

지하수 환경영향평가

03. 대수층의 수리지질학적 특성(2) - 투수성

1. 대수층의 투수성

대수층이 얼마나 빨리 지하수를 통과시키는지에 대한 능력을 일컫는 수리학적 특성을 투수성이라고 한다. 대수층의 투수성은 지하수를 개발·이용 시에 적정 양수량을 산정하거나 지반굴착으로 인한 유출지하수량, 제방이나 댐과 같이 침투력에 영향을 받는 구조물의 안정성을 해석이 필요한 경우에 반드시 고려해야하는 특성이다. 대수층의 투수성은 지하수의 흐름에 직접적인 영향을 미치는 특성으로 이를 제대로 이해하고 적용하려면 Darcy의 법칙에 대한 이해가 필수적이다. 대수층의 투수성을 나타내는 주요 수리지질학적 특성인 자에는 공극률, 수리전도도, 투수량계수, 투수계수가 있다. 공극률은 대수층의 투수성에도 영향을 미치지만 저유성(물을 저장하는 능력)에도 영향을 미치는 주요인자로 공극률에 대한 설명은 저유성과 함께 하기로 하고, 본 차시에서는 그 외 인자들에 대해서만 알아보도록 한다.

2. Darcy의 법칙

Darcy의 법칙은 대수층에서의 지하수 흐름을 설명하는 기본법칙이다. 프랑스의 토목엔지니어였던 Henry Darcy가 모래를 통과하는 물의 흐름에 대한 실험을 통해 얻은 결과로부터 유도한 경험식이다. 1856년 Darcy는 음용수용으로 물을 여과시킬 때 정수처리장의 모래여과지의 성능을 개선하기 위하여 모래를 통한 물의 흐름에 대한 실험을 수행하였다. 이 실험에서 그는 여러 차례에 걸쳐 그림 2-1과 같이 관에 모래를 채우고 사선으로 기울이면서 모래를 통과하는 물의 유출량(Q)을 측정하였다. 그 결과, 관을 통해 흐르는 물의 유출량은 관의 단면적(A)에 비례함을 알 수 있었다. 또한, 유출량이 관의 양쪽 끝에 위치한 두 지점에서의 에너지 차이, 즉 수두차이($\Delta h = h_2 - h_1$)에 비례하고, 두 지점의 거리(Δl)에는 반비례함을 알 수 있었다.

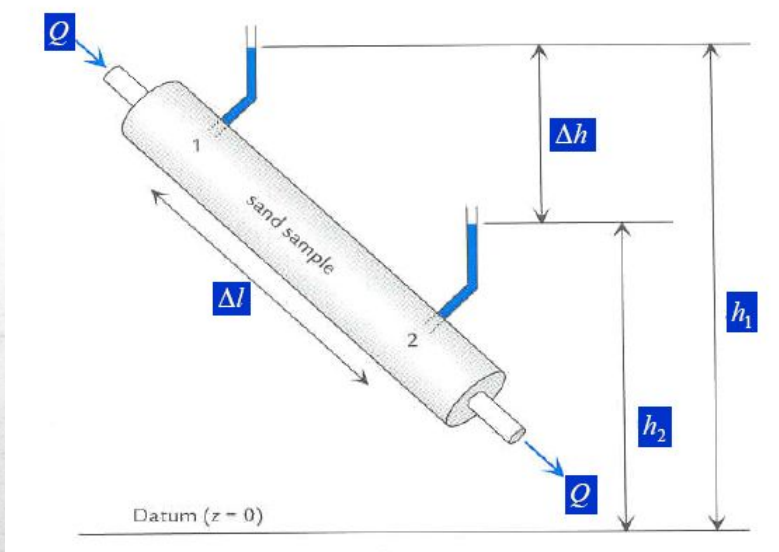


그림 2-1. Henry Darcy의 실험

이 실험을 통해 매질(모래)을 통과하는 물의 유출량은 단면적, 수두구배($i = \frac{\Delta h}{\Delta l} \approx \frac{dh}{dl}$)비례한다는 Darcy의 법칙이 만들어졌다 (식1).

$$Q = -KA \frac{dh}{dl} = -KAi \quad (\text{식 1})$$

$$q = \frac{Q}{A} = -Ki$$

이 때, Q(discharge flow)는 대수층에서 흘러나온 지하수의 유출량으로 차원은 $[L^3/T]$ 이고, K는 비례상수로 차원은 $[L/T]$ 이다. q는 비배출량(specific discharge)이라 하며 물의 유출 속도(flux)로 차원은 $[L/T]$ 이다. q는 Darcy 속도(Darcian velocity)라고도 부른다.

Darcy의 법칙은 지질학적 지층, 즉 대수층과 대수층 내에서 흐르고 있는 지하수의 흐름속도가 선형관계를 가지고 있다는 것을 보여준다. 다시 말해 Darcy의 법칙은 비배출량이 수두구배에 따라 선형의 관계를 가질 때에만 적용할 수 있다. 일반적으로 Darcy의 법칙은 레이놀즈수(Reynolds number)¹⁾가 1과 10사이인 층류(laminar flow)에만 적용가능하다고 알려져 있다.

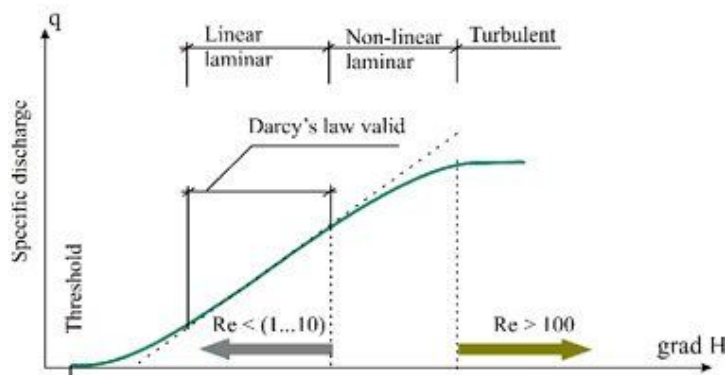


그림 2-2. 레이놀즈수에 따른 비배출량의 변화 (출처: http://echo2.epfl.ch/VICAIRE/mod_3/chapt_5/main.htm)

●쉬어가기 퀴즈(학습 중에 학습자가 쉽게 풀어 볼 수 있는 O, X 퀴즈 1문항을 제시해 주세요. 정답과 해설도 함께 제시해 주셔야 하고, 해당 주제 다음에 넣어주세요.)

문제> Darcy의 법칙은 대수층에서 흐르는 지하수의 흐름에 관한 법칙으로 모든 지하수흐름에 적용가능하다.

정답> X

해설> Darcy의 법칙은 대수층에서의 지하수 흐름을 설명하는 기본법칙으로 수두구배와 배출량이 선형관계를 보이는, 레이놀즈 숫자가 1과 10사이인 층류(laminar flow)에만 적용가

1) 레이놀즈수(Reynolds number, Re) = 관성에 의한 힘/ 점성에 의한 힘. 즉, $Re = \frac{\rho q L}{\mu}$ 이고, 이때 ρ 는 유체의 밀도, L 은 특성길이, μ 는 유체의 점성계수이다.

능하다.

3. 수리전도도와 투수계수, 투수량계수

수리전도도 (Hydraulic conductivity, K)

수리전도도는 Darcy의 법칙의 비례상수로서 대수층이 물을 통과, 이동시키는 특성, 즉 투수성을 나타내는 인자이다. 수리전도도는 Darcy의 법칙에 의해 단위수두구배가 주어졌을 때 단위 단면적의 대수층에서는 유출되는 물의 부피로 정의하고 차원은 [L/T]이다 (식2).

$$K = -\frac{Q}{Ai} = -\frac{q}{i} \quad (\text{식2})$$

따라서 대수층의 투수성이 클수록 수리전도도의 값은 크다. 수리전도도는 대수층의 특성에 따라 그 값의 차이가 약 10^{12} 정도 날 정도로 그 값의 범위가 매우 큰 특성인자다 (표 2-1).

표 2-1. 암석별 일반적인 수리전도도 값의 범위 (Spitz and Moreno, 1996)

Unconsolidated deposits	Hydraulic conductivity (m/s)	Rocks	Hydraulic conductivity (m/s)
Dense clay	$10^{-13} \dots 10^{-8}$	Dense sandstone	$10^{-9} \dots 10^{-7}$
Weathered clay	$10^{-8} \dots 10^{-6}$	Karstic sandstone	$10^{-7} \dots 10^{-5}$
Silt	$10^{-7} \dots 10^{-5}$	Dense limestone	$10^{-9} \dots 10^{-7}$
Alluvial deposits	$10^{-5} \dots 10^{-3}$	Karstic limestone	$10^{-5} \dots 10^{-3}$
Fine sand	$10^{-5} \dots 10^{-4}$	Dolomite	$10^{-10} \dots 10^{-8}$
Medium sand	$5 \times 10^{-4} \dots 5 \times 10^{-3}$	Dense crystalline rocks	$10^{-13} \dots 10^{-12}$
Coarse sand	$10^{-4} \dots 10^{-3}$	Fractured crystalline rocks	$10^{-10} \dots 10^{-6}$
Fine gravel	$10^{-3} \dots 5 \times 10^{-1}$	Dense basalt	$10^{-13} \dots 10^{-10}$
Medium gravel	$5 \times 10^{-2} \dots 10^{-1}$	Fractured basalt	$10^{-7} \dots 10^{-4}$
Coarse gravel	$10^{-2} \dots 5 \times 10^{-1}$	Claystone	$10^{-13} \dots 10^{-9}$

수리전도도는 대수층 매질의 특성뿐만 아니라 이를 통해 유동하는 유체의 특성에 의해서도 좌우된다. 수리전도도는 대수층 매질과 유체의 특성의 함수로 나타낼 수 있는데, 이 때 수리전도도는 대수층 공극의 크기와 유체의 밀도에 비례하고 유체의 점성에 반비례한다 (식 3).

$$K = f(\text{매질의 특성, 유체의 특성}) = C \frac{d^2 \gamma}{\mu} \quad (\text{식 3})$$

토목분야에서는 수리전도도 K 를 투수계수라고도 부르기도 하는데, 이 경우에는 매질만의 특성인자인 고유투수계수(아래에서 정의함)와 혼란을 야기할 수 있으므로 용어의 사용에 주의하도록 한다. 요즘에는 지하수환경에 대한 3차원적 해석의 필요성과 기술발달로 인해 수리전도도가 훨씬 보편적인 용어다.

투수계수 (permeability, k)

(식 3)에서 매질과 유체의 특성에 의해 좌우되는 특성인 수리전도도를 매질의 특성만을 따로 k 라고 표시하여 고유투수계수(intrinsic permeability)라고 부르고, k 를 이용하여 표시하

면 다음 식과 같다.

$$K = \frac{k\gamma}{\mu} ; k = Cd^2 \quad (\text{식 4})$$

투수계수의 차원은 $[L^2]$ 이다. 한편, 지질매체에서 석유채굴을 하는 석유산업에서는 대수층의 투수성(k)의 단위를 darcy로 사용하는 경우가 많은데, 1darcy는 $9.87 \times 10^9 \text{cm}^2$ 이다.

투수량계수 (Transmissivity, T)

투수량계수 또한 대수층이 물을 얼마나 잘 통과시키는가에 대한 능력, 즉 투수성을 나타내는 수리지질학적 인자로서 대수층의 투수량계수는 수리전도도에 대수층 포화대의 두께, b , 를 곱한 값과 같다 (식 5).

$$T = Kb \quad (\text{식 5})$$

Darcy의 법칙에 적용하면 투수량 계수는 단위 수두 구배 시 단위 폭의 대수층을 통해 흐르는 물의 양을 의미한다. 피압대수층에서는 지하수위 변화에 상관없이 포화두께가 일정하므로 피압대수층의 투수량계수는 지하수위 변화에 무관하게 일정한 값을 가진다. 한편, 자유면 대수층에서는 지하수위 변화에 따라 포화대의 두께가 변하므로 투수량계수도 변한다.

4. 수리전도도의 특성

수리전도도의 분포와 평균

수리전도도는 동일한 지질학적 암상에서도 매우 다양한 측정값을 가진다. 따라서 여러 개의 측정값으로부터 대수층을 대표하는 수리전도도는 측정값의 평균을 구하여 이용한다.

대수층의 공극은 정규분포를 보이는 반면 수리전도도는 대수정규분포(log-normal distribution)을 나타낸다. 대수정규분포를 보이는 수리전도도의 평균치를 구할 때 산술평균(arithmetic mean, A_M)은 큰 K 값의 영향을 많이 받아 실제 평균보다 큰 값으로 구해진다. 따라서 수리전도도의 평균은 조화평균(harmonic mean, H_M)과 산술평균의 사이인 기하평균(geometric mean, G_M)이 가장 대표적이라고 할 수 있다. 다음은 각 평균을 구하는 식이다 (식 6).

$$A_M = \frac{\sum_{i=1}^N X_i}{N} ; H_M = \frac{N}{\sum_{i=1}^N X_i^{-1}} ; G_M = \sqrt[N]{X_1 X_2 X_3 \cdots X_N} \quad (\text{식 6})$$

균질성과 불균질성 (homogeneity & heterogeneity)

수리전도도의 측정값이 관측위치에 상관없이 동일한 경우 수리전도도가 균질하다고 하고, 값이 위치에 따라 달라지는 경우 수리전도도가 불균질하다고 부른다. 대수층의 두께가 위치에 따라 변하거나 연속적으로 퇴적된 퇴적층의 경우, 또는 다양한 지질학적 사건(event)으로 인해 대수층 매질의 구성이 변하는 경우 등 많은 경우 대수층의 수리전도도는 불균질성을 띤다.

대수층이 연속적으로 퇴적되어 수리전도도가 불균질한 대수층인 경우(그림 4-1), 대수층의 수평방향(K_h)과 수직방향(K_v)의 유효수리전도도(effective hydraulic conductivity)는 다음 식에 따라 산출할 수 있다 (식 7)

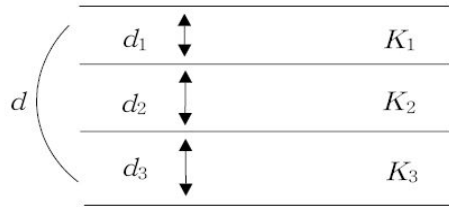


그림 4-1. 다중구조를 가진 대수층
(d: 대수층의 총두께)

수평방향의 수리전도도: $dK_h = d_1K_1 + d_2K_2 + \dots$

$$K_h = \frac{\sum_{i=1}^n K_i \cdot d_i}{\sum_{i=1}^n d_i}$$

수직방향의 수리전도도: $\frac{d}{K_v} = \frac{d_1}{K_1} + \frac{d_2}{K_2} + \dots$

$$K_v = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{\sum_{i=1}^n \frac{d_i}{K_i}}$$

(식 7)

등방성과 이방성 (isotropy & anisotropy)

하나의 대수층에서 수리전도도가 방향에 무관하게 동일한 경우를 등방성, 방향에 따라 달라지는 경우는 이방성이라고 부른다. 예를 들어, 위에서 언급한 연속된 퇴적으로 인한 다중구조를 가진 대수층의 경우, 수직방향과 수평방향의 수리전도도가 서로 다른 값을 갖는 이방성을 가진다. 수두구배 방향과 지하수 흐름방향이 서로 일치하지 않는 경우 이 대수층의 수리전도도는 이방성을 가짐을 알 수 있다 (그림 4-2).

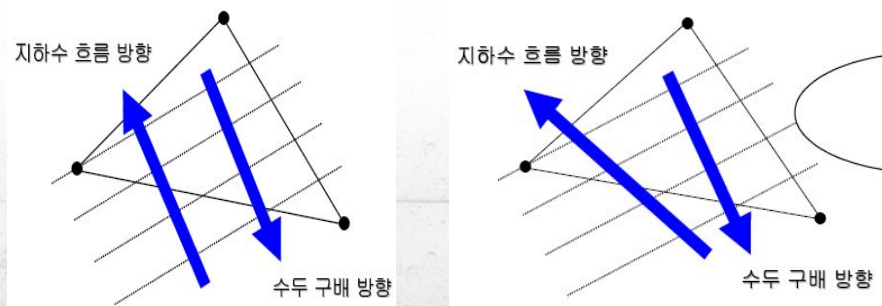


그림 4-2. 수리전도도의 등방성과 이방성

일반적으로 여러 개의 퇴적층으로 구성된 대수층의 경우, 수평방향의 수리전도도가 수직방향보다 약 10배 정도가 큰 것으로 나타났다. 반면 주상절리가 발달된 화강암의 경우에는 수직방향의 수리전도도가 수평방향보다 훨씬 큰 값을 갖는 것으로 나타났다.

표 4-1. 각종 암석의 수평, 수리전도도 (한정상, 1998)

암종	수평 수리전도도(K)	수직 수리전도도(K_z)
비고결암		
자갈	$4.7 \times 10^{-2} \sim 1.4$	모래, 자갈 및 점토 $4.7 \times 10^{-6} \sim 4.7 \times 10^{-5}$
사력	$9.5 \times 10^{-3} \sim 0.24$	
모래	$4.7 \times 10^{-3} \sim 0.14$	
quick sand	$2.4 \times 10^{-3} \sim 0.38$	
사구	$4.7 \times 10^{-3} \sim 0.24$	
peat(풍화를 적게 받음)	$3.8 \times 10^{-3} \sim 1.4 \times 10^{-2}$	
peat(상당히 풍화받음)	$3.8 \times 10^{-4} \sim 1.9 \times 10^{-3}$	
peat(young sphagnum)	$3.8 \times 10^{-4} \sim 3.8 \times 10^{-3}$	
peat(old sphagnum)	$2.8 \times 10^{-4} \sim 3.8 \times 10^{-4}$	
황토	$9.4 \times 10^{-8} \sim 9.4 \times 10^{-4}$	
점토	$9.4 \times 10^{-9} \sim 9.4 \times 10^{-5}$	
빙하토	$2.4 \times 10^{-8} \sim 4.7 \times 10^{-7}$	
고결암		
현무암	$4.7 \times 10^{-11} \sim 0.94$	$4.7 \times 10^{-2} \sim 4.7 \times 10^{-10}$
석회암	$9.7 \times 10^{-7} \sim 0.94$	
혈암	$4.7 \times 10^{-10} \sim 4.7 \times 10^{-9}$	
규암	$1.9 \times 10^{-7} \sim 3.8 \times 10^{-4}$	
greenstone	$4.7 \times 10^{-5} \sim 6.6 \times 10^{-4}$	
유문암	$4.7 \times 10^{-5} \sim 9.4 \times 10^{-4}$	
편암	$4.7 \times 10^{-7} \sim 9.4 \times 10^{-4}$	
석탄	$4.7 \times 10^{-7} \sim 4.7 \times 10^{-2}$	