

지하수 환경영향평가

02. 대수층의 수리지질학적 특성(1) - 저유성

1. 대수층의 저유성

대수층의 투수성은 얼마나 빨리 지하수를 통과시키는지에 대한 능력인 반면, 저유성은 대수층이 얼마나 많은 양의 물을 저장할 수 있는지에 대한 능력을 의미한다. 이는 투수성과 함께 지하수환경영향평가 시 반드시 알아야 할 대수층의 중요한 수리지질학적 특성이다. 대수층의 저유성을 나타내는 주요 수리지질학적 특성인자에는 공극률, 비산출율, 비보유율, 저류계수, 비저류계수가 있다.

2. 공극률 (Porosity, n)

토양이나 암석입자 사이의 공간 또는 대수층 내의 틈 또는 절리 등의 공간을 공극(pores)이라고 하며 공극률이란 대수층 내에 발달된 공극의 양을 나타내는 인자다. 공극률은 대수층 시료의 부피(V_t)에 대한 시료 내 공극의 부피의 비(V_v)로 계산한다 (식 1, 그림 1-1).

$$n = \frac{V_v}{V_t} = \frac{V_v}{V_v + V_m} \quad (\text{식 1})$$

여기에서 V_m 은 대수층 내 고체로 이루어진 암석물질의 부피를 말한다.

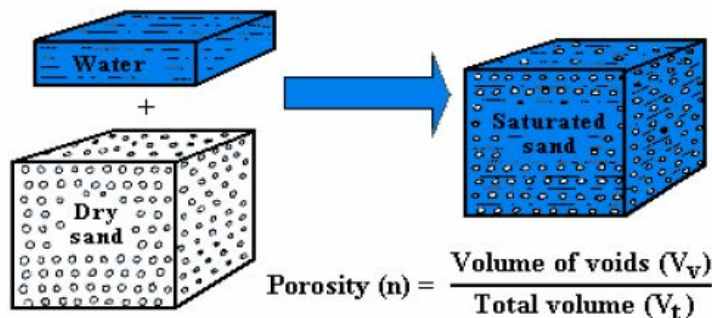


그림 1-1 공극률

암석의 공극은 암석이 형성되면서 생긴 1차공극과 암석이 형성된 후 단층작용 등의 다양한 지질학적 이벤트로 인해 생성된 2차공극으로 구분한다. 예를 들어 모래와 자갈 등의 충적층의 퇴적암의 공극은 1차공극이고 화강암이나 편마암 내에 발달된 단열 등은 2차공극이다. 대수층의 공극률을 계산할 때에는 1차공극이나 2차공극의 구분 없이 대수층 내 발달된 모든 공극의 부피를 반영한다.

같은 암상으로 구성된 대수층이라도 구성입자의 배열상태, 모양, 분급정도에 따라 공극률이 다르게 나타난다. 입자의 배열상태가 규칙적인 경우가 불규칙적인 경우에 비해 공극률이 크게 나타나고 각질의 입자가 원형의 입자보다 훨씬 큰 공극률을 갖는다. 또한 분급상태가 양호한 경우가 불량한 경우보다 공극률이 크다 (그림 1-2).

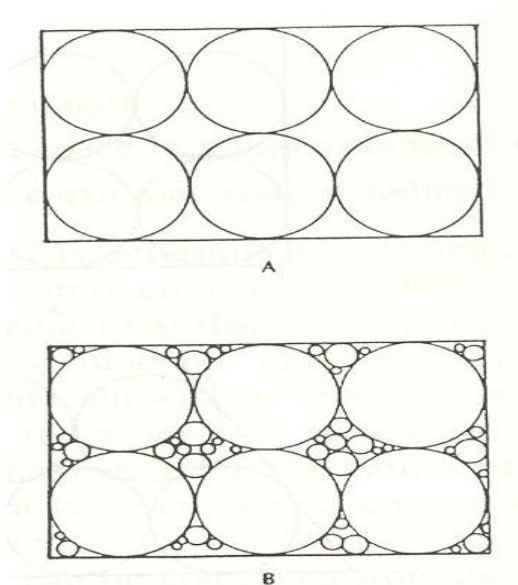


그림 1-2. 분급상태에 따른 공극률

암상에 따른 공극률의 값은 다음과 같다.

Clay (점토) : 0.3 ~ 0.6

Silt (미사) : 0.35 ~ 0.5

Sand (모래) : 0.25 ~ 0.5

Gravel (자갈) : 0.3 ~ 0.4

(출처: Groundwater, 1979)

한편, 대수층 전체부피에 대한 공극률은 지하수를 저유할 수 있는 최대저수량을 뜻하며 대수층 내에 저장된 지하수의 부존량을 산정할 때에는 대수층의 공극률을 알아야한다 (한정상, 1998).

2. 비산출율과 비보유율

자유면대수층 내의 물과 구성입자들 간에는 표면장력이 작용한다. 그로 인해 대수층으로부터 지하수를 채수할 때 공극내의 모든 물이 배출되지 않고 일부는 공극 내에 남아있게 된다. 이 때 단위부피의 자유면대수층에서 배출되는 물의 부피를 비산출율 (specific yield, S_y)이라고 하고 한편 배출되지 않고 남아있는 물의 부피를 비보유율(specific retention, S_r)이라고 한다. 다시 말해 대수층 부피에 대한 대수층에서 중력에 의해 배출되는 물의 부피의 비가 비산출율이다. 비산출율은 유효공극률(effective porosity) 또는 배수가능공극률이라고도 부른다. 비산출율과 비보유율의 합은 대수층의 공극률과 같다.

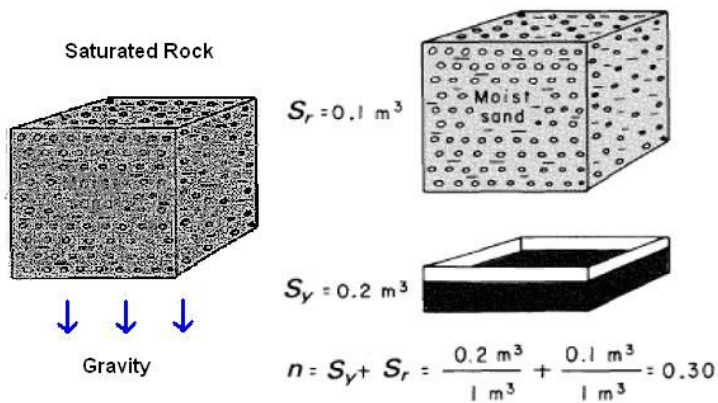


그림 2-1. 비산출율과 비보유율 (Heath, 1983)

비산출율은 공극률보다 작고, 구성입자의 크기, 모양, 공극분포 등에 따라 다른 값을 갖는다. 대수층의 구성 입자크기가 작으면 표면장력이 크기 때문에, 비보유율은 입자크기에 반비례한다 (그림 2-2). 일반적으로 대부분의 충적층은 0.1~0.2 정도의 비산출율 값을 가지고 균일한 모래층은 0.3정도의 값을 갖는다. 표 2-1은 암석별 일반적인 공극률과 비산출율 값을 나타낸다.

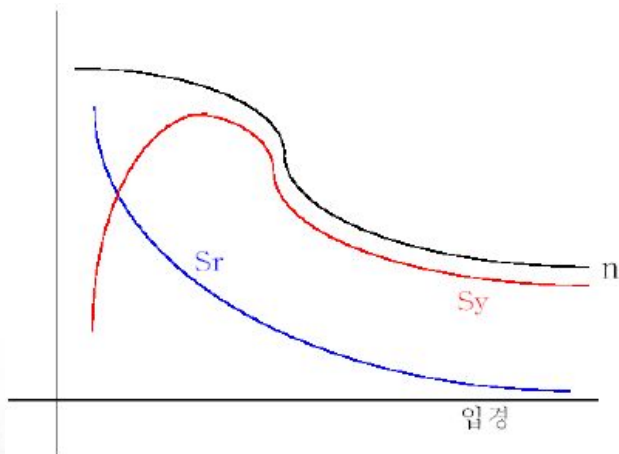


그림 2-2. 입자크기에 따른 비산출율과 비보유율

표 2-1. 암석별 대표적인 공극률과 비산출율 (한정상, 1998)

암 종	공 극 률	비 산출 률	비 고
1. 비고결 퇴적물			
흐트러진 상태의 균질모래	0.46		
조밀한 균질모래	0.34		
흐트러진 상태의 혼합모래	0.4		
조밀한 혼합모래	0.3		
빙하퇴적물(혼합)	0.25 ~ 0.45		Walton(1988)
벤토나이트	0.84		Walton(1988), Davis(1969), Johnson(1967)
조립질 자갈	0.24 ~ 0.36	0.1 ~ 0.25	
세립질 자갈	0.25 ~ 0.038	0.2 ~ 0.35	Croff(1985)
조립질 모래	0.31 ~ 0.46	0.2 ~ 0.35	
중립질 모래		0.15 ~ 0.3	
세립질 모래	0.26 ~ 0.53	0.1 ~ 0.3	
실 토	0.34 ~ 0.61	0.01 ~ 0.3	
점 토	0.34 ~ 0.60	0.01 ~ 0.2	
peat	0.6 ~ 0.80	0.3 ~ 0.5	Walton(1988)
황 토	0.4 ~ 0.55	0.1 ~ 0.35	"
사 구	0.35 ~ 0.45	0.3 ~ 0.4	"
사력층	0.2 ~ 0.35	0.15 ~ 0.30	"
점토질 모래		0.03 ~ 0.2	
2. 퇴 적 암			
이 암	0.25 ~ 0.4	0.01 ~ 0.35	
사 암	0.25 ~ 0.5	0.1 ~ 0.4	
석회암, 백운암	0.00 ~ 0.20	0.001 ~ 0.05	
용식 석회암	0.05 ~ 0.55	0.01 ~ 0.25	
세 일	0.01 ~ 0.1	0.005 ~ 0.05	
anhydrite	0.5 ~ 0.05	$5 \times 10^{-4} \sim 0.05$	
chalk	0.05 ~ 0.2	$5 \times 10^{-4} \sim 0.05$	
salt bed	0.005 ~ 0.03		
3. 결정질암			
파쇄암	0 ~ 0.1	$5 \times 10^{-5} \sim 10^{-2}$	
조밀한 결정질암	0 ~ 0.05		
현무암	0.03 ~ 0.35		
풍화된 화강암	0.34 ~ 0.57	0.2 ~ 0.3	Walton(1988)
풍화된 반려암	0.42 ~ 0.45		
화강암	0.1	5×10^{-4}	
화산응회암		0.002 ~ 0.35	

3. 저류계수와 비저류계수

저류계수(*Storativity, Storage coefficient*)

저류계수(storativity, storage coefficient)는 지하수위가 변함에 따라 대수층으로 물이 유입되거나 또는 배출되어, 그 양만큼 대수층 내에 저장되어 있는 물의 부피가 변하게 된다. 대수층 내 저장된 물의 양의 변화는 배출되거나 유입된 물의 부피와 동일하다. 이 때, 단위 수두변화가 발생했을 때 단위 면적의 대수층으로부터 배출되거나 대수층으로 유입되는 물의 부피를 저류계수라고 정의한다.

자유면 대수층의 저류계수는 비산출율과 동일하고 피압대수층의 경우에는 대수층의 두께가 항상 포화상태이므로 두께를 고려한 비저류계수를 정의하여 사용한다. 피압대수층의 경우 지하수의 채수와 상관없이 대수층이 항상 포화되어 있기 때문에 중력배수되는 지하수가 없으므로 S_y 는 0이 된다. 저류계수는 무차원의 상수로 나타낸다.

$$S = S_y + S_s b \quad (\text{식 2})$$

여기서, b 는 대수층의 두께, S_s 는 비저류계수이다.

자유면 대수층의 저류계수는 약 0.02 ~ 0.3이고, 피압 대수층의 저류계수는 0.005이하이다. 일반적으로 피압대수층의 저류계수가 자유면 대수층의 저류 계수보다 훨씬 작으므로 지하수 양수 시 피압 대수층에서 지하수위 강하가 더 크게 발생한다.

비저류계수(*Specific storage*)

대수층에서 지하수를 채수하면 지하수위 강하로 인해 지하수가 팽창하고 대수층이 압축하면서 대수층의 단면적을 통해 물이 배출되는데 이 때 단위 지하수위 변화 시, 대수층의 부피 대비 배출된 물의 부피의 비를 비저류계수라고 정의한다. 다시 말해, 비저류계수란 단위 수두 강하 시 물의 팽창과 대수층의 압축에 의해 단위 부피의 대수층으로부터 배출되는 물의 부피 [L^{-1}]를 말한다. 일반적으로 비저류계수는 0.0001이하이다.

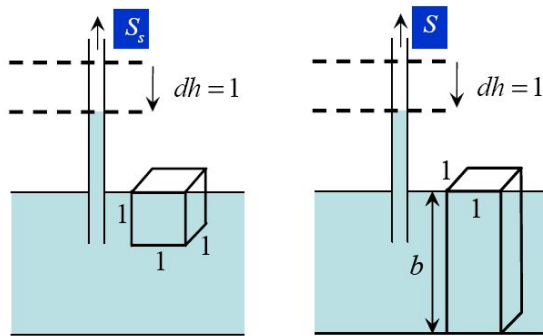


그림 3-1. 비저류계수와 저류계수 개념도

1) 유효응력과 수압

그림 3-2와 같이 피압대수층 상부에 작용하는 하중을 σ_T 라고 하고 피압대수층의 입자들간에 작용하는 응력을 유효응력, σ_e , 지하수압을 p 라고 할 때 평형상태에서는 유효응력, σ_e , 과 지하수압의 합이 상부하중과 동일하다 (식 3).

$$\begin{aligned} \sigma_T &= \sigma_e + p = \text{const} \\ da_T &= d\sigma_e + dp = 0; \quad d\sigma_e = -dp = -\gamma_w dh \end{aligned} \quad (\text{식 3})$$

여기에서 h 는 수두, γ_w 는 물의 비중이다.

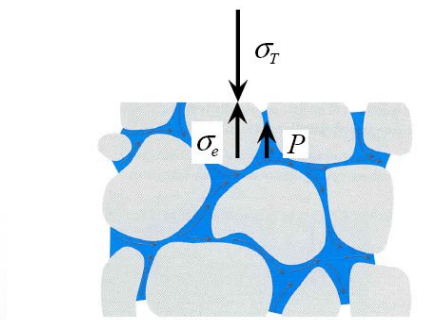


그림 3-2. 상부하중과 평형상태인 유효응력과 (지하)수압

2) 압축계수

대수층 암석의 팽창에 의한 저유량 변화

피압대수층에서 지하수 채수 등의 이유로 지하수가 배출되어 지하수위가 감소하면 수압은 감소하고 유효응력은 증가한다. 유효응력의 증가는 대수층이 압축되면서 부피가 감소하고 이때 배출되는 지하수량은 대수층의 압축성에 따라 달라진다. 대수층의 압축성은 대수층 암석(고체)의 압축계수, α , 로 나타내며 압축률은 (식 4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\alpha = - \frac{dV_T/V_T}{d\sigma_e} = \frac{db/b}{\gamma_w dh} \quad (\text{식 4})$$

V_T : 대수층 전체의 부피로 대수층 내 고체의 부피(V_s)와 물의 부피를 합한 것이다. 대수층 내 고체의 부피는 항상 일정하므로 대수층 부피의 변화는 곧 대수층 내 지하수부피의 변화를 의미한다 (식 5).

$$V_T = V_w + V_m ; dV_T = dV_w \quad (\text{식 5})$$

따라서, 이를 (식 4)의 대수층 암석의 압축계수와 (식 3)의 수두변화를 이용하면 나타내면 다음과 같다.

$$dV_w = \alpha V_T d\sigma_e = - \alpha V_T r_w dh \quad (\text{식 6})$$

수압감소에 의한 저유량 변화

지하수위 강하로 인해 수압이 감소하면 물이 순간팽창을 하여 대수층에서 지하수가 배출되는데, 이때 배출되는 지하수의 부피는 지하수의 압축성에 따라 좌우된다. 지하수의 압축성은 물의 압축계수, β , 로 나타낼 수 있는데 이는 (식 7)와 같이 정의된다.

$$\beta = - \frac{dV_w/V_w}{dp} \quad (\text{식 7})$$

여기서 V_w 는 대수층 내 물의 부피로 포화대수층의 경우 대수층 전체 부피에 공극률을 곱한 것과 같다 ($V_w = nV_T$). 물의 압축계수는 $4.6 \times 10^{-10} m^2/N$ 이다.

위 식을 (식 3)을 대입하여 정리하면 다음 식이 된다.

$$dV_w = - \beta (nV_T) (\gamma_w dh) \quad (\text{식 8})$$

3) 비저류계수와 압축계수

앞서 단위 지하수위 변화 시($dh=-1$), 지하수위 대수층의 단위부피당($V_T = 1$) 지하수 배출량을 비저류계수, S_s , 라고 정의하였는데 이 때 지하수 배출은 대수층 암석의 팽창과 수압 감소에 의한 저유량의 변화로 발생하므로 비저류계수는 (식 6)과 (식 8)을 더한 값이 된다.

$$S_s = \alpha r_w + n\beta r_w = r_w (\alpha + n\beta) \quad (\text{식 9})$$