

울릉도 대수층 저장 및 회수기술의 현장 적용성 평가

김만일, 석희준, 김형수, Jeffrey Barry*

한국수자원공사, 수자원연구소, 대전 유성구 전민동 462-1

*Groundwater Solutions, Inc., USA

e-mail : sxh60@kowaco.or.kr

요 약 문

대수층 저장 및 회수(ASR)기술의 현장 적용성을 평가하기 위하여 경상북도 울릉군 울릉읍 저동천 상류부근에서 양수시험 및 주입시험을 실시하였다. 양수시험결과 투수계수는 $48.7\text{m}^3/\text{day}$ 이고, 저류계수는 0.009이며, 비양수량은 $158.2\text{m}^3/\text{day}$ 로 계산되었다. 또한 시험정과 관측정은 거의 위상차 없이 같은 수위강하 경향을 보여주며 취수정은 관측정보다 평균적으로 10cm 정도 더 높은 수위강하 폭을 보여주는 것으로 미루어 볼 때 시험정과 관측정의 두 지점은 서로 수리지질학적으로 긴밀히 연결되어 있는 하나의 시스템임을 강하게 시사한다. 이외에도 주입시험 결과 암반구간 대수층은 낮은 투수계수를 가질 뿐만 아니라 낮은 저류계수를 가지기 때문에 ASR에 불리한 조건을 가짐을 알 수 있다. 그러나 상부 충적층 구간에서 실시한 주입시험 결과, 두 지점은 긴밀히 연결된 하나의 시스템으로 두 지점의 심부 암반층과의 연결성은 없고, 대신 상부의 높은 투수계수를 가지는 충적층 구간이 두 지점사이에 서로 긴밀히 연결되어 있는 것으로 파악된다. 또한 잔류 수위가 0으로 떨어지는 것으로 볼 때 주입된 주입수는 저장되지 않고 인근의 저동천으로 빠져나가는 것으로 사료된다. 이상의 사실로 볼 때 본 연구지역은 ASR에 불리한 조건을 가지는 지역으로 최종적으로 판단된다.

주요어: 대수층 저장 및 회수(ASR), 양수시험, 주입시험

1. 서론

지속가능한 수자원 확보 노력의 일환으로 다양한 지하수 인공함양 방식을 통한 용수 공급 방안이 대두되고 있는 가운데, 최근 미국을 중심으로 지하수 인공함양을 활용한 용수 공급 방식인 ASR(대수층 저장 및 회수 기법)의 효과가 실제적으로 검증되고 있다. ASR 기법은 대수층내 용수 저장의 개념으로, 용수 수요가 적고 취수원의 수량에 여유가 있는 동안에 확보된 물을 지하 대수층에 저장하였다가 용수 수요가 증대되거나 취수원 수량 확보가 곤란할 때 저장된 물을 양수하여 공급하는 방식이다. 본 연구는 울릉도 울릉읍 지역에 있는 도동정수장 부근에서 주입시험 및 양수시험을 통하여 대수층의 저장 및 회수 능력을 평가하여 ASR 기술의 현장 적용성을 평가하였다.

2. 울릉도 지역의 지질 및 수자원 현황

울릉도는 화산활동에 의해 해상으로 분출된 5각형의 화산섬으로, 해발 984km의 성인봉이 중앙에 위치하여 분수령을 이루며, 나리분지를 제외하고 평균 25% 이상의 경사를 가진다. 울릉도의 지질은 하부로부터 현무암질집괴암 및 현무암류와 이들을 관입한 휘록암 및 현무암질암맥, 다시 이들을 덮고 있는 조면암질집괴암, 라피리웅회암 및 응회암, 조면암질암류, 칼레라 퇴적층, 조면암질안산암류로 구성되어있으며, 다시 이들을 부정합으로 덮는 해안퇴적층 및 테일러스로 이루어져 있다. 또한 울릉도를 가로지르는 북동남서 방향으로 발달한 대규모 단층인 봉래단층과 이와 거의 직각으로 이어진 도동단층이 주요한 단층대로 나타난

다. 화산작용으로 인해 생성되는 부수적인 암질의 특성을 그대로 가지고 있어 기공이 많은 다공질의 부석층들이 부분적으로 다소 깊은 층적층을 이루고 있다. 울릉읍 주변에서 실시된 지구물리탐사 결과를 살펴보면 대수층 분포 심도는 대략 40~70m 내외로 단층대 주변에 다공질의 부석층과 통구미층으로 구성되어 있다¹⁾.

3. ASR 현장 적용성 시험

ASR 적용성 시험을 위하여 현장에서 양수시험, 회수시험 및 주입시험을 수행하였고, 이에 대한 분석을 통하여 대수층의 주입 및 회수 능력을 평가하였다. 이를 위하여 울릉군 울릉읍 도동 3리 소재 두 공의 암반관정(DD-1, DD-2)중 DD1은 시험정, DD2는 관측정으로 이용하였다. DD1 시험정을 대상으로 우물 자재를 인양한 후 사전 양수시험과 회복시험을 실시하였으며, 이 두 시험이 종료된 후 주입시험을 수행하였다. 이 때 주입시험을 위한 대구경 싱글 팩커(직경 6inch, 길이 107inch)의 설치 예정 심도를 확인하기 위해 공내 TV 검층을 수행하였다. 공내 TV 검층 결과, 지표에서 풍화암 상단부까지 약 19m 부근까지 케이싱이 설치되어 있으며 약 22m 심도에서 첫 번째 주요 파쇄대군의 위치를 확인하였다. 따라서 첫 번째 파쇄대보다 약 1.5m 정도 높고 공벽 상태가 양호한 부근에 팩커를 설치하고 현장 주입시험을 수행하였다.

3.1. 양수 시험

양수시험은 시험정 DD1에 수중양수펌프(5HP)를 심도 23m에 설치하여 약 8시간동안 144m³/day로 양수하고 시험정, 관측정 두 곳에 자동수위센서(Hermit 3000, In-Situ사)를 설치하여 지하수위 변동을 측정하였다. 이에 대한 시간별 수위강하는 그림 2에 도시하였다. 그림 2에서 보는 바와 같이 시험정과 관측정은 거의 위상차 없이 같은 수위강하 경향을 보여주며 시험정은 관측정보다 평균적으로 약 10cm 정도 더 높은 수위강하 폭을 보여준다. 위의 결과는 시험정과 관측정이 파쇄대와 같은 불연속면에 의해 서로 수리지질학적으로 긴밀히 연결되어 있는 하나의 시스템임을 강하게 시사한다. 또한 Cooper and Jacob 방법을 이용하여 대수층의 투수계수를 구한 결과 48.7m³/day 이고, 저류계수는 0.009로 나타났고, 비양수량은 158.2m³/day로 계산되었다. 대수층 투수계수인 48.7m³/day은 상하부 전체를 대변하는 값으로 판단되며, 일반적으로 층적대수층의 전형적인 값이다. 따라서 양수시험에서 구한 투수계수는 상부의 층적층의 특성을 대부분 반영

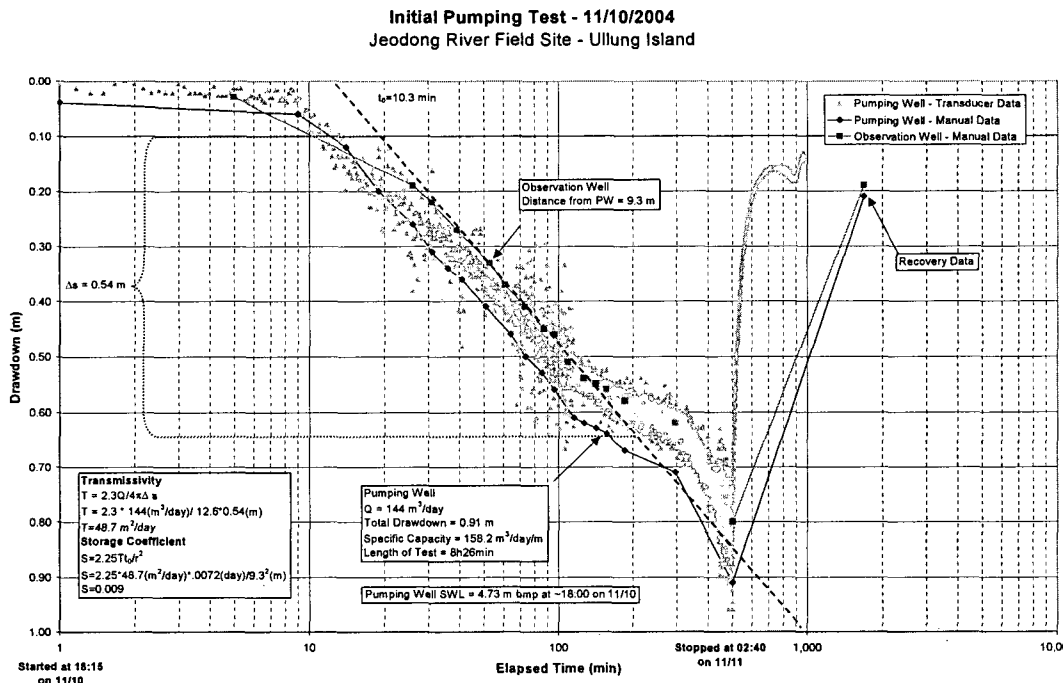


그림 2. 양수시험에 의한 시험정과 관측정의 수위강하 분포 곡선

한다고 볼 수 있다. 또한 양수시험을 통하여 얻은 비양수량은 $125 \text{ m}^2/\text{day}$ 보다 높은 값으로써 높은 산출량을 가지는 대수층의 특성을 지시하여, 저류계수도 일반적으로 피압 혹은 부분 피압 대수층에서 나타나는 낮은 값으로 ASR 적용에 부합될 것으로 사료된다²⁾.

3.2. 암반 대수층의 주입 시험

시험정의 케이싱 하단 약 21m 지점인 암반 대수층 구간에 싱글팩커를 설치하여 상부 충적대수층과 하부 암반 대수층 구간을 고립화시킨다. 주입수는 도동정수처리장에서 처리된 물로서 양질의 물을 확보하여 지하수와 주입수의 혼합 이후에도 양호한 수질을 갖도록 하였다. 주입시험은 주입량 $26.6 \text{ m}^3/\text{day}$ 로 일정하게 유지하면서 주입시 뿐만 아니라 주입이 끝난 후에도 시험공내 압력변화를 측정하였다. 이때 최고 주입압은 약 6bar이고 총 1.1 m^3 의 물을 주입 하였다. 그림 3은 주입시험동안 시간에 따른 수위반응곡선을 나타낸다. 주입시험시 초기 주입동안 압력증가가 빠르게 일어나기 때문에 수위 측정이 이루어 질 수 없었다. 따라서 그림 3은 주입이 끝난 후에 회복수위만을 나타낸 것이다. 그림 3에서 볼 수 있듯이 추정된 투수계수는 $0.69 \text{ m}^2/\text{day}$ 이고 비양수량도 $0.42 \text{ m}^2/\text{day}$ 로서 매우 낮다. 즉 투수성이 낮고, 산출율이 적은 지하 매질로서 심부 암반 대수층은 ASR을 위한 저류조건에 불리한 특징을 갖는다. 또한 잔류수위가 0에 가깝게 떨어지기 때문에 심부 암반 대수층은 저장효과가 거의 없음을 의미한다. 이는 아마도 파쇄대와 같은 불연속면으로 주입된 물이 외부로 급격히 빠져 나가고 있는 것으로 사료된다.

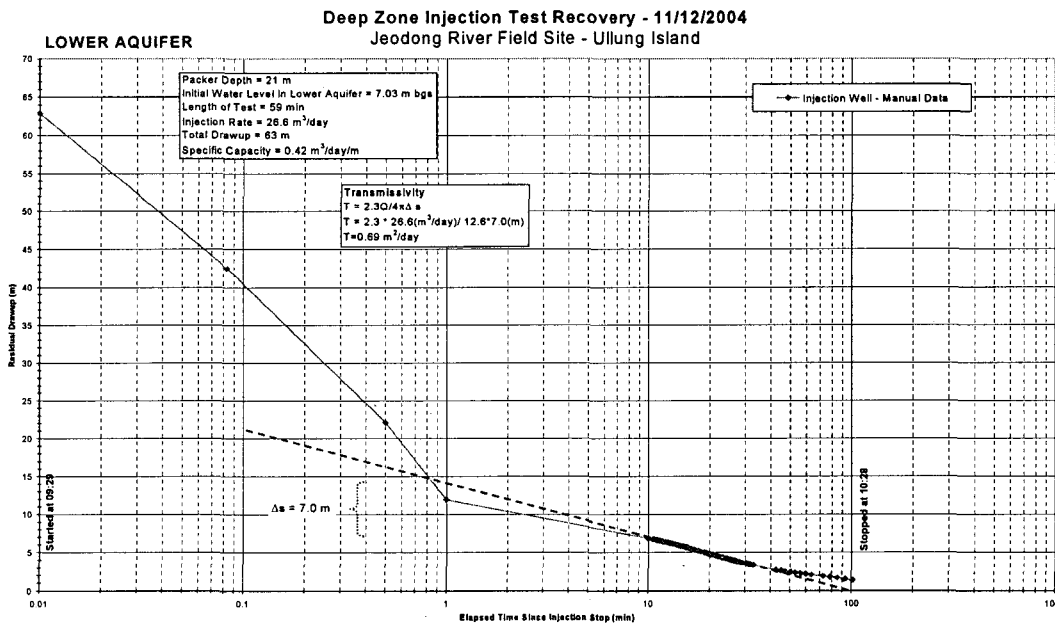


그림 3. 심부암반대수층의 주입시험 결과

3.3. 충적층 대수층의 주입 시험

양수시험에서 구한 투수량 계수는 $48.7 \text{ m}^2/\text{day}$ 이고 주입시험에서 구한 투수량계수는 $0.69 \text{ m}^2/\text{day}$ 이기 때문에 심부 암반층과 상부 충적층의 수리 물성치는 분명히 다르다는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 이번에는 상부 충적층의 주입수 저장 능력을 파악하기 위하여 팩커를 제거하고 주입수를 상부에서 호스로 약 19분 동안 약 $361 \text{ m}^3/\text{day}$ 의 유속을 갖고 약 4.8 m^3 로 주입하였다. 암반 대수층의 주입시험과 마찬가지로 주입시험동안 주입정 및 관측정의 시간에 따른 수위반응곡선을 그림 4에 그려서 대수층의 수리물성치 및 ASR을 위한 대수층의 저장 능력을 파악하였다. 그림 4에서 볼 수 있듯이 투수량계수는 $47.1 \text{ m}^2/\text{day}$ 이고, 비양수량은 $523.5 \text{ m}^2/\text{day}$ 로서 상부 충적층 뿐만 아니라 하부 암반층을 대변하는 전체적인 구간에 대한 수리

물성치이다.

이 값은 양수시험에서 구한 값과 거의 비슷하기 때문에 두 시험 모두의 결과에 대한 신뢰성을 높여주는 부분이다. 그리고 심부 암반대수층에 대한 주입시험 결과와 비교해 볼 때 충적층 구간은 심부 암반 구간에 비해 매우 높은 투수계수의 수리 물성치로 이루어진 매질임을 추정할 수 있다. 이외에도 관측정과 시험정의 수위 상승과 회복은 거의 같은 위상차를 보임을 알 수 있다.

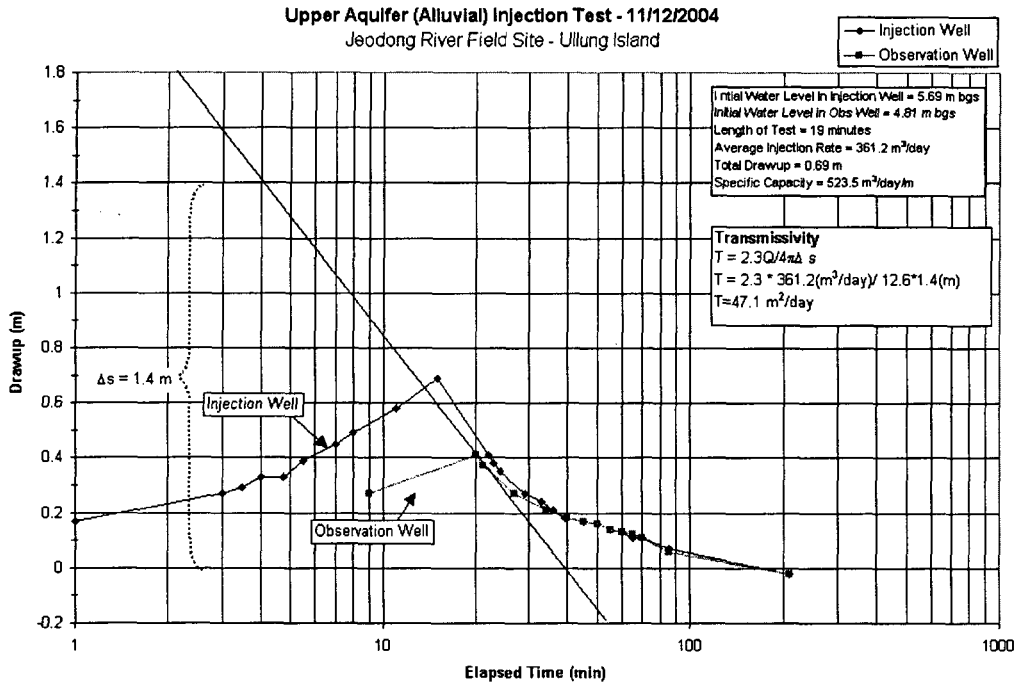


그림 4. 상부 충적층 및 심부 암반 대수층에 대한 주입시험 결과

즉 시험정에서 관측정으로 수리적인 영향이 즉각적으로 전달되는 것으로 파악되고, 이는 두 지점이 수리적으로 긴밀히 연결되어 있는 하나의 시스템으로 파악된다. 그러나 심부 암반대수층의 주입시험에서 나온 결과로 미루어 볼 때 두 지점의 심부 암반층과의 연결성은 없고, 주로 상부의 높은 투수계수를 가지는 충적층 구간 사이에 서로 연결되어 있는 것으로 파악된다. 또한 회복시에는 위상이 같을 뿐만 아니라 회복 폭도 같은 것으로 미루어 볼 때 두 지점사이에서 충적층 구간은 매우 높은 수리적인 연결성을 가지는 하나의 시스템을 알 수 있고, 또한 잔류 수위가 0으로 떨어지는 것으로 볼 때 주입된 주입수는 저장되지 않고 인근의 저동천으로 빠져나가는 것으로 사료된다. 이는 또한 세 가지 사실로 유추 가능하다. 첫 번째로 상부의 충적층 구간은 굉장히 높은 투수를 가지며 수평적으로 인근의 저동천까지 연결되어 있다. 두 번째 충적층 깊이가 저동천의 수위와 거의 비슷하다. 세 번째 이 지역의 자연 수두구배는 높은 수두를 보이는 시험정으로부터 낮은 수두를 보이는 관측정으로 높게 나타나고 이는 저동천까지 연결된다. 이상의 세 가지 사실로 볼 때 주입시 형성된 주입정의 수위 상승은 낮은 수두를 보이는 하천쪽으로 진행되면서 빠르게 소멸된다고 추측할 수 있다.

4. 결론

대수층 저장 및 회수(ASR)기술의 현장 적용성을 평가하기 위하여 울릉읍 저동천 부근에서 양수시험 및 주입시험을 실시하였다. 주입시험은 암반구간과 전체 구간에 대해서 각각 따로 실시하였다. 암반구간에 대한 주입시험은 지표 하 심도 21m에 팩커를 설치하여 실시하였고 전체구간에 대해서는 팩커 없이 호스로 직접 물을 넣어서 실시하였다. 양수시험과 주입시험 결과, 충적층은 두 지점 간에 긴밀히 연결되어 있지만 암반층은 서로 연결되어 있지 않고, 암반층은 투수계수가 낮고, 저류계수 또한 낮아서 ASR에 불리한 조

건을 가질 뿐만 아니라 파쇄대를 통해 인근 지역으로 빠르게 물이 빠져 나가는 것으로 판단된다. 반면에 두 지점의 충적층은 높은 투수계수를 가지고 서로 연결되어 있기 때문에 하나의 긴밀한 시스템으로 판단되지만 주입수의 저장능력은 거의 없는 것으로 파악된다. 이는 주입수가 높은 투수계수와 높은 자연 수두구배를 갖는 충적층을 통하여 인근의 저동천으로 빠져 나감으로서 잔류 수위가 빠르게 0으로 떨어지기 때문이다.

사사

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발 사업단의 연구비 지원 (과제번호: 3-4-2) 및 한국수자원공사 현물투자 지원에 의해 수행되었다. 연구비를 지원해 준 사업단 및 한국수자원공사 측에 감사드린다.

참고문헌

- 1) 한국수자원공사, 제주도 및 울릉도 지하수조사 보고서, 1990.
- 2) Barry, J., Aquifer Storage and Recovery(ASR) A New Water Management Tool, "세계 물의 해" 기념 지하수심포지움, 21세기 지하수자원의 지속가능한 개발, 이용 및 관리 발표 논문집, (사)한국지하수토양환경학회, 한국수자원공사, 27-36, 2003.