

대수층 저장 및 회수 (Aquifer Storage & Recovery) 기법을 활용한 수자원 확보 및 공급 방안

- 미국 Oregon 지역의 실제 공급 사례를 중심으로 -

김형수¹, Jeff Barry², Larry Eaton²

¹한국수자원공사 수자원연구원, ²Groundwater Solution Inc. (e-mail : hskim@kowaco.or.kr)

<요약문>

대수층 저장 및 회수(Aquifer Storage and Recovery, 이하 ASR) 기법은 지표수가 여유가 있는 기간 동안 지하 대수층에 정수된 물을 주입하여 두었다가, 첨두 수요(peak demand)가 필요한 한시적인 기간 동안 대수층 내에 저장되어 있던 물을 양수하여 공급하는 새로운 개념의 수자원 공급 체계의 일환이다. 본 발표에서는 미국 Oregon 주의 대표적인 3개 도시에서 수행된 수자원 공급 사업과 이 수자원 공급 사업에서 ASR 기법이 어떻게 적용되었는지를 살펴보았다. 이들 도시에서 수행된 ASR 기법을 활용한 수자원 공급은, 기존 지표 저류조 저장 방식에 비해 월등히 경제적이며, 다양한 이점을 가지고 있는 것으로 드러났다. 또한 이들 도시에서의 ASR 기법 적용에 따른 효율성이 2001년도 및 2002년도에 분명하게 나타나 현재 이들 도시는 ASR 시설에 대한 확충 계획을 수립, 진행하고 있다. 한편, 이들 지역의 ASR 기법 활용 용수 공급 사례는, 국내의 경우에도 투수성이 우수한 화산암 지역, 제3기 지층 및 석회암 지역 등에서 활용될 경우, 충분한 효과를 발휘 할 수 있을 것으로 기대된다.

주요어 : 인공함양, 대수층 저장 및 회수 기법(ASR), 용수 공급, 경제성

1. 서 론

최근 들어 지속 가능한 수자원 확보 노력의 일환으로, 강변 여과 방식, 지하수담 활용 방식, 직접 인공함양 방식 등의 다양한 지하수 인공함양 방식을 통한 용수 공급 방안이 대두되고 있다. 최근에 미국을 중심으로 수행되고 있는 대수층 저장 및 회수(Aquifer Storage and Recovery, 이하 ASR) 기법은 지하수 인공함양을 활용한 용수 공급 방식으로, 그 효과가 실제적으로 검증되고 있다. 특히, ASR 기법의 활용은 기존의 용수 공급 시설과 지하 대수층의 연계를 통해, 부가적인 수자원 공급 증대를 도모할 수 있기 때문에 기존 시설물의 교체 및 용량 증대를 최소화하면서도 필요로 하는 용수를 필요한 시기에, 필요한 장소로 공급할 수 있다는 큰 장점을 갖고 있다. 지하 대수층의 저장은 지표의 수자원 저장에 비해, 환경적 충격 완화, 증발 손실 억제, 안정성 증대 및 낮은 비용 등의 다양한 장점을 가지고 있다. 현재 ASR 기법은 주로 미국 서부 지역 및 남부 지역을 중심으로 활용되고 있으며, 미국 내 약 75개소의 개발이 진행중이며, 약 35개소가 운영 중에 있다(Barry, 2003). 미국 이외의 지역으로는 주로 호주,

인도 등에서 ASR 기법을 통한 수자원 확보 및 공급이 이루어지고 있다. 본 발표에서는 실제로 ASR 방식을 통해 용수를 공급하고 있는 미국 서부의 Oregon 주의 주도인 Salem를 비롯하여, Beaverton 및 Tigard의 수자원 공급 체계와 ASR 기법 적용에 대한 현황 소개를 통해 ASR 기법의 국내 적용성을 모색하고자 한다.

2. ASR 기법의 기본 개념 및 적용 주요 기준

용수 공급 관리의 대표적인 애로 사항은 용수 이용에 대한 요구가 시기적으로 일정하지 않으며, 취수원을 통해 확보할 수 있는 수량 역시 시기적으로 차이가 크다는 점을 들 수 있다. 이러한 용수 수요에 대한 변동 및 취수원의 가용 수량 변화는 실제 용수 공급 시설 용량과 평균 공급 용량 사이의 차이를 야기 시키며, 항상 침투 수요에 대한 대비를 위해 과다한 시설 용량 및 취수원을 확보하여야 하는 어려움이 있다. 특히 장기간의 가뭄으로 인해 취수원의 수량이 절대적으로 부족한 경우는 시설 용량이 충분하다고 해도 별도의 저장 시설이 없는 경우, 용수 공급에 곤란을 겪게 된다. ASR의 기본 개념은 일종의 대수층 내 용수 저장 개념으로 용수 수요가 크지 않고 취수원의 수량에 여유가 있는 동안에 확보된 물을 지하 대수층에 저장하였다가 용수 수요가 증대되고 취수원 수량 확보가 곤란할 때, 저장된 물을 양수하여 공급하는 방식으로 요약된다. 이러한 지하 대수층을 활용하는 방식은 수도 시설 운영을 효율적으로 할 수 있음은 물론, 과다한 시설 투자를 방지할 수 있으며, 정화되어 저장된 물을 특별한 처리 없이 대부분 직접 사용할 수 있다는 장점을 갖는다.

한편, ASR 기법의 적용은 우선적으로 대수층의 특성을 정확히 파악하고 실제 ASR의 적용성을 객관적으로 평가하여야만 한다. ASR의 성공적 적용을 위해서는 우선 투수량 계수가 125 m²/day 이상의 피압 혹은 부분 피압 대수층이 있어야하며, 주입시 수두가 지표 고도를 넘지 않을 정도의 자연지하수위와 지표와의 공간 확보가 되어야 한다. 또한 지하의 수리적 경계에 의해 지하 대수층이 구분화 되어서는 안되며, 풍수기에 함양을 위한 탁도 1 NTU 이하의 양질의 물이 확보될 수 있어야 한다. 또한 자연적인 지하수와 주입수의 혼합 이후에도 수질이 양호하여야 한다(Barry, 2003). 미국의 경우, 지하수 인공함양을 위한 수질 기준은 인공 함양 방식에 따라 근본적인 차이가 있으며, ASR 방식과 같이 직접 대수층으로 물을 주입하는 경우에는 주별로 다소의 차이가 있으나 기본적으로 먹는 물 수질의 매우 양질의 수질을 요구하고 있는 실정이다. 국내의 경우도 앞으로 지하수 인공함양을 위한 수질 기준이 필요할 것으로 판단되며, 실제 대수층에 정호 등을 이용하여 직접 물을 주입하는 경우에는 매우 양질의 수질을 확보할 수 있도록 조치되는 것이 타당하다고 판단된다.

3. Oregon주의 ASR 적용 사례

3.1 Salem City

1994년에 재수립된 Salem의 수자원 기본 계획(water master plan)은 시의 물 공급이 North Santiam River에 위치한 취수원에만 의존하고 있는 문제를 지적하였다. 이러한 문제 해결을 위해, 긴급 사태에 대한 2차적인 취수원과 여름 시기의 침투 수요를 보충하기 위한 취수원 개발이 요구되었다. 계획의 제안 내용에 따라 Salem 시는 이러한 문제 해결을 위해 ASR 시스템의 도입을 고려하였고 예비적인 평가를 통해 ASR 시스템이 타당하다고 판단하였다. Salem 시의 ASR 적용의 최종 목표는 일일 75,700m³의 공급 능력과 총 1,665,400m³의 저장 능력을 개발하는 것으로 설정되었다. 이러한 목표를 위해 2003년 현재 Salem 시는 Woodmansee 공원 내에 4개의 ASR 정호를 운영하고 있으며(그림 1 참조), 이를

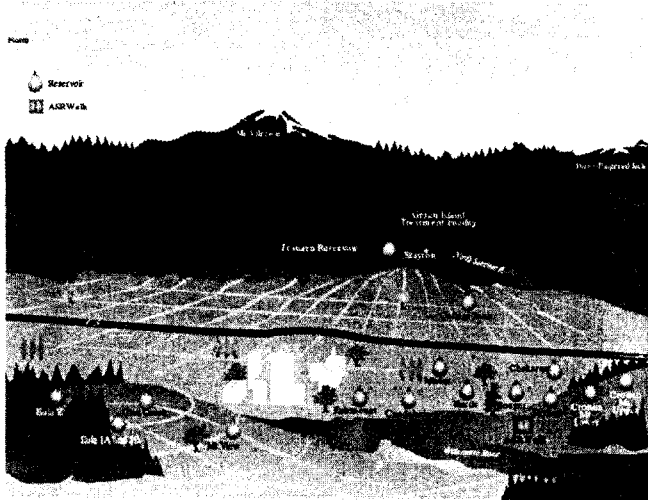


그림 1. Salem 물공급 개략도 (Salem City, 2003)

통해 일일 34,065m³을 공급할 수 있는 시설을 확보하고 있다. 이들 ASR 정호에 주입 원수, ASR에서 회수된 물 및 ASR을 통해 공급받은 최종 수돗물에 대한 수질 분석 결과 모든 성분이 분석 장치의 검출 한계 이하이거나 매우 낮은 수준으로 활용에 지장이 없는 것으로 평가되었다. 그러나 1999년에 EPA에서 한시적으로 제안한 Radon에 대한 새로운 먹는 물 기준의 경우, 문제의 가능성을 가지고 있을 수도 있다는 점이 지적되었다.

다음 표 1은 1997년부터 2001년까지 ASR을 통해 저장되고 회수된 실제적인 수량을 보여 준다. Oregon주의 제한적인 물 사용 허가사항에 따라, Salem 시당국은 95%의 저장된 물을

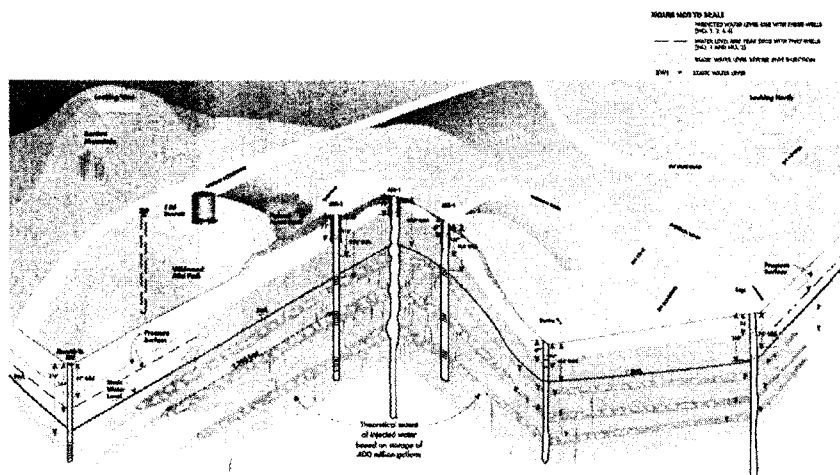
회수할 수 있으며, 필요시 다음 해에 저장할 95%의 저장수를 이월하여 양수하는 것이 허락되어 있다. 표에서 볼 수 있듯이 2002년 초에 회수하여 사용할 수 있는 저장된 물의 양은 개략 408,780m³(108 MG, million gallon)이다.

표 1. Salem 시의 ASR 저장 및 회수 현황 자료 (Salem, 2002)

Year	Carryover from Previous Year (MG)	Quantity Stored during Year (MG)	5% Reduction to Quantity Stored (MG)	Total Available to withdraw (MG)	Quantity withdrawn during the Year (MG)	Remainder (MG)	5% Reduction for Carryover into next Year (MG)
1997	48.44	96.12	91.31	139.75	37.53	102.22	97.11
1998	97.11	340.78	323.74	420.85	210.34	210.51	199.99
1999	199.99	279.88	265.89	465.88	100.30	365.58	347.30
2000	347.30	0.00	0.00	347.30	1.59	345.71	328.42
2001	328.42	10.97	10.42	338.84	224.86	113.98	108.28

3.2 Beaverton City

2002년 현재, Beaverton City는 전체 Beaverton City 인구의 79%인 62,000명 주민(전체 인구 78,820)의 물을 공급하고 있다. Beaverton 시는 자치 단체간 공동 물공급 집단인 Joint Water Commission(JWC)의 일원으로, JWC의 소유주는 Beaverton, Hillsboro, Forest Grove 그리고 Tualatin Valley Water District(TVWD)이다. JWC는 이들 소유주들의 물을 저장, 관리하고 처리하기 위한 목적으로 설립되었다. Beaverton City의 ASR 적용성에 대한 연



Beaverton's Aquifer Storage and Recovery System
Water is stored belowground in a basalt aquifer. When demand increases in the summer or in an emergency, the water can be pumped back out and used.

그림 2. Beaverton ASR 정호 및 현부압 대수층 개념도 (Beaverton City, 2002)

구는 1995년 TVWD와 공동으로 시작되었다. 이러한 적용성 평가 연구를 위해, Beaverton 시 당국과 TVWD는 Oregon 주에 ASR 평가를 위한 정호 공동 이용인가를 신청하였으며, Oregon 주는 ASR 적용성 평가를 위한 한시적인 허가를 내주었다. 이러한 인가를 통해 1999년부터 실제 파일롯 시험이 시작되었으며, Beaverton City는 Hanson Road의 정호를 통해, TVWD는 Schuepbach 정호를 통해 ASR 타당성 평가를 수행할 수 있었다.

ASR 타당성 평가는 Beaverton City의 물공급에 ASR 기법 적용이 충분한 타당성을 갖는 것으로 평가되어, 현재는 2개소의 ASR 시설이 설치, 운영되고 있으며, 현재 추가로 2개의 시설을 건설 중에 있다. 이미 설치 운영되고 있는 Sorrento 수처리장의 ASR 시설은 현무암 분출 사이의 수평 파쇄층과 잡석층을 주 대수층으로 사용하고 있다. JWC 수처리장으로부터 공급된 음용수가 이 수평 대수층에 저장을 위해 주입되며, 실제 회수될 때의 수질은 음용수 사용에 문제가 없다. 기존 현무암 대수층 내의 자연 지하수의 경우는 다양한 광물질을 포함하고 있어 높은 경도를 나타냈으며, 음용시에 다소 쓴 맛을 보여주었다. 그림 2는 Beaverton City의 ASR 정호 및 지하 대수층의 개념도이다.

2002년에 시는 약 1,116,575m³(295MG)의 JWC 처리수를 ASR 1번공과 2번공을 통해 저장하였으며, 하절기의 가뭄기간동안 저장된 물과 지하수 원수 401,210m³(106 MG)를 양수하여 총 1,517,785m³(401MG) 물을 공급하여, 이 시기의 첨부 수요를 충당하였다. 이 기간 동안 ASR 정호는 일일 11,355m³의 역할을 담당하였으며, 이는 시의 하절기 첨부 수요 56,775m³의 약 18% 역할을 함으로써 그 효과를 기대 이상으로 발휘하였다.

다음 표 2는 Beaverton City의 ASR 활용 용수 공급과 기존의 JWC 공급 방식에 대한 비용 평가 결과를 정리하여 보여준다.

표 2. Beaverton City의 ASR 및 기존 용수 공급 방식 경제성 비교 평가

OVERALL COST COMPARISON (ASR vs. JWC Conventional Supply)		
PEAK Summer Supply, 8 MGD Capacity		
ASR Supply	Annualized Cost of 400 MG	Cost@ 400MG (\$/100cubic feet)
Total ASR Annualized Capital Cost	\$535,551	\$1.002
Total ASR O&M	\$261,034	\$0.488
Total	\$796,585	\$1.49
JWC Conventional Supply	Annualized Cost of 400 MG	Cost@ 400MG (\$CCF)
Total JWC Annualized Capital Cost	\$897,110	\$1.678
Total JWC O&M	\$129,617	\$0.242
Total	\$1,026,727	\$1.92

3.3 Tigard City의 ASR 확장 계획

Salem 및 Beaverton 시의 경우와 마찬가지로 Tigard 시의 경우도 ASR의 타당성 평가 및 실제 운영을 통해 ASR 기법을 활용한 용수 공급이 기존 방식에 대해 경쟁력이 있으며, 다양한 장점을 갖는 것으로 평가하였다. 현재 운영 중인 ASR 기법 활용 용수 공급의 성공에 따라, Tigard 시는 더 많은 양의 물을 ASR 방식으로 저장하고 회수하기 위한 능력 증대를 수행하고자 추가적인 ASR 시설 타당성 지역을 조사하고 있다. 기본적으로 적합 지역 선정에는 3가지 요인에 의한 평가가 수행되었으며, 첫 번째 요소는 지하 대수층의 투수성, 두 번째 요소는 기존 용수 공급 시설물과의 근접성, 마지막 요소는 시 북측의 부정적 측면의 수리지질학적 경계부까지의 거리이다(Groundwater Solution Inc., 2003). 이들에 대해서는 각각 45%, 45%, 10%의 가중치를 통한 점수가 부여되었으며, 이러한 점수를 통해 타당 유망성 지역이 선정되었다. 이러한 평가 방식은 국내 지역에 대해서도 유사하게 적용될 수 있을 것으로 사료된다.

4. 결론 및 제언

미국 Oregon 주의 대표적인 3개 도시에서 수행된 수자원 공급 사업과 이 수자원 공급 사업에서 ASR 기법이 어떻게 적용되었는지를 살펴보았다. 이들 도시에서 수행된 ASR 기법을 활용한 수자원 공급은, 기존 지표수 취수 및 지표 저류조 저장 방식에 비해 월등히 경제적이며, 다양한 이점을 가지고 있는 것으로 드러났다. 또한 이들 도시에서의 ASR 기법 적용에 따른 효율성도 충분히 검증되어 현재 이들 도시는 ASR 시설에 대한 확충 계획을 수립 진행하고 있다. ASR 기법은, 풍수기와 갈수기의 활용 가능한 지표수자원의 차이가 크고, 활용 가능한 지표 공간이 부족한 국내의 경우에 유리할 것으로 판단된다. 특히, 투수성이 우수한 화산암 지역, 제3기 지층 및 석회암 지질 조건을 갖는 지역에서 지표수 취수 방식에 의한 기존 수도 공급 체계와 연계시킬 경우, 충분한 수자원 공급효과와 더불어 경제성 확보에도 유리할 것으로 판단된다. 본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비 지원(과제번호 3-4-1)에 의해 수행되었다.

5. 참고문헌

- Barry, Jeff, 2003, Aquifer Storage and Recovery (ASR) : A New Water Management Tool, “세계 물의 해” 기념 지하수 심포지움(21세기 지하수자원의 지속가능한 개발, 이용 및 관리) 발표 논문집. 한국지하수통양환경학회, 한국수자원공사, p27-36.
- Beaverton City, 2002, City of Beaverton Water Quality Report
- Salem City, 2003, Salem Oregon Annual Water Quality Report
- Groundwater Solution Inc., 2003, Aquifer Storage and Recovery(ASR) Program Expansion Report, City of Tigard.