

## 균열 암반 대수층 활용 지하수 인공 함양 주입 예비 평가

김형수, 백건하\*, 윤윤영\*\*, 한정성\*\*

한국수자원공사 수자원연구원, \*한국수자원공사 조사기획처, \*\*(주)한서엔지니어링 (hskim@kowaco.or.kr)

### <요약문>

균열 암반 대수층에 대한 지하수 인공 함양 주입 가능성을 예비적으로 평가하기 위한 시험을 수행하였다. 지하수 인공 함양 주입 시험이 수행된 지역은 경기도 포천군 이동면이며, 이 지역의 지질은 중립 내지 조립질 화강암에 해당된다. 시험 정호에 대한 시추공 내부 촬영 결과, 화강암 내에 부분적으로 절리들이 발달되어 있었으며, 대체로 수직적인 절리 발달이 우세하였다. 2개소에서 인공 함양 주입 시험이 100 kgf/cm<sup>2</sup> 이상의 확장 팩커로 대상공의 상부를 밀폐한 후 시행되었다. 이중 MW-7호 공에서는, 주입 압력을 5 내지 7 kgf/cm<sup>2</sup>으로 조절하여 시간당 약 450 ℓ의 평균 주입률로 시험을 수행하였으며, O-7a호 공에서는 주입 압력을 4 kgf/cm<sup>2</sup> 내외, 시간당 약 1,740 ℓ의 평균 주입률로 시험을 수행하였다. MW-7호 공의 시험은 3일간 3회에 걸쳐 각 450분, 200분, 414분 동안 시험이 수행되었으며, O-7a호 공에서는 연속적으로 24시간 동안 인공 함양 주입 시험이 수행되었다. 수행된 지하수 인공 함양 주입 시험은 적어도 지하수 상류 구배 구간의 지하 수두를 시험이 수행된 이후에도 24시간 이상 유지하는 것으로 평가되었다. 실험을 통해 주입한 양과 주변 관측공의 수위 상승을 단순 검토한 결과 시험이 수행된 지역의 개략적 유효 공극률을 산정 할 수 있었으며, 그 결과, 이 지역 균열 암반의 유효 공극률은 약 3 내지 6% 인 것으로 평가되었다. 국내에서 지하수 인공 함양 방식을 균열 암반 대수층에 활용하여, 지속적인 수자원 관리와 수도 공급을 할 수 있는지를 평가하기 위해서는 앞으로 보다 많은 시험 수행과 연구를 통한 검증이 요구된다.

주요어 : 지하수, 인공 함양, 균열 암반, 유효 공극률, 주입 시험, 대수층 저장/회수(ASR)

### 1. 서론

지하수 인공 함양 기법은 대수층을 활용하여 수자원을 공급하고 관리하기 위한 적극적인 방안으로, 최근 들어 유럽, 미국, 일본 등의 선진국들을 비롯해 수자원 확보에 어려움을 겪고 있는 개발 도상국 등에서도 이 기술을 활용한 수자원 확보 방안을 적극적으로 적용하고 있다. 다양한 지하수 인공 함양 기법 중에 하나인 대수층 저장/회수 방법은 최근 들어 국내에 소개되기 시작하였으나(김형수 등, 2003a; Barry, 2003; Murray, 2003), 본 연구가 직접적인 대수층 주입을 통한 지하수 인공 함양 연구로는 최초라고 할 수 있다. 대수층 저장/회수 방법은 일명 ASR(aquifer storage & recovery)로도 불리며, 풍수기에 여분의 수자원을 대수층 내에 저장하였다가 갈수기에 다시 양수하여 사용하는 방식으로 가장 적극적인 대수층 활용 인공 함양 기법이다. 이에 대한 일반적인 사항은 김형수 등(2003b)을 참조할 수 있

다. 일반적으로 ASR 방식은 주로 대수층의 공극률이 양호한 퇴적암류나 화산암류에서 시행되는 것이 바람직하나, 지질 조건이 적합하지 않은 경우, 균열성 암반 대수층에서도 부분적으로 활용될 수 있다고 알려져 있다. 그러나 국내에서는 아직 이러한 ASR 방식 인공함양 기법을 활용한 사례가 없으며, 실제 대수층에 주입 가능성조차 공식적으로 파악된 바가 없는 것으로 알려져 있다. 따라서 본 연구에서는 ASR 기법을 활용한 수자원 관리와 공급의 가능성을 초보적인 단계에서 예비 평가하기 위하여, 화강암 균열 대수층에 대한 인공 함양 주입 시험을 수행하였다.

## 2. 연구지역 일반 및 인공 함양 주입 시험 개요

연구 지역은 행정구역상 경기도 포천시 이동면 도평 3리 산 269번지 일원의 샘물 공장으로서 조사가 수행된 정호에 대한 상세 위치는 그림 1에 도시되어 있다. 조사 지역 인접 부근은 중립 내지 조립질 화강암과 다소 치밀하나 상대적으로 풍화에 약한 우백색 화강암 맥암 등이 분포하고 있으며, 도평천 서측의 폐쇄된 채석장에는 복운모 화강암이 분포하고 있다. 본 연구 지역은 군사보호 지역이어서 다른 곳에 비하여 거주자가 적은 편이며, 농경 활동도 활발한 편은 아니다. 임상 상태는 보통 정도이다.

인공 함양 주입 시험은 MW-7호 공과 O-7A공에서 수행되었으며, 주입 시험이 수행되는 동안 주입 공에 대해서는 주입 압력, 물 주입량, 수두 변화 및 수온을 측정하였고, 주변 관측공에 대해서는 지하수위 변화를 연속으로 자동 계측하였다. 한편, 인공 함양 주입 시험을 하기 위한 팩커의 설치 및 정호의 내부 절리 발달 상태를 파악하기 위한 정호 비디오 검층을 인공 함양 주입 시험 이전에 수행하였다. 또한 주입공 및 일부 관측공으로 활용된 공들에 대해서 인공 함양 주입 시험이 수행되기 전후에 각각 양수 시험을 수행하여, 인공 함양 주입에 의한 우물 개선 효과에 대한 검증도 함께 수행하였다.

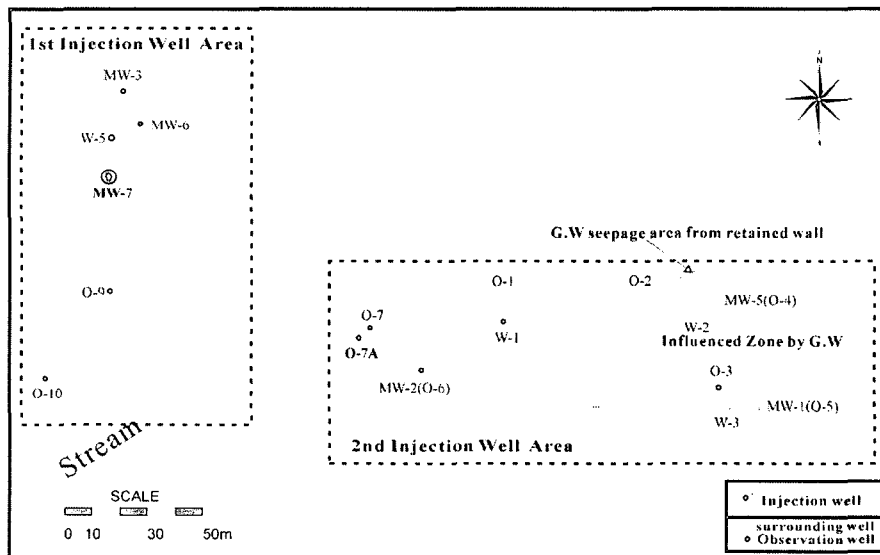


그림 1. 인공함양 주입시험 현장 조사 위치도

## 3. 인공 함양 주입 시험 수행 및 결과

MW-7호 공을 활용한 주입 시험은 3일간에 걸쳐 단속적으로 매일 349분, 450분, 414분 동안 각각 수행되었다. 그림 2는 MW-7호 공에서 수행된 인공 함양 주입 시험의 주입 압력과 물 주입량을 보여준다.

그림 2에서 볼 수 있듯이, MW-7호 공에서는, 주입 압력을 5 내지 7 kgf/cm<sup>2</sup>으로 조절하여 시간당 약 450 ℓ의 평균 주입률로 시험을 수행하였다. 시험이 수행되는 동안 주변의 지하수위 변화는 MW-3, W-5, MW-6, O-9 및 O-10호공(관측공 위치는 그림 1 참조)에서 기록되었다. MW-7호 공 주입 시험시의 주변 관측공의 지하수위 분포는 그림 3에서 볼 수 있다. 그림 3에 주어진 지하수위는 시험이 수행되기 이전에 자연 수위에 대한 상대적인 수위 변화를 보여준다.

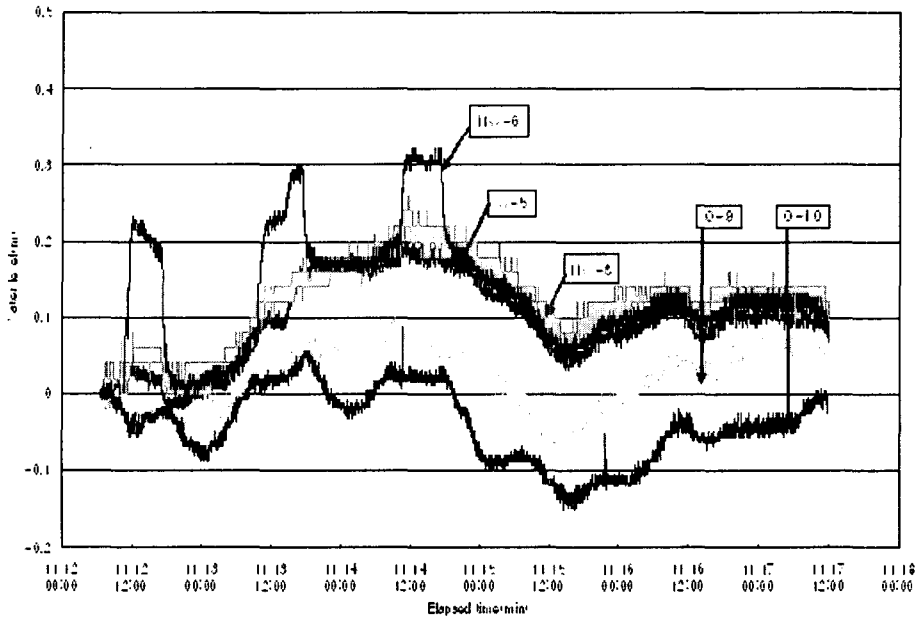


그림 3. MW-7 인공함양 주입시험 중 인근 관측점 지하수위변동

O-7a호 공에서는, MW-7호 공에서의 주입 시험과는 달리 연속적으로 24시간 동안 지속적인 인공 함양 주입 시험이 수행되었다. 그림 4는 O-7호 공에서의 주입 압력과 주입율을 보여준다.

그림 4에서 볼 수 있듯이, O-7a호 공에서는, 주입 압력을 4 kgf/cm<sup>2</sup> 내외, 시간당 약 1,740 ℓ의 평균 주입률로 시험을 수행하였다. 시험이 수행되는 동안 주변의 지하수위 변화는 O-3, W-1, O-6 및 O-7호 공(관측공 위치는 그림 1 참조)에서 기록되었으며, 그 결과는 그림 5에 주어져 있다. 그림 5에 주어져 있는 지하수위는 그림 3과 마찬가지로, 시험이 수행되기 이전의 자연 수위에 대한 상대적인 수위 변화를 보여준다. 그림 5에서 O-7호 공의 수위가 0.8m 이상에서 증가되지 않고 일정한 현상은 본 관측공의 최초 자연 수위가 케이싱 상단으로부터 0.8 m 하부였으며, O-7a호 공과의 거리가 수 m로 가까워 주입 시험이 수행되는 동안 관측공의 케이싱 최상단으로 지하수가 토출되면서 나타난 현상으로 실제 지하수 두는 이보다 높았음을 보여주고 있다.

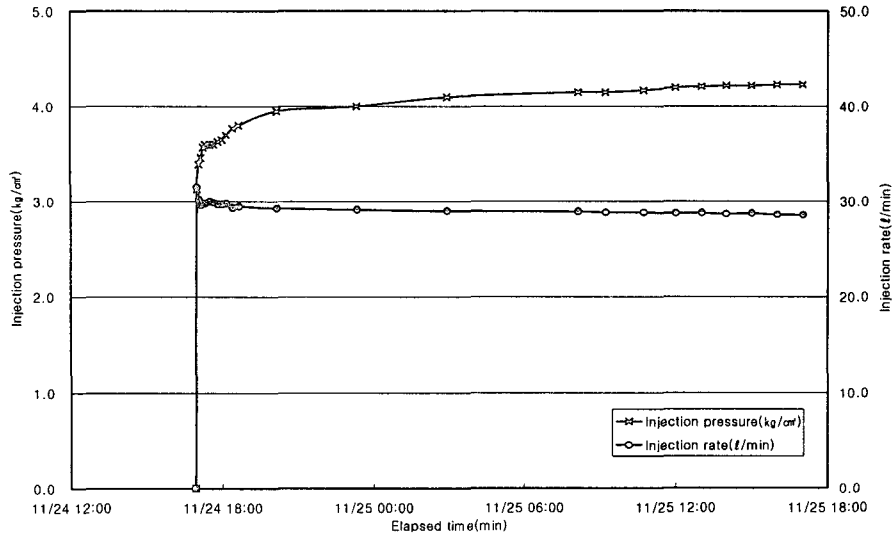


그림 4. O-7a 인공함양시험 시간-주입수압/주입율

#### 4. 결과 분석 및 예비 결론

금번 인공함양 주입 시험을 통해서 밝혀진 중요 사실은 주입이 완료된 후에, 적어도 주입 시간보다 긴 시간동안 주변 균열 대수층의 수두가 유지되었다는 것이다. 특히, 이러한 현상은 주입 정호의 상류 구배에서는 뚜렷이 나타났으며, 하류 구배에서는 상대적으로 수두 손실이 빠르게 진행되는 것으로 평가되었다. 인공 함양 시험을 통해 주입한 양과 주변 관측공의 수위 상승을 단순 검토하여 유효 공극률 평가를 수행하였다. MW-7호 공에 주입된 물의 총량은 약 8.4 m<sup>3</sup>이며, 이 주입 효과에 의해 30 m 전후 구간에 대한 주변 지하수위가 전체적으로 10 cm 동일하게 상승된 것으로 가정하면, 이 지역의 유효 공극률은 약 3 %로 평가된다. O-7a호 공에 주입된 물의 총량은 약 41.9 m<sup>3</sup>로, 이 주입 효과에 의해 30 m 전후 구간에 대한 주변 지하수위가 전체적으로 25 cm 동일하게 상승된 것으로 가정하면, 이 지역의 유효 공극률은 약 6 %로 평가된다. 결과적으로 인공 함양 주입 시험에 의한, 연구 지역 균열 암반의 유효 공극률은 약 3 내지 6 % 인 것으로 평가되었다. 이러한 유효 공극률은, 일반적인 균열 결정질암의 공극률이 10 % 이내의 범위(Driscoll, 1986)인 점을 감안할 때, 타당한 것으로 사료된다. 한편, 주입 시험을 통해 유효 공극률을 평가하는 방식은 양수 시험의 해석 결과와 비교 될 수 있으나, 실질적으로 균열 암반 대수층에 대한 양수 시험에 대한 이론적 해석과 정밀한 평가가 어려워 직접적인 대비를 수행하지는 못하였다. 앞으로 이러한 유효 공극률 산정 방식과 양수 시험을 통한 대수층 특성 평가에 대한 비교 연구는 중요한 과제가 될 수 있을 것으로 판단된다. 주입 시험 전후의 양수 시험을 통한 비양수량의 변화는 MW-7호 공에서는 거의 나타나지 않았으나, O-7a호 공에서는 약 75 %의 증가 현상이 관찰되었다. 이러한 증가 현상은 주입에 의해 부분적으로 연결되지 않았던 절리가 연결된 것으로 판단된다. 국내에서 지하수 인공 함양 방식을 균열 암반 대수층에 활용하여, 지속적인 수자원 관리와 수도 공급을 할 수 있는지를 평가하기 위해서는 앞으로 보다 많은 시험 수행과 연구를 통한 검증이 요구된다. 본 연구는 21세기 프런티어 연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비 지원(과제 번호 3-4-1 및 3-4-2)에 의해 수행되고 있는 과제이다.

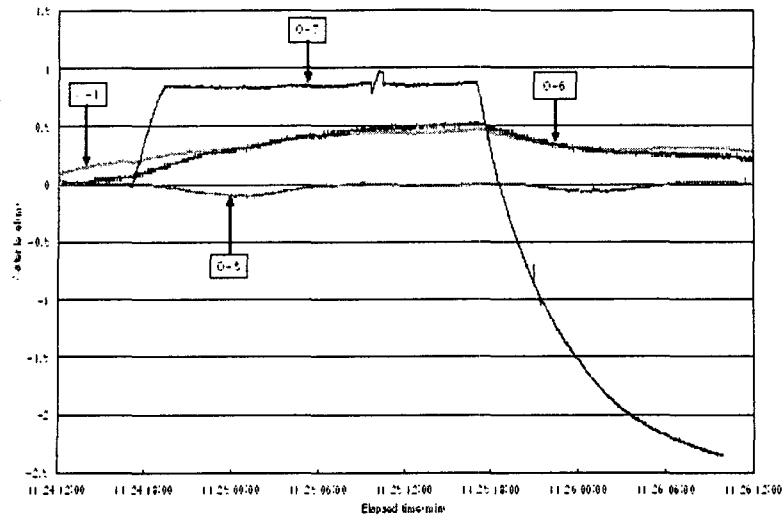


그림 5. O-7a 인공함양시험 중 인근 관측정 지하수위변동

## 5. 참고 문헌

- Barry, J., 2003, Aquifer Storage and Recovery(ASR) A New Water Management Tool, "세계 물의 해" 기념 지하수심포지움, 21세기 지하수자원의 지속가능한 개발, 이용 및 관리 발표논문집, (사)한국지하수토양환경학회, 한국수자원공사, p.27-36.
- Driscoll, F. G., 1986, Groundwater and Wells, 2nd ed., published by USF Johnson Screens, 1089p.
- Murray, R., 2003, Artificial Recharge in Hard-rock Aquifers in Southern Africa, 「지속가능한 지하수 개발 및 함양기술 개발」 연구성과 발표 및 지하수 인공함양 국제 심포지움 논문집, 한국수자원공사, p.31-66.
- 김형수, Barry, J., Eaton, L., 2003a, 대수층 저장 및 회수(Aquifer Storage & Recovery) 기법을 활용한 수자원 확보 및 공급 방안, 한국지하수토양환경학회 추계학술발표회 논문집, p.267-271.
- 김형수 등, 2003b, "지속가능한 지하수 개발 및 함양기술 개발" 보고서, 한국수자원공사 연구보고서, KIWE-DRC-03-1, 21세기 프론티어 연구개발사업 '수자원의 지속적 확보기술개발' 세부과제(3-4-1) 중간보고서.