

## 2.3 단계양수시험 (Step-drawdown Tests)

### 2.3.1 목적

단계양수시험은 수두손실중 대수층의 수두손실과 우물수두손실을 구분하여 주로 우물의 효율을 알기 위하여 실시되며 단계양수시험을 통해 얻을 수 있는 정보로는 다음과 같은 것들이 있다.

#### 1) 다양한 양수량에서의 관정의 비양수량

비양수량은 적정양수량의 산출에 도움을 줄 수 있다. 그러나 실험의 시간이 경제 효과를 만나기에는 부족한 경우가 많기 때문에 단계양수실험을 통해 얻어진 비양수량은 어떤 일정한 양수량에서의 실제 장기비양수량과는 차이를 보일 수 있다.

#### 2) 우물의 효율

전체 수두손실에서 정류에 의해 발생하는 수두손실의 비율로 관정의 성능을 비교할 때 주로 사용된다. 그러나 정류에 의해 발생하는 수두손실의 값을 정확히 구해내는 것이 어렵기 때문에 우물의 효율이 관정의 성능을 정확히 대표하는 것은 아니며 최근의 연구에서는 우물의 효율이 실제로는 큰 의미를 갖지 않는다고 제시된 바도 있다.

#### 3) 투수량계수(transmissivity)와 저유계수(storativity)

단계양수의 어떤 한 단계에서의 시간 대 수위강하, 또는 거리 대 수위강하자료를 이용하면 T, S의 값을 구할 수 있다.

양수정에서의 수위강하는 다음과 같은 요인들이 복합되어 발생한다.

- 대수층의 수두손실 : 대수층에서의 정류에 의한 수두손실
- 우물손실

#### ㄱ) 선형우물손실

관정 굴착과정에서 발생하는 대수층의 손상에 의해 발생

- 굴착과정에서 대수층 구성물질의 다짐작용으로 인한 수두손실
- 굴착시 사용되는 이토에 의한 충전작용으로 인한 수두손실

- 자갈층진물에서의 수두손실
- 스크린에서의 수두손실
- ㄴ) 비선형우물손실
  - 관정의 스크린 내부와 흡입관에서 발생하는 난류에 의한 마찰손실
  - 관정의 주변에서 발생하는 난류에 의한 수두손실

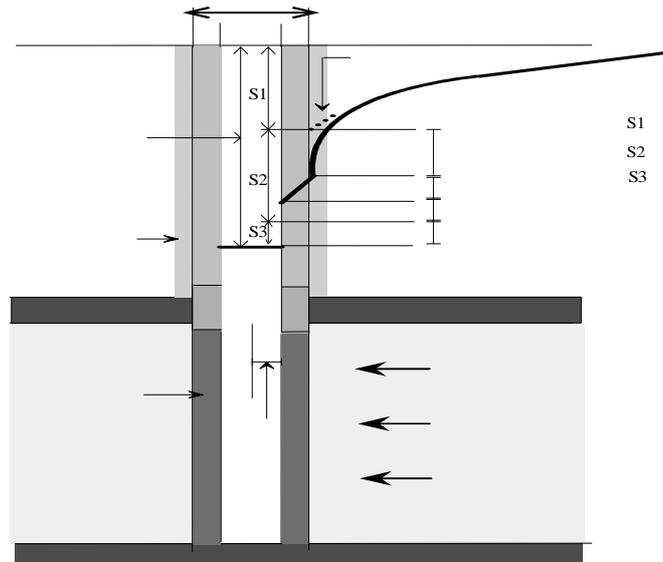


그림 2.3.1 양수정에서 발생하는 여러 가지 수두손실

### 2.3.2 실험 수행순서

일반적으로 실험은 적어도 3단계 이상 진행되어야 하며 각 단계에서의 양수시간은 같도록 하는 것이 좋다. 각 단계에서 양수량을 일정하게 유지하는 것이 중요하다. 그러나 최근의 연구에서 일정하지 않은 양수시간과 양수량을 가지는 단계양수실험의 경우에도 해석을 할 수 있는 방법이 제시되었다(Kawecki, 1995). 일반적으로 양수시험 시 시간이 지남에 따라 양수량이 감소하므로 양수량을 수시로 점검하는 것이 좋다. 만약 양수량을 일정하게 조절하는 것이 어려운 상황이라면 해석시 각 단계에서 양수량을 평균화시키는 과정을 거치는 것이 좋다. 시험시 수위가 완전히 안정되기까지는 많은 시간이 소요되므로 어느 정도 수위가 안정되는 양상을 보이면 다음 단계로 넘어가는 것이 좋으며 여건이 허락한다면 좀 더 명확한 해석결과를 위해 되도록 여러단계를 양수하는 것이 바람직하다. 또한 회복실험도 여건이 허락하면 수행하는 것이 좋다.

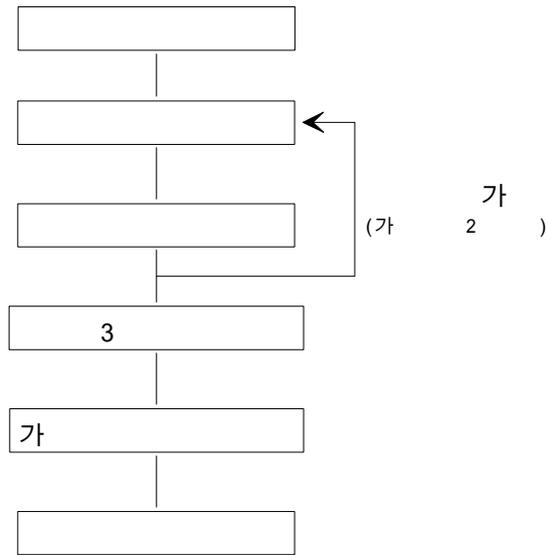


그림 2.3.2 단계양수시험 수행도

### 2.3.3 실험장비

단계실험양수에 필요한 장비는 기본적으로 양수실험에 필요한 장비와 동일하다.

- 1) 양수기 : 단계양수실험은 양수를 여러번을 반복할 뿐만 아니라 양수량을 매단계 높이게 되므로 출력이 좋고 양수량이 큰 펌프를 사용하는 것이 좋다.
- 2) 발전기 : 야외작업에서의 동력원으로 사용하며 일정한 양수량을 유지하기 위하여 안정적인 발전기를 사용하는 것이 좋다.
- 3) 펌프조절기 : 역시 양수량을 일정하게 조절하고 필요한 양수량의 비를 얻기 위해 사용한다. 조절기를 사용할 수 없는 경우에는 밸브를 조절함으로써 양수량을 증가시킨다.
- 4) 유량계 : 양수량 측정을 위해서 사용한다. 유량계를 설치할 수 없는 경우에는 다른 방법을 사용하여 양수량을 측정한다. 다만 양수량은 시간이 지남에 따라 수압의 감소로 인하여 줄어드는 양상을 보이므로 양수시험중 여러번 측정하는 것이 좋다.
- 5) 수위측정기 : 수동, 자동 모두 사용할 수 있으나 양수시험의 초기수위는 급격히 하강하므로 수동측정에는 난점이 많다.(이런 이유로 양수시험의 자료를 해석하는 경우에는 초기자료는 배제하여 해석하는 경우가 많다). 뿐만 아니라

단계양수시험에서는 양수시간이 긴 경우가 많을 뿐 아니라 양수량이 바뀔 때마다 다시 급격한 수위하강을 보이므로 자동측정기를 사용하면 편리하다.

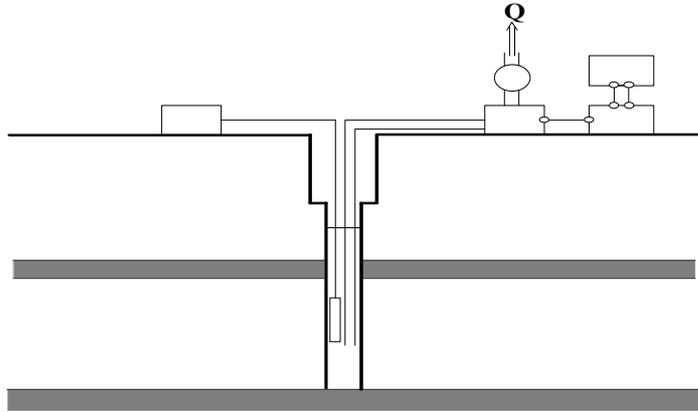


그림 2.3.3 단계양수시험을 위한 현장장비설치

### 2.3.4 이론적 바탕

Jacob은 단계양수실험시 양수정에서의 수위강하에 대해 다음과 같은 식을 제시하였다.

$$s_w = BQ + CQ^2 \quad (2.3.1)$$

여기서

$$B = B_1 + B_2 \quad (2.3.2)$$

- $s_w$  : 양수정에서의 수위강하량
- $B_1$  : 선형 대수층-손실 계수
- $B_2$  : 선형 우물-손실 계수
- $C$  : 비선형 우물-손실 계수

Jacob은 우물에서의 다양한 선형수두손실을 하나의 항인  $r_e$ (유효우물반경)로 결합하였다. 그는 이것을 이론적인 수위강하가 우물의 스크린밖에서의 수위강하와 일치할 때의 우물의 축으로부터의 방사상의 거리로써 정의하였다. 그러나 단계양수실험의 자

료로부터 이 유효우물반경을 구하는 것은 불가능한데 이것은 단계양수실험을 통해서 대수층의 저우계수만을 알 수 있으며 유효반경을 알기 위해서는 인근의 관측정에서의 관측자료가 필요하기 때문이다.

다른 연구자들은 관정의 안쪽과 바깥쪽에서의 지하수의 흐름에 상당한 편차와 변동이 있음을 발견하였다. 이를 근거로 Rorabaugh(1953)은 Jacob의 방정식을 다음과 같이 다시 제시하였다.

$$s_w = BQ + CQ^P \quad (2.3.3)$$

여기서  $P$  는  $Q$  의 값에 따라 1.5에서 2.5사이의 값을 갖는다.

단계양수실험을 통해 위의 식의  $B, C, P$  의 값을 계산할 수 있다.  $B, C$  의 값을 알면 우리는 어떤 시간  $t$  에서 어떤 일정한 양수량  $Q$  로 양수할 경우에 양수정에서 발생하는 수위강하량을 알 수 있다. 이것을 토대로 관정에서의 적정양수량과 관정의 효율 및 조건이나 특성을 알 수 있게 된다. 여기서 양수량과 수위강하사이의 관계는 우물과 대수층의 생산력을 표현하는 우물의 비양수량(specific capacity),  $Q/s_w$ 로 표현할 수 있다. 비양수량은 일정한 값을 갖지 않으며 양수가 진행됨에 따라, 양수량이 증가함에 따라 감소한다. 우물의 효율은 정류에 의해 발생하는 전체수두손실의 비율로, 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다.

$$E_w = \left\{ \frac{B_1Q}{BQ + CQ^P} \right\} \times 100(\%) \quad (2.3.4)$$

현실적으로  $B_1$ 과  $B_2$ 값을 각각 구분해서 구하기는 어렵기 때문에 우물의 효율에서 비선형의 우물손실의 영향만을 산출할 수 있다. 관정설치에 있어서의 모든 결함이 비선형의 흐름저항으로 나타나는 것은 아니기 때문에 우물의 결함의 정도는 우물의 효율만으로써 결정할 수는 없다. 만약 Jacob에 의한 가정들이 맞다면 대수층의 손실은  $BQ$ , 우물손실은  $CQ^2$ 으로 표현할 수 있고  $E_w$ 는 우물의 효율을 나타내게 된다. 그러나 수많은 실험결과 이 가정이 정확하지 않음이 밝혀졌으며 따라서  $E_w$ 도 우물효율과 일치하지 않게 된다. 만약 부정류가 관정의 내부나 주위뿐만 아니라 관정주변의 교란받지 않은 층에서도 역시 발생하는 경우에는  $CQ^2$  항의 일부분은 대수층의 손실로부터 발생하게 된다. 따라서  $E_w$ 를 우물손실로 가정하는 경우에는 부정류를 갖는

관정의 경우 실제로는 효율적인 우물을 비효율적인 우물로 판단하게 될 수 있다. 반대로 대부분의 관정에서 우물손실의 상당량은 부정류가 아닌 정류에 의해 발생한다. 이런 경우에는  $BQ$  는 단지 대수층의 손실뿐만 아니라 우물손실 역시 포함하게 된다. 그러므로  $E_w$ 가 우물효율로 사용되면 부정류가 거의 발생하지 않는 관정의 경우 실제로는 효율이 낮음에도 불구하고 효율적인 우물로 판단하게 된다.

### 2.3.5 해석방법

단계양수실험을 통해서 얻을 수 있는 정보로는 앞에서 언급한 바와 같이 대수층의 T 값과 S 값 그리고 우물손실값이 있다.

#### 1) 투수율계수, 저류계수

단계양수시험은 양수시험을 여러번 반복하는 것이므로 각각의 단계에서의 양수실험자료는 일반일정양수실험의 결과와 같다. 따라서 단계양수실험의 한 단계만의 자료를 사용하여 양수시험의 해석방법을 적용하여 T, S 값을 구할 수 있다. 양수실험의 해석방법은 앞에서 언급하였으므로 여기서는 생략하도록 한다.

#### 2) 우물손실값(우물손실계수)

단계양수실험을 해석하는 방법으로는 Jacob 방정식에 근거한 Hantush-Bierschenk Method, Eden-Hazel Method와 Rorabaugh 방정식에 근거한 Rorabaugh trial-error straight Method, Sheahan's curve-fitting Method가 있다. 이 방법들을 비교하면 다음과 같다.

	Hantush-Bierschenk method	Eden-Hazel method	Rorabaugh trial-error straight line method	Sheahan's curve-fitting method
해석식	Jacob equation	Jacob equation	Rorabaugh equation	Rorabaugh equation
적용대상	피압, 누수, 자유면대수층	피압대수층	피압, 누수, 자유면 대수층	피압, 누수, 자유면대수층
용도	B, C 값 계산	투수율계수, C	B, C, P 값 계산	B, C, P 값 계산

일반적으로 단계양수시험을 해석하는 방법은 다음과 같다.

(1) 용지위에 실험을 통해 얻어진 시간 대 수위강하의 그래프를 그린다.

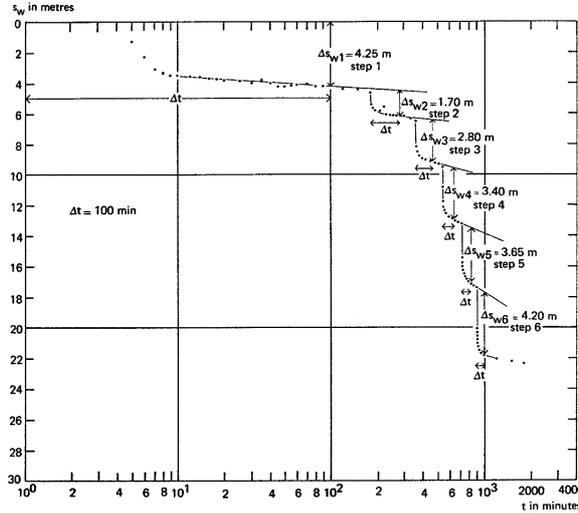


그림 2.3.4 단계양수시험의 시간 대 수위강하곡선

- (2) 시간 대 수위강하 그래프를 이용하여 각 단계에서의 수위강하량과 전체 수위강하량을 계산한다.
- (3) 위에서 구한 수위강하량을 각 단계에서의 양수량으로 나눈 값과 양수량의 그래프를 그린다.
- (4) 식 (2.3.2)에서  $\frac{s_w}{Q} = B + CQ$ 의 식을 얻는데 위에서 그린 그래프의 기울기는  $C$ ,  $Y$ 절편의 값이  $B$ 에 해당한다.
- (5) 비선형-우물손실을  $CQ^P$ 로 가정할때는 식 (2.3.2)를

$$\log \left[ \frac{s_w}{Q} - B \right] = \log C + (P-1) \log Q$$

와 같은 형태로 변형하여 대수용지에  $\left[ \frac{s_w}{Q} - B \right]$ 와  $Q$ 의 값을 그래프로 그려서 얻어진 직선의 기울기와  $Y$ 절편을 통해 각각  $C$ 와  $P$ 의 값을 얻을 수 있다.

위와 같은 방법은 곡선을 맞추는 과정이라던지 그리는 과정등의 번거로움을 가지고

있다. 이러한 번거로움을 줄이고 계산의 편이를 도모하는 방법이 Miller과 Weber(1983)에 의해 제안되었다.

각각의 단계에서의 양수량과 수위강하의 관계는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$s_1 = BQ_1 + CQ_1^P \quad (2.3.5)$$

$$s_2 = BQ_2 + CQ_2^P \quad (2.3.6)$$

$$s_3 = BQ_3 + CQ_3^P \quad (2.3.7)$$

이 때,

$Q_1 < Q_2 < Q_3$  그리고  $s_1 < s_2 < s_3$  이다.

위의 식들을 연립하여 풀면  $P$ 의 값을 다음과 같은 식을 통하여 얻을 수 있다.

$$P = \frac{\log[\varepsilon + (Q_3/Q_2) - (k_2/k_1)(Q_1/Q_2)]}{\log(Q_3/Q_2)} \quad (2.3.8)$$

여기서

$$\varepsilon = \frac{k_2}{k_1} \left(\frac{Q_1}{Q_2}\right)^P, \quad k_1 = s_1 - \frac{Q_1}{Q_2} s_2, \quad k_2 = s_3 - \frac{Q_3}{Q_2} s_2 \quad \text{이다.}$$

위의 식을 통해  $P$ 를 구한 뒤 다시 다음과 같은 식을 이용하여  $C$ 를 구한다.

$$C = \frac{s_1 - (Q_1/Q_2)s_2}{Q_1^P - (Q_1/Q_2)Q_2^P} \quad (2.3.9)$$

또는

$$C = \frac{s_3 - (Q_3/Q_2)s_2}{Q_3^P - (Q_3/Q_2)Q_2^P} \quad (2.3.10)$$

$B$ 의 값은 식 (2.3.5), (2.3.6), (2.3.7) 중 하나를 통해 다시 구할 수 있다.

### 2.3.6 참고문헌

- Fletcher, G. Driscoll., 1986, *Groundwater and Wells*. Johnson Division, St Paul, Minnesota., pp. 554-559.
- Kruseman, G. P., de Ridder, N. A., 1991, *Analysis and Evaluation of Pumping Test Data*, International Institute for Land Reclamation and Improvement Publication 47., Wageningen (The Netherlands), pp. 199-217.
- Miller, C. T. and W. J. Weber, Jr., 1983, Rapid solution of the nonlinear step-drawdown test, *Ground Water*. v. 21, no. 5, pp. 584-588.
- Kawecki, M. W., 1995. Meaningful interpretation of step-drawdown tests, *Ground Water*. v. 33, no. 1, pp. 23-32.