

4. 대수층 시험

- 4.1. 영향추
- 4.2. 양수시험 방법
 - 4.2.1. 양수시험에 필요한 장비
 - 4.2.2. 시험전 현장 답사
 - 4.2.3. 우물의 지름과 양수율
 - 4.2.4. 관측우물과 시험기간
 - 4.2.5. 수위강하 측정표
- 4.3. 대수층 시험결과 분석
 - 4.3.1. Thiem의 해법
 - 4.3.2. Theis 해법
 - 4.3.3. Jacob의 해법
 - 4.3.4. Theis의 회복시험 분석법
 - 4.3.5. 비양수량과 투수량계수
 - 4.3.6. 수두강하와 우물손실
 - 4.3.7. 단계적 수두강하 시험
- 4.4. 우물의 간섭
- 4.5. 대수층 경계
 - 4.5.1. 대수층 경계의 종류
 - 4.5.2. 대수층 경계와 양수시험
 - 4.5.3. 대수층 경계의 거리와 방향
- 4.6. 누수가압층의 영향

그림

- 4-1 영향추
- 4-2 피압대수층에서 정상류의
- 4-3 불압대수층에서 정상류
- 4-4 Thiem의 거리-수두강하 해법
- 4-5 우물로 향한 물의 방사상 유동
- 4-6 열전도와 지하수의 흐름
- 4-7 표준곡선: $W(u)$ 대 u 와 $W(u)$ 대 $1/u$
- 4-8 Theis 해법의 보기
- 4-9 양수시간과 영향추의 관계
- 4-10 시간-수두강하 해법의 보기

- 4-11 Jacob의 거리-수두강하 해법
- 4-12 Jacob의 시간/(거리)²-수두강하 방법 보기
- 4-13 시간-수두강하/잔유수두강하의 모양
- 4-14 Theis의 회복시험 분석 보기
- 4-15 양수시간과 비양수량의 감소
- 4-16 비양수량과 투수량계수
- 4-17 단일 우물 양수시험
- 4-18 양수율-수두강하
- 4-19 단일정 양수시험 분석
- 4-20 단계적 수두강하 시험
- 4-21 양수우물(a)과 함양우물(b)의 간섭
- 4-22 함양성 경계(a)와 불투수성 경계(b)
- 4-23 대수층 경계와 양수시험 결과
- 4-24 대수층 경계의 거리와 방향
- 4-25 누수현상
- 4-26 Hantush(a)와 Hantush-Jacob(b)의 표준곡선

표

- 4-1 관측우물에서 수두측정
- 4-2 양수우물에서 수두측정
- 4-3 양수시험 측정표
- 4-4 가상적인 양수시험 결과
- 4-5 양수시험 결과
- 4-6 가상의 회복시험 결과

부록

- 4-1 $W(u)$ 대 $1/u$
- 4-2 $W(u)$ 대 u

4. 대수층 시험(aquifer test)

지하수를 양수함에 따라 지하수면이 하강하고, 대수층마다 하강할 수 있는 수두의 한계가 있기 때문에 우리가 쓸 수 있는 지하수의 양 또한 한계가 있게 된다. 따라서 지하수원을 평가하는 중요한 목적은 양수에 따른 대수층의 수두강하를 정확히 아는 것이다. 한 대수층에 양수우물과 몇 개의 관측우물을 설치하여 양수우물에서 양수하는 도중 이에 대한 지하수면의 반응을 관측우물에서 측정하여 이를 분석함으로써 대수층의 수리학적 성질을 결정하고 우물의 장기 생산력을 평가하는 것을 양수시험(pumping test) 또는 대수층시험(aquifer test)이라 한다. 양수기간에 측정한 수두강하 또는 양수정지 후의 수위상승을 이론적으로 분석하는 학문을 우물 수력학(well hydraulics)이라 한다.

4.1. 영향추(cone of influence)

필요에 따라 샘(springs) 또는 우물(wells) 어느 것이나 물의 공급원이 될 수 있다. 그러나 석회암 또는 용암지대 같은 특별한 경우를 제외하고 샘물의 분출량이 도시, 공업, 농업 등에 필요한 물을 공급하기에는 부족해서 우리가 필요로 하는 양의 지하수는 대부분의 경우 우물에서 양수해야 한다.

지하수의 가장 경제적인 개발과 효율적인 관리를 하려면 양수시 그 지역의 지하수계가 어떻게 반응하는가를 알아야 한다. 따라서 우물을 양수할 때 이에 대한 대수층의 반응을 정확히 아는 것은 수리지질학의 중요한 과제 중에 하나다.

양수에 대한 대수층의 반응은 아래사항에 의해 지배된다.

- (1) 양수로 인한 수위강하원추(cone of depression) 즉, 영향추의 확장율(이는 대수층의 투수량계수와 저류계수의 함수이다)
- (2) 대수층의 불투수성 경계까지의 거리
- (3) 대수층의 함양원 경계까지의 거리
- (4) 인접 우물에서의 양수로 인한 간섭
- (5) 대기압의 변화

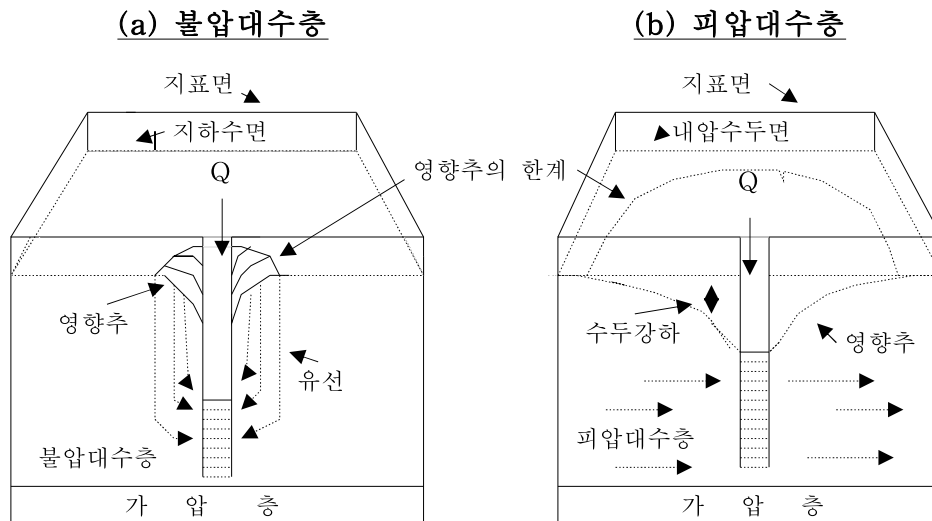


그림 4-1 영향추

그림 4-1에서 보는 바와 같이 양수를 시작하면 우물 안에 있는 물이 맨 먼저 양수되므로 우물 안의 수면이 하강(drawdown)한다. 양수가 계속되어 우물 안의 수두가 그와 인접하고 있는 대수층의 수두 보다 낮아짐에 따라 물이 대수층으로부터 우물로 흐르기 시작하고, 우물을 중심으로 하나의 영향추를 형성한다. 양수를 계속하면 물의 흐름은 사방에서 우물 쪽으로 수렴(converge)하고 우물에 접근함에 따라 물이 통과해야 할 면적은 점점 줄어들어 수두경사는 우물 방향으로 더욱 심해지게 된다. 따라서 우물 안에 수두는 더욱 낮아져서 대수층으로부터 우물로 흐르는 물의 양은 계속 증가하게 된다. 이 흐름의 증가는 양수량과 대수층에서 우물로 흐르는 물의 양이 어느 정도 같아 질 때까지 계속되다가 일단 양수와 공급이 같아지면 우물과 대수층 안의 수두는 더 이상 하강하지 않고 어떤 높이에 머물러 있게 된다. 이 때에 우물로 향한 지하수의 흐름은 앞에서 이미 기술한바 있는 정상상태에 도달하게 되고 영향추의 모양은 양수기간과 관계없이 일정하게 된다.

위에 기술한 정상류와는 대조적으로 무한한 피압대수층의 경우와 같이 양수가 계속되는 한 영향추는 계속 외곽으로 확산하고 수두 또한 계속 강하하여 우물로 향한 지하수의 흐름은 비정상류가 되고, 이에 따라 영향추의 모양 또한 계속해서 변하게 된다.

불압대수층의 영향추와 피압대수층의 영향추 사이에는 몇 가지 중요한 차이점이 있다. 그림 4-1a에서와 같이 양수시 불압대수층의 지하수면은 하강하고 이에 따라 영향추가 형성된다. 그런데 우리가 이미 아는바와 같이 불압대수층의 저류계수는 비산출율과 같으므로 이 때문에 대수층 자체가 배수되고 영향추는 이 배수로 인해 형성되는 것이다. 대수층이 배수됨에 따라 포화된 부분의 대수층의 두께가 줄게 됨으로 투수량계수도 감소되어 우물안과 대수층에서의 수두강하를 더욱 증가시킨다. 이 반면에 불압대수층의 저류계수는 피압대수층의 저류계수보다 매우 커서 외각으로 향한 영향추의 확장, 즉 영향반경(effective radius)은 피압대수층에 비해 매우 적다.

불압대수층과는 달리 양수에 대한 피압대수층의 반응은 대수층의 압력감소로 내압수두의 하강현상이 일어나지만 대수층 자체가 배수되는 일은 드물다. 우리가 앞에서 저류계수를 논할 때 피압대수층에서 방수하는 물은 물의 팽창과 대수층을 이루고 있는 입자의 수축 때문이고, 이들의 팽창률과 수축률은 매우 적으므로 저류계수가 매우 적다는 것도 설명한바 있다. 이 때문에 양수로 인한 영향추의 확장은 매우 빠르고 이에 따라 영향반경이 매우 커져서 이웃에 있는 우물과 서로 간섭하는 경우도 많이 생긴다(그림 4-1b).

4.2. 양수시험 방법

양수시험이란 앞서 말한바와 같이 양수로 인한 수두의 시간적 변화를 측정하여 이를 분석함으로써 대수층의 투수량계수와 저류계수를 결정하는 것이다. 대부분의 경우 양수시험은 일정한 양수율로 양수우물을 몇 시간 또는 몇 일간 양수하는 동안 양수우물과 같은 대수층을 관통한 몇 개의 관측우물에서 수두변화를 측정하는 것이다. 한 개 또는 그 이상의 우물을 이용해서 양수시험을 하려면 양수전의 정수위(static water level), 양수율, 양수시험 기간, 관측우물의 수와 위치, 수위측정 시간표 등을 미리 결정해야 한다.

4.2.1. 양수시험에 필요한 장비

양수시험에 필요한 장비는 양수시험의 목적, 양수시험 장소, 우물의 설계, 관측우물의 수와 위치 등에 따라 다양하다. 양수시험에 필요한 최소한의 장비를 열거하면 아래와 같다.

- (1) 양수기
- (2) 배수에 필요한 pipe
- (3) 양수기를 우물에 고정시킬 삼발이(tripod)나 pipe dog
- (4) 유량 조절기
- (5) 동력원(발전기)
- (6) stop watch(최소한 2 개)
- (7) 수면 측정기(전기 sounder, 강철 테이프)
- (8) data 측정표(수두강하, 시간, 양수율)
- (9) 반대수방안지(semi-log paper)
- (10) 자
- (11) 계산기
- (12) 현장 안전 장비
- (13) 손전등
- (14) 공구

이상의 장비 외에 아래의 서류를 준비해야 한다.

- (1) 양수우물과 관측우물의 시추와 완성 기록
- (2) 우물의 유지 기록
- (3) 최근의 화학 분석 data
- (4) 지질도와 수리지질도

4.2.2. 시험전 현장 답사

최소한 시험시작 24시간 전에 현지를 답사하여 아래 사항을 확인한다.

- (1) 현지의 교통 사정
- (2) 양수시험에 필요한 모든 허가 확보
- (3) 양수시험에 필요한 모든 장비 설치와 시험
- (4) 수차에 걸쳐 수면을 측정하여 정수면 결정
- (5) 양수시험에 영향을 줄만한 주위 활동, 시설 조사
- (6) 양수우물에 의해 영향을 받을만한 주위활동, 시설 조사

4.2.3. 우물의 지름과 양수율

일반적으로 양수우물의 지름은 수수망(well screen) 또는 우물측관(well casing)의 지름으로 측정한다. 양수우물의 지름은; (1) 양수기 시설에 필요한 공간과 (2) 우물의 최대한의 수리학적 효율을 고려해서 결정해야한다. 양수량이 커질수록 양수기의 크기가 증가하므로 최소한의 우물지름은 원하는 양수량에 의해 결정된다. 다른 조건이 같을 때 양수효율은 우물의 지름이 클수록 증가하지만, 이들의 관계가 비례적인 것은 아니다. 예를 들면 우물의 지름이 2배로 증가해도 양수량은 10 % 정도밖에 증가하지 않는다.

양수시험에 가장 적합한 양수율은 소위 단계적 수두강하시험(step drawdown test)을 통해 결정할 수 있는데, 이는 어떤 양수율로 양수를 시작하여 지정시간 후에 양수율을 증가해서 일정한 시간 동안 양수를 계속하고 다시 양수율을 증가하여 같은 과정을 반복하는 시험이다. 이 시험을 통해 우물의 유효수두(available head)와 계획한 시험기간에 적합한 양수율을 결정한다.

일단 적합한 양수율을 결정하여 시험을 시작하면 이 율을 처음부터 끝까지 일정하게 유지하는 것이 중요하다. 이 때문에 시험도중 양수율을 수시로 측정해야 하는데, 가장 간단한 방법은 용량을 아는 그릇에 물이 채워지는 시간을 측정하여 양수율을 결정하거나 그 외에 다른 편리한 방법으로 결정하면 된다.

4.2.4. 관측우물과 시험기간

관측우물(observation well)의 수는, 양수시험기간과 함께, 양수시험의 목적과 책정된 예산에 따라 결정된다. 사정에 따라 양수우물 자체만으로도 하지만 대부분의 경우 한 개 이상의 관측우물을 사용하는데, 그 이유는 수두강하-시간관계 이외에 수두강하-거리관계를 이용해서 시험결과를 분석하려면 관측우물에서 측정 한 시험결과가 있어야 하기 때문이다. 따라서 같은 시험결과를 몇 가지의 다른 방법으로 분석하여 서로 비교해 봄으로써 더 신빙성 있는 분석결과를 얻을 수 있게 된다.

관측우물은 양수우물과 같은 대수층에 같은 깊이로 완공해야 하고, 이들의 위치는 양수우물로부터 서로 다른 거리에, 그리고 지하수가 흐르는 방향과 일치해서 배열하는 것이 편리하다. 그 이유는 평형식(equilibrium formula)을 사용하여 양수시험 결과를 분석하려면 거리가 다른 관측우물에서 측정한 수두강하 값이 필요하고 또 비평형식(non-equilibrium formula)을 적용하는데도 편리하기 때문이다.

양수우물과 관측우물간의 거리는 양수시험의 기간과 대수층의 수리학적특성을 결정하고자 하는 영역에 의해 결정이 된다. 그러나 시험결과를 분석하는데 사용할 수식에 의하면 거리가 짧을수록 양수에 대한 반응이 크므로 단기간의 양수시험을 통해 필요한 결과를 얻을 수 있다. 또한 거리가 짧을수록 대수층경계의 영향을 우려할 필요성이 적어진다. 그 반면에 양수시험결과는 관측우물 까지의 거리 이내에 있는 대수층의 특성이며, 이 거리 밖에서 어떻게 변하는지는 알 수가 없다. 거리를 결정할 뚜렷한 근거가 없으면 24시간의 양수시험시 양수우물로부터 약 30-100 m 사이의 거리가 적당한데, 이 거리면 양수로 인한 수두강하를 측정하기에 충분할 뿐 아니라 그 지역의 대수층의 변화도 알아볼 수 있는 거리이기 때문이다.

일반적으로 양수시험기간이 길수록 더 신빙성이 있는 결과를 얻게 된다. 이것은 영향반경의 크기가 양수시간의 함수이고 영향반경이 클수록 간극체의 균질, 등방성에 관한 자료를 얻을 가능성이 많아지기 때문이다. 이 때문에 장기간에 걸친 우물의 생산력 또는 광범위한 지역의 지하수 상태를 정확히 파악하려면 때에 따라서 7일 이상의 양수시험을 하기도 한다. 그러나 보편적인 양수시험기간은 12-48 시간 사이이고, 대부분의 경우 이 기간이면 필요한 결과를 얻는데 충분하다.

4.2.5. 수위강하 측정표

양수시험 중 가장 중요한 일은 양수우물과 관측우물에서 물의 깊이(수두)를 측정하는 것이다. 수두를 측정하는 여러 가지 방법 중에 가장 정확한 방법은 양수시험 중 수두변화를 계속 기록할 수 있는 자동 수두 측정계이다. 그 외에 테이프, 전기 싸운더(sounder) 등이 흔히 쓰이는데 이들을 사용해서 정확도가 1-2 mm까지 측정하기에 그리 어렵지 않다.

표 4-1과 4-2는 흔히 쓰이는 관측우물과 양수우물에서 양수시간에 따른 수두 측정 예정표이다. 이들에 의하면 양수 초기에 수두가 급속히 강하함으로 측정회수도 많게 된다. 양수시험이 계속되어 어느 정도 시간이 흐르면 수두강하율이 낮아져서 수두강하측정의 회수도 자연히 줄게 된다. 표 4-3은 양수시험에 보편적으로 사용되는 양식으로 양수시험 결과를 분석하는데 필요한 여러 가지 정보를 기록하도록 되어 있다.

양수시간	측정회수
0 - 2 분	1회 / 0.2 분
2 - 5 분	1회 / 0.5 분
5 - 15 분	1회 / 1 분
15 - 50 분	1회 / 5 분
50 - 100 분	1회 / 10 분
100 - 300 분	1회 / 30 분
5 - 48 시간	1회 / 60 분
2 - 6 일	3회 / 1 일
6일 - 양수종료	1회 / 1 일

표 4-1 관측우물에서 수두측정

양수시간	측정회수
0 - 5 분	1회 / 0.5 분
5 - 60 분	1회 / 5 분
60 - 120 분	1회 / 20 분
120 - 양수종료	1회 / 60 분

표 4-2 양수우물에서 수두측정

번호: _____

양수/회복시험

우물번호: _____ 깊이: _____ (m) 거리: _____ (m)

양수시험 실시자: _____ 양수시험 책임자: _____

시험목적: (급수) _____ (오염) _____ (연구) _____ (기타) _____

시험장소: _____

양수시작: (년) _____ (월) _____ (일) _____ (시) _____ (분) _____

양수정지: (년) _____ (월) _____ (일) _____ (시) _____ (분) _____

시험완료: (년) _____ (월) _____ (일) _____ (시) _____ (분) _____

양수시작시 수면깊이: _____ (m) 시험완료시 수면깊이 _____ (m)

측정기준: (우물측관의 정상) _____ 고도: (해발 _____ m)

측정단위: (양수율: _____) (측정시간: _____) (수두강하: _____)

수위 측정표

시간 (t, 분)	양수기간	t/t'	수면깊이 (m)	수두강하 (m)	잔유수두강하 (m)	양수율 (m ³ /일)	비고

표 4-3 양수시험 측정표

4.3. 대수층 시험결과 분석

가장 이상적인 양수시험은 양수우물로부터 각기 다른 거리에 있는 최소한 2-3 개의 관측우물을 사용하여 실시한 시험이다. 충분한 양수시간 후에 각 관측우물에서 측정한 수두강하 값은 거리-수두강하 또는 시간-수두강하 방법으로 분석하여 대수층의 수리학적 성격을 결정한다.

대수층시험 결과를 분석하려면 양수기간에 지하수의 흐름이 정상류나 아니면 비정상류냐에 따라서 그 분석 방법이 다르다. 또한 모든 분석법은 아래와 같은 가정을 만족 시켜야 하며, 그 외에 개개의 방법에 따르는 가정이 있는데 이들은 각각의 분석방법을 설명 할 때에 열거하기로 하겠다.

모든 분석 방법이 공통으로 요구하는 가정:

- (1) 대수층은 영향반경 안에서 균질, 등방성이며, 일정한 두께를 가졌다
- (2) 대수층은 무한한 영역을 차지한다
- (3) 대수층 시험 시작 시 양수우물 안의 지하수면은 수평 하다
- (4) 대수층 시험 중 양수율은 시종일관 일정하다
- (5) 양수우물은 대수층의 두께 전체를 침투한 완전우물(fully penetrating well)이며 우물로 향한 물의 흐름은 어디서나 수평 하다
- (6) 우물의 지름은 매우 작아서 우물 안에 저류 되어 있는 물의 양은 무시할 수 있다
- (7) 수두는 양수와 동시에 강하한다
- (8) 대수층의 투수량계수는 양수시험 동안 영향추의 한계 내에서 변함없이 일정하다

자연 상태에서 위에 열거한 가정들을 모두 만족시키기는 매우 어렵다. 그러나 이들 가정으로부터 얼마간의 예외는 우리가 응용하려는 분석방법에 큰 지장을 주지 않는다. 일반적으로 실제 조건이 이들 가정과 많은 차이가 있는 경우는 지하수 흐름의 문제가 있는 특별한 경우이다.

4.3.1. Thiem의 해법

양수시험중 같은 시간에 여러 개의 관측우물에서 일제히 측정한 수두강하 값과 양수우물로부터 이들 관측우물까지의 거리와의 관계를 이용하여 대수층의 성질을 결정할 수 있다. 이와 같은 방법을 Thiem 해법 또는 거리-수두강하 해법이라 하며 이때 사용하는 수식을 평형식(equilibrium formula)이라 한다.

Thiem 해법은 앞에 열거한 모든 가정을 만족해야 할뿐 아니라, 대수층 시험중 지하수의 흐름이 정상상태(steady-state)에 도달한 정상류(steady-state flow)의 경우에만 사용할 수 있다. 피압대수층과 불압대수층의 경우 평형식을 유도하면 아래와 같다.

피압대수층의 경우:

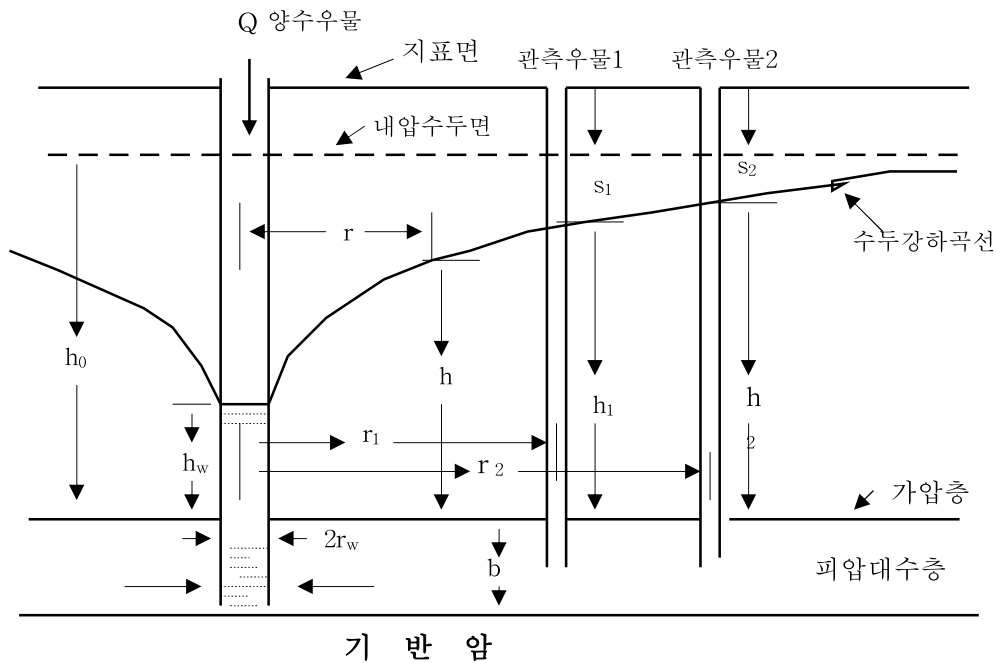


그림 4-2 피압대수층에서 정상류

그림 4-2에서, 양수우물로부터 거리가 r 인 지점에서 우물 방향으로 흐르는 물의 양 Q 는 Darcy 법칙에 의해,

$$Q = vA \quad (4-1)$$

여기서, $A = 2\pi r b$
 $v = K(dh/dr)$
 $b =$ 피압대수층의 두께

따라서 식 4-1은,

$$Q = 2\pi r b K \frac{dh}{dr} \quad (4-2)$$

식 4-2를 다시 배열하면,

$$\frac{dr}{r} = \frac{2\pi K b}{Q} \int_{h_w}^{h_0} dh \quad (4-3)$$

우물에서 경계조건 $h = h_w, r = r_w$, 그리고 영향권에서 경계조건 $h = h_0, r = r_0$ 하에 식 4-3을 적분하면,

$$\ln \frac{r_0}{r_w} = \frac{2\pi K b}{Q} (h_0 - h_w) \quad (4-4)$$

보다 광범한 대수층의 일반적인 경우를 생각하면 r 에 대한 외부적 조건이 없
 어지므로 식 4-4는,

$$Q = 2\pi K b \frac{h - h_w}{\ln\left(\frac{r}{r_w}\right)} \quad (4-5)$$

식 4-5에 의하면 r 이 증가함에 따라 h 도 무제한 증가하게 된다. 그러나 h 는 원래 내압수두면(정수압면) h_0 이상 증가할 수 없다. 광범한 대수층에서 정상류는 이론적으로 있을 수 없는데, 그 이유는 양수를 계속하는 한 영향추가 계속 확장되어야 하기 때문이다. 그러나 실질적으로 양수우물로부터 먼 거리에서 h 는 h_0 에 접근하고, 수두강하는 양수우물로부터 거리의 대수(logarithm) 값과 비례해서 변한다.

양수 우물로부터 거리가 r_1 과 r_2 에 있는 두 개의 관측우물로부터 수두강하를 측정했다면 식 4-5는 아래와 같이 된다.

$$Q = 2\pi K b \frac{h_2 - h_1}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \quad (4-6)$$

우리가 이미 알고 있는바와 같이 $T = Kb$ 이고, 또 실제로 수두 h 대신 수두강하 s 를 측정하게 되므로,

$$T = \frac{Q}{2\pi(s_1 - s_2)} \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) \quad (4-7)$$

$\ln x = 2.3 \log_{10} x$ 이므로 위 식을 다시 쓰면,

$$T = \frac{2.30Q}{2\pi(s_1 - s_2)} \log \frac{r_2}{r_1} \quad (4-8)$$

여기서, T = 투수량계수

Q = 양수율

s_2 = 관측우물 2에서 측정한 수두강하

s_1 = 관측우물 1에서 측정한 수두강하

r_2 = 양수우물로부터 관측우물 2 까지의 거리

r_1 = 양수우물로부터 관측우물 1 까지의 거리

불압대수층의 경우:

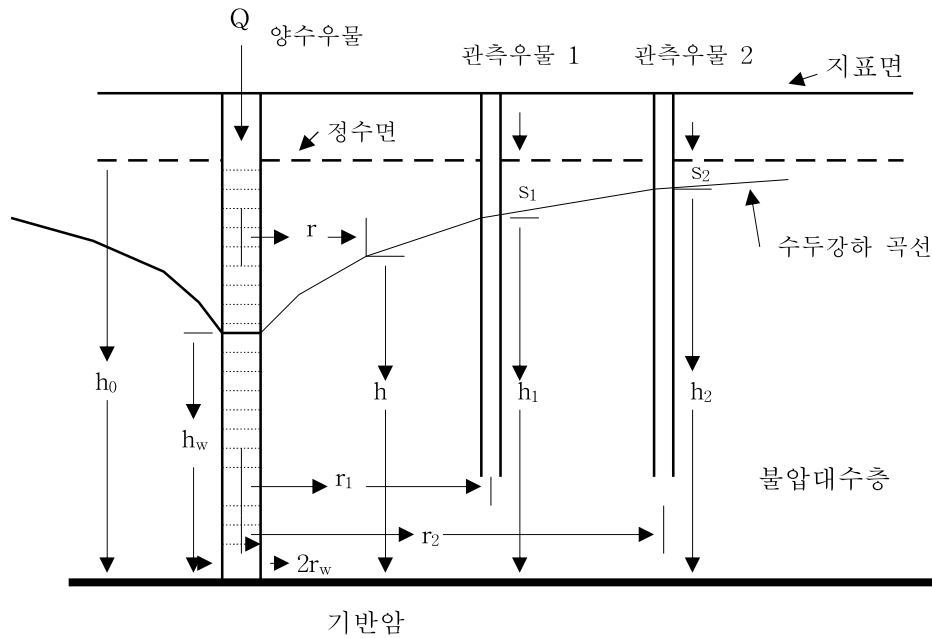


그림 4-3 불압대수층에서 정상류

그림 4-3으로부터 양수로 인한 지하수의 흐름율은 Darcy 법칙에 의해,

$$Q = -2\pi rKh \frac{dh}{dr} \quad (4-9)$$

식 4-9를 $r = r_w$ 에서 $h = h_w$, $r = r_0$ 에서 $h = h_0$ 의 한계 안에서 적분하면,

$$Q = \pi K \frac{h_0^2 - h_w^2}{\ln\left(\frac{r_0}{r_w}\right)} \quad (4-10)$$

식 4-10을 그림 4-3에 주어진 2 개의 관측우물의 수두와 반경으로 전환하면,

$$Q = \pi K \frac{h_2^2 - h_1^2}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \quad (4-11)$$

식 4-11을 투수계수 K 로 배열하면,

$$K = \frac{Q}{\pi(h_2^2 - h_1^2)} \ln \frac{r_2}{r_1} \quad (4-12)$$

식 4-12는 우물 주위에서 지하수의 수직방향의 흐름 때문에 수두강하 곡선을 정확히 나타내지 못한다. 그러나 실제의 경우 수두강하가 포화된 대수층의 두께에 비해 적으면, 실제의 K 와 잘 일치한다.

식 4-12로부터 투수량계수 T 를 계산하면, 이는 투수계수에 포화된 대수층의 두께를 곱한 것이므로 포화된 대수층의 두께를 h_1 과 h_2 의 평균값이라 하면,

$$T \approx K \frac{h_1 + h_2}{2} \quad (4-13)$$

만일 수두강하가 현저하게 크면 식 4-13의 h_1 과 h_2 는 각각 $(h_0 - s_1)$ 과 $(h_0 - s_2)$ 로 대치하면 된다. 따라서 불압대수층의 투수량계수를 나타내는 평형식은,

$$T = Kh_0 = \frac{Q}{2\pi[(s_1 - \frac{s_1^2}{2} h_0) - (s_2 - \frac{s_2^2}{2} h_0)]} \ln \frac{r_2}{r_1} \quad (4-14)$$

또는

$$T = \frac{2.30Q}{2\pi[(s_1 - \frac{s_1^2}{2} h_0) - (s_2 - \frac{s_2^2}{2} h_0)]} \log \frac{r_2}{r_1} \quad (4-15)$$

따라서 불압대수층의 경우 측정된 수두강하 값을 아래 식으로 수정하여 식 4-8에 s_1 과 s_2 를 대치하면 된다.

$$s_c = s - \frac{s^2}{2h_0} \quad (4-16)$$

여기서, s_c = 수정한 수두강하 값
 s = 측정된 수두강하 값
 h_0 = 포화된 부분의 대수층 두께

Thiem 해법의 응용 과정은 두 가지로; (1) 시간-수두강하 도표를 이용하는 것과 (2) 거리-수두강하를 이용하는 과정이다.

Thiem의 시간-수두강하 해법 과정:

- (1) 반대수방안지에 각각의 관측우물에서 측정한 수두강하 값을 산술 축에, 이에 대응하는 시간을 대수 축에 점시한다
- (2) 각각의 관측우물에 해당하는 시간-수두강하 도표를 만든다. 이는 (1)에 점시한 점들을 지나는 선으로 나타나게 된다. 만일 각각의 관측우물을 나타내는 직선이 서로 평행하면 수두경사는 일정하고 따라서 대수층에서 지하수의 흐름은 정상상태로 볼 수 있다
- (3) 2개의 관측우물을 택하여 수두강하 값 s 를 취하고 우리가 이미 아는 r 과 Q 값을 식 4-8에 삽입하여 투수량계수 T 를 계산한다

[Thiem의 시간-수두강하 해법 보기]

아래의 표4-4는 4개 관측우물에서 양수 시작후 830분 후에 측정한 수두강하 값이다. 이때 $Q = 788 \text{ m}^3/(\text{일})$ 이고 전체 양수 시간은 14시간이다.

관측우물	W_1	W_2	W_3	W_4
	$r = 0.8 \text{ m}$	$r = 30 \text{ m}$	$r = 90 \text{ m}$	$r = 215 \text{ m}$
수두강하	2.236 m	1.088 m	0.716 m	0.250 m

표 4-4 가상적인 양수시험 결과

임의로 관측우물 W_2 와 W_3 을 택하여 아래의 값을 취한 후, 이미 알고 있는 $Q = 788 \text{ m}^3/(\text{일})$ 과 함께 식 4-8에 삽입하여 T 를 결정한다.

$$\begin{aligned} r_1 &= 30 \text{ m} & s_1 &= 1.088 \text{ m} \\ r_2 &= 90 \text{ m} & s_2 &= 0.716 \text{ m} \end{aligned}$$

$$T = \frac{2.30 \times 788 \frac{\text{m}^3}{(\text{일})}}{2 \times 3.14 \times (1.088 \text{ m} - 0.716 \text{ m})} \log\left(\frac{90 \text{ m}}{30 \text{ m}}\right) = 370 \frac{\text{m}^2}{(\text{일})}$$

Thiem의 거리-수두강하 해법 과정:

- (1) 반대수방안지의 산술축에는 어떤 임의의 시간에 2개 이상의 관측우물에서 수두강하를 동시에 측정하여, 대수 축에는 양수우물과 관측우물간의 거리를 그리고 산술 축에는 수두강하 값을 점시하여 거리-수두강하 도표를 만든다
- (2) 앞에 열거한 모든 가정에 합당하면 (1)에서 점시한 점들은 하나의 직선을 이루게 된다
- (3) 이직선의 경사에서 한 대수간격(1 log cycle)에 해당하는 수두강하 값을 Δs 라 하면 식 4-8은 아래와 같이 간소화할 수 있다

$$T = \frac{2.30Q}{2\pi\Delta s} \quad (4-17)$$

- (4) (3)에서 얻은 Δs 값을 위 식 4-17에 삽입하여 T 값을 계산한다

[Thiem의 거리-수두강하 해법 보기]

그림 4-4는 표 4-4를 점시한 도표다. 이 도표에서 $\Delta s = 0.84$ m을 취한 다음, $Q = 788 \text{ m}^3/(\text{일})$ 과 함께 식 4-17에 삽입하여 T를 계산한다.

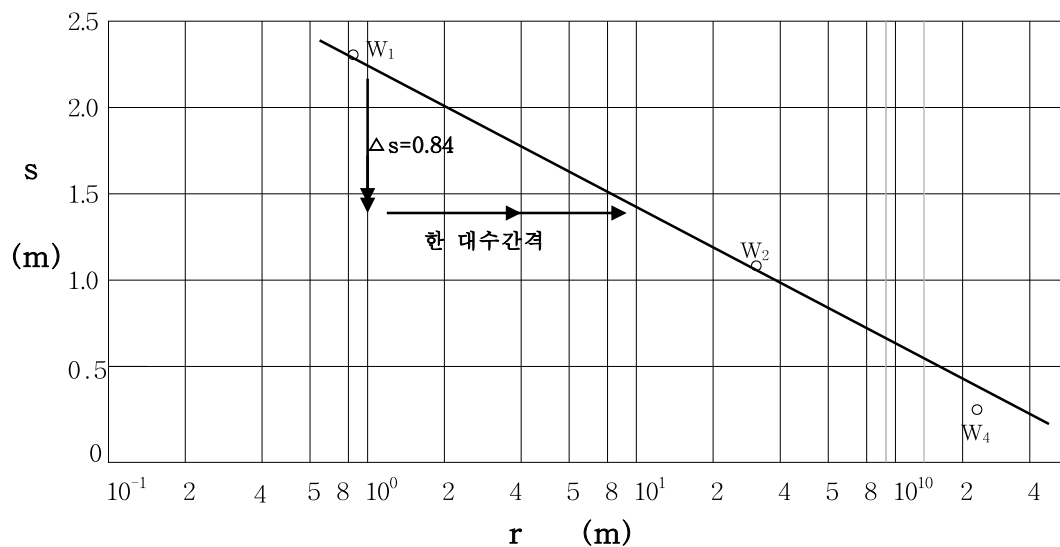


그림 4-4 Thiem의 거리-수두강하 해법

$$T = \frac{2.30 \times 788 \left(\frac{\text{m}^3}{\text{일}} \right)}{2 \times 3.14 \times 0.84} = 343 \frac{\text{m}^2}{(\text{일})}$$

4.3.2. Theis 해법

피압대수층에 완공한 우물을 일정한 양수율로 양수하면, 양수의 영향은 양수 시간과 함께 양수우물로부터 한없이 밖으로 퍼져 나간다. 이때 영향권 안에서 수두강하율과 저류계수를 곱하면 양수로 인한 유출량과 같아야 한다. 유출되는 물은 대수층에 저류된 물로써 무한 영역을 가진 대수층이라면 양수를 계속하는 한 수두가 계속해서 내려가야 한다. 따라서 흐름의 상태는 비정상상태가 되고 이때 지하수의 흐름은 비정상류가 된다. 그러나, 양수를 계속하면 양수의 영향반경이 증가함에 따라 수두강하율이 감소되어 결국은 무시할 수 있을 정도로 작아져 실질적으로 거의 정상상태에 이르게 된다.

이와 같은 비정상 상태 하에 얻은 시험결과를 분석하는데 필요한 수식은 1935년에 Theis가 양수시간의 요소를 포함함으로써 처음으로 개발했다. 이 식의 특징은 양수로 인한 물의 흐름이 정상상태에 이르기 전이라도 그 시험결과로 대수층의 수리학적 성질을 결정할 수 있다는 점이다. 대부분의 경우 물의 흐름이 정상상태에 도달하려면 양수기간이 수개월로부터 수년이 걸린다는 사실로도 Theis의 개발이 얼마나 중요한가를 알 수 있다.

Theis해법을 적용하려면 앞에 열거한 가정 이외에 아래 가정이 필요하다.

- (1) 대수층은 피압대수층이다
- (2) 우물로 향한 지하수의 흐름은 비정상상태이다. 즉, 시간에 따른 수두강하는 계속 되고 따라서 시간에 따른 수두경사도 일정치 않다

대수층경계로부터 멀리 떨어져 있는 피압대수층의 경우 위에 열거한 가정은 거의 만족되나 불압대수층의 경우 가정과 실제사이의 차이가 있으므로 Theis 식을 불압대수층에 적용하려면 수두강하 측정값 s 를 식 4-16으로 수정하여, 수정한 값을 실제로 측정된 값 대신 사용해야 한다.

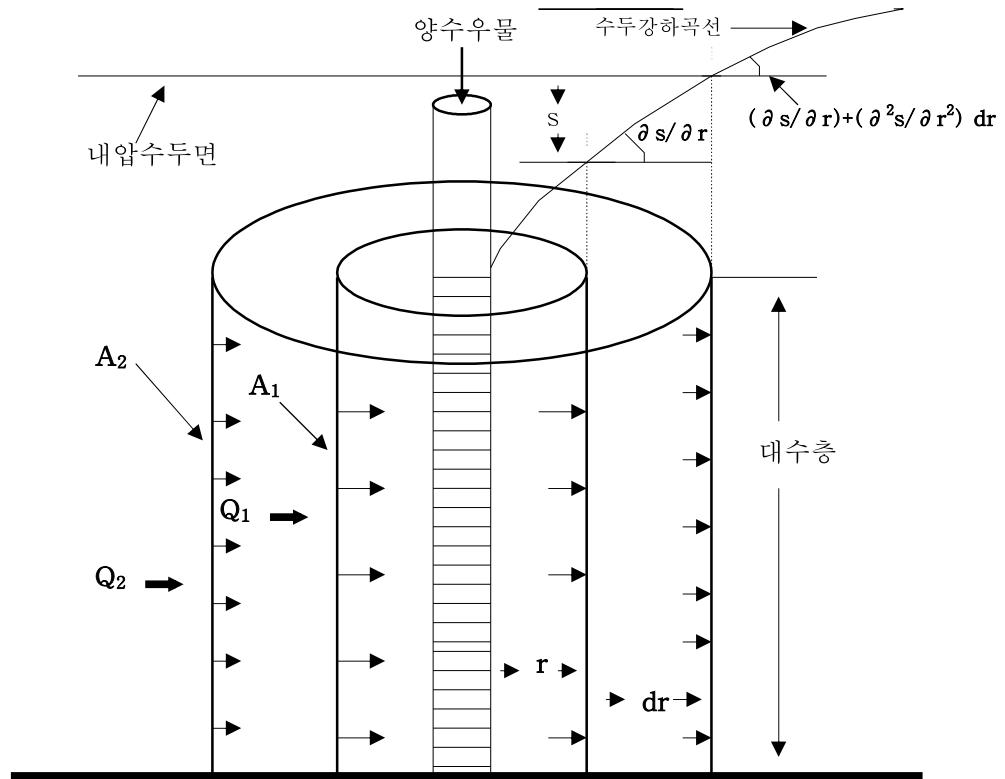


그림 4-5 우물로 향한 물 방사상 유동

This 해법에 필요한 수식은 아래방법으로 얻을 수 있다.

양수우물로 흐르는 유량을, 거리 r 과 $r + dr$ 에서 측정하여 두 지점간에 유량의 차이를 시간에 따른 체적변화로 나타내면,

$$Q_1 - Q_2 = \frac{dV}{dt} \tag{4-18}$$

여기서, Q_1 = 양수우물로부터 거리 r 에서 측정한 흐름양

Q_2 = 양수우물로부터 거리 $(r + dr)$ 에서 측정한 흐름양

V = 물의 체적

t = 시간

Darcy 법칙에 의해 Q_1 은,

$$Q_1 = - TI_1 W_1 \quad (4-19)$$

여기서, T = 투수량계수(Kb)
 I_1 = 수두경사($\partial s / \partial r$)
 W_1 = 흐름폭($2\pi r$)

식 4-19를 다시 쓰면,

$$Q_1 = -2\pi r T \frac{\partial s}{\partial r} \quad (4-20)$$

같은 방법으로,

$$Q_2 = TI_2 W_2 \quad (4-21)$$

여기서, I_2 = 수두경사, $I_1 + (\partial^2 s / \partial r^2) dr$
 W_2 = 흐름폭, $2\pi(r + dr)$

식 4-21을 다시 쓰면,

$$Q_2 = -2\pi(r + dr) T \left(\frac{\partial s}{\partial r} + \frac{\partial^2 s}{\partial r^2} dr \right) \quad (4-22)$$

따라서 시간에 따른 체적의 변화 dV/dt 는,

$$\frac{dV}{dt} = Q_1 - Q_2 = - (2\pi r T \frac{\partial s}{\partial r}) + 2\pi(r + dr) T \left(\frac{\partial s}{\partial r} + \frac{\partial^2 s}{\partial r^2} dr \right) \quad (4-23)$$

시간에 따른 체적변화(dV/dt)는 시간에 따른 저류량의 변화와 같으므로,

$$\frac{dV}{dt} = 2\pi r dr \frac{\partial s}{\partial t} S \quad (4-24)$$

여기서, S = 저류계수

식 4-23과 4-24는 같으므로,

$$-2\pi r T \frac{\partial s}{\partial r} + 2\pi(r+dr)T \left(\frac{\partial s}{\partial r} + \frac{\partial^2 s}{\partial r^2} dr \right) = 2\pi r dr \frac{\partial s}{\partial t} S \quad (4-25)$$

또는,

$$-2\pi r T \frac{\partial s}{\partial r} + T \left[2\pi r \frac{\partial s}{\partial r} + 2\pi r \frac{\partial^2 s}{\partial r^2} + 2\pi dr \frac{\partial s}{\partial r} + 2\pi(dr)^2 \frac{\partial^2 s}{\partial r^2} \right] = 2\pi r dr \frac{\partial s}{\partial t} S \quad (4-26)$$

위의 식을 정리하면,

$$2\pi r T dr \frac{\partial^2 s}{\partial r^2} + 2\pi T dr \frac{\partial s}{\partial r} + 2\pi T \frac{\partial^2 s}{\partial r^2} dr^2 = 2\pi r dr \frac{\partial s}{\partial t} S \quad (4-27)$$

위의 식에서 dr 은 매우 작기 때문에 dr^2 를 무시하고, 양편을 $2\pi r T dr$ 로 나누면,

$$\frac{\partial^2 s}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial s}{\partial r} = \frac{S}{T} \frac{\partial s}{\partial t} \quad (4-28)$$

식 4-28은 우리가 이미 살펴본 비정상류의 흐름을 나타내는 확산 방정식을 방사상 좌표로 나타낸 것이다. 만일 흐름이 정상류이면, $(S/T)(\partial s/\partial t) = 0$ 이 되어 식 4-28은 Laplace 방정식이 된다.

식 4-28의 경계조건은,

$t > 0$ 인 경우:

$$r \rightarrow 0 \text{ 일 때 } s \rightarrow 0$$

$$\lim_{r \rightarrow 0} [r(\partial s/\partial r)] = Q/(2\pi T)$$

$$r \rightarrow 0$$

또한 식 4-28의 초기조건은,

$$t > 0 \text{인 경우: } s(r,0) = s_0$$

이는 양수시작시 일정한 수두가 유지되었음을 의미한다. 따라서 경계조건을 만족시키는 식 4-28의 해답은 내압수두면의 방정식이어야 한다.

식 4-28에 r^2 를 곱하면,

$$r^2 \frac{\partial s}{\partial t} \frac{S}{T} = r \frac{\partial s}{\partial r} + r^2 \frac{\partial^2 s}{\partial r^2} \quad (4-29)$$

이는 피압대수층에서 압축성 유체의 방사상 흐름을 나타내는 기본적인 편 미분방정식이다. 식 4-29의 해답은 Theis에 의해 지하수의 흐름과 열전도(heat conductance)를 비유해서 얻었다.

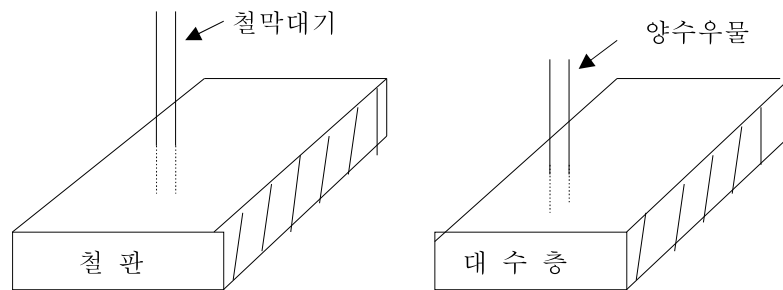


그림 4-6 열전도와 지하수의 흐름

그림 4-6에서와 같이 일정한 온도의 무한히 크고 균질한 철판에 온도가 이보다 낮고 아주 가는 철막대기를 꽂아서 철판으로부터 열을 흡수한다고 가정한다.

$$r \frac{\partial s}{\partial r} = -2Ce^{-\frac{r^2 S}{4Tt}} \quad (4-30)$$

을 가정하면,

$$r^2 \frac{\partial^2 s}{\partial r^2} = 2Ce^{-\frac{r^2 S}{4Tt}} + C \left(\frac{r^2 S}{Tt} \right) e^{-\frac{r^2 S}{4Tt}} \quad (4-31)$$

식 4-30과 4-31을 식 4-29에 삽입하면,

$$r^2 \frac{\partial s}{\partial t} \frac{S}{T} = -2Ce^{-\frac{r^2 S}{4Tt}} + 2Ce^{-\frac{r^2 S}{4Tt}} + C\left(\frac{r^2 S}{Tt}\right)e^{-\frac{r^2 S}{4Tt}} \quad (4-32)$$

식 4-32를 정리하면,

$$\frac{\partial s}{\partial t} = \frac{C}{t} e^{-\frac{r^2 S}{4Tt}} \quad (4-33)$$

여기서 상수 C는 식 4-33에 적당한 값을 삽입함으로써 결정할 수 있다.

양수에 의한 지하수의 흐름율은,

$$Q = -2\pi r \frac{\partial s}{\partial r} T + \int_0^r 2\pi r dr \frac{\partial s}{\partial t} S \quad (4-34)$$

이는 양수에 의한 지하수의 흐름율은 반지름이 r인 원주를 통과하는 물의 양과 그 원주 안의 대수층을 이루는 물질의 압축에 의해 증가한 물의 흐름을 합한 것과 같다.

식 4-34에 식 4-31과 4-33을 삽입한 후 적분하면,

$$Q = 4\pi TC \quad \text{또는} \quad C = \frac{Q}{4\pi T} \quad (4-35)$$

식 4-35를 식 4-33에 삽입하면,

$$\frac{\partial s}{\partial t} = \frac{Q}{4\pi Tt} e^{-\frac{r^2 S}{4Tt}} \quad (4-36)$$

식 4-36을 적분하면,

$$s = s_0 + \frac{Q}{4\pi T} \int_0^t \frac{1}{t} e^{-\frac{r^2 S}{4Tt}} dt \quad (4-37)$$

기준면을 정수면과 일치하게 정하면 $s_0 = 0$ 이 되어 식 4-37은,

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \int_0^t \frac{1}{t} e^{-\frac{r^2 S}{4Tt}} dt \quad (4-38)$$

만일,

$$u = \frac{r^2 S}{4Tt} \quad (4-39)$$

이면

$$t = \frac{r^2 S}{4Tu} \quad (4-40)$$

이고, 양변을 적분하면

$$dt = \left(-\frac{r^2 S}{4Tu^2}\right) du \quad (4-41)$$

여기서 적분한계는,

$$\begin{aligned} t = 0, & \quad u = \infty \\ t = t, & \quad u = r^2 S / 4Tt \end{aligned}$$

따라서 식 4-38은,

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \int_{\infty}^{\frac{r^2 S}{4Tu}} \frac{1}{\left(\frac{r^2 S}{4Tu}\right)} e^{-u\left(-\frac{r^2 S}{4Tu^2}\right)} du \quad (4-42)$$

즉,

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \int_{\frac{r^2 S}{4Tt}}^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du \quad (4-43)$$

또는,

$$s = h_0 - h = \frac{Q}{4\pi T} \int_{\frac{1.87r^2 S}{4Tt}}^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du \quad (4-44)$$

여기서, h_0 = 양수우물로부터 r 거리에 있는 관측우물에서 $t = 0$ 일 때
정수면

h = 양수시작 이후 t 시간에 측정한 지하수면

s = 수두강하($h_0 - h$)

Q = 양수율(일정함)

T = 투수량계수

S = 저류계수

$u = 1.87r^2 S / Tt$

t = 양수시작 이후 경과한 시간

위의 식 4-44에서 $\int_{\frac{1.87r^2 S}{4Tt}}^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du$ 는 적분지수(exponential integral)이며 아래와 같이 무한급수(infinite series)의 값을 갖는다.

$$\int_{\frac{1.87r^2 S}{4Tt}}^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du = W(u) = -0.577216 - \log_e u + u - \frac{u^2}{2 \times 2!} + \frac{u^3}{3 \times 3!} \cdots - \frac{u^n}{n \times n!} \quad (4-45)$$

여기서 $W(u)$ 를 **우물함수(well function)**라 하며 따라서 식 11-45는 아래와 같이 표현 할 수 있다.

$$s = \left[\frac{Q}{4\pi T} \right] W(u) \quad (11-46)$$

위의 식을 Theis해법 또는 비평형식(non-equilibrium formula)라 한다.

식 4-46은 아래의 초기 및 경계조건 아래 식 4-28에 주어진 확산방정식의 해답이다.

(1) $h(r, 0) = h_0$ ($t = 0$ 일 때 거리 r 에서 수두 h 는 정수면 h_0 과 같음)

- (2) $h(\infty, t) = h_0$ ($t = t$ 일 때 무한거리에서의 수두 h 는 정수면 h_0 과 같음. 이는 양수의 영향은 대수층의 변동리까지 미치지만 경계 면은 접하지 않음 즉, 무한영역의 대수층을 의미한다.)
- (3) $t > 0$ 일 때 $\lim (r \partial h / \partial r) = Q/2\pi T$ (이는 거리 r_w 즉, 양수우물의 반지름에서 일정한 양수율을 의미함. 가정에 의해 r_w 는 무한히 작아야 한다)

식 4-39를 다시 배열하면,

$$\frac{r^2}{t} = \left(\frac{4T}{S}\right)u \quad (4-47)$$

대수층시험 결과를 비평형식을 이용해서 해석하므로 그 대수층의 수리지질학적 특성을 결정하는데 유리한 점은:

- (1) 저류계수 S 와 투수량계수 T 를 결정할 수 있고
- (2) 한 개의 관측우물만 필요하고
- (3) 대수층시험 기간이 짧으며
- (4) 정상류를 가정할 필요가 없다

위의 식 4-46과 4-47은 직접적인 수학적 해법이 없으므로 그림 4-7과 같은 표준곡선(type curve)을 사용한 도표중첩해법, 즉 Theis해법을 적용해야 한다. 이 방법은 식 4-46과 4-47에서, 양수율 Q 가 일정하면 수두강하 s 와 r^2/t 와의 관계는 $W(u)$ 와 u 와의 관계와 같다. 따라서 $W(u)$ 와 u 의 관계를 나타내는 표준곡선과 시험결과를 점시한 도표 또한 이와 같은 관계를 갖게 된다는 점을 이용한 것이다.

Theis의 시간-수두강하 해법 과정:

- (1) 부록 4-1 (또는 4-2)에 주어진 값을 이용하여 양대수방안지(log-log paper)에 $W(u)$ 와 $1/u$ (또는 u)와의 관계를 나타내는 표준곡선을 준비한다(그림 4-7)
- (2) 표준곡선과 동일한 양대수방안지에 관측우물에서 측정한 수두강하 값 s 와 t/r^2 (또는 t)를 각각 종축과 횡축에 점시한 도표를 그린다
- (3) 두 도표의 축을 서로 평행하게 하여 표준곡선 위에 관측결과 도표를 중첩시킨다
- (4) 중첩된 도표에서 하나의 합치점(match point) A 를 택한 후 이 점에서 s , t/r^2 (또는 t), $W(u)$ 그리고 $1/u$ 의 값을 취한다. 이때 합치점은 도표상 어느 곳에 있던 관계가 없으므로 가급적 $W(u) = 1$, $1/u = 10$ 되는 점을 택해 나중에 계산할 때 편리하도록 한다
- (5) 이들 값을 식 4-46과 4-47에 삽입하여 T 와 S 를 결정한다

$W(u)$

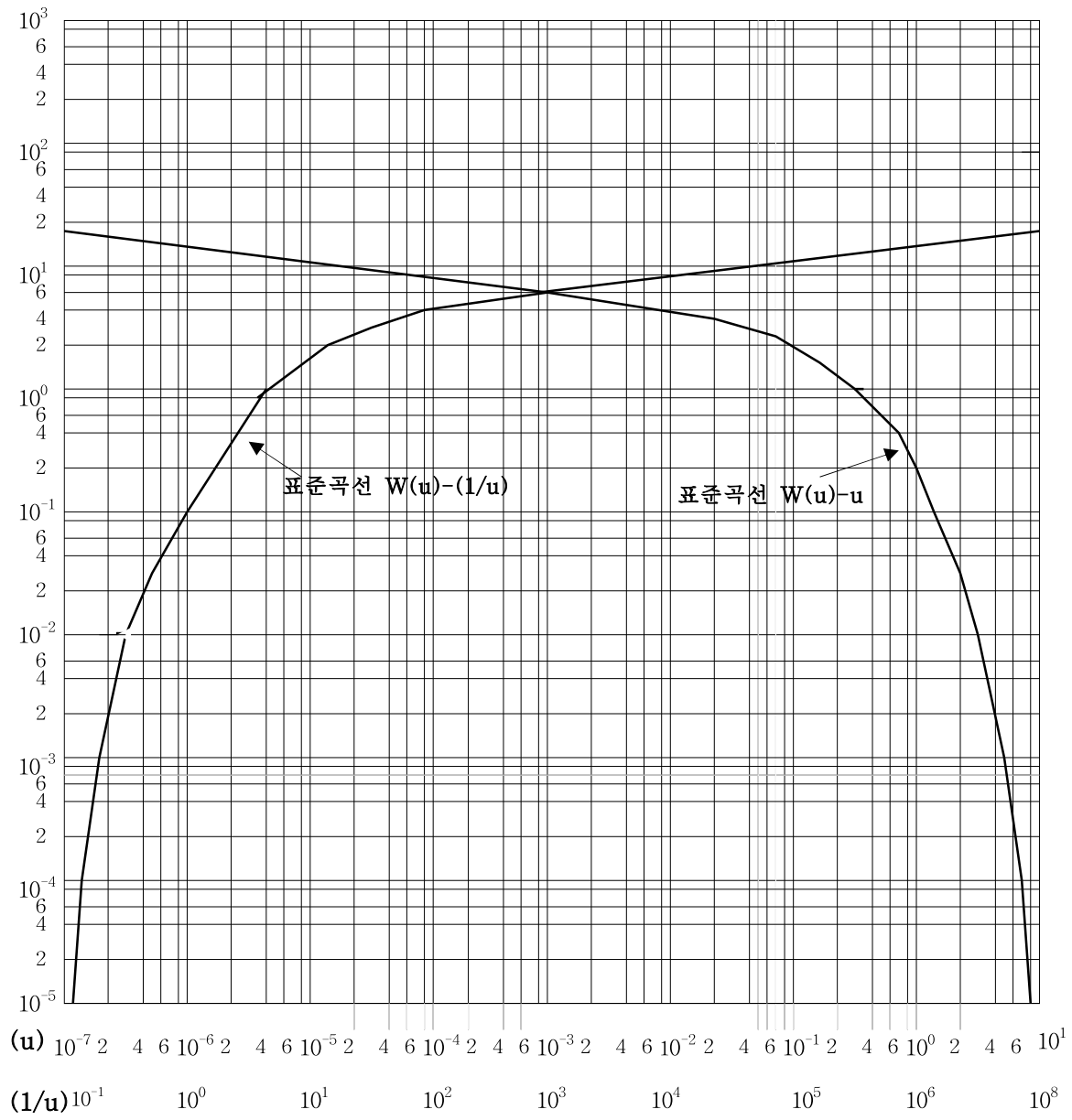


그림 4-7 표준곡선: $W(u)$ 대 u 와 $W(u)$ 대 $1/u$

[Theis의 시간-수두강하 해법 보기]

아래의 표 4-5는 대수층 시험에 사용된 3개의 관측우물에서 측정한 수두강하 값이다.

관측우물 W ₁ (r = 30 m)			관측우물 W ₂ (r = 90 m)			관측우물 W ₃ (r = 215 m)		
t (분)	s (m)	t/r ² (분/m ²)	t (분)	s (m)	t/r ² (분/m ²)	t (분)	s (m)	t/r ² (분/m ²)
0.10	0.00	0	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0
0.25	0.08	2.78 x 10 ⁻⁴	2.00	0.021	2.47 x 10 ⁻⁴	66.0	0.089	1.43 x 10 ⁻⁴
0.70	0.18	7.77 x 10 ⁻⁴	2.66	0.044	3.24 x 10 ⁻⁴	127	0.138	2.75 x 10 ⁻⁴
1.40	0.28	1.56 x 10 ⁻³	3.50	0.075	4.32 x 10 ⁻⁴	185	0.165	4.00 x 10 ⁻⁴
2.33	0.36	2.59 x 10 ⁻³	4.33	0.104	5.35 x 10 ⁻⁴	251	0.186	5.43 x 10 ⁻⁴
3.36	0.42	3.73 x 10 ⁻³	6.00	0.153	7.42 x 10 ⁻⁴	305	0.196	6.60 x 10 ⁻⁴
5.35	0.50	5.94 x 10 ⁻³	9.00	0.206	1.11 x 10 ⁻³	366	0.207	7.92 x 10 ⁻⁴
8.30	0.57	9.22 x 10 ⁻³	15.0	0.275	1.85 x 10 ⁻³	430	0.214	9.31 x 10 ⁻⁴
10.0	0.60	1.11 x 10 ⁻²	25.0	0.348	3.08 x 10 ⁻³	606	0.227	1.31 x 10 ⁻³
18.0	0.68	2.00 x 10 ⁻²	30.0	0.364	3.70 x 10 ⁻³	780	0.250	1.68 x 10 ⁻³
33.0	0.753	3.66 x 10 ⁻²	53.0	0.429	6.55 x 10 ⁻³			
48.0	0.793	5.34 x 10 ⁻²	60.0	0.444	7.41 x 10 ⁻³			
80.0	0.855	8.89 x 10 ⁻²	90.0	0.494	1.11 x 10 ⁻²			
139	0.915	1.54 x 10 ⁻¹	120	0.528	1.48 x 10 ⁻²			
245	0.966	2.72 x 10 ⁻¹	180	0.569	2.22 x 10 ⁻²			
360	1.007	4.00 x 10 ⁻¹	301	0.614	3.72 x 10 ⁻²			
600	1.053	6.66 x 10 ⁻¹	422	0.657	5.21 x 10 ⁻²			
830	1.088	9.22 x 10 ⁻¹	602	0.688	7.43 x 10 ⁻²			
			785	0.718	9.70 x 10 ⁻²			

표 4-5 양수시험 결과

그림 4-8은 표 4-5를 점기한 도표이다 (t/r²-횡축, s-종축). 합치점 A에서 얻은 아래의 값과, 이미 알고있는 Q = 788 m³/(일)을 식 4-46와 4-47에 삽입하여 T와 S를 구한다.

$$W(u) = 1$$

$$1/u = 10$$

$$s = 0.15 \text{ m}$$

$$t/r^2 = 1.5 \text{ 분/m}^2$$

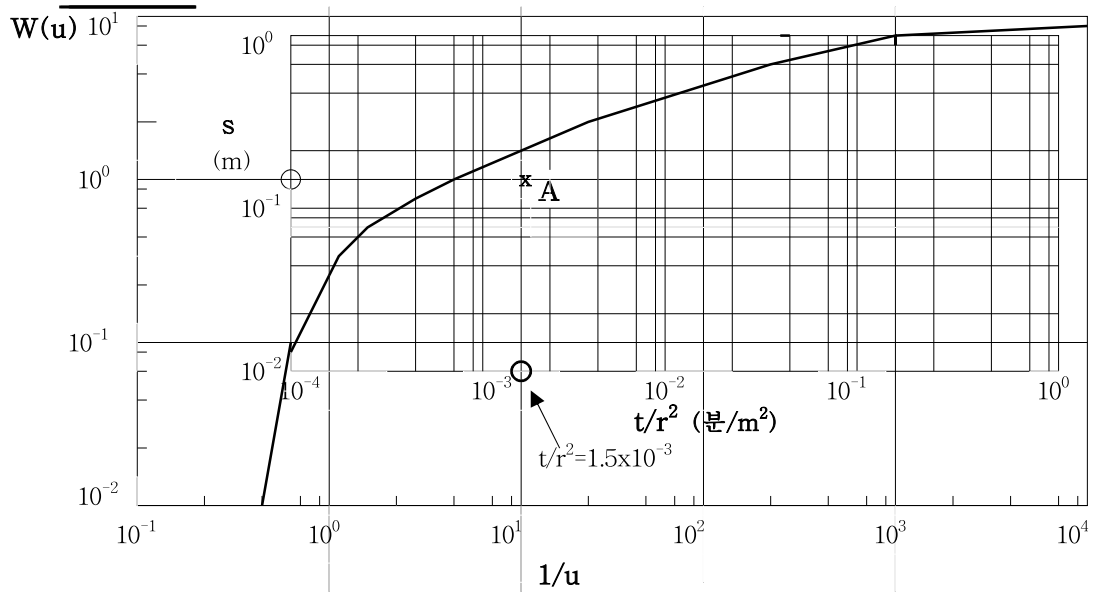


그림 4-8 Theis 해법의 보기

$$T = \frac{Q}{4\pi s} W(u) = \frac{788 \frac{m^3}{(일)} \times 1}{4 \times 3.14 \times 0.15m} = 418 \frac{m^2}{(일)}$$

$$\frac{S}{\frac{1}{u}} = \frac{4 \times 418 m^2 \times 1.5 \times 10^{-3} (\text{분})}{1440 (\text{분}) m^2} \times \frac{1}{10} = 1.7 \times 10^{-4}$$

위에 기술한 Theis해법을 불압대수층에 적용하려면 두 가지 고려사항이 있는데 첫째는 대수층에서의 물의 방출은 수두강하와 동시에 일어나지 않고 얼마간 지연되기 때문에 양수시험 초기에 측정된 결과를 이용해서 결정한 저류계수의 값은 실제의 값 보다 매우 적은 값이 될 수 있다. 다른 점은 양수율이 매우 높고 관측우물이 양수우물로부터 비교적 가까운 거리에 있으면 양수로 인한 대수층의 배수현상이 매우 심하게 일어난다. 이 때문에 포화된 부분의 두께가 감소되고 따라서 주어진 대수층의 투수량계수가 일정해야 한다는 양수시험의 기본적인 가정이 위반되게 된다. 이와 같은 경우에 시험을 통해 얻은 수두강하 값은 앞에 이미 설명한 식 4-16을 이용하여 수정한 후 Theis 해법을 이용하여야 된다.

4.3.3. Jacob의 해법

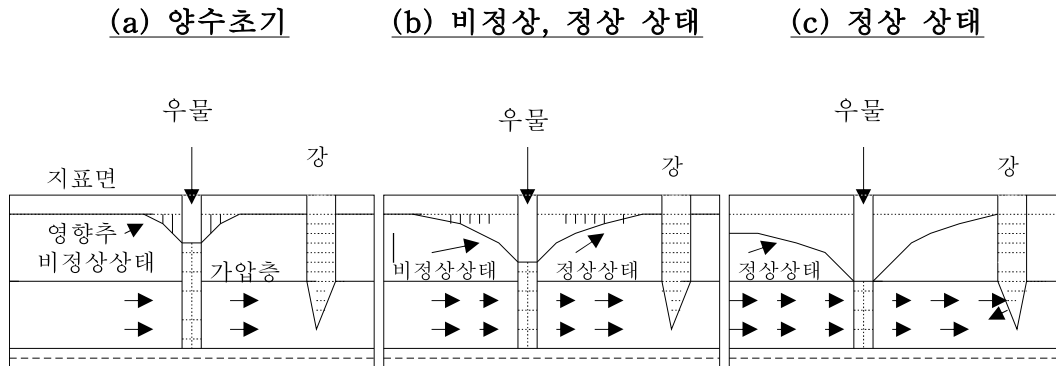


그림 4-9 양수시간과 영향추의 관계

양수시험결과를 분석하는 방법은 Theis해법 이외에도 여러 가지가 있다. 그 중의 하나는 Jacob의 방법인데 그의 방법은 Theis해법에서 필요한 도표중첩의 번거로운 과정을 거칠 필요가 없기 때문에 편리하다. Jacob은 Theis해법에 필요한 양대수방안지의 중첩방법 대신 반대수방안지(semi-log paper)를 사용한다. 이상적인 조건하에서 시간과 수두강하를 반대수방지에 점사하면 이들의 관계가 곡선이 아닌 직선으로 표시된다.

이 방법을 사용할 때 기억해야 할 것은 Theis해법이 때와 장소에 제한 없이 적용할 수 있는 반면에 Jacob의 방법은 Theis해법이 전제로 한 일반적인 가정 이외에 어떤 특별한 조건하에서만 적용할 수 있다는 점이다. Jacob의 방법의 제한을 좀더 확실히 이해하기 위해 양수시험 중에 영향추의 변화과정을 살펴볼 필요가 있다.

그림 4-9a는 영향추가 양수우물로부터 외각으로 확장됨에 따라 그 모양이, 즉 영향추 위에 모든 점에서의 수두경사가, 양수를 계속되는 한 계속 변하는 것을 나타내고 있다. 우리는 이런 상태를 비정상상태라고 함은 이미 설명한바 있다. 양수시험 초기에는 전체의 영향추가 비정상형이어서 그 모양이 계속 변한다. 양수를 얼마간 계속하면 이 영향추는 먼저 양수우물 주위로부터 어느 정도 정상형이 되기 시작하며 이 현상은 점차 영향추의 외각으로 확산하기 시작한다(그림 4-9b). 오랜 기간 양수를 계속하면 어느 시점에서 우물로부터의 유출량과 대수층으로부터 우물로의 함양율이 거의 같아져서 이들 사이에 균형을 이루게 되는데 이때 양수로 인한 수두강하는 정지되고 영향추의 모든 부분이 정상상태에 도달하게 된다(그림 4-9c).

이론적으로 Jacob의 방법은 영향추가 정상상태에 있는 영역에서만 적용할 수 있다. 그러나 실제로는 $u=(r^2S)/(4Tt)$ 의 값이 0.01보다 작아지면 정상상태에 이르렀다고 보아도 무방하다. 이 값을 u 방정식에 삽입하여 t 를 풀면 이는 가장 멀리 있는 관측우물이 정상상태에 도달하는 시간을 의미한다. 따라서,

$$t_c = \frac{7200r^2S}{T} \quad (4-48)$$

여기서, t_c = 정상상태에 도달하는 시간(분)
 r = 양수우물과 관측우물간의 거리(m)
 S = 저류계수(추측한)
 T = 투수량계수($m^2/일$)

위와 같이 영향추가 정상상태에 도달하려면 양수시간 t 가 매우 길어야 하고 관측우물까지의 거리 r 은 작아야 한다. 이런 조건에서 식 4-45의 우편에 3째 항 이하의 매우 작아지기 때문에 무시할 수 있다. 따라서 식 4-45는 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \left(-0.577216 - \ln \frac{r^2S}{4Tt} \right)$$

(4-49)

또는,

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \left(\ln \frac{4Tt}{r^2S} - 0.577216 \right) \quad (4-50)$$

이는,

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \left(\ln 4 + \ln \frac{Tt}{r^2S} - 0.577216 \right) \quad (4-51)$$

여기서, $0.577216 = \ln 1.78$ 이고 $\ln 4 = 1.3893$ 임으로, $1.3893 + 0.577216 = 0.8091 = \ln 2.25$ 가 된다.

따라서 식 4-51은,

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \left(\ln \frac{2.25Tt}{r^2S} \right) \quad (4-52)$$

우리가 이미 아는바와 같이 $\ln x = 2.3 \log_{10}x$ 임으로 식 4-52는,

$$s = \frac{2.30Q}{4\pi T} \log \frac{2.25 Tt}{r^2 S} \quad (4-53)$$

위의 수식은 Jacob의 변형된 비평형식(modified non-equilibrium equation)이라 한다.

정상상태에 도달한 후 관측우물에서 측정한 수두강하 값과 이에 대응하는 시간을 반대수방안지에 점시하면(산술축에 수두강하 s 를, 대수축에 시간 t 를 점시함) 개개의 점들이 직선에 가까운 선상에 놓이게 된다. 이때 직선의 경사는 양수율과 투수량계수에 비례한다.

어떤 우물에서 시간 t_1 과 t_2 에 측정한 수두강하 값을 각각 s_1 과 s_2 라 하면, 식 4-53에 의해 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$s_1 = \frac{2.30Q}{4\pi T} \log \frac{2.25 Tt_1}{r^2 S}$$

그리고

$$s_2 = \frac{2.30Q}{4\pi T} \log \frac{2.25 Tt_2}{r^2 S}$$

여기서 $s_2 - s_1$ 은,

$$s_2 - s_1 = \frac{2.30Q}{4\pi T} \log \frac{2.25 Tt_2}{r^2 S} - \frac{2.30Q}{4\pi T} \log \frac{2.25 Tt_1}{r^2 S} = \frac{2.30Q}{4\pi T} \log \frac{t_2}{t_1}$$

$s_2 - s_1 = \Delta s$ 라 하면

$$T = \frac{2.30Q}{4\pi \Delta s} \log \frac{t_2}{t_1} \quad (4-54)$$

$\log 10 = 1$ 이므로 $\log \frac{t_2}{t_1}$ 의 값이 한 대수 간격에 대응하는 수두강하 값 Δs 라
 택하면,

$$T = \frac{2.30Q}{4\pi\Delta s} \quad (4-55)$$

시간-수두강하 직선의 연장과 수두강하 s 가 0을 나타내는 축과의 교차점에서
 읽은 시간을 t_0 라 하면, 4-53으로부터

$$0 = \frac{2.30Q}{4\pi T} \log \frac{2.25 T t_0}{r^2 S}$$

(4-56)

여기서 $\frac{2.30Q}{4\pi T} \neq 0$ 이므로 $\frac{2.25 T t_0}{r^2 S} = 1$ 이 되어야 한다. 따라서

$$S = \frac{2.25 T t_0}{r^2} \quad (4-57)$$

여기서, Q = 양수율

T = 투수량계수

S = 저류계수

r = 양수우물과 관측우물간의 거리

위의 식을 적용할 때 조심해야 할 것은 모든 값의 단위가 일정해야 한다는 점
 이다. 따라서 Q 가 $m^3/(\text{일})$ 이면 s 는 m , T 는 $m^2/(\text{일})$ 이어야 한다. 여기서 S 는
 무단위의 상수임으로 식 4-57에서 t_0 의 단위는 (일)이 된다.

Jacob의 시간-수두강하 방법 과정:

- (1) 반대수방안지에 양수시간 t (대수축)에 대응하는 수두강하 값 s (산술축)를 점시하
 여 측정치에 가장 가까운 직선을 그린다
- (2) 이 직선을 연장하여 시간축과의 교차점, 즉 수두강하가 0인 점에서 시간 t_0 을 취
 한다
- (3) 직선의 경사에서 한 대수간격에 대응하는 수두강하 값 Δs 를 결정한다
- (4) 식 4-55에 이미 알고 있는 양수율 Q 와 (3)에서 결정한 Δs 의 값을 삽입하여 T 를
 계산한다
- (5) (2)와 (4)에서 결정한 t_0 과 T 그리고 관측우물까지의 거리 r 을 식 4-57에 삽입하
 여 S 를 결정한다

[Jacob의 시간-수두강하 방법 보기]

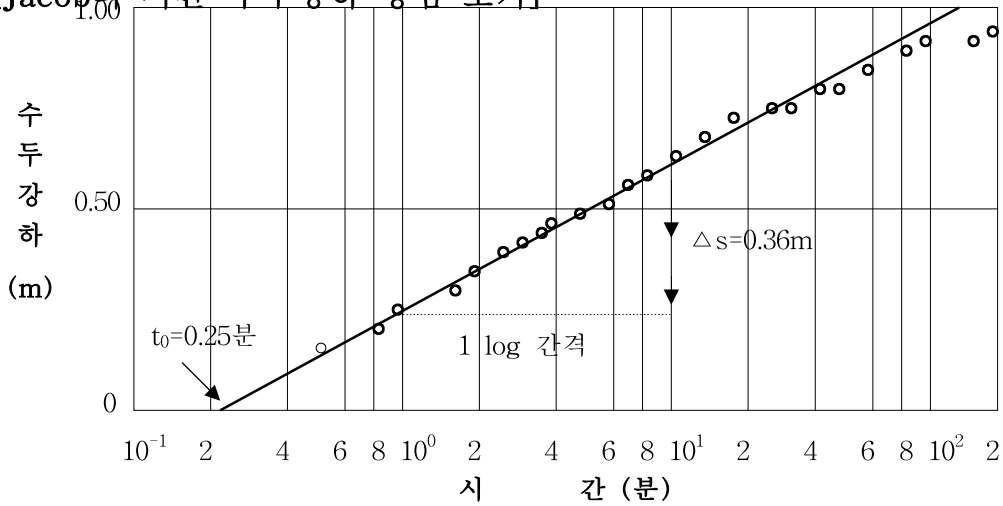


그림 4-10 시간-수두강하 해법의 보기

그림 4-10은 앞에 표 4-5에 주어진 양수시험 결과 중 관측우물 W_1 에서 측정
한 수두강하 값을 점시한 도표다. 이 도표로부터 취한 아래의 값과 이미 알고
있는 $Q = 788 \text{ (m}^3\text{/분)} = 788 \times 60 \times 24 = 1,134,720 \text{ (m}^3\text{/일)}$ 을 식 4-55와 4-57에
삽입하여 T 와 S 를 계산한다.

$$\Delta s = 0.36 \text{ m}$$

$$r = 30 \text{ m}$$

$$t_0 = 0.25 \text{ (분)} = 2.5/1440 \text{ (일)}$$

$$T = \frac{2.30Q}{4\pi\Delta s} = \frac{2.30 \times 788 \text{ m}^3\text{/일}}{4 \times 3.14 \times 0.36 \text{ m}} = 401 \text{ m}^2\text{/일}$$

$$S = \frac{2.25 T t_0}{r^2} = \frac{2.25 \times 401 \text{ m}^2\text{/일}}{30^2 \text{ m}^2} \times \frac{0.25}{1440} \text{ (일)} = 1.74 \times 10^{-4}$$

Jacob의 시간-수두강하 방법을 사용할 때 주의해야 할 것은 u 의 값이 매우 작아서 일반적으로 $u < 0.01$ 일 때에만 가능하다. 따라서 위의 과정을 통해 T 와 S 를 결정한 후 이들의 값을 식 4-47($u = \frac{r^2 S}{4Tt}$)에 삽입하여 u 의 값이 유효한계에 안에 있는가를 점검해야 한다. 따라서 위의 값을 식 4-47에 삽입하면 $u \approx 10^{-4}$ 이므로 $t < 0.01$ (일) 또는 $t < 14$ 분에 해당하고, $u < 0.01$ 임으로 위의 결과는 유효하다.

같은 방법으로 다른 관측우물에서 측정한 값을 이용하여 T 와 S 를 결정한 후 이들을 서로 비교함으로써 보다 신빙성이 있는 대수층의 성질을 결정할 수 있다.

Jacob의 거리-수두강하 방법 과정:

- (1) 앞에서 살펴본 Thiem의 거리-수두강하 해법의 경우와 같은 방법으로 반대수방 안지에 여러 개의 관측우물에서 정해진 시간에 동시에 측정한 수두강하 값 s 를 산술축에, 그리고 이들 우물과 양수우물간의 거리 r 을 대수축에 점시한다
- (2) 점시한 점들을 지나가는 직선을 그린다음 이를 연장하여 거리를 나타내는 점 즉 수두강하 $s = 0$ 이 되는 거리를 취한다
- (3) 이 교차점의 좌표는 $s = 0$ 이고 $r = r_0$ (r_0 는 정해진 시간 t 때에 영향반경)
- (4) 또한 r_0 을 거리-수두강하 직선의 연장과 수두강하가 0을 나타내는 축과의 교차점에서 측정한 양수우물로부터 관측우물까지의 거리라 하면, 식 4-57은 아래와 같이 표현할 수 있고 이를 이용하여 대수층의 저류계수를 결정할 수 있다

$$S = \frac{2.25 T t}{r_0^2} \quad (4-58)$$

여기서, t = 수두강하를 측정한 양수시간

r_0 = 수두강하가 0이 되는 양수우물 까지의 거리

만일 Theis해법을 이용해서 영향추 외각부분에서의 수두강하를 계산한다면 이들 값은 거리-수두강하 직선이 나타내는 수두강하 값 보다 적은 값이 되며, 이는 우리가 측정할 수 있는 영향추의 한계가 r_0 밖에 있음을 의미한다.

만일 거리-수두강하 직선을 안쪽, 즉 우물의 지름 쪽으로 연장하면 이 연장선이 수두강하 축과 만나는 점에서의 수두강하 값은 우물밖에 대수층에서의 수두강하 값을 나타내고 이 값보다 우물 안에서의 수두강하 값이 크면 이는 뒤에서 설명할 소위 우물손실(well loss) 때문이다.

이미 살펴본 바와 같이 대수층이 이방성이면 이의 투수계수 또는 투수량계수가 방향에 따라 달라진다. 이 때문에 거리는 같더라도 방향이 다른 관측우물에서 측정한 수두강하 값은 서로 다른 값이 될 수 있다. 이런 경우에 거리-수두강하 방법은 같은 방향으로 서로 다른 거리에 최소한 3 개의 관측우물에서 측정한 시험결과가 있어야 신빙성이 있는 분석결과를 얻을 수 있다.

[Jacob의 거리-수두강하 방법 보기]

그림 4-11은 표 4-5에서 양수시작 이후 140분에 관측우물 W₁, W₂, W₃에서 측정한 수두강하 값을 점시한 도표이다. 이미 알고 있는 Q = 788 m³/(일)과 도표로부터 얻은 아래 값을 식 4-55와 4-58에 삽입하여 T와 S를 결정한다.

$$\Delta s = 0.81 \text{ m}$$

$$r_0 = 420 \text{ m}$$

$$T = \frac{2.30Q}{2\pi\Delta s} = \frac{2.30 \times 788 (\text{m}^3/\text{일})}{2 \times 3.14 \times 0.81 (\text{m})} = 355 \left(\frac{\text{m}^2}{\text{일}} \right)$$

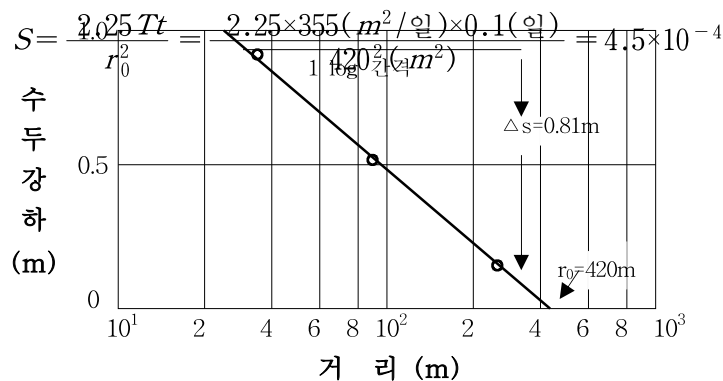


그림 4-11 Jacob의 거리-수두강하 해법

Jacob의 시간/(거리)²-수두강하 방법 과정:

- (1) 반대수방한지에 여러 개의 관측우물에서 측정한 수두강하 값 s 를 산술축에, 그리고 이에 대응하는 시간/(거리)² 값 t/r^2 를 대수축에 점시한다
- (2) 점시한 점들을 지나는 직선을 그린다음 이를 연장하여 t/r^2 축과 교차점을 정한다. 이때 이 교차점의 좌표는 $s = 0, t/r^2 = (t/r^2)_0$ 이 된다
- (3) 식 4-56과 4-57에서 이미 설명한 것과 같은 이유로,

$$S = 2.25 T \left(\frac{t}{r^2} \right)_0 \quad (4-59)$$

- (4) 식 4-59에 (2)에서 취한 값을 삽입하여 S 를 결정하고, 앞에서 이미 설명한 방법으로 식 4-55를 이용하여 T 를 구한다

[Jacob의 시간/(거리)²-수두강하 방법 보기]

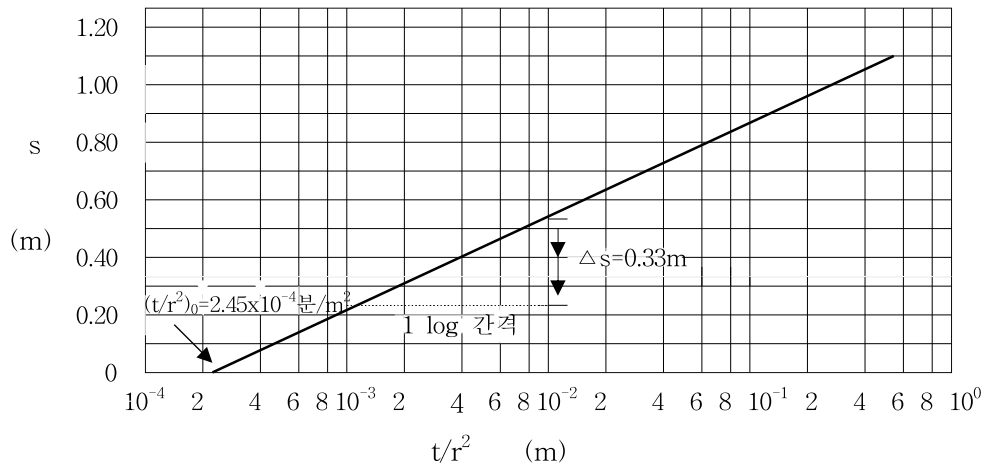


그림 4-12 Jacob의 시간/(거리)²-수두강하 방법 보기

그림 4-12는 표 4-5에 주어진 양수시험 결과를 나타내는 도표다. 이 도표로부터 얻은 값과, $Q = 788 \text{ m}^3/(\text{일})$ 을 식 4-55와 4-57에 삽입하여 T 와 S 를 구하면,

$$(t/r^2)_0 = 2.45 \times 10^{-4} \text{ 분}/\text{m}^2$$

$$\Delta s = 0.33 \text{ m}$$

$$T = \frac{2.30Q}{4\pi\Delta s} = \frac{2.30 \times 788 \frac{\text{m}^3}{(\text{일})}}{4 \times 3.14 \times 0.33 \text{ m}} = 438 \frac{\text{m}^2}{(\text{일})}$$

$$S = 2.25 T \left(\frac{t}{r^2} \right)_0 = 2.25 \times 438 \frac{\text{m}^2}{(\text{일})} \times \frac{2.45}{1440} (\text{일}) \times 10^{-4} = 1.7 \times 10^{-4}$$

4.3.4. Theis의 회복시험(recovery test) 분석법

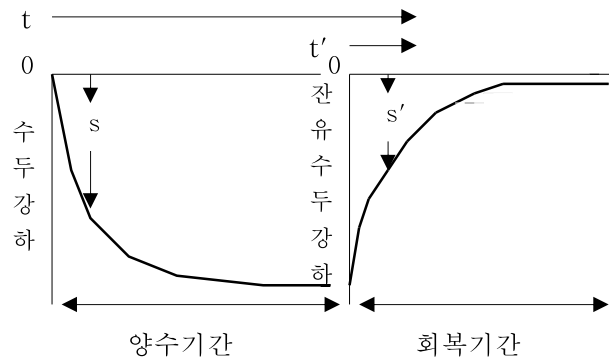


그림 4-13 시간-수두강하/잔유수두강하의 모양

양수를 정지하면 수위가 상승하게 되는데 이 때의 회복하는 수두는 양수시 수두강하의 반영이라고 볼 수 있다. 따라서 양수우물 또는 관측우물의 수위회복을 측정하여 이를 앞에서 살펴본 비평형식으로 분석하므로써 대수층의 수리학적 성질을 결정하는데 응용할 수 있다.

회복시험 분석법의 장점:

- (1) 비평형식을 이용하여 투수량계수 T 를 결정할 수 있고, 이를 다른 방법으로 결정한 값과 비교함으로써 더욱 신빙성이 있는 분석을 할 수 있다
- (2) 회복시험은 물의 회복(recovery)율이 일정하여 양수율의 평균값과 같으므로 양수할 때 양수율의 변화로 인한 수두강하의 변화에서 오는 오차를 피할 수 있다

회복시험 분석법의 단점:

- (1) 투수량계수 T 는 결정할 수 있으나 저류계수 S 는 결정할 수 없다

잔유수두강하(residual drawdown) s' 는 양수 이전의 수두에서 양수 정지후 t' 시간 후에 측정된 수두를 뺀 수두를 말하며, 이는 Theis해법에 의해 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$s' = \frac{Q}{4\pi T} [W(u_1) - W(u_2)] \quad (4-60)$$

여기서, $u_1 = r^2 S / 4Tt$, $u_2 = r^2 S / 4Tt'$
 t = 양수시작 이후의 시간
 t' = 양수정지 이후의 시간

만일 $u_2=(r^2S)/(4Tt')$ 가 아주 작아지면 Jacob의 방법에 의해,

$$s' = \frac{2.30Q}{4\pi T} \log \frac{t}{t'} \quad (4-61)$$

이미 앞에서 설명한바와 같이 s' (산술축)- t/t' (대수축)의 도표는 한 직선을 나타내고 그 직선의 경사에서 t/t' 의 값이 한 대수간격(1 log cycle)에 대응하는 s' 의 값을 $\Delta s'$ 라 하면 아래와 같이 된다.

$$T = \frac{2.30Q}{4\pi \Delta s'} \quad (4-62)$$

Theis의 회복시험 분석 과정:

- (1) 양수시험 측정표를 참고로 해서 t/t' 을 계산한다
- (2) 그림 4-14에서와 같이 반대수방안지에 잔유수두강하 s' 와 t/t' 를 점시한다
- (3) 도표에서 한 대수간격의 $\log(t/t')$ 을 취하고 이에 대응하는 잔유수두차 $\Delta s'$ 를 결정한다
- (4) 식 4-62를 이용하여 대수층의 투수계수량을 결정한다

[Theis의 회복시험 분석 보기]

t' (분)	t/t'	s' (m)	t' (분)	t/t'	s' (m)
0	∞	1.09	60	15	0.47
0.5	1661	1.01	90	10	0.40
1	831	0.97	120	7.9	0.36
2	416	0.91	150	6.5	0.32
3	278	0.89	180	5.6	0.30
5	166	0.85	240	4	0.26
10	84	0.76	300	3.8	0.23
20	42	0.65	450	2.8	0.18
30	29	0.58	600	2.4	0.15

표 4-6 가상의 회복시험 결과

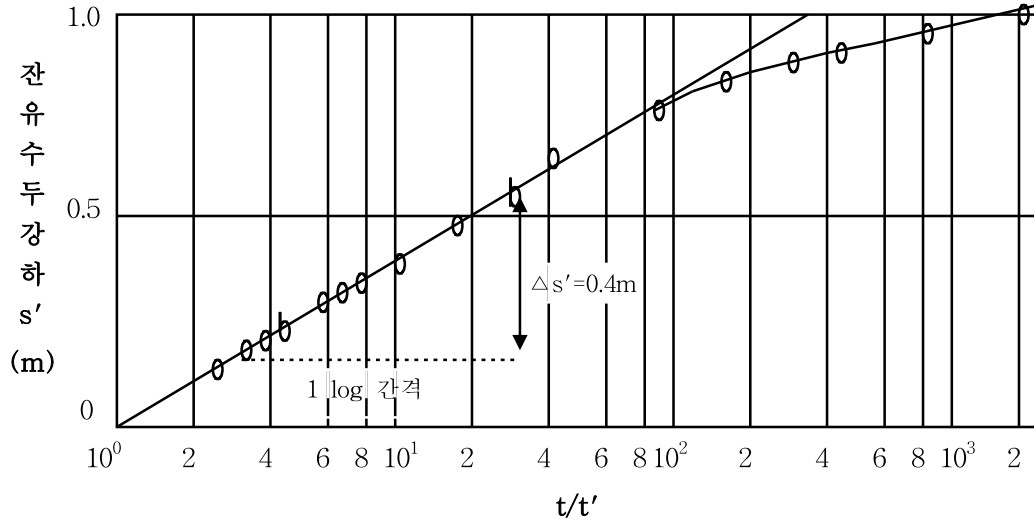


그림 4-14 Theis의 회복시험 분석 보기

그림 4-14는 표 4-6에 주어진 가상의 회복시험 결과를 이용하여 $s'-t/t'$ 를 점사한 도표로써 이를 회복곡선이라 한다.

우리가 이미 아는 $Q = 788 \text{ m}^3/(\text{일})$ 과 그림 4-14에서 한 대수간격의 t/t' 에 대응하는 잔유수두강하 값 $\Delta s' = 0.4 \text{ m}$ 을 식 4-62에 삽입하여 T 를 결정한다.

$$T = \frac{2.30Q}{4\pi\Delta s'} = \frac{2.30 \times 788 \frac{\text{m}^3}{(\text{일})}}{4 \times 3.14 \times 0.40 \text{ m}} = 361 \frac{\text{m}^2}{(\text{일})}$$

4.3.5. 비양수량(specific capacity)과 투수량계수

시추가 성공적으로 끝나면 그 즉시 우물의 완공법, 생산력, 운영, 정비 등에 필요한 정보를 얻기 위해 아래와 같은 간단한 양수 시험을 하는 것이 통례이다.

- (1) 양수에 대한 지하수면의 반응을 측정하여 영향반경을 결정하여 이 우물과 그 주위에 있는 다른 우물들이 서로 간섭하는가를 점검한다
- (2) 일정한 양수율 또는 양수율을 단계적으로 변경시키며 양수하여 양수시험에 가장 이상적인 양수율을 결정한다

이와 같은 시험을 할 때 가장 중요한 것은 정확한 양수율과 수두의 측정이다. 일정한 양수율로 장기간 실시한 시험결과는 이미 설명한바와 같이 대수층의 투수량계수와 저류계수를 결정하는데 필요하다. 우물의 완공 직후에 실시하는 시험은 임시로 설치한 양수기를 사용하게 되므로 휘발유 또는 디젤을 사용하는 발동기를 쓰는 경우가 많다. 발동기의 고장, 정기적인 연료공급, 발동기의 정비 등 여러 가지 문제로 일정한 양수율을 장기간 유지한다는 것은 그리 쉬운 일이 아니다.

단기간의 양수시험 결과로 우물의 장기 생산력을 추리하는 것은 매우 어려운 일이다. 장기생산력을 추리하는데 고려해야할 가장 중요한 두 가지 요소는; (1) 일정한 양수율로 시험기간보다 오랜 기간 양수할 때 생산력의 감소이고, (2) 정수면의 하강 때문에 생기는 생산력의 감소이다.

우물완공 직후에 실시한 시험이 양수우물 하나만을 이용했거나 또는 양수율을 일정하게 유지하지 못한 경우에 그 우물의 장기생산력은 비양수량을 근거로 결정한다. 비양수량은 단위수두경사에 해당하는 우물의 생산력인데 이는 일정한 양수기간 후(일반적으로 24 시간 후)에 단위수두강하에 대응하는 양수량을 말한다. 따라서 양수를 시작하여 24 시간이 지난 후 양수율과 수두강하를 동시에 측정한 다음 측정한 양수율을 수두강하로 나눈 것이 비양수량이다.

$$\text{비양수량} = \frac{\text{양수율}}{\text{수두강하}} = \frac{Q}{s_t} \quad (4-63)$$

예를 들면 어떤 우물을 5,450 m³/(일)의 양수율로 일정한 시간 양수한 후에 9.1 m의 수두강하를 측정했다면 비양수량은 5,450/9.1, 즉 599 m²/(일)가 된다.

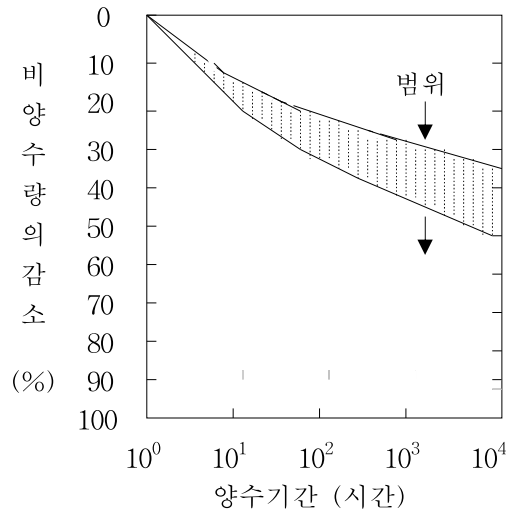


그림 4-15 양수시간과 비양수량의 감소

균질, 등방성 대수층의 경우 그림 4-15에서와 같이 비양수량은 양수시간이 길수록 감소한다. 예를 들어 양수시작 1 시간 후에 비양수량을 100 %라 하면 같은 유로 1 년간 양수한 후에는 비양수량은 약 40 %가 감소됨을 알 수 있다.

우물의 장기 생산력을 예측하려면 계절적인 함양의 변화에 의한 정수면의 변화와 양수 이외에 다른 유출로 인한 수두강하도 고려해야 한다. 따라서 우물의 장기 생산력은 비양수량에서 자연적인 수두강하로 인한 생산력을 감한 나머지에 유효수두를 곱한 것과 같다. 유효수두란 불압대수층의 경우 포화상태에 있는 대수층의 두께의 약 2/3에 해당하는 수두이고, 피압대수층의 경우 내압수두면과 대수층의 위 한계 사이의 수두를 말한다.

일반적으로 비양수량은 아래의 요소와 밀접한 관계가 있다.

- (1) 우물에 물을 공급하는 부분의 대수층의 투수량계수 (이는 우물의 수수망에 의해 변하며 일반적으로 대수층의 투수량계수보다 작은 값이다)
- (2) 대수층의 저류계수
- (3) 양수기간
- (4) 우물의 유효반경 (이는 우물의 반경보다 훨씬 크다)
- (5) 양수율

위의 요소 중 (1), (2), (3), (4)가 비양수량에 주는 영향은 Theis해법을 적용해서 평가할 수 있고, 마지막 (5)의 영향은 단계적 양수시험이나 양수우물과 관측우물을 이용한 양수시험 결과가 있어야 결정할 수 있다.

위에 열거한 바와 같이 우물의 비양수량은 대수층의 투수계수와 우물완공에 따른 다른 여건에 의해 결정된다. 따라서 양수시험을 한적이 없는 우물도 일반적으로 비양수량은 알고 있기 때문에 이를 이용해서 투수량계수를 추리할 수가 있다(그림 4-16). 비양수량으로부터 투수량계수를 결정하기 위해 수정한 Theis 해법은,

$$T = \frac{W(u)}{4\pi} \frac{Q}{s} \quad (4-64)$$

여기서, $u = \frac{r^2 S}{4Tt}$

T = 투수량계수

Q/s = 는 비양수량

Q = 양수율

s = 수두강하

W(u) = 우물함수

r = 우물의 유효반경(effective radius)

S = 저류계수

t = 비양수량을 결정하기 이전까지의 양수기간

식 4-64의 W(u)/4π를 상수로 생각하면 편리한데 그렇게 하려면 먼저 u(또는 1/u)의 값을 정하고 부록 4-1 또는 4-2에서 이에 대응하는 W(u)의 값을 정해야 한다. 이때 u의 값은 그 지역의 대표적인 조건에 합당한 T, S, r, t의 값을 u를 나타내는 식에 삽입하여 결정하면 된다.

위에서 살펴본 이론을 근거로 시간-수두강하 방법 또는 거리-수두강하 방법을 응용하여 비양수량 또는 투수량계수를 추리하기도 한다. 이와 같은 추리방법은 평균적인 우물의 지름, 양수기간, 그리고 전형적인 저류계수를 가정하여 결정한 비양수량 또는 투수량계수를 이용하여 다른 방법으로 결정한 이들의 값을 점검하는데 쓰인다.

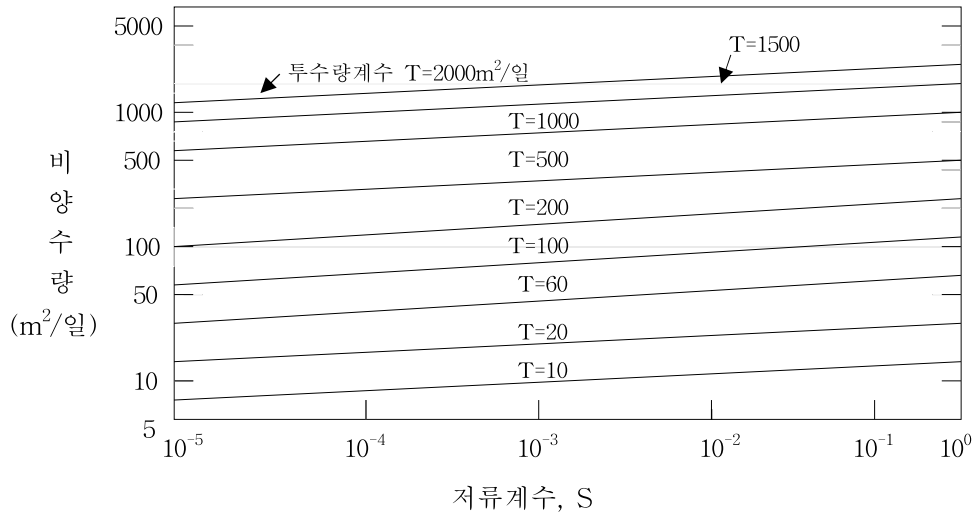


그림 4-16 비양수량과 투수량계수

Jacob의 시간-수두강하 방법의 식은(식 4-53), $s = \frac{2.30Q}{4\pi T} \log \frac{2.25Tt}{r^2S}$ 이므로 이를 다시 배열하면,

$$\frac{Q}{s} = \frac{4\pi T}{2.30 \log \frac{2.25Tt}{r^2S}} \quad (4-65)$$

4.3.6. 수두강하와 우물손실(well loss)

가장 실용성이 있는 양수시험결과는 양수우물과 관측우물에서 측정한 양수에 대한 대수층의 반응, 즉 수두강하 또는 수두회복이다. 이런 시험을 흔히 균정(multiple well) 양수시험이라 한다. 때에 따라선 양수우물 자체만으로 양수시험을 해야할 때가 있고 양수우물에서 측정한 시험 결과만으로 대수층의 수리학적 성질을 결정해야 한다.

이와 같은 단일정(single well) 양수시험 결과를 분석하려면 양수우물에서의 수두강하의 성격을 좀더 자세히 알 필요가 있다. 그림 4-17에서 보는바와 같이 대부분의 경우 전체수두강하 s_T 는 두 개의 성분을 가졌는데; (1) 대수층 안에서의 수두강하 s_a 이고 (2) 물이 대수층에서 우물로 들어갈 때와 우물 안의 물이 위로 올라가 양수기 안으로 들어 갈 때 생기는 수두강하 s_w 이다. 따라서 양수우물 안에서의 수두강하는 우물과 인접하고 있는 대수층 안에서의 수두강하보다 심하다.

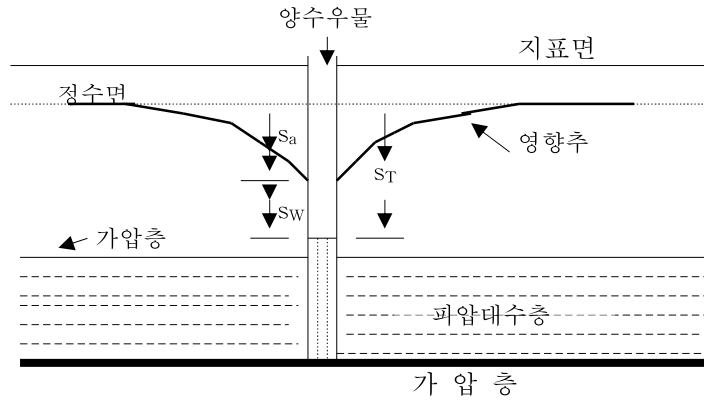


그림 4-17 단일 우물 양수시험

우물 안에서의 전체수두강하 s_T 를 수식으로 표현하면,

$$s_T = s_a + s_w \quad (4-66)$$

여기서, s_a = 우물의 유효반경에서의 대수층 수두강하(이를 대수층손실, formation loss,이라고도 함)

s_w = 우물손실(well loss)

식 4-66에서 대수층손실은 물이 대수층에서 흐를 때 마찰 때문에 생기는 현상이고, 이는 양수율과 1차 함수적인 관계를 가졌다. 반면에, 우물손실은 물이 대수층에서 우물로 들어갈 때 물의 흐름이 층류에서 난류로 변하기 때문에 일어나는 현상으로, 이는 양수율과 2차 함수적인 관계를 가졌다. 따라서 식 4-66은 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$s_T = BQ + CQ^2 \quad (4-67)$$

여기서, Q = 양수율

B = 대수층의 수리학적 성질과 양수시간에 지배되는 어떤 요소

C = 우물의 성질과 관련되는 어떤 요소

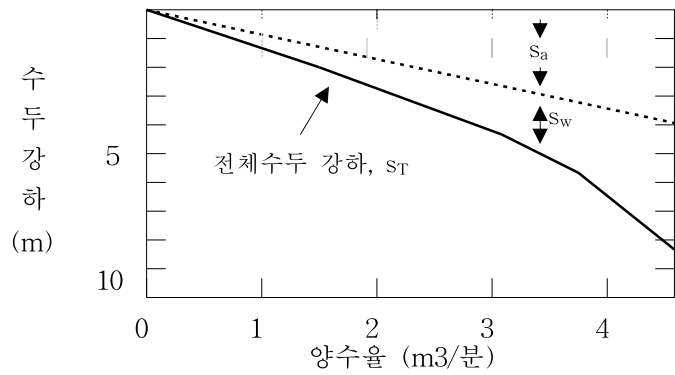


그림 4-18 양수율-수두강하 관계

식 4-67에 의하면 양수우물 안에서의 수두강하는 양수율과 비례한다. 방출되는 물이 대수층의 저류로부터 공급되는 한 대수층손실을 나타내는 BQ항의 B는 양수시간이 증가함에 따라 증가한다. 그 반면에 우물의 성질이 변하지 않는 한 우물손실을 나타내는 CQ^2 의 C는 양수시간과 관계없이 일정하다. 그러나 우물손실항이 양수율의 제곱과 비례하기 때문에 우물손실로 인한 수두강하는 양수율이 증가함에 따라 급격히 증가한다. 그림 4-18은 양수율과 대수층손실, 우물손실 그리고 전체 수두강하와의 관계를 나타내고 있다. 우물손실이 양수우물의 수두강하에 끼치는 영향을 정확히 아는 것은 시험결과를 분석하는데 중요할 뿐 아니라 급수용 우물을 설계하는 데도 매우 중요하다.

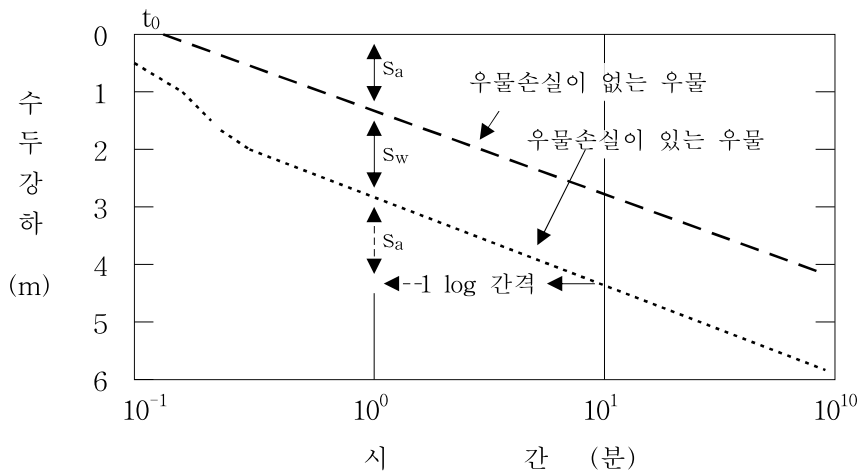


그림 4-19 단일정 양수시험 분석

식 4-67에서 C 는 대부분의 경우 일정하므로 양수율이 일정하면 CQ^2 전체가 일정하게 된다. 그러므로 우물손실 s_w 는 양수우물 안에서의 전체수두강하 s_T 는 증가시키지만 시간에 따른 수두강하율과는 관계가 없다. 따라서 양수우물에서 측정된 수두강하 값을 그림 4-19에서와 같이 반대수방안지를 사용한 Jacob의 시간-수두강하 방법(식 4-56)으로 분석하여 대수층의 투수량계수를 결정할 수가 있다.

양수우물에 우물손실이 있으면 그 우물에서 측정된 수두강하 값으로 시간-수두강하 직선을 적용하여 저류계수를 구할 수가 없다. 실제로 우물손실이 없더라도 양수우물에서 측정된 시험결과로 저류계수를 결정하면 우물의 유효반경이 정상적인 유효반경과 많은 차이가 있기 때문에 저류계수 값에 큰 오차가 있게 된다.

4.3.7. 단계적 수두강하 시험(step drawdown test)

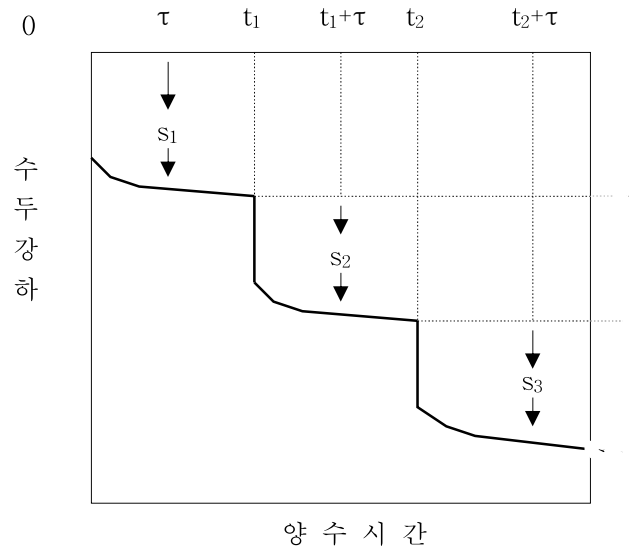


그림 4-20 단계적 수두강하 시험

지금까지 살펴본 양수시험분석에 관한 이론은 시험중의 지하수의 흐름이 층류라는 전제하에 성립한다. 흐름이 층류이면 수두강하는 양수율과 1차 함수적 관계를 갖게 된다. 그러나 때에 따라서 양수율이 너무 높으면 대수층으로부터 우물로 들어가는 흐름의 속도가 난류인 경우가 종종 있다. 이와 같은 난류의 경우 수두강하와 양수율과의 1차 함수적 관계는 무너지고 수두강하의 일부가 양수율과 1차 함수 이상의 어떤 고차 함수적 관계를 갖게 된다.

가장 이상적인 양수율이나 양수기의 적절한 깊이를 결정하기 위해서 고의적으로, 또는 때에 따라선 양수시험중 양수율을 일정하게 유지하기가 어렵기 때문에 양수율을 단계적으로 변화하여 시험을 실시하는 경우가 있는데 이와 같은 시험을 단계적 수두강하 시험이라 한다. 특히 이와 같은 시험은 수두강하중 층류와 난류에 해당하는 부분을 분리하는데 많이 사용된다.

단계적 수두강하 시험은 어떤 양수율 Q_0 으로 시험을 시작하여 일정 기간, 즉 $t_1 - t_0$ 동안 계속하며 이때의 수두강하를 측정 한 후 양수율을 Q_2 로 변경하여 양수기간 $t_2 - t_1$ 동안 양수하며 같은 방법으로 수두강하를 측정한다. 일반적으로 5-8번 가량 양수율을 증가하게 되는데 한 양수율로 약 2 시간 가량 양수하는 것이 통례이다. 이때 주의해야 할 것은 가급적 각 단계의 양수기간을 똑 같이 하는 것이 시험결과를 분석하는데 편리하다(그림 4-20).

피압대수층에 완공한 가장 이상적인 우물에서의 층류인 경우, 수두강하와 양수율과의 관계는 식 4-53에서 $s = \frac{2.30Q}{T} \log\left(\frac{2.25Tt}{r^2S}\right)$ 으로 표현하였다. 이 식은 우물손실을 생각하지 않은 대수층만의 수두강하이므로 이를 간소화하면,

$$s = BQ \quad (4-68)$$

$$\text{여기서, } B = \frac{2.30}{T} \log\left(\frac{2.25Tt}{r^2S}\right)$$

실제로 위와 같은 우물손실이 전혀 없는 이상적인 경우는 매우 드물고 대부분의 수두강하는 층류로 인한 것과 난류로 인한 것을 내포하고 있으므로 이들을 포함한 수식은 앞에서 이미 살펴본 바와 같이 $s = BQ + CQ^2$ 로 표현한다. 이 식에서 BQ를 층류 항(term) 혹은 대수층손실 항이라 하고 CQ^2 를 난류 항 또는 우물손실 항이라 하는데, 이는 우물의 불실 함이 주원인이기 때문이다. B와 C를 결정하기 위해 앞에 식을 Q로 나누어 단위 양수율에 해당하는 수두강하, 즉 비수두강하(specific drawdown)로 표현하면,

$$\frac{s}{Q} = CQ + B \quad (11-69)$$

위 식에서 s/Q 와 Q가 1차 함수적 관계를 가졌음을 알 수 있다. 따라서 s/Q 대 Q를 점시하면 절편이 B이고 경사가 C인 직선이 되고 이로부터 B와 C를 결정할 수 있다.

식 4-69의 역, 즉 비양수량을 Q/s 로 표현하면 이는 난류의 경우에 양수율 증가에 따른 비양수량의 감소를 보여준다.

$$\frac{Q}{s} = \frac{1}{CQ + B} \quad (4-70)$$

흔히 단계적 수두강하 시험을 통해 층류로 인한 수두강하와 전체수두강하의 비율을 결정하는데 이 비율을 백분율로 표현하면 아래와 같다.

$$L_s = \frac{BQ}{BQ + CQ^2} \times 100 \quad (4-71)$$

여기서, L_s = 전체수두강하 중 층류로 인한 수두강하의 백분율

이와 같은 단계적 수두강하 시험을 통해 얻은 결과를 분석하여 대수층의 성질을 결정하려면 양수기간 중의 측정된 수두강하 s 대신 s/Q , 즉 단위 양수율에 해당하는 수두강하인 비수두강하를 이용함으로써 이미 기술한 시간-수두강하 방법이나 거리-수두강하 방법을 적용할 수 있다. 이에 따라 시간-수두강하 방법의 식 4-55와 거리-수두강하 방법의 식 4-17은 각각 아래와 같이 변경할 수 있다.

$$T = \frac{2.30}{4\pi} \frac{1}{\Delta(s/Q)} \quad (4-72)$$

$$T = \frac{2.30}{2\pi} \frac{1}{\Delta(s/Q)} \quad (4-73)$$

이들 식에서 $\Delta(s/Q)$ 는 t^{\wedge} 와 r^{\wedge} 의 한 대수간격에 대응하는 비수두강하의 값이다. t^{\wedge} 와 r^{\wedge} 은 양수시간 t 와 관측점 까지의 거리 r 의 대수적 평균(logarithmic mean)인데 이는 양수율을 일정하게 유지했을 경우에 실제로 측정된 수두강하 값과 같은 수두강하를 얻을 수 있는 시간과 거리를 말한다. 단계적 수두강하 시험 결과를 분석하여 저류계수를 결정하려면 앞에서 기술한 시간-수두강하 방법이나 거리-수두강하 방법을 그대로 적용하면 되는데, 이는 저류계수를 나타내는 식 4-57과 4-58이 양수율과는 아무런 관계가 없기 때문이다.

단계적 수두강하 시험 분석 과정:

- (1) 시간-수두강하 또는 거리-수두강하 방법에서의 t, r, s 를 각각 $t^{\wedge}, r^{\wedge}, s/Q$ 로 대치한다
- (2) 실제의 양수시간인 t_n 에 대응하는 대수적 평균시간 t_n^{\wedge} 을 다음과 같이 결정한다
 - (a) t_n 이전의 각 단계마다 증가한 양수율($\Delta Q_0, \Delta Q_1, \dots, \Delta Q_{n-1}$)과 증가가 시작한 때와 t_n 사이의 시간의 대수($\log(t_n - t_0), \log(t_n - t_1), \dots, \log(t_n - t_{n-1})$)를 곱한다
 - (b) 각 단계마다 결정한 위의 값을 전부 합한다 [$\sum\{\Delta Q_i \times \log(t_n - t_i)\}$]
 - (c) 시간 t_n 에서의 실제 양수율은 (b)에서 결정한 합을 각 단계의 양수율의 증가율을 합한 값으로 나누면 된다 [$\sum\{\Delta Q_i \times \log(t_n - t_i)\} / \sum\{\Delta Q_i\}$]
 - (d) (c)에서 얻은 값의 반 대수 값을 취하면 이는 t_n^{\wedge} 의 값이 된다
- (3) (2)와 같은 방법으로 r_n^{\wedge} 을 결정한다

아래의 계산은 대수적 평균을 결정하는 과정의 보기이다.

[단계적 수두강하 시험 분석 보기]

첫째 단계: 시간 $t_0 = 0$ 에 양수율 $Q = 300$ ($m^3/일$)으로 양수를 시작하여 1 시간 계속 하고,

둘째 단계: 시간 $t_1 = 60$ (분)에 양수율 $Q = 500$ ($m^3/일$)으로 증가하여 3시간 양수한 후에,

셋째 단계: 시간 $t_2 = 240$ (분)에 다시 양수율 $Q = 400$ ($m^3/일$)으로 감소하여 60 분간 양수한 후, $t_3 = 300$ (분)에 양수를 정지했다.

$t_n - t_i$ (분)	$\log(t_n - t_i)$	ΔQ_i	$\Delta Q_i \times \log(t_n - t_i)$	$\sum\{\Delta Q_i \times \log(t_n - t_i)\} / \sum\Delta Q_i$	t^{\wedge} (분)
$t_3 - t_0 = 300$	2.477	300	743.1		
$t_3 - t_1 = 240$	2.380	200	476.0		
$t_3 - t_2 = 60$	1.778	-100	-177.8		
		+	+	2,603	400
		400	1,041.3		

따라서 계산할 때에는 실제의 양수시간 $t_n = 300$ (분)을 계산한 양수기간인 $t^{\wedge} = 400$ (분)으로 대치해야 한다.

4.4. 우물간의 간섭(well interference)

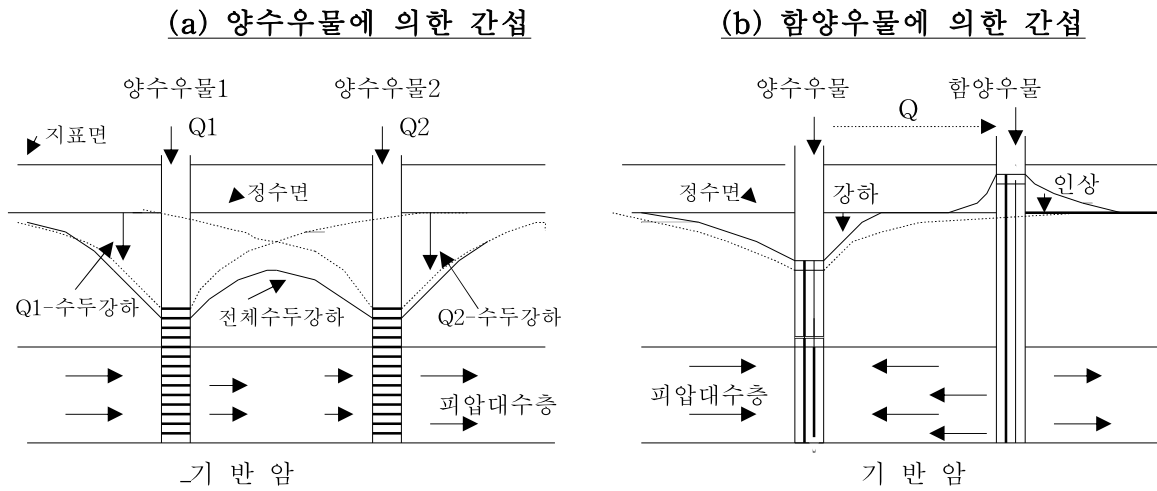


그림 4-21 양수우물(a)과 함양우물(b)의 간섭

우물을 양수하면 그 우물주위의 지하수면이 하강하고 이에 따라 하나의 영향추를 형성한다. 이와 반대로 어떤 우물에 물을 투입하면 지하수면이 상승하고 이에 따라 상승추(cone of impression)를 형성한다. 또한 어떤 대수층에서 양수로 인한 수두강하(s)는 양수율(Q)과 양수시간(t)에 정 비례하고, 투수량계수(T), 저류계수(S) 그리고 양수우물로부터 관측점까지의 거리에 자승(r^2)과 역 비례한다. 이를 수식으로 표현하면,

$$s = \frac{Q, t}{T, S, r^2} \quad (4-74)$$

만일 양수우물이 밀집해 있으면 한 우물에서의 양수로 인해 그 주위에 있는 다른 양수우물에 수두강하를 초래하게 된다. 수두강하는 누적됨으로 어떤 양수우물의 수두강하는 그 자체의 양수로 인한 것과 그 주위의 다른 우물의 양수로 인한 것과의 합한 것이 된다(그림 4-21a). 이때 다른 우물의 양수로 인한 수두강하를 우물간섭이라 한다.

한 지점에서 대수층이 양수와 함양의 영향을 동시에 받는다면 수면의 변화는 양수율과 함양율에 의한 수두변화의 차이와 같아야 한다. 따라서 만일 양수율과 함양율이 같다면 이 두 우물의 중간 지점에서는 수두강하와 수두상승이 삭제되어 정수면을 일정하게 유지할 수 있다(그림 4-21b).

식 4-74에 의하면 우물간섭이 없는 경우 양수우물의 유효반경 내에서 대수층의 수두강하는 양수율에 정비례한다. 반대로 말하면 최대한의 양수율은 유효수두에 비례한다. 피압대수층의 경우 유효수두는 양수이전의 내압수두면과 대수층의 위 경계간의 거리이고, 불압대수층의 경우 양수 이전의 포화상태에 있는 대수층의 60%를 말한다.

어떤 우물의 양수율이 대수층의 유효수두의 일부에만 영향을 줄 때 다른 우물에 의한 우물간섭은 양수깊이를 증가시켜 결과적으로 양수비용을 증가시킨다. 우물간섭은 유효수두를 감소하기 때문에 우물의 최대 생산력이 또한 감소된다. 따라서 우물간섭은 각 우물에서 최대한의 양수를 해야 할 정장(well field)을 설계하는데 매우 중요한 문제이다. 식 4-74에서 볼 수 있는 것과 같이 두 우물간의 우물간섭은 이들 간의 거리에 자승과 역 비례한다. 따라서 지나친 우물간섭은 우물간의 거리를 조정함으로써 어느 정도 피할 수 있다.

4.5. 대수층 경계(aquifer boundaries)

4.5.1. 대수층 경계의 종류

Theis해법과 다른 모든 지하수흐름의 기본방정식은 대수층이 무한하다는 전제하에 개발되었으나 실제로 그런 대수층은 있을 수 없다. 그러나 많은 대수층이 광범한 영역을 차지하고 있으며 양수에 의한 영향이 대수층의 유출(discharge)과 함양(recharge) 경계에 미치려면 수년이 걸리기도 한다. 따라서 양수로 인해 유출되는 물은 대수층의 저류로부터 공급되므로 수두는 수 년 동안 계속해서 강하게 된다

대부분의 대수층은 수직과 수평경계가 있는데 수직경계의 예로는 지하수면, 다른 대수층간의 접촉면, 기반암과의 경계등이고, 수평경계는 대수층을 절단하고 있는 하천이나 단층 등을 들 수 있다. 수력학적으로 대수층의 경계는; (1) 함양성 경계(recharge boundary)와 (2) 불투수성 경계(barrier boundary)의 두 가지가 있다. 함양성 경계는 그 경계에 따라 유선이 시작되는 경계인데 이는 어떤 특수한 수력학적 조건하에서 대수층의 함양원 역할을 한다. 이런 경계의 예로써 대수층이 영구적인 하천 또는 바다와 접하고 있는 경우이다. 불투수성 경계는 유선이 횡단할 수 없는 경계이다. 이와 같은 경계는 대수층의 한계가 불투수성의 물질과 접하는 곳과 일치하는 경우이다. 이런 경계의 예로서 모래로 된 대수층이 점토층과 만날 때이다. 대수층경계의 위치와 성질은 지하수 오염물의 이동과 생태 그리고 양수에 대한 대수층의 반응과 관련된 여러 가지 지하수의 문제를 해결하는데 매우 중요하다. 예를 들면 수두경사의 방향에 따라 어떤 개천이 오염의 근원이 될 수도 있고 오염물의 수용지가 될 수도 있다.

영향추 이내에 있는 대수층의 수평 경계는 양수로 인한 대수층의 반응에 심한 영향을 준다. 이와 같은 수평경계의 영향을 분석하거나 예측하려면 대수층이 무한한 것처럼 해야 하는데 이를 성취하기 위해 영상우물(image well)과 영상이론(image theory)을 적용한다. 그림 4-22는 영상우물이 어떻게 함양과 불투수성 경계의 영향을 보상하는지를 보여주는 평면과 단면도이다(우물간섭 참조).

함양성 경계의 기본요점은 그 경계 밖에서는 양수의 영향을 받지 않으며 따라서 수두강하가 없다는 점이다. 대수층과 접하고있는 하나의 영구하천은 함양성 경계인데 그 이유는 대수층으로부터의 양수는 이 하천으로부터 함양을 초래하기 때문이다.

(a) 함양성 경계

(b) 불투수성 경계

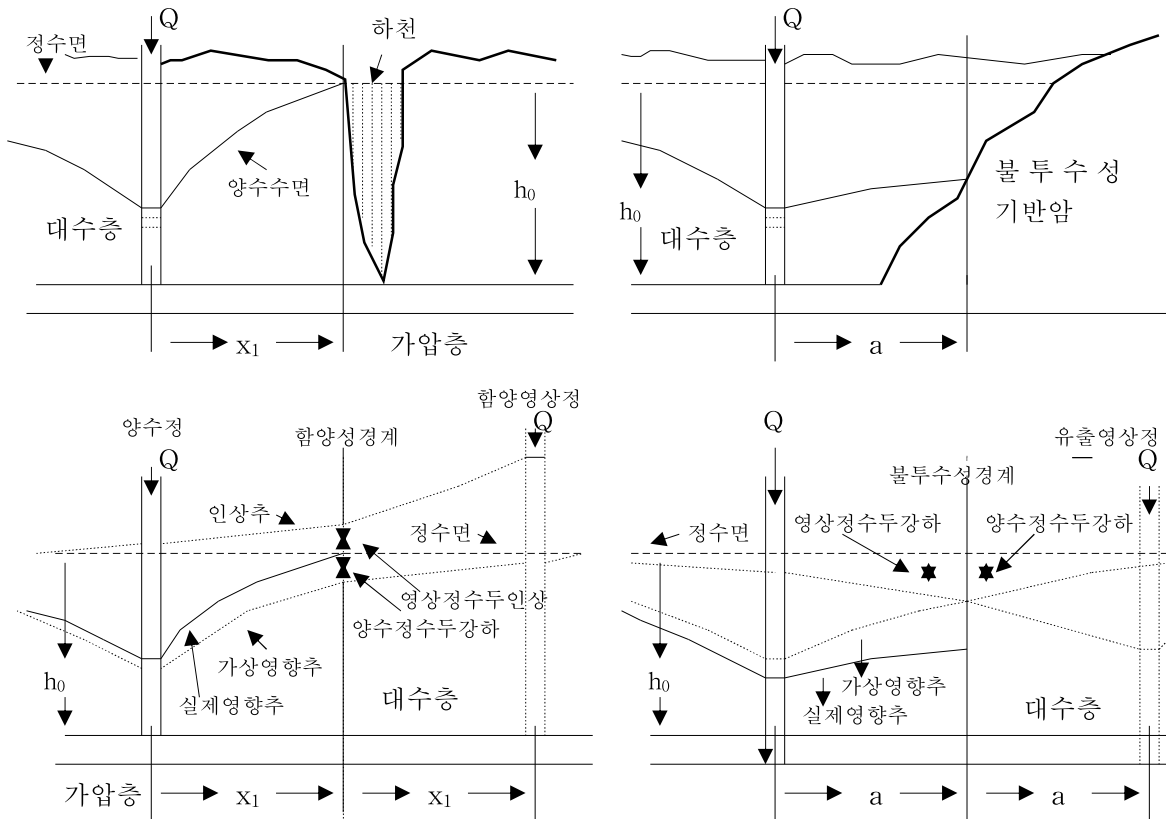


그림 4-22 함양성 경계(a)와 불투수성 경계(b)

함양경계의 수력학적 영향은 영상의 함양우물이 그 경계선을 기준으로 실제우물과 대칭 되는 위치에 있다고 가정하므로 써 재연할 수 있다. 물을 양수우물에서 양수와 같은 시간에 같은 율로 영상의 함양우물에 투입한다고 생각한다(그림 4-22a). 이 때에 유선은 함양성 경계에서 시작하고 등포텐셜선은 경계와 거의 평행하다.

불투수성 경계의 특징은 그 경계를 횡단해서 물이 흐를 수 없다는 점이다. 이러한 경계는 불유통 경계(no flow boundary)라고도 하는데 이는 마치 지하수면 또는 내압수두면의 분기선(divide)과 같다(그림 4-22b). 이와 같은 불투수성의 영향은 위에서 말한 영상의 함양우물과 같은 위치에 영상의 유출우물이 있다고 가정하면 된다. 이때 이 영상의 유출우물은 실제의 양수우물과 같은 시간에 같은 율로 지하수를 유출하는 셈이다. 이에 따른 유선은 불투수성 경계와 거의 평행하고 등포텐셜선은 이 경계와 수직으로 교차한다.

영상우물에 관한 이론은 대수층 근처에 정장(well field)을 설계하는데 매우 중요한 이론이며, 양수로 인한 수두강하를 최소한으로 줄이려면 아래와 같은 조건을 적용해야 한다.

- (1) 양수우물은 가급적으로 함양성 경계에 가까이 그리고 이와 평행하게 위치한다
- (2) 양수우물은 불투수성 경계로부터 가급적 멀리 그리고 이와 수직으로 위치해야 한다

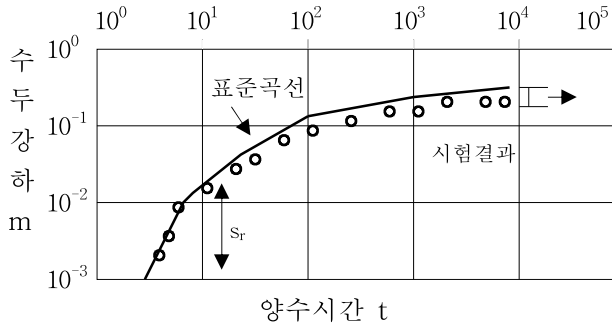
지금까지 살펴본 대수층의 경계는 함양 또는 불투수성의 경계가 하나밖에 없는 경우이다. 그러나 실제로는 다른 성격의 경계가 동시에 또는 같은 성격의 경계가 여러 개 있을 수 있는데, 이런 경우도 같은 영상이론을 적용하여 분석할 수가 있다.

4.5.2. 대수층경계와 양수시험

대수층경계 근처에서 양수시험을 하면 수두경사 측정값이 Theis의 표준곡선 또는 Jacob의 방법에 필요한 직선으로부터 이탈하게 된다. 그리고 이 경계의 영향이 그 근처에 다른 우물, 즉 영상우물 때문에 생기는 현상이라고 가정한다(대수층의 경계 참조). 따라서 함양성 경계는 함양우물이 경계선을 기준으로 실제 우물과 대칭 되는 위치에서 실제우물과 같은 기간에 같은 율로 물을 투입하기 때문에 수두경사에 주는 영향과 같은 것임을 이미 살펴본바 있다. 같은 이론으로 불투수성 경계인 경우에는 함양우물이 아니고 영상양수우물이 있다고 보는 것이다.

대수층경계의 영향을 받은 양수시험결과를 분석하려면 양수우물로부터 비교적 가까운 거리에 있는 관측우물에서 양수시험 초기에 측정한 수두강하 값 즉, 대수층경계의 영향을 받기 이전의 측정값을 이용하여 대수층의 투수량계수와 저류계수를 앞에서 이미 설명한 Theis해법이나 Jacob의 방법으로 결정한다(그림 4-23).

(a) 함양성 경계



(b) 불투수성 경계

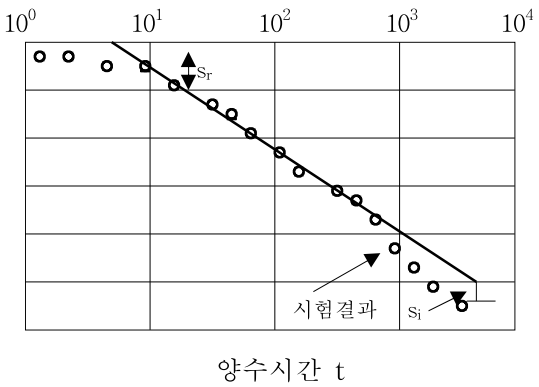
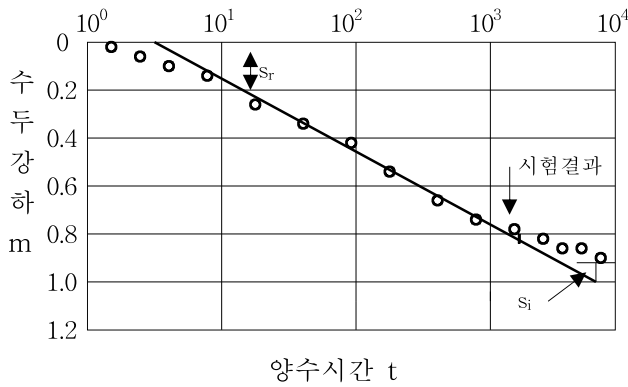
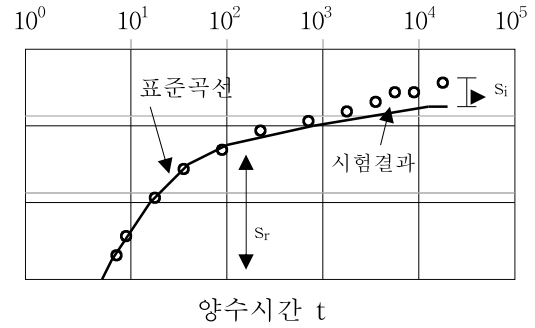


그림 4-23 대수층 경계와 양수시험 결과

시험결과를 나타내는 곡선의 일부가 대수층의 경계의 영향 때문에 Theis의 표준곡선에서 이탈하는 경우, 이 이탈한 부분의 표준곡선에 대한 상대적 위치에 따라서 대수층경계의 종류를 알 수 있다. 만일 이탈한 부분이 표준곡선 위에 있으면, 즉 그 부분의 수두강하가 표준곡선에 비해 작으면 이는 함양성 경계를 의미하고(그림 4-23a) 표준곡선 아래쪽, 즉 그 부분의 수두강하가 표준곡선보다 심하면 불투수성의 경계를 의미한다(그림 4-23b).

Jacob의 방법에 의하면 양수시험 시작 후 얼마가 지나면 반대수방안지에 점시한 수두강하 값이 한 직선을 나타내게 된다(그림 4-23에서 s_r 에 해당하는 부분). 직선을 나타내기 시작하는 시간은 대수층의 투수계수, 저류계수, 그리고 양수우물과 관측우물간의 거리에 자승한 값과 관련이 있다. 따라서 이 첫 번째 직선의 수두경사를 Jacob의 방법에 삽입하여 투수량계수 T 와 저류계수 S 를 결정한다. 만일 대수층경계가 있으면 수두강하 값은 이 첫 번째 직선으로부터 이탈하여 경사가 다른 두 번째 직선 상에 있게 된다(그림 4-23에서 s_i 에 해당하는 부분).

4.5.3. 대수층경계의 거리와 방향

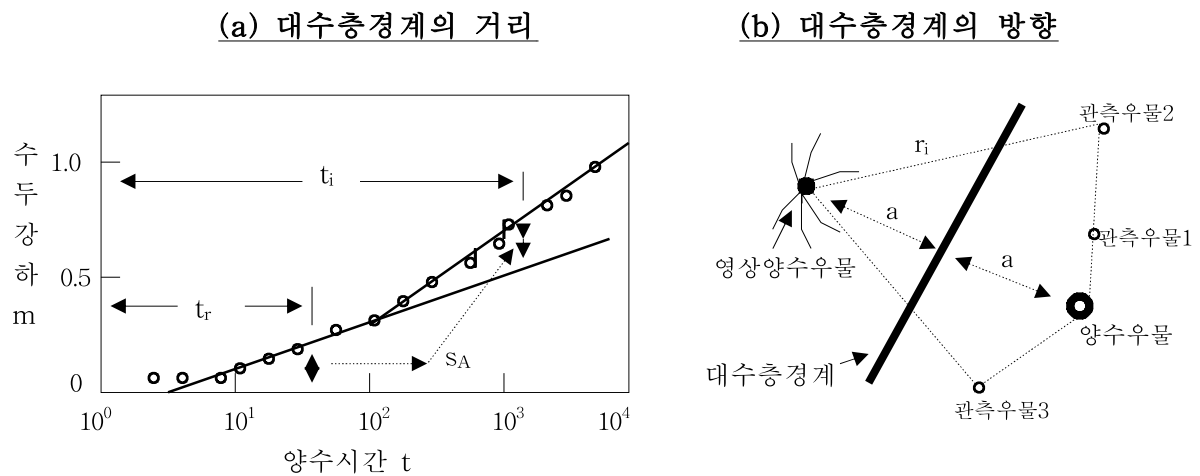


그림 4-24 대수층 경계의 거리와 방향

대부분의 대수층경계의 위치는 비교적 쉽게 알 수 있다. 예를 들어 가장 흔히 볼 수 있는 함양성 경계는 하천, 호수 등 따위이고 불투수성 경계는 계곡의 벽을 이루고 있는 불투수성의 기반암과 같은 경우이다. 그러나 이들의 거리는 그리 쉽게 알 수 없는 경우가 많다. 이 때 양수시험 결과를 분석하여 대수층 경계까지의 거리를 결정할 수 있다. 대수층이 균질이면(투수량계수와 저류계수가 대수층의 어느 곳에서나 일정), $u = 1.87r^2S/Tt$ 로부터,

$$\frac{1.87S}{T} = \frac{u_r}{r_r^2/t} = \frac{u_i}{r_i^2/t} \quad (4-75)$$

그림 4-24a에서와 같이 실제우물에 의한 수두강하와 영상우물에 의한 수두강하 값이 같게 취하면 즉, $s_r = s_i$ 이면 아래와 같은 열전도의 “시간의 법칙(law of time)”을 얻을 수 있다.

$$\frac{r_r^2}{t_r} = \frac{r_i^2}{t_i} \quad (4-76)$$

여기서, r_r = 은 양수우물과 관측우물간의 거리

r_i = 관측우물과 영상우물간의 거리

t_r = 실제우물에 의한 관측우물에서의 수두강하 s_r 를 측정한 시간

t_i = 영상우물에 의한 관측우물에서의 수두강하 s_i 를 측정한 시간

식 4-76을 영상우물까지의 거리로 표현하면,

$$r_i = r_r \sqrt{\frac{t_i}{t_r}} \quad (4-77)$$

또는

$$r_i = r_r \frac{\sqrt{r_r^2/t_r}}{r_i^2/t_i} \quad (4-78)$$

영상우물은 관측우물을 중심으로 해서 r_i 를 반경으로 한, 하나의 원주 위에 있음을 알 수 있다. 대수층경계로부터 영상우물과 실제우물의 거리는 같으므로 경계는 영상우물과 양수우물간의 거리의 중간 점에 있다(그림 4-24b). 만일 대수층경계가 하천이나 계곡의 벽 같이 경계의 위치가 자명하면 하나의 관측우물에서 계산한 거리만 알면 된다. 그러나 경계의 방향을 알지 못하는 경우 최소한 3 개의 관측우물에서 경계까지의 거리를 알아야 그 경계의 방향을 결정할 수 있다. 3 개의 관측우물로부터 영상우물까지의 거리를 이용해서 3개의 원을 그린다음 이 원들이 서로 교차하는 한 점이 영상우물의 위치이고 대수층의 경계는 이 점과 양수우물을 연결한 직선의 중간지점에 있다(그림 4-24b).

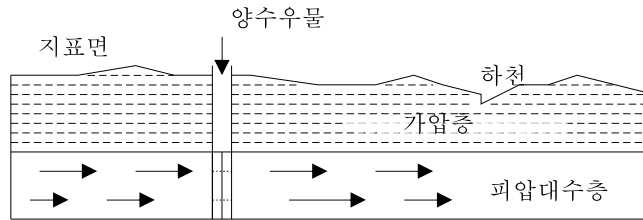
4.6. 누수가압층(leaky confining bed)의 영향

Theis해법을 적용한 양수시험결과의 분석은 유출되는 물 전체가 양수와 동시에 대수층의 저류로부터 공급된다는 전제하에 행해진다. 따라서 최소한 양수시험기간에 대수층의 위 또는 아래에 있는 가압층으로부터 대수층으로의 물에 유동이 없거나 무시할 수 있을 정도로 적은 양이어야 한다. 대부분의 피압대수층의 경우 이와 같은 전제는 성립되나 많은 대수층이 누수가압층과 인접하는 경우도 적지 않아서 양수에 반응하여 물이 이들 가압층을 통해 대수층으로 흐르게 되는 경우가 많다. 이와 같은 경우 양수로 인한 수두강하는 Theis해법에 의한 예측과 다르고 이 때문에 Theis해법을 직접 적용할 수가 없다.

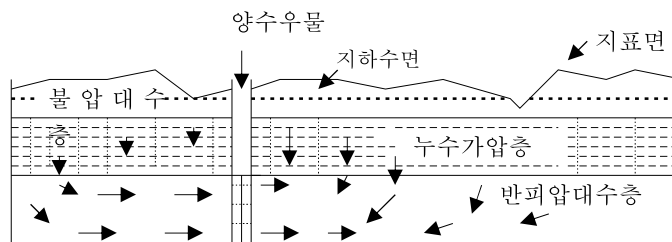
그림 4-25a는 하나의 피압대수층이 두꺼운 불투수성의 가압층과 접하고 있어 양수로 인한 물의 유출은 전적으로 대수층에 저류된 물로부터 공급됨으로 이런 대수층에서 행한 양수시험결과는 Theis해법이나 Jacob의 방법으로 분석하면 된다. 그림 4-25b는 하나의 대수층이 두꺼운 누수가압층과 접하고 있어 양수시험중이 가압층으로부터 많은 양의 물이 대수층으로 공급되는 경우이다. 앞서 말한바와 같이 이런 대수층을 반피압대수층이라 하며 가압층으로부터 대수층으로 흐르는 물 때문에 양수시험결과를 분석하려면 누수현상을 고려해야 한다. 그림 4-25c는 한 대수층이 얇은 가압층과 접하고 있어 이 가압층에서 대수층으로 흐르는 물은 무시할 수 있으나 이 가압층의 투수성 때문에 그 위에 있는 불압대수층의 물이 밑에 있는 반피압대수층으로 쉽게 흐를 수 있는 경우이다.

누수현상이 있는 대수층시험결과를 분석하려면 Theis해법과 같은 원리로 표준곡선을 이용한 도표중첩방법을 적용해야 한다. 그러나 Theis해법이 하나의 표준곡선을 가진 반면에 누수현상이 있는 시험결과를 분석하는 표준곡선은 여러 개의 곡선으로 되었으며 이들 개개의 곡선은 각각 다른 조건에 대수층과 가압층의 수리학적 성질을 반영하는 것이다.

(a) 누수현상이 없는 경우



(b) 가압층으로부터 누수



(c) 가압층을 통한 누수

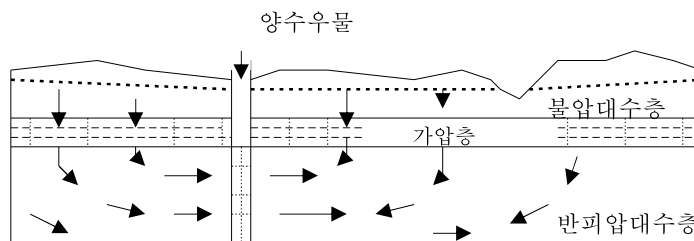


그림 4-25 누수현상

양수시험 중 가압층에 저류 되어 있는 물이 그 밑에 대수층으로 흐를 때(그림 4-25b) 수두강하 측정값 s 와 이에 대응하는 t 를 양대수방안지에 점지하여 그림 4-26a에서 보는 소위 Hantush의 표준곡선과 중첩하여 하나의 합치점을 택한다. 그리고 그 합치점에서 4 개의 좌표 값을 취한 후 아래의 식을 이용하여 투수량계수 T 와 저류계수 S 를 결정한다.

$$T = \frac{QH(u, \beta)}{4\pi s} \quad (4-79)$$

$$S = \frac{4Ttu}{r^2} \quad (4-80)$$

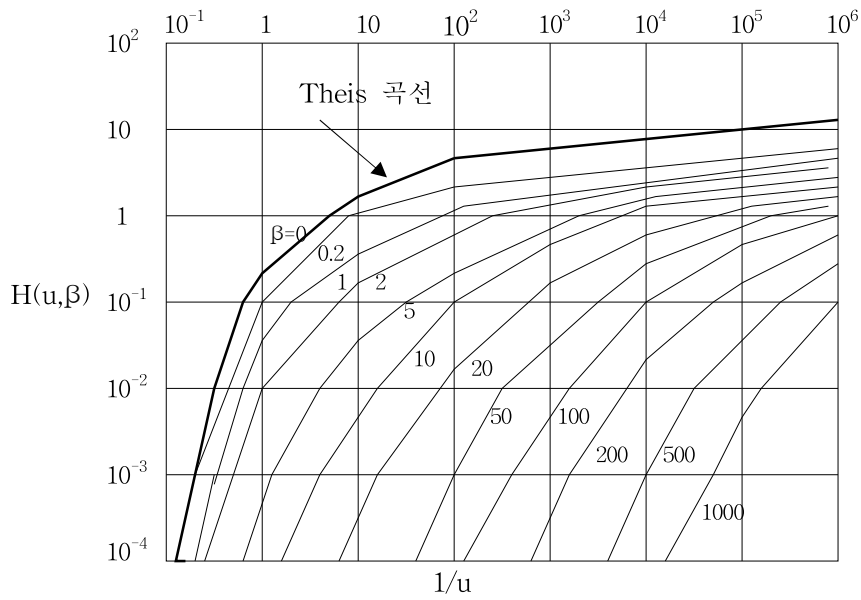
그림 4-25c의 경우와 같이 양수시험 중 가압층 위에 있는 불압대수층의 물이 가압층을 통해 대수층으로 흐를 때 위에서와 마찬가지로 측정된 수두강하 값 s 와 이에 대응하는 t 를 양대수방안지에 점시하여 그림 4-26b에서 보는 소위 Hantush-Jacob의 표준곡선과 중첩하여 하나의 합치점을 택한다. 그 합치점에서 4 개의 좌표 값을 취한 후 아래의 식을 이용하여 투수량계수 T 와 저류계수 S 를 결정한다.

$$T = \frac{QW(u, r/B)}{4\pi s} \quad (4-81)$$

$$S = \frac{4Ttu}{r^2} \quad (4-82)$$

양수시험을 실시할 때 대수층의 수리학적 성질은 물론 그 지역에 있을 수 있는 대수층의 함양 또는 불투수성 경계에 주의해야 한다. 양수시험이 끝나면 그 지역의 지질 또는 수리지질학적 조건에 가장 합당한 분석방법을 택해야 한다. 그 지역에 대한 예비지식이 불충분한 경우 시험결과를 우선 양대수방안지에 점시하여 Theis의 도표중첩해법으로 분석한다. 만일 시험결과가 표준곡선과 잘 일치하면 이 방법으로 대수층의 투수량계수 T 와 저류계수 S 를 결정하면 된다. 만일 시험결과가 표준곡선으로부터 많이 이탈하면 이는 일반적으로 대수층경계 또는 가압층의 누수현상이 있음을 의미한다.

(a) Hantush의 표준곡선



(b) Hantush-Jacob의 표준곡선

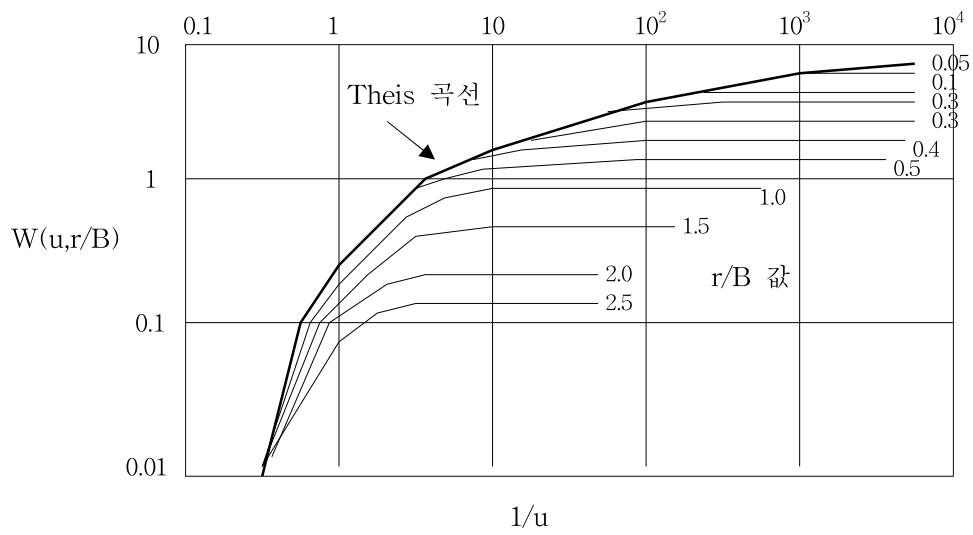


그림 4-26 Hantush(a)와 Hantush-Jacob(b)의 표준곡선

부록 4-1: W(u) 대 1/u

1/u	10.00	7.69	5.88	5.00	4.00	3.33	2.86	2.50	2.22	2.00	1.67	1.43	1.25	1.11
10 ⁻¹	0.219	0.135	0.075	0.049	0.025	0.013	0.007	0.004	0.002	0.001	0.00	0.00	0.00	0.00
10 ⁰	1.82	1.59	1.36	1.22	1.04	0.91	0.79	0.70	0.63	0.56	0.45	0.37	0.31	0.26
10 ¹	4.04	3.78	3.51	3.35	3.14	2.96	2.81	2.68	2.57	2.47	2.30	2.15	2.03	1.92
10 ²	6.33	6.07	5.80	5.64	5.42	5.23	5.08	4.95	4.83	4.73	4.54	4.39	4.26	4.14
10 ³	8.63	8.37	8.10	7.94	7.72	7.53	7.38	7.25	7.13	7.02	6.84	6.69	6.55	6.44
10 ⁴	10.94	10.67	10.41	10.24	10.02	9.84	9.68	9.55	9.43	9.33	9.14	8.99	8.86	8.74
10 ⁵	13.24	12.98	12.71	12.55	12.32	12.14	11.99	11.85	11.73	11.63	11.45	11.29	11.16	11.04
10 ⁶	15.54	15.28	15.01	14.85	14.62	14.44	14.29	14.15	14.04	13.93	13.75	13.60	13.46	13.34
10 ⁷	17.84	17.58	17.31	17.15	16.93	16.74	16.59	16.46	16.34	16.23	16.05	15.90	15.76	15.65
10 ⁸	20.15	19.88	19.62	19.45	19.23	19.05	18.89	18.76	18.64	18.54	18.35	18.20	18.07	17.95
10 ⁹	22.45	22.19	21.92	21.76	21.53	21.35	21.20	21.06	20.94	20.84	20.66	20.50	20.37	20.25
10 ¹⁰	24.75	24.49	24.22	24.06	23.83	23.65	23.50	23.36	23.25	23.14	22.96	22.81	22.67	22.55
10 ¹¹	27.05	26.79	26.52	26.36	26.14	25.96	25.80	25.67	25.55	25.44	25.26	25.11	24.97	24.86
10 ¹²	29.36	29.09	28.83	28.66	28.44	28.26	28.10	27.97	27.85	27.75	27.56	27.41	27.28	27.16
10 ¹³	31.66	31.40	31.13	30.97	30.74	30.56	30.41	30.27	30.15	30.05	29.87	29.71	29.58	29.46
10 ¹⁴	33.96	33.70	33.43	33.27	33.05	32.86	32.71	32.58	32.46	32.35	32.17	32.02	31.88	31.76

보기: $1/u = 10 \times 10^{-1}$ 이면 $W(u) = 0.219$

$1/u = 3.33 \times 10^2$ 이면 $W(u) = 5.23$

부록 4-2 W(u) 대 u

u	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0
10 ⁰	0.219	0.049	0.013	0.0038	0.0011	0.00036	0.00012	0.000038	0.000012
10 ⁻¹	1.82	1.22	0.91	0.70	0.56	0.45	0.370	0.310	0.260
10 ⁻²	4.04	3.35	2.96	2.68	2.47	2.30	2.150	2.030	1.920
10 ⁻³	6.33	5.64	5.23	4.95	4.73	4.54	4.390	4.260	4.140
10 ⁻⁴	8.63	7.94	7.53	7.25	7.02	6.84	6.690	6.550	6.440
10 ⁻⁵	10.94	10.24	9.84	9.55	9.33	9.14	8.990	8.860	8.740
10 ⁻⁶	13.24	12.55	12.14	11.85	11.63	11.45	11.29	11.16	11.04
10 ⁻⁷	15.54	14.85	14.44	14.15	13.93	13.75	13.60	13.46	13.34
10 ⁻⁸	17.84	17.15	16.74	16.46	16.23	16.05	15.90	15.76	15.65
10 ⁻⁹	20.15	19.45	19.05	18.76	18.54	18.35	18.20	18.07	17.95
10 ⁻¹⁰	22.45	21.76	21.35	21.06	20.84	20.66	20.50	20.37	20.25
10 ⁻¹¹	24.75	24.06	23.65	23.36	23.14	22.96	22.81	22.67	22.55
10 ⁻¹²	27.05	26.36	25.96	25.67	25.44	25.26	25.11	24.97	24.86
10 ⁻¹³	29.36	28.66	28.26	27.97	27.75	27.56	27.41	27.28	27.16
10 ⁻¹⁴	31.66	30.97	30.56	30.27	30.05	29.87	29.71	29.58	29.46
10 ⁻¹⁵	33.96	33.27	32.86	32.58	32.35	32.17	32.02	31.88	31.76

보기: $u = 2.0 \times 10^{-3}$ 이면 $W(u) = 5.64$

$u = 5.0 \times 10^{-14}$ 이면 $W(u) = 30.05$