

## 2.2 양수시험 (Pump Tests)

### 2.2.1 목적

피압 대수층 및 자유면 대수층에서 일정량의 양수는 수위 강하를 유발한다. 이때 양수량과 하강되는 수위자료를 바탕으로 적절한 관정 유동방정식을 이용하여 해당 대수층의 수리적인 특성(주로 투수량계수와 저유계수)을 파악하는 것이 양수시험의 목적이다.

### 2.2.2 필요 장비

#### 1) 관정

양수시험에 필요한 관정은 크게 양수정, 관측정의 두가지로 나뉘는데 이 두 관정은 원하는 시험구간의 대표성을 갖는 곳에 위치하여야 하며 철로등의 교통시설에 의한 교란이 적고 장비의 이동 및 설치가 용이한 곳에 위치하여야 한다. 양수정의 구경은 수중펌프 등의 장비설치가 가능한 정도의 크기면 충분하다.

관측정은 한 개만 있어도 대수층의 수리적 특성을 파악할 수 있지만 두 개이상의 관측정이 존재한다면 시간-수위하강, 거리-수위하강의 두가지 관계를 가지고 분석할 수 있으며 보다 넓은 범위의 대수층을 보다 정확하게 분석할 수 있다.

#### 2) 펌프

사용 가능한 펌프라면 무엇을 사용해도 크게 상관 없지만 우선 며칠에 걸쳐 일정한 양으로 양수할 수 있어야 하고, 대수층의 특성과 규모에 맞는 용량의 펌프를 선택해야 원하는 만큼의 수위하강을 도모할 수 있다.

#### 3) 발전기

야외에서 직접적인 전력사용이 불가능할 때 동력원으로서 발전기를 사용한다. 양수도중 발전기가 멈춰버리거나 전력공급이 불안정해서 양수효율이 크게 바뀌면 곤란하므로 안정적인 발전기를 사용하는 것이 매우 중요하다.

#### 4) 조절기(regulator)

양수량을 일정하게 조절하기 위하여 펌프와 발전기 사이에 조절기를 설치하여 사용하는데 조절기가 없을때에는 양수관의 밸브를 이용하여 양수량을 조절할 수도 있다.

#### 5) 유량계

양수량 측정을 위하여 유량계를 사용한다. 시판되는 유량계를 보면 다양한 원리를 이용하여 직접 수치나 눈금으로 유량을 나타내는데 만일 이러한 장비가 없을 경우에는 눈금이 있는 물통을 이용할 수도 있다. 이때 물통의 용량이 양수량에 비례해서 일정정도 이상이어야 평균화된 유량을 작은 오차로 알아낼 수 있다.

#### 6) 수위 측정기

수위 측정기는 크게 자동 수위 측정기와 수동 수위 측정기 두가지로 나눌 수 있는데 자동 수위 측정기를 사용할 때에는 데이터 보정을 위하여 수위를 측정하기 시작할 때와 끝낼 때 수동 수위 측정기 사용을 병행해야 한다.

※ 이 외에 계획된 양식의 기록지를 미리 준비하는 것도 매우 중요하다. 양식 내용에는 양수시험 날짜 및 시간, 관정이름, 단위, 초기 및 최종 수위등이 포함되어야 할 것이다.

### 2.2.3 양수시험 과정

양수정 및 관측정에서의 수위는 양수가 시작되기 이전에도 장·단기적으로 일정한 경향을 가지고 변화한다. 이는 기압이나 조석 또는 강우 등의 요인이 복합적으로 작용해서 생긴 결과인데 양수시험을 수행하기 앞서 이러한 자연변화 양상을 파악하여 시험 결과에 반영하여야 한다. 특히 양수시험 기간이 길어진다면 이 과정이 더욱 중요하다.

#### 1) 장비 설치

계획한 형태의 시험에 알맞게 장비를 설치한다. 일반적인 장비설치는 아래의(그림 2.2.1) 과 같고 이때 주의할 점은 양수된 물이 시험구간에 영향을 미치지 않게 배수처리를 잘 하는 것이다. 길이가 긴 관을 사용하여 인근 하천으로 흘릴 수도있고 작은 배수로를 만들고 배수로 바닥에 비닐 등을 깔아 멀리 흘러버릴 수도 있다.

#### 2) 양수

양수량은 대수층의 종류와 규모, 원하는 정확도 등의 요인에 의해 달라질 수 있다. 대수층의 종류는 관정 착정시의 자료를 통해 대강은 짐작해볼 수 있다. 일단 양수가

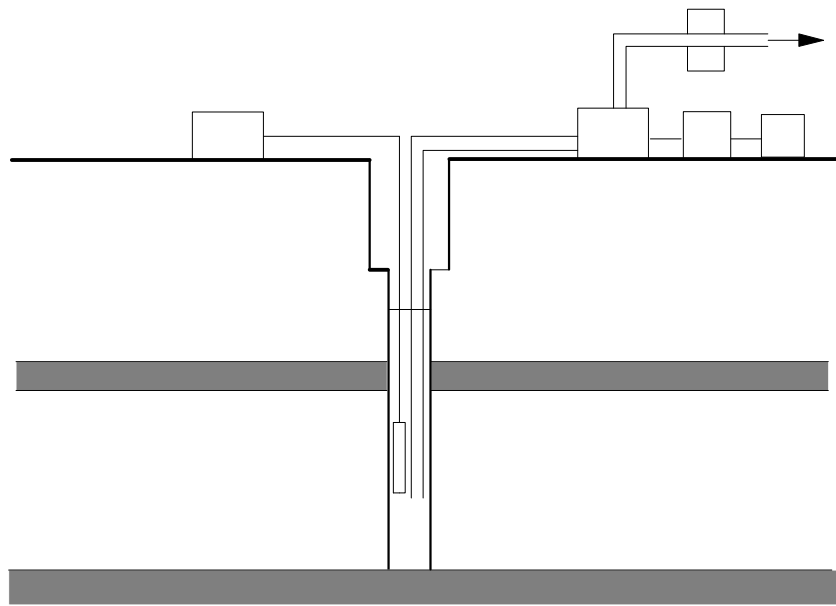


그림 2.2.1 양수시험을 위한 장비설치 모식도

시작되면 양수량을 일정하게 유지하는데, 양수시험 과정에서 약간의 양수량 감소는 불가피 하게 되므로 이때에는 시간에 따른 양수량의 변화를 잘 기록해 두었다가 나중에 중첩하여 사용할 수 있다.

### 3) 자료기록

양수시험시 기록해야할 자료는 크게 수위값과 양수량의 두가지가 있다. 양수량은 대체로 일정하므로 큰 변화가 없는한 적당히 긴 시간간격을 두고 기록하여도 상관없지만 수위값은 꾸준히 변화하고 특히 초기 수위값은 급격한 변화를 보이므로 짧은 시간간격을 두고 기록하여야 한다. 아래의 표 2.2.1은 일반적인 수위기록 시간간격을 적어본 것인데 이는 대수층의 특성과 양수시험 기간에 따라 약간씩 달라질 수도 있다.

표 2.2.1 양수시험 시행중 자료기록시간 간격

양수시작 후 경과시간	시간 간격
0 ~ 5 분	30초
5 ~ 60 분	5분
60 ~ 120 분	20분
120 ~ 양수시험 종료	60분

자동 수위 측정기를 사용할 때에는 수위자료 보정을 위하여 수동 수위 측정기를 사용하여 초기 수위와 최종 수위를 반드시 기록해 둔다.

#### 4) 수위 회복

펌프를 정지시킨후 원래의 수위가 회복될 때까지 기다린다. 수위회복시의 수위자료를 가지고 대수층을 분석할 수도 있기 때문에 이때의 수위를 기록하기도 한다.

### 2.2.4 자료 해석

양수시험 결과자료를 분석하기 위해서는 대수층의 형태에 따른 적절한 모델의 선택이 필수적이다. 잘못 선택된 모델을 사용하여 계산된 수리 상수값은 적절한 값이 아니다. 모델 선택상의 문제와 다양한 주변부 효과에 의한 결과자료의 교란은 최종결과에 불확실성을 높이기 때문에 오랜 현장경험과 자료 해석경험이 필요하다.

수위 하강값( $s$ )과 시간( $t$ )을  $[\log s - \log t]$  그래프, 또는  $[s - \log t]$  그래프에 도시하여 보면 대수층의 종류와 경계조건에 따라 다양하고 특징적인 형태의 그래프가 그려지는데 이를 이용하여 대강의 상황을 유추해볼 수 있다. 대수층 및 경계조건에 따른 그래프의 민감도는  $[s - \log t]$  그래프가 더 크다.

#### 1) 대수층의 종류에 따른 그래프 형태

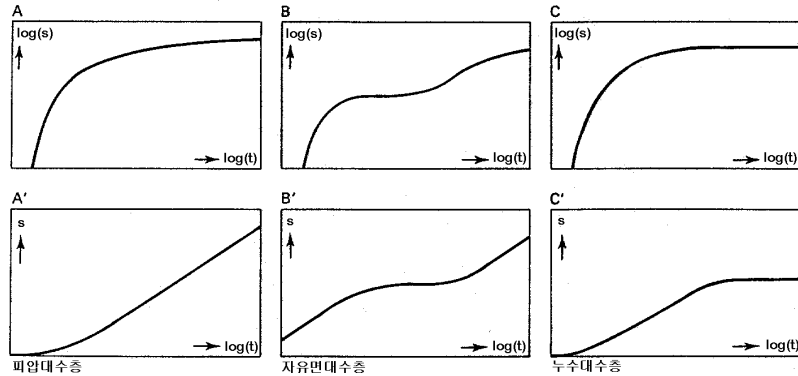


그림 2.2.2 대수층의 종류에 따른 그래프 형태

#### 2) 부분 관통정의 영향

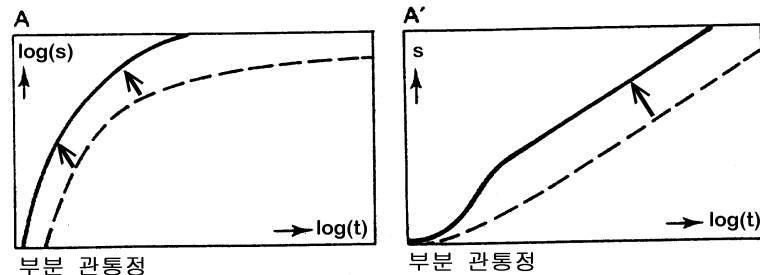


그림 2.2.3 부분 관통된 양수정의 영향을 나타낸 그래프

### 3) 우물 저장수의 영향

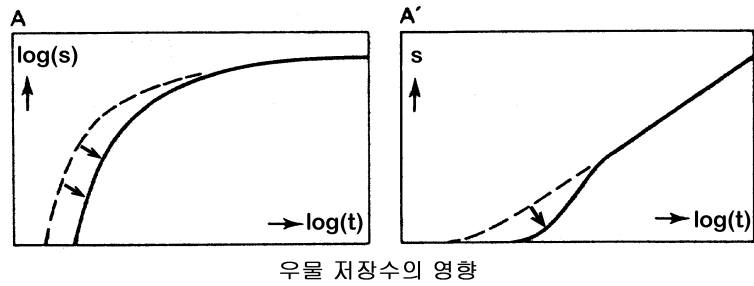


그림 2.2.4 우물에 저장된 물의 영향을 나타낸 그래프

### 4) 함양경계와 불투수경계의 영향

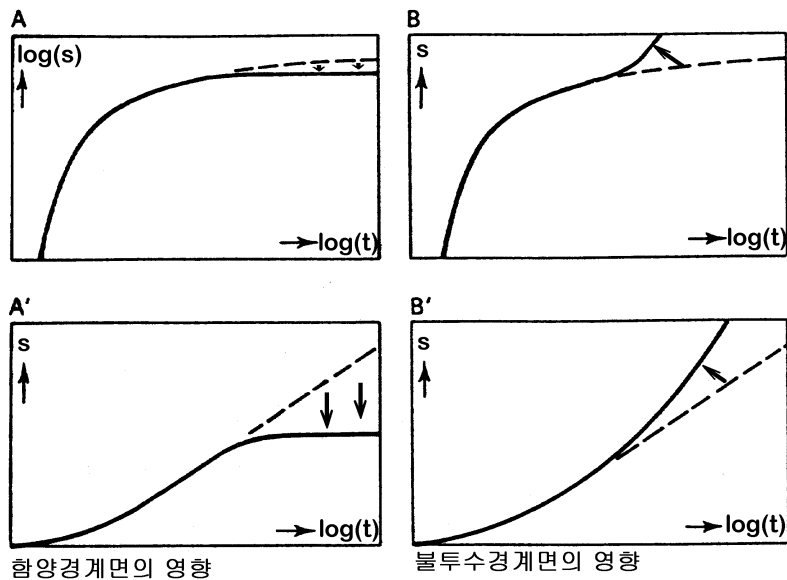


그림 2.2.5 경계면의 영향을 나타낸 그래프

## 2.2.5 해석 모델

전술한 바와 같이 양수시험 결과자료를 분석하기 위해서는 대수층의 형태에 따른 적절한 모델의 선택이 필수적이다. 여기에서는 대수층의 형태를 크게 피압 대수층, 누수 대수층, 자유면 대수층으로 나누고 각 경우를 정류상태 흐름가정, 부정류상태 흐름가정으로 나누어 해석 모델을 제시한다. 적절한 모델을 사용하여 우리가 구하려고자 하는 수리상수는 투수계수(T)와 저유계수(S)인데 경우에 따라 두가지 모두를 구할 수도 있고 투수계수만 구하게 될 수도 있다. 모델에 따라서 대부분 수작업이 가능하지만 상용 프로그램을 사용한다면 더욱 편리할 것이다. AQTESOLV는 이러한 목적으

로 사용되는 프로그램 중에서 가장 보편적이고 편리한 프로그램이다. 대수층의 형태에 따라 중간과정이 복잡한 모델 사용이 불가피할 때 사실상 수작업이 곤란하고 또 모델 자체의 내용을 이해하기도 힘들기 때문에 다음에 제시되는 모델중 일부는 자세히, 나머지는 상용 프로그램을 사용할 때 편의를 도모하기 위하여 모델의 이름과 간단한 내용만 언급하기로 한다.

#### 1) 피압 대수층

양수되는 지하수는 이론상 대수층에 저장된 물에서 유래하는 것이므로 정류상태의 흐름이란 불가능한 가정이다. 하지만 현장에서 수위하강값이 무시할 수 있을 만큼 작을 때 정류상태 흐름을 가정한다.

피압 대수층에서의 해석 모델은 다음과 같은 조건을 가정한다.

- ① 시험 대상이 되는 대수층은 피압 대수층이다.
- ② 해당 대수층은 양수정을 중심으로 하여 사방으로 무한히 펼쳐져 있다.
- ③ 양수시험의 영향을 받는 해당 대수층은 두께가 일정하고 균질한 등방성 매질이다.
- ④ 양수하기 이전에 양수시험의 영향을 받는 영역의 해당 대수층 지하수두는 거의 비슷하다.
- ⑤ 해당 대수층은 일정한 속도로 양수된다.
- ⑥ 양수정은 해당 대수층을 완전히 관통하여 양수시 양수정을 중심으로 지하수의 수평적인 흐름이 발생한다.

부정류상태 흐름 해석모델에서는 다음과 같은 가정이 추가된다.

- ⑦ 대수층에 저장된 지하수는 양수되어 배출되는 즉시 수위 하강을 유발한다.
- ⑧ 양수정의 직경은 매우 작아서 우물 저장수의 양은 무시할 만 하다.

#### 1-1) 정류상태 흐름

##### 1-1-1) Thiem's method

- 정류상태 흐름 가정하에 투수계수(T)를 구한다.

가. 관련 방정식

$$Q = \frac{2\pi T(h_2 - h_1)}{2.30 \log(r_2/r_1)} = \frac{2\pi T(s_1 - s_2)}{2.30 \log(r_2/r_1)} \quad (2.2.1)$$

$Q$  : 양수율 [ $\text{m}^3/\text{d}$ ],  $T$  : 대수층의 투수계수 [ $\text{m}^2/\text{d}$ ]

$r_1$  and  $r_2$  : 관측정과 양수정 사이의 거리 [m]

$h_1$  and  $h_2$  : 관측정에서의 수위값 [m]

$s_1$  and  $s_2$  : 관측정에서의 수위하강값 [m]

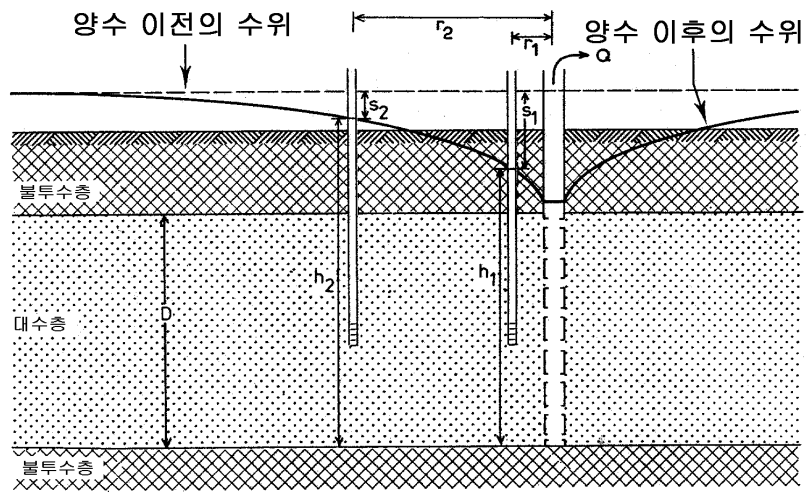


그림 2.2.6. 피압 대수층에서의 양수를 모식적으로 나타낸 수직 단면도

나. 해석 과정

- ① 두 개 이상의 관측정에서의 자료를 [ $s - \log t$ ] 그래프에 도시 하였을 때 후기 자료의 그래프가 서로 거의 평행 하다면 정류상태에 도달 하였다고 할 수 있다.
- ② 위와 같은 과정으로 정류상태에 도달한 자료를 [ $s - \log r$ ] 그래프에 도시한다.
- ③ 관측정의 개수가 많을 경우 최적화된 직선을 그려낸다.
- ④ 위의 직선 그래프와 위 식을 이용하여  $T$ 값을 구한다.

1-2) 부정류상태 흐름

1-2-1) Theis's method

- 부정류상태 흐름 가정하에 투수계수(T)와 저유계수(S)를 구한다.

가. 관련 방정식

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W(u) \quad (2.2.2)$$

$$W(u) = -0.5772 - \ln u + u - \frac{u^2}{2 \cdot 2!} + \frac{u^3}{3 \cdot 3!} - \frac{u^4}{4 \cdot 4!} + \dots \quad (2.2.3)$$

$$u = \frac{r^2 S}{4Tt} \quad (2.2.4)$$

s : 양수정에서 r만큼 떨어진 관측점에서의 수위 하강값 [ m ]

Q : 양수율 [ m<sup>3</sup>/d ]

T : 대수층의 투수계수 [ m<sup>2</sup>/d ]

S : 대수층의 저유계수

t : 양수 시작후 경과시간 [ day ]

- 식(2.2.2) 양변에 log를 적용해보면

$$\log s = \log(Q/4\pi T) + \log W(u) \quad (2.2.5)$$

- 마찬가지로 식(2.2.3)의 양변에 log를 적용해보면

$$\log(r^2/t) = \log(4T/S) + \log u \quad (2.2.6)$$

- 식(2.2.5)의  $Q/4\pi T$ 와 식(2.2.6)의  $4T/S$ 는 상수이므로 [  $\log s - \log(r^2/t)$  ] 사이의 관계와 [  $\log W(u) - \log u$  ] 사이의 관계는 유사하여야 하며 이를 이용하여 T, S를 구한다.

나. 해석 과정

- ① log-log 그래프 용지에 Theis관정함수(  $\log W(u) - \log u$  )의 type curve를 도시한다.
- ② 마찬가지로 준비된 log-log 그래프 용지에 관측된 자료를 이용하여 [  $\log W(u) - \log u$  ] 를 도시한다.
- ③ 두 용지의 수직축을 평행하게 유지한 채로 겹쳐서 두 개의 type curve를 최대한 일치시킨다.

④ 두 그래프에서 임의의 일치점을 지정하여 그점의  $W(u)$ ,  $\frac{1}{u}$ ,  $s$ ,  $\frac{t}{r^2}$  값을 읽는다.

⑤ ④번과정에서 읽은 값들을 (식-4) 와 (식-5)에 대입하여  $S$ ,  $T$ 값을 구한다.

#### 1-2-2) Jacob's straight line method

- 부정류상태 흐름 가정하에 투수계수( $T$ )와 저유계수( $S$ )를 구한다.

가. 관련 방정식

- 앞서의 식(2.2.3)을 보면  $u$ 는  $t$ 가 증가할수록 감소하게 된다.
- 결과적으로 충분한 시간이 지난 후 양수정과 가까운 관측정에서의 관정함수는 다음과 같이 전개될 수 있다.

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \left( -0.5772 - \ln \frac{r^2 S}{4Tt} \right) \quad (2.2.7)$$

- 위의 식(2.2.7)의 자연로그를 상용로그로 전환하여 보면 다음과 같이 정리될 수 있다.

$$s = \frac{2.30Q}{4\pi T} \log \frac{2.25Tt}{r^2 S} \quad (2.2.8)$$

- 식(2.2.8)과 양수시험 자료를 바탕으로 직접 도시한 그래프를 이용하여  $T$ 와  $S$ 를 구할 수 있다.

나. 해석 과정

- ① Semi-log 그래프 용지에 양수시험 자료를 이용하여  $[s - \log t]$  그래프를 도시한다.
- ② 위에 도시된 직선을  $s = 0$  인 지점(가로축과의 교점)까지 연장한다.
- ③ 직선의 기울기,  $s = 0$  일때의  $t$ 값( $t_0$ ), 식(2.2.8)을 이용하여  $T$ 와  $S$ 를 구한다.

#### 2) 누수 대수층

누수 대수층에서의 자료 해석은 자료의 전처리과정은 물론이고 해석모델 자체도 무척 까다롭다. 누수가 발생하는 가압층의 저장수 유무는 물론 층의 규모, 두께, 피압층 상부 자유면 대수층에 대한 정보 등 다양한 사전 정보가 필요하다. 누수 대수층

에서의 자료해석은 기본적으로 피압 대수층에서의 그것과 비슷하지만 가압층의 두께와 수리전도도에 따른 누수요인을 고려한다는 점에서 크게 차이가 나고, 누수 가압층의 저장수 유무에 따라 적용모델이 세분되기도 한다.

누수 대수층에서의 해석 모델은 다음과 같은 조건을 가정한다.

- ① 시험 대상이 되는 대수층은 누수 대수층이다.
- ② 해당 대수층은 양수정을 중심으로 하여 사방으로 무한히 펼쳐져 있다.
- ③ 양수시험의 영향을 받는 해당 대수층은 두께가 일정하고 균질한 등방성 매질이다.
- ④ 양수하기 이전에 양수시험의 영향을 받는 영역의 해당 대수층 지하수두는 거의 비슷하다.
- ⑤ 해당 대수층은 일정한 속도로 양수된다.
- ⑥ 양수정은 해당 대수층을 완전히 관통하여 양수시 양수정을 중심으로 지하수의 수평적인 흐름이 발생한다.
- ⑦ 누수층에서의 지하수 유동은 수직적으로 발생한다.
- ⑧ 양수되지 않은 대수층에서의 수위하강은 무시할만 하다.

부정류상태 흐름 해석모델에서는 다음과 같은 가정이 추가된다.

- ⑨ 대수층에 저장된 지하수는 양수되어 배출되는 즉시 수위 하강을 유발한다.
- ⑩ 양수정의 직경은 매우 작아서 우물 저장수의 양은 무시할 만 하다.

## 2-1) 해석 모델

Method	유동상태가정	누수층의 저장수	T	S	L	c	K'S'	K'D'/S'
DeGlee	정류흐름	無	○	×	○	○	×	×
Hantush-Jacob	정류흐름	無	○	×	○	○	×	×
Walton	부정류흐름	無	○	○	○	○	×	×
Hantush inflection Point	부정류흐름	無	○	○	○	○	×	×
Hantush curve-fitting	부정류흐름	有	○	○	×	×	○	×
Neuman-Witherspoon	부정류흐름	無	×	×	×	×	×	○

T : 대수층의 투수계수, S : 대수층의 저유계수, L : 누수 요소 ( $\sqrt{Tc}$ )  
 c : 누수 가압층의 수리 저항도( $D'/K'$ ),  $K'$  : 누수 가압층의 수직적 수리 전도도  
 $D'$  : 누수 가압층의 포화 두께,  $S'$  : 누수 가압층의 저유계수  
 $\frac{K'D'}{S'}$  : 누수 가압층의 수리 확산계수

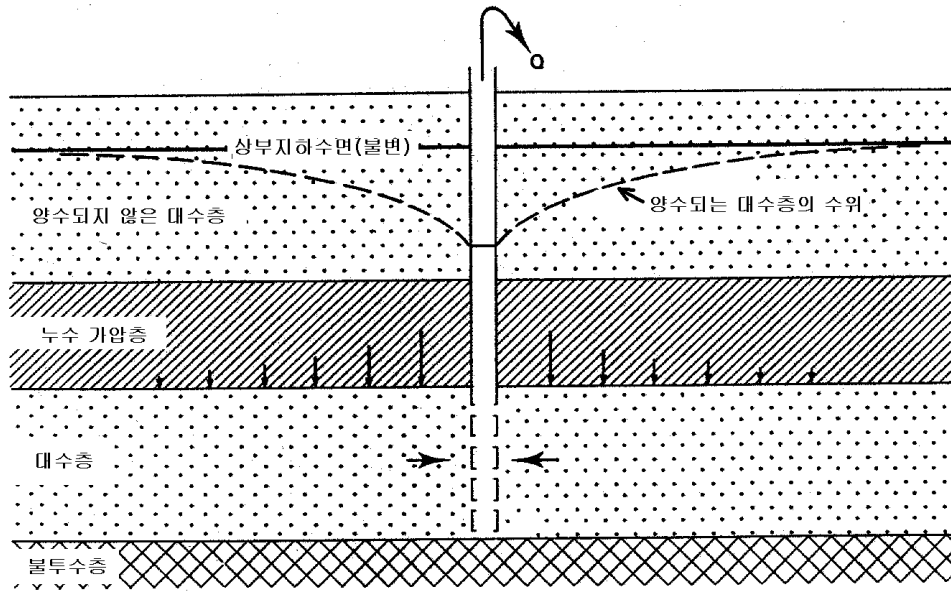


그림 2.2.7 누수 대수층에서의 양수를 모식적으로 나타낸 수직 단면도

### 3) 자유면 대수층

자유면 대수층에서 양수 시험 실행시 발생하는 지하수 유동양상이 대수층에서와 다른점은 다음과 같다.

- 자유면 대수층에서 양수 시험이 시작되면 양수정을 중심으로 대수층의 두께가 변하게 된다.
- 피압 대수층에서의 양수는 주로 대수층내 지하수와 매질의 압력해소를 유발하지만 자유면 대수층에서의 양수는 주로 대수층의 두께변화를 유발한다.
- 양수 시작 후에 피압 대수층에서는 주로 지하수의 수평적인 흐름이 유지되지만 자유면 대수층에서는 수평적인 흐름이 유지되지 않는다.

피압 대수층에서의 해석 모델은 다음과 같은 조건을 가정한다.

① 시험 대상이 되는 대수층은 자유면 대수층이다.

- ② 해당 대수층은 양수정을 중심으로 하여 사방으로 무한히 펼쳐져 있다.
- ③ 양수시험의 영향을 받는 해당 대수층은 두께가 일정하고 균질한 등방성 매질이다.
- ④ 양수하기 이전에 양수시험의 영향을 받는 영역의 해당 대수층 지하수두는 거의 비슷하다.
- ⑤ 해당 대수층은 일정한 속도로 양수된다.
- ⑥ 양수정은 해당 대수층을 완전히 관통한다.

### 3-1) 부정류흐름 가정

#### 3-1-1) Neuman's curve-fitting method

- Neuman의 수위하강 방정식과 이 방정식의 그래프를 이용하는 방법이다.(자세한 내용은 참고자료를 참조)
- 그래프를 이용하여 탄성 저유계수(  $S_A$ )와 비보유율(  $S_y$ ), 수직방향 수리 전도도(  $K_v$ ), 수평방향 수리 전도도(  $K_h$ )를 구한다.
- 앞서에 제시한 등방성 가정이 성립하지 않아도 상관없다.

### 3-2) 정류흐름 가정

#### 3-2-1) Thiem-Dupuit's method

- 앞서의 가정에 덧붙여 다음과 같은 Dupuit의 가정을 추가로 세운다.
- ① 지하수의 속도는 지하수면의 기울기에 비례하며 그 기울기는 매우 작다.
- ② 지하수의 흐름은 수평적이며 시험구간 전체적으로 속도가 일정하다.
- 위와같은 가정이 성립할 때 다음과 같은 방정식이 성립한다.

$$Q = \pi K \frac{h_2^2 - h_1^2}{\ln(r_2/r_1)} = \frac{2\pi T(s'_2 - s'_1)}{2.30 \log(r_2/r_1)} \quad (2.2.9)$$

$$s' = s - (s^2/2D)$$

※ 나머지 기호는 아래의 그림을 참조

- 위의 식(2.2.9)를 이용하여 투수계수(T)를 구한다.

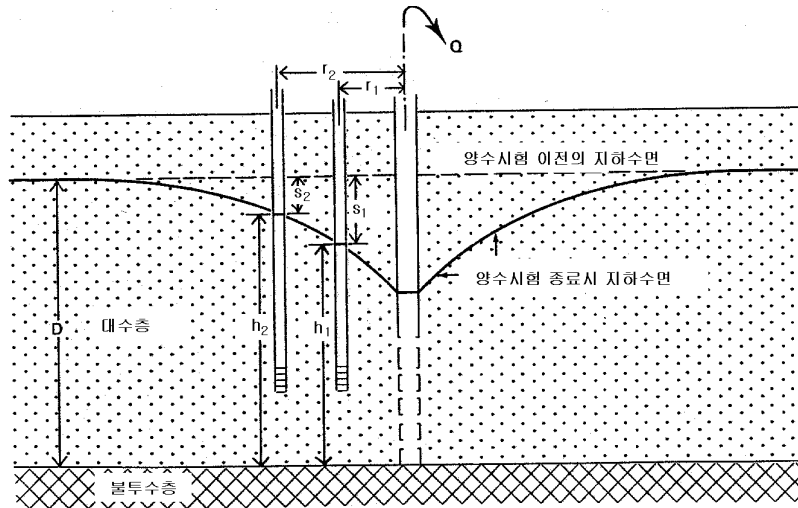


그림 2.2.8 자유면 대수층에서의 양수를 모식적으로 나타낸 수직 단면도

## 2.2.6 참고 문헌

- Fetter, C. W., 1988, *Applied Hydrogeology*, Merrill Publishing Company, Columbus, Ohio, pp161-216
- G. P. Kruseman and N. A. de Ridder, 1991, *Analysis and Evaluation of Pumping Test Data*, International Institute for Land Reclamation and Improvement, Wageningen, The Netherlands, pp27-108