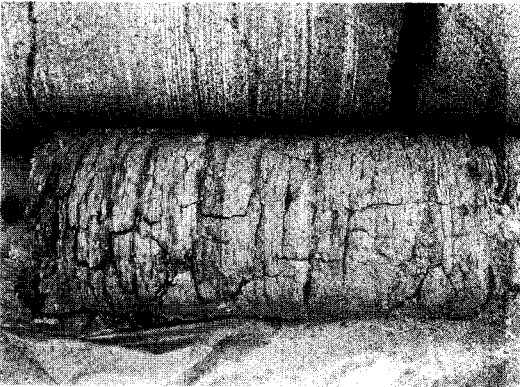


그림 4. 시추코어에서 회수된 U층(사진: 박기화)

동하면서 자연적으로 여과될 수 있는 장점을 갖고 있다. 또한 제주도는 불포화대가 해발고도의 50%에 이를 만큼 두꺼워 지하수 개발에는 많은 에너지가 필요하지만, 지표 오염물질의 자연저감통로가 길다는 장점과 인공함양을 위한 지하저장 공간이 충분하다는 장점을 동시에 갖고 있다. 이러한 두껍고 투수층이 잘 발달해 있는 불포화대 관정주입을 통한 인공함양은 많은 양을 주입할 수 있음과 동시에 불포화대의 자연여과기능을 이용할 수 있는 장점이 있다.

3.2. 제주도의 수문학적 특성

제주도는 강수의 35%가 증발산으로 손실되고, 46%는 지하수로 함양되며, 19%는 하천을 통해 바

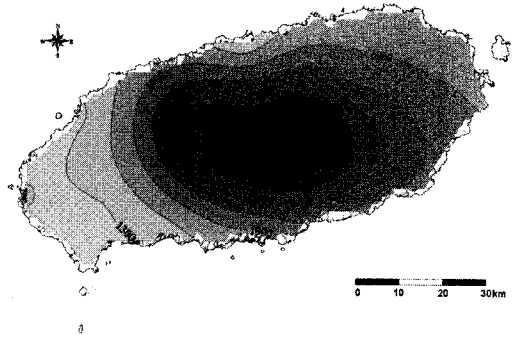


그림 5. 2006년도 강수량 분포(한국지질자원연구원, 2007)

다로 유출된다(한국수자원공사, 2003). 2006년도 강수량의 공간적 분포를 살펴보면(그림 5), 남동부 산간지역으로 갈수록 강수량이 증가하는 경향을 보인다. 제주 서부 해안지역은 연평균 1200mm의 강수량을 보이는 반면 한라산 정상 부근은 연평균 3000mm 이상의 강수량을 갖는다. 제주도 한라산 국립공원으로부터 유출되는 하천유출수는 탁도 이외의 오염물이 적어 인공함양에 적합한 양질의 물을 제공한다.

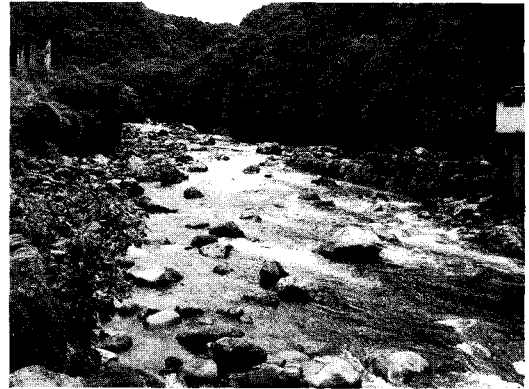
제주도의 하천은 일부 용천수에 의한 유출을 제외하고는 평소에 건천으로 존재하고 선행강우 유무와 강도에 따라 다르지만 대략 50mm 이상의 강수량 이후에 유출이 발생한다(그림 6). 제주시 소재 한천의 상·하류지역에 위치한 하천유출량관측소의 자료를 이용하여 유출빈도·수위 변동 폭·유출 지속시간·유출량·유출률 등을 분석한 결과, 상류 지역에서의 유출빈도는 연간 약 13회이었고, 수위 변동 폭은 0.2-4.03m, 유출 지속시간은 6-53시간(평균 22시간)이었으며, 최근 5년 동안 연간 유출량은 617천 m^3 -12,271천 m^3 이었고, 유출률은 2.6-33.7%이었다(한국지질자원연구원, 2008).

3.3. 제주친화형 대수층 인공함양 기술

21세기 프론티어 연구개발사업 중 「수자원의 지속적확보기술개발 사업단」의 일환으로 제주도에서



(a)



(b)

그림 6. 제주도 하천의 평소 모습(a)과 집중호우 뒤의 유출이 발생한 모습(b)(제주시 소재 광령천)

수행되고 있는 인공함양 기술 실용화 사업은 J-ART라는 제주형 대수층 인공함양 기술(Jeju-friendly Aquifer Recharge Technology) 개발을 통해 지속가능한 수자원 확보에 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).

2007년 9월 태풍 '나리'에 의한 제주시 하천이 범람하면서 홍수에 의한 극심한 피해가 발생한 이후 제주시에서 추진하는 홍수저감용 저류지와 연계하여 비용경제적인 인공함양 시스템 구축을 위한 연구를 수행하고 있다(그림 7). J-ART 인공함양 시스템 실용화를 위하여 연구지역에 대한 수리지질학적 특성 분석, 하천유출수의 수량, 수질 분석, 불포화대에서의 지하수 유동 관측, 하천 유출수의 탁도 저감 기술, 안정동위원소를 이용한 지하수 순환 속도 및 인공함양 평가, 인공함양 실용화 평가를 위한 모델 개발 등 다양한 연구방법과 요소기술 개발이 진행 중이다.

제주 친화형 대수층 인공함양 기술은 앞서 연구한 제주도의 수리지질학적 특성 및 수문학적 특성을 고려하여 제주도에 적합한 방식의 시스템으로 디자인하였다(그림 8). 한천 제2저류지 부근은 150m 이상 되는 두꺼운 불포화대를 갖고 있으며, 2008년 말 450mm 지름의 관정에서 실시한 주입 시험에 의하면 지표 아래 50m 깊이의 관정을 통해 일일 15000m³의 물을 주입할 수 있는 것으로 조사되었다. J-ART 시스템을 통한 지하수 인공함양은 10개 공의 함양정을 해 약 105만m³/년을 확보할 수 있을 것으로 추정된다(한국지질자원연구원, 2009). 유출이 발생했을 때 약 20시간 후에 바다로 흘러가 버려질 물을 인공함양을 통해서 지하대수층에 저장해둠으로써 이용가능한 수자원으로 바꿔 줄 수 있는 것이다. 또한 인공함양을 통해 지하로 주입된 용량만큼 저류지 용량을 간접적으로 늘이는 효과가 있어 저류지의 홍수저감기능이 상승하는 효과가 있을 것으로 기대된다.

4. 맺음말

2009년 1월 스위스에서 열린 다보스 포럼에서는 '물부도 사태(water bankruptcy)'에 대한 경고가 등장했다. 지구촌이 식량과 기후, 경제성장을 연결

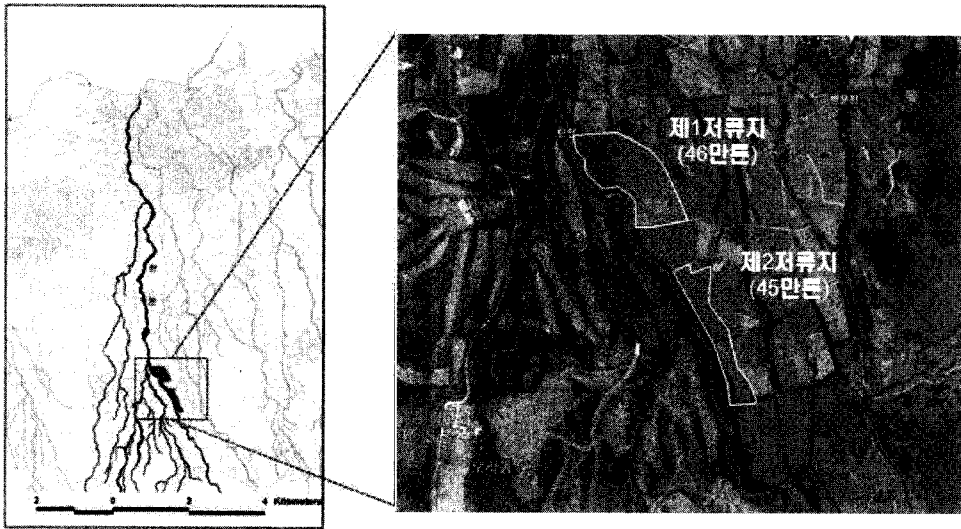


그림 7. 홍수저감용 저류지 시설 위치(제주시 한천 중상류, 해발 280~370m)

하는 고리인 수자원 관리에 실패할 경우 글로벌 경제 시스템 자체가 붕괴될 수 있다는 경고였다. 지금도 전 세계 곳곳에서는 다국적 강을 둘러싼 물 분쟁이 끊이지 않고 있으며, 21세기는 물을 확보하기 위한 전쟁이 될 것이라는 예측이 현실화 되고 있다. 우리나라 또한 지하체간에 물을 확보하기 위한 대립이 곳곳에서 발생하고 있다.

우리나라의 경우 지구온난화로 인해 지표수 자원의 증발산에 의한 손실이 커지고, 가뭄과 홍수의 예측 불확실성으로 인해 지표수저장시설을 통한 수자원 확보와 홍수피해 저감을 이루기가 점점 어려워지고 있다. 이에 따라 지속가능한 수자원으로서의 지하수 자원에 대한 중요성이 크게 부각되고 있으나, 지하수 자원 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 완충 작용 및 자정작용을 이용하는 적극적인 수자원 확보 기술이다.

제주친화형 대수층 인공함양 기술은 지하수 의존도가 절대적으로 높은 제주화산섬의 지하수 자원을 늘리고, 홍수저감 효과 및 극심한 가뭄에 대비해 미리 준비해두는 수자원 확보 기술이다. 제주친화형 대수층 인공함양 기술은 관정주입식 인공함양이라는 기본기술을 제주도의 수리지질학적 특성과 수문학적 특성을 고려하여 제주도에 적합한 방식으로 설계하였다. 관정주입식 인공함양 기술을 내륙의 산간지역에 적용한다면 소규모 시설을 통한 마을 용수 공급 시스템이 가능할 것이고, 비닐하우스 밀집 농업지역에 적용한다면 수매재배로 인한 지하수 위 고갈 문제 회복 및 농업용수를 확보할 수 있을 것이며 공단에 적용한다면 지반침하 방지와 공업용수의 안정적 확보를 가능케 할 것이다.

사사

이 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 수자원의 지속적확보기술개발 사업단의 연구비 지원(과제번호 3-2-3)에 의해 수행되었다. ☞

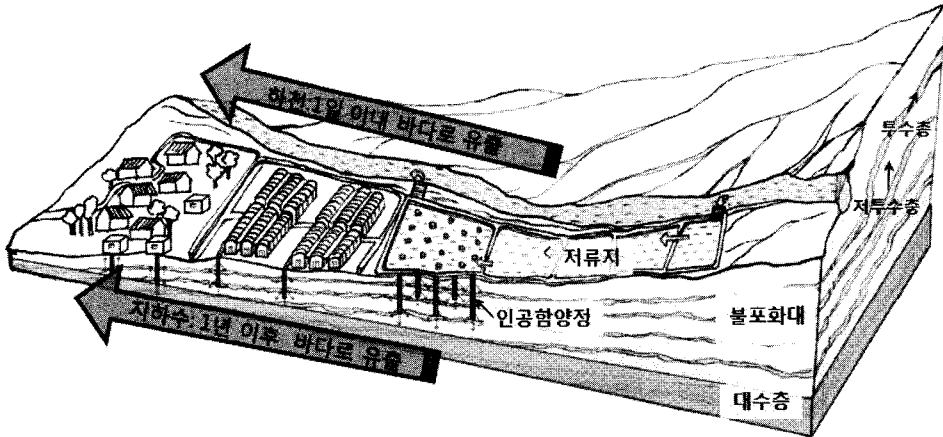
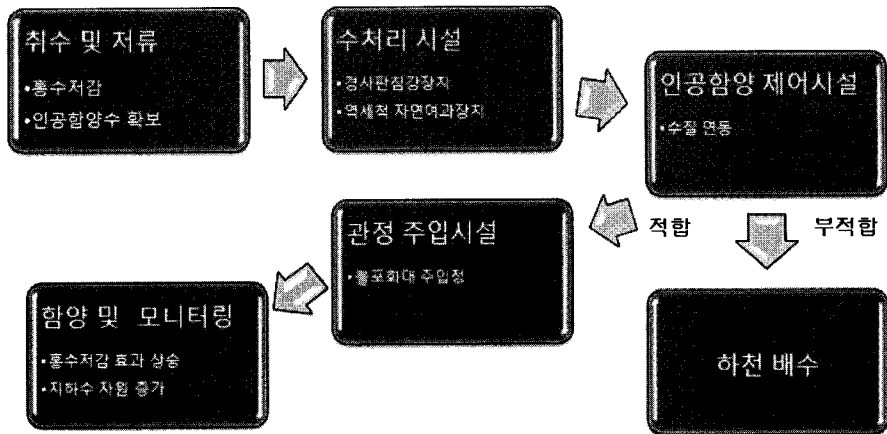


그림 8. 홍수저감용 저류지와 연계한 J-ART 시스템 흐름도(위) 및 개념도(아래)

참고문헌

- 김용철, 김용제, 문덕철, 강봉래, 고기원, 박기화, 2008, 제주친화형 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.
- 부성안, 송성호, 이규상, 김진성, 김혜빈, 2005, 해수침투확산방지법 및 지하수인공함양에 관한 연구, 농업기반공사 농어촌연구원, 59pp.
- 박기화, 안주성, 기원서, 박원배, 2006, 제주도지질여행, 한국지질자원연구원, 제주도발전연구원, 로템디자인연구소, p.18-39

- 이종선, 김병도, 이기철, 김영업, 김진희, 1996, 제주지역 지하수 인공함양에 관한 연구, 농어촌진흥공사 제주지사.
- 한국수자원공사, 2003, 제주도 수문지질 및 지하수자원 종합조사(Ⅲ), p.271-277.
- 한국지질자원연구원, 2007, 제주도 지하수 부존특성에 대한 지구화학적 해석, 과학기술부, GP2007-009-02-2007(1), 203 pp.
- 한국지질자원연구원, 2008, 지하수-지표수 연계 순환/유동 시스템 해석기술 실용화: 21세기 프론티어 연구개발사업 중 수자원의 지속적확보기술 개발사업 3단계 1차년도 보고서, 교육과학기술부, 121 pp.
- 한국지질자원연구원, 2009, 지하수-지표수 연계 순환/유동 시스템 해석기술 실용화: 21세기 프론티어 연구개발사업 중 수자원의 지속적확보기술 개발사업 3단계 2차년도 보고서, 교육과학기술부, 109 pp.
- Huisman, L. and T. N. Olsthoorn, 1983, Artificial Groundwater Recharge, Pitman Press, 320 pp.
- 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, 104 pp.
- Pyne, R. D. G, 2005, Aquifer Storage Recovery: A Guide to Groundwater Recharge Through Wells (2nd ed.), ASR Systems, 608 pp.
- UNESCO IHP, 2005, Strategies for Managed Aquifer Recharge (MAR) in Semi-arid Area, UNESCO, 30 pp.