

지반 침하 지역에서 적정 채수량 신장을 위한 현장 시험 방안 제시

석희준, 임은상, 원이정, 김형수, 이강복*

한국수자원공사, 수자원연구소, 대전 유성구 전민동 462-1

*서울시 송파구 가락동 신한빌딩, 147-9

e-mail : sxh60@kowaco.or.kr

요 약 문

K시 강변여과수 개발 지역에서 적정 채수량 산정 및 지표수 연계 특성을 파악하기 위한 적절한 현장 시험 세부계획 수립과 그 근거를 마련하였다. 일반적으로 단계양수시험을 통하여 적정 채수량 산정 후, 산정된 적정 채수량으로 장기양수 시험을 통하여 주변 수리권에 미치는 지하수위 변화와 강변여과수의 수질변화를 관찰하여 지표수와 연계한 변동특성을 파악하는 일련의 과정을 생각할 수 있다. 그러나 K시 강변여과수 개발 지역과 같은 연약 지반에서는 단계 양수시험시의 높은 양수량에 인한 지반 침하의 우려로 인해 이에 대한 공정의 변화가 불가피하였다. 따라서 현장 시험 공정 순서를 바꾸어서 장기 양수 시험 후 단계양수시험을 수행하는 새로운 대안을 모색하였고 이를 뒷받침 해주는 근거를 제시하고자 한다. 뿐만 아니라 단계양수시험의 단계별 적절한 양수시간을 합리적, 효율적으로 결정하여 경제적 이면서 가급적 빠른 시간 내에 단계양수시험을 완료 가능하게 만들고, 가능한 한 더 오랜 기간동안 장기 양수 시험을 가능하게 함으로써 제한된 시간내에 많은 수리지질학 및 화학적인 정보를 얻을 수 있도록 하였다.

주요어: 강변여과수, 적정채수량, 단계양수시험, 장기양수시험, 지반침하

1. 서론

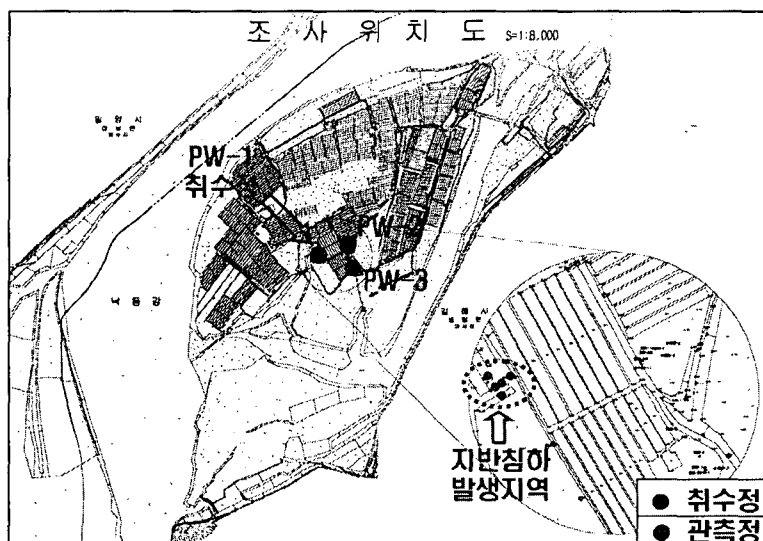


그림 1. K시 강변여과수 개발 지역 현장 조사 위치도

연구지역은 K시 강변여과수 개발을 위해 조사 중이다. 이 지역은 밀양강과 낙동강이 합류되는 지점으로, 두 강의 유수에 의해 형성된 사구이며, 주변부도 대부분 낙동강 및 밀양강의 유수의 영향으로 형성된 충적층으로 상부는 소량의 실트 섞인 세립질 모래가 우세하고 하부는 폐각을 소량 함유한 실트, 점토가 혼재한 모래, 사질 자갈이 우세한 토질로 강의 주변부를 따라 비교적 넓은 평야를 형성하고 있다. 본 지역의 대수성 특성 및 적정 채수량 파악을 위해서 취수정 및 관측정을 착정하였고 위치는 그림 1에 도시하였다. 또한 시험 도중 발생된 지반침하를 그림 1에 나타내었다.

2. 현황파악 및 대안 제시

K시 지역의 강변여과수 개발을 위해 적정 채수량 산정 및 지표수 연계 변동 특성을 파악하기 위하여 단계양수시험 및 장기 양수시험이 실시되었다. 그러나 기존 현장 시험 내용에 따르면 PW-1의 취수정에서 양수량이 커짐에 따라 지반침하에 의한 착정보호공 구조물이 기울어지거나 모래의 다량 유입으로 펌프 기동이 불가능하는 시험 과정상의 문제점이 나타났었다. 이는 점토질 모래층의 세굴에 의한 점토질 모래층의 상부에 있는 모래층의 세립질 모래가 빠져나가면서 지반침하가 일어난 것으로, 착정시 시추 조사공의 상세 단면도를 통하여 추정할 수 있었다. 점토질 모래층의 세굴은 양수량 증가에 의한 관정 주변의 난류 흐름 발생으로 마찰력을 증가시켜 점토질 입자가 빠져나가는 것이므로 점토질 모래층의 세굴이 일어나는 것을 방지하기 위해서 양수량 조절이 불가피하다. 그러나 적정 채수량 산정을 위해서는 높은 양수량을 통한 단계양수시험이 불가피하므로 단계양수시험 전에 지반의 침하를 피하기 위해서 그라우팅 및 다양한 지반 보강공법 중에 적당한 공법을 적용한 후 단계양수시험을 실시하는 것이 안전하다고 판단되지만 제한된 과업 기간 및 공사비로 인한 이의 적용이 현실적으로 어려울 것으로 판단되므로 또 다른 대안을 제시하는 것이 필요하다. 따라서 단계양수시험 후 장기양수시험방법의 시험 공정에 의해 적정 채수량 산정 후 장기양수시험을 함으로써 주변 수리권에 미치는 지하수위 변화와 강변여과수의 수질변화를 관찰하여 지표수와 연계한 변동특성을 파악하는 일련의 과정을 본 지역에 그대로 적용하는 것은 위에서 언급한 문제점으로 인하여 어렵다고 판단되므로 본 연구에서는 현장 시험 공정 순서를 바꾸어서 장기 양수 시험 후 단계양수시험을 수행하는 새로운 대안을 모색하였고 이를 뒷받침 해주는 근거를 제시하고자 한다. 그 뿐만 아니라 단계양수시험의 단계별 양수시간을 경제적으로 결정하여 가급적 빠른 시간 내에 단계양수시험을 완료 가능하게 하고자 한다. 그럼으로써 가능한 더 오랜 기간동안에 장기 양수 시험을 수행하도록 하여 지표수와 연계한 변동특성을 충분히 넓은 지역과 장기간에 걸쳐서 파악하도록 하였다.

3. 장기 양수 시험을 위한 적정 채수량 추정 방안

우선 장기 양수 시험시 추정할 수 있는 적정 채수량은 크게 두가지 방법에 의해서 구할 수 있다. 첫째는 근방 양수정에서 기 획득된 적정 양수량을 이용하는 방법이 있다. 이는 수리지질학적으로 본 연구지역내 적정 양수량이 유사하다는 전제하에 가정을 둔 것이다. 둘째는 이전의 양수시험에 의해 획득된 수리물성치를 가지고 계산 또는 수치 모델링에 의해서 획득될 수 있다. 적정 채수량 산출을 구하기 위해서 피압 대수층의 경우 지하수위가 대수층의 상부에 도달하지 않는 범위내에서 최대 수위강하량을 결정하고 다음과 같은 경험식 (1)을 이용하여 적정 채수량을 산정 할 수 있다(Razack and Huntley, 1991).

$$T = 15.3 \left(\frac{Q}{s_{\max}} \right)^{0.67} \quad (1)$$

여기서 투수계수는 (m^2/day)단위를 사용하고, Q 는 (m^3/day)단위이며, s_{\max} 는 (m)을 사용한다. 여

기서 T는 대수성 시험으로부터 얻은 값을 이용하고 최대 수위 강하는 자연수위로부터 점토질 모래층의 상부까지 수위강하가 일어나는 것을 가정하여 11m 라고 결정하고 계산한다. 따라서 위의 식 (1)을 이용하여 적정 채수량을 구하면 약 $2470 \text{ m}^3/\text{day}$ 을 얻을 수 있다.

4. 단계양수시험 지침(안)

단계별 양수시험시 단계 양수 시간을 시험과정의 경제성을 위하여 적절하게 결정하는 것이 중요한데, 여기서는 GMS의 MODFLOW의 수치모의 해석을 통하여 구하였다. 이 때 수치모의 해석을 위한 수리 물성치는 <강변여과수 및 대체취수원 개발 타당성 조사 보고서, 2003>의 값을 인용하였고, 대수층은 피압 대수층이라고 가정하여 단계 양수량에 따른 안정수위에 도달하는 시간을 구하였다. 수치모의를 위한 격자망과 경계조건은 그림 3에 나타내었다.

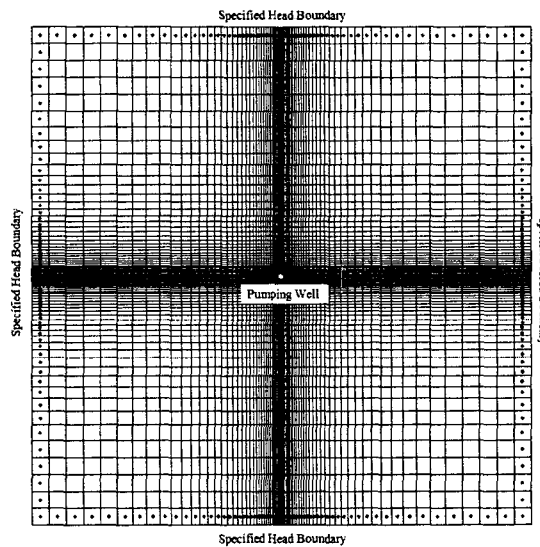


그림 3. 단계양수시험시 단계양수시간을 결정하기 위한 가상 수치모델 개념도

본 수치모의에서는 단계양수를 각각 $1000 \text{ m}^3/\text{day}$, $1500 \text{ m}^3/\text{day}$, $2000 \text{ m}^3/\text{day}$, $2500 \text{ m}^3/\text{day}$, $3000 \text{ m}^3/\text{day}$, $3500 \text{ m}^3/\text{day}$, $4000 \text{ m}^3/\text{day}$ 로 설정하고 이에 대해서 각각 수치모의 하였고 이 중 두 가지 경우에 대한 결과만을 그림 4에 나타나 있다.

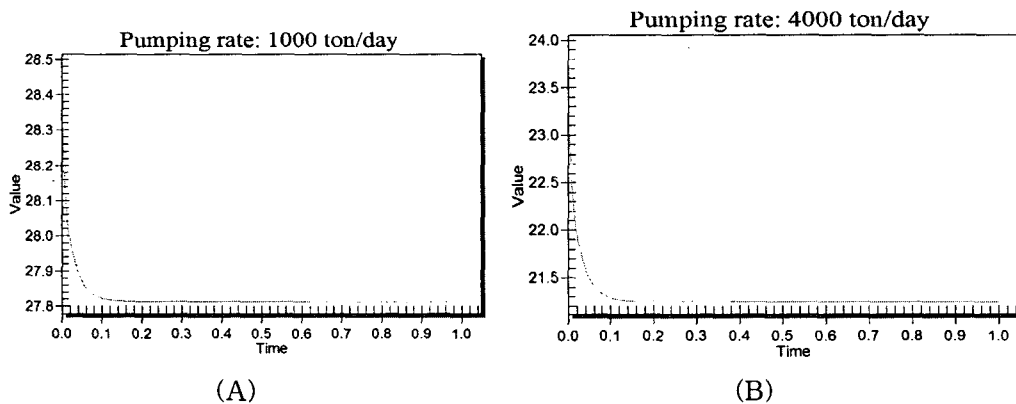


그림 4. 단계별 양수시험의 각각 다른 양수량에 따른 양수정에서 시간에 따른 수위변화

그림 4에서 보여지는 바와 같이 양수량의 증가에 따라 양수정에서 수위강하량은 증가하고 최대 4000

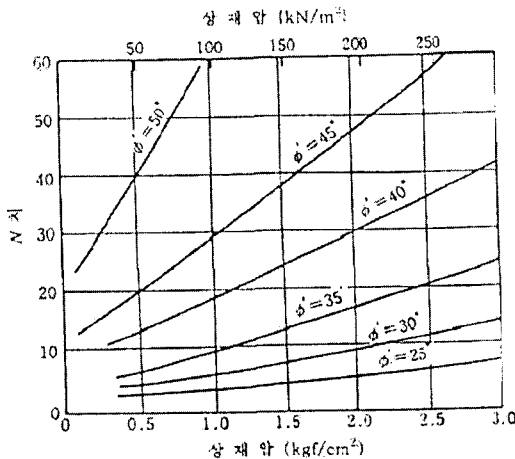
m^3/day 로 양수 하였을 때 약 9m 정도 수위강하가 일어났음을 알 수 있다. 그리고 안정수위에 도달하는 시간은 모든 과정에서 약 0.15 day가 소요되었음을 알 수 있다. 이와 같이 다른 양수량으로 양수함에도 안정수위에 도달하는 시간이 같은 이유는 지하수 유동방정식에서 가정하는 한 가지 사실 때문이다. 그 가정은 피압 대수층에서 수두압력의 감소로 인해서 대수층 매질에 있는 물이 일시적이고 즉각적으로 빠져나온다는 것이다. 이상의 결과로 볼 때 최대 적정 채수량은 약 $4000 m^3/day$ 이고, 각각의 양수별 안정수위 도달시간은 약 0.15 day로 나타났다. 그러나 실제 우물내부에서 일어나는 비선형흐름 마찰에 의한 우물 손실을 고려하면 $4000 m^3/day$ 보다는 적은 양수량으로 양수하는 것이 적절하다고 판단된다. 또한 양수별 안정수위 도달시간도 0.15 day로 모델링 결과 추정 할 수 있지만 지하수 유동방정식이 갖고 있는 기본적인 가정이 현실과 부합되지 않을 수 있음을 감안할 때 이보다 더 큰 값인 0.30 day로 수행하는 것이 적절하다고 판단된다.

5. 지반의 강도증가를 평가

장기양수시험에 의한 지반의 강도 증가를 살펴보면, 지하수위가 저하됨에 따라서 지반의 유효응력이 증가하여 지반의 압축·압밀을 촉진시킴으로서 지반이 보다 안정된 상태를 이루게 된다. 즉, 장기양수시험에 의해 지하수위의 저하가 발생하게 되고 이로 인해서 상재하중으로 작용되지

는 유효응력의 증가가 유발되고 이 유효응력의 증가는 다시 지반강도의 증가를 유도하여 보다 안정적인 지반으로 조성하게 된다. 이와 같은 강도 증가를 실질적으로 PW-1에 적용해 보면 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다. 상부 모래지반의 포화단위중량 $\gamma_s = 2.0 \text{ ton}/m^3$, 습윤단위중량 $\gamma_t = 1.8 \text{ ton}/m^3$ 으로 가정하고 상부 모래지반의 $z=15m$ 에서의 상재하중을 구하면 식 (2)와 같다.

$$\begin{aligned} \sigma_{15} &= \gamma_t \cdot z_w + (\gamma_s - \gamma_w) \cdot (z - z_w) \\ &= 1.8 \times 7.8 + (2 - 1) \times 7.2 = 21 \text{ t}/m^2 = 2.1 \text{ kg}/cm^2 \end{aligned} \quad (2)$$



이 깊이에서의 N치가 약 30정도이므로 그림 5¹⁾의 관계를 이용하면 내부마찰각 $\phi' = 40^\circ$ 라는 것을 알 수 있다. 또한 장기양수시험에 의하여 지하수위가 4.2m하강했다고 가정하면 $z=15m$ 에서의 상재하중은 식 (3)과 같이 되므로 N치가 약 36이 됨을 알 수 있다.

$$\begin{aligned} \sigma_{15d} &= \gamma_t \cdot z_w + (\gamma_s - \gamma_w) \cdot (z - z_w) \\ &= 1.8 \times 12 + (2 - 1) \times 3 = 25 \text{ t}/m^2 \\ &= 2.5 \text{ kg}/cm^2 \end{aligned} \quad (3)$$

그림 5. 사질토의 내부 마찰력 ϕ' 별 상재압과 N치와의 관계

따라서 양수후의 강도 증가분은 식(4)로 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta q_u &= (N_{15d} - N_{15})/8 = (36 - 30)/8 \\ &= 0.75 (\text{kg}/cm^2) = 75 (\text{kPa}) \end{aligned} \quad (4)$$

따라서 지층 증양의 점토지반 역시 일반적인 점성토지반의 경우

$$\Delta c_u / \Delta p = 0.25 \sim 0.3^{2)} \quad (5)$$

의 값을 가지므로 약 10~12kPa 강도의 증가가 발생한다고 볼 수 있다.

5. 결론

장기 양수 시험시 적정 채수량인 2470 m^3/day 으로 장기간 양수하면서 주변 수리권에 미치는 지하수 위 변화와 강변여과수의 수질변화를 관찰하여 지표수와 연계한 변동특성을 효과적으로 파악할 수 있을 것이라고 판단된다. 그리고 단계양수별 양수시간은 약 0.30 day로 하는 것이 적절하다고 판단되어 만약 단계별 양수 시험을 8 단계로 하였을 경우 약 2.4 day가 소요될 것이다. 또한 비교적 낮은 양수량을 갖고 장기 양수 시험할 경우 장기간 동안 비교적 안정된 지하수위면이 형성되어 지하수위 저하로 인해 발생한 하중에 의하여 지반이 압축 압밀되어 보다 안정된 대수층을 형성함으로써 향후 단계 양수시험시, 더 높은 양수량으로 인해 발생하는 유속 마찰력에 대하여 보다 안정적인 지반조건을 가질 것으로 사료된다.

6. 사사

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

7. 참고문헌

- 1) V. De Mello, 1971, "The standard penetration test", A State of the Art Report, 4th Pan. Am. Conf. on SM&FE Puerto Rico, Vol. 1, pp. 1-88
- 2) A.W. Skempton, 1957, Discussion on "The planning and design of the new Hong Kong Air Port", Proc. ICE. 7, pp. 305-307
- 3) 김해시, 2003, 강변여과수 및 대체취수원개발 타당성 조사 보고서
- 4) Razack, M., Huntley, D., 1991, Assessing transmissivity from specific capacity in a large and heterogeneous alluvial aquifer, Ground water, Vol. 29, No. 6, pp. 856-861.