



지하수 환경영향평가

04. 지하수 유동

1. 유체의 에너지와 수두

유체의 에너지

지하수의 유동을 해석하기 위해서는 지하수가 가지고 있는 에너지에 대해 먼저 알아야 한다. 일반적으로 움직이는 물체의 총 에너지는 운동에너지와 위치에너지의 합으로 나타낸다. 한편 유체의 총 에너지는 운동에너지와 위치에너지, 그리고 추가적으로 유체가 갖고 있는 압력에너지의 합이다. 따라서 유체의 총 에너지를 수식으로 표현하면 다음의 <식 1>과 같다.

$$E = \frac{1}{2}mv^2 + mgz + V_f P \quad \text{<식 1>}$$

여기에서 m 은 유체의 질량, v 는 유체의 속도, z_s 는 관측지점의 고도, V_f 는 유체의 부피이고 P 는 유체의 압력이다. 유체의 역학적 에너지를 각각 단위부피, 단위질량, 단위무게의 유체가 가지는 총에너지로 표시하면 다음과 같다.

단위부피 유체의 총에너지는 압력의 차원을 가진다.

$$E_V = \frac{1}{2}\rho_w v^2 + \rho_w gz + P \quad : \text{단위부피 유체의 총 에너지} \quad \text{<식 2>}$$

물은 비압축성이므로 단위질량의 유체가 가지는 총 에너지는 다음 식이 된다.

$$E_m = \frac{1}{2}v^2 + gz + \frac{P}{\rho_w} \quad : \text{단위질량 유체의 총 에너지} \quad \text{<식 3>}$$

Bernoulli equation에 따르면 비압축성의 유체의 에너지는 운동에너지와 위치에너지, 압력 에너지의 합은 항상 일정하다.

$$\frac{1}{2}v^2 + gz + \frac{P}{\rho_w} = \text{const} \quad : \text{Bernoulli equation} \quad \text{<식 4>}$$

수두(또는 수리수두), h

단위무게의 유체가 가지는 총 에너지는 다음과 같이 차원이 길이[L]인 등식으로 나타내진다.

$$\frac{E_m}{g} = \frac{1}{2g}v^2 + z + \frac{P}{\rho_w g} \quad : \text{단위무게 지하수의 총 에너지} \quad \text{<식 5>}$$

지하수는 매우 느린 속도로 이동하기 때문에 지하수속도에 의한 운동에너지는 무시할 만큼 작다. 따라서 지하수의 경우 <식 3>에서 첫 번째 항을 0이라고 가정하면 단위무게의 지하수가 갖는 총 에너지는 다음과 같이 표현된다.

$$h = z + \frac{P}{\rho_w g} = z + \psi \quad \text{<식 6>}$$

단위무게의 지하수가 갖는 에너지는 길이의 차원, [L]을 가지는데, 이를 수리수두(hydraulic head), 또는 줄여서 ‘수두’라고 지칭한다. 수리수두는 위치수두(z)와 압력수두(ψ)의 합으로 나타낼 수 있다. 이 때, 위치수두는 기준점으로부터의 측정지점까지의 높이이며, 압력수두는 수면(지하수면)에서부터의 관측지점까지의 깊이이다.

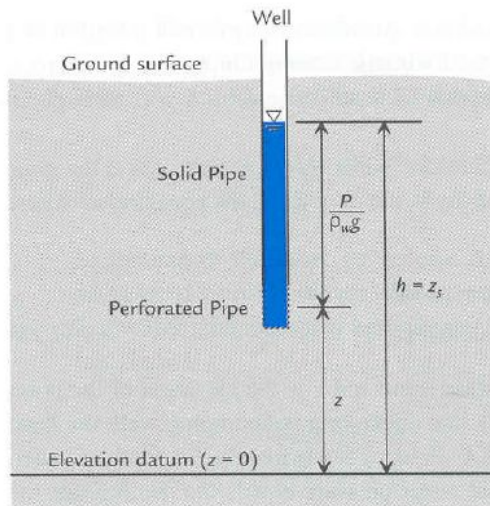


그림 1 . 수리수두

수리수두는 우리가 대수층에 관정을 설치하여 관측하게 되는 수면의 위치로서 보통 ‘지하수위’라고도 부른다. 자유면대수층에서는 지하수위가 지하수면의 위치와 동일하고 따라서 대수층의 상단면에 실제로 존재하는 수면이다. 피압대수층의 지하수위는 정수압면이라는 가상의 면으로 대수층의 상단면보다 높게 위치한다. 한편 등수위선(equipotential lines)은 수두가 같은 점들을 연결한 선을 말한다.

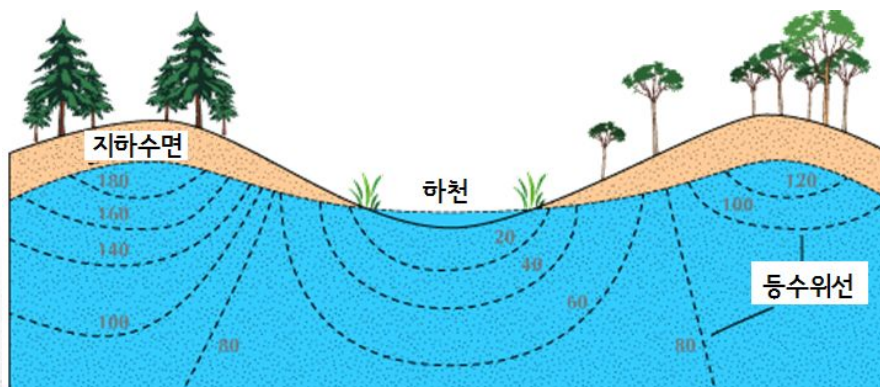


그림 2 . 등수위선 (출처: <http://www.gg.uwyo.edu/geol1100j/index.asp>)

문제> 지하수의 에너지는 단위무게 당 지하수의 총에너지인 수리수두로 나타낼 수 있다.

정답> O

해설> 운동에너지를 무시할 만큼 유동속도가 느린 지하수의 에너지는 단위무게 당 총에너지인 위치수두와 압력수두의 합인 수리수두로 나타낸다.

2. 포화대에서의 지하수의 유동

지표를 흐르는 물과 같이 지하수도 중력에 의하여 높은 곳에서 낮은 곳으로 흐르게 된다. 그러나 여기서 낮은 곳의 의미는 단순히 고도가 낮은 곳을 의미하는 것이 아니며 앞에서 배운 수두, 즉 위치에너지와 압력에너지를 합한 물리량을 의미하므로 대수층의 조건에 따라 국부적으로 상향의 지하수 흐름이 발생할 수도 있다.

지하수유동 방정식

포화대에서의 지하수 유동방정식은 3장에서 배운 Darcy의 법칙과 질량보존의 법칙을 이용하여 구할 수 있다.

질량의 법칙에 따르면 시간당 단위부피당 내부로 유입되는 유체의 질량과 외부로 유출되는 유체의 질량의 차는 단위부피 내 총 질량변화의 양과 동일하다. 즉, 단위부피 내 지하수 유동을 지배하는 기본 법칙은 다음과 같다.

$$\text{질량유입속도} - \text{질량유출속도} = \text{시간당 질량변화}$$

1) 정상상태 (steady state)

정상상태는 시간에 따른 수두변화가 없는 경우이다. 다시 말해 단위부피의 대상영역 (control volume)에 유입되는 유체질량의 속도와 유출되는 유체질량의 속도가 동일하여 대수층 내 유체질량의 변화가 없는 경우이다.

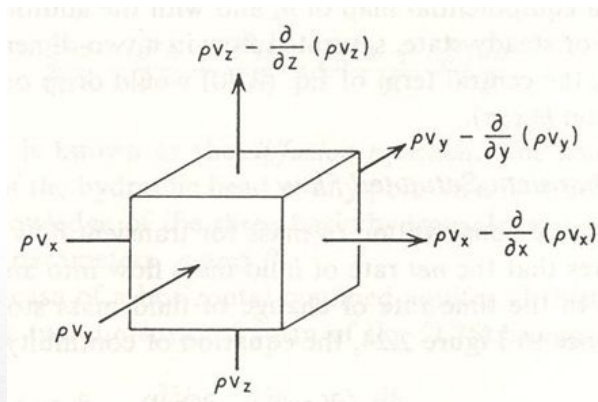


그림 3. 단위부피의 대상영역

이를 그림 3의 단위부피의 대상영역에 대하여 식으로 정리하면 다음과 같다

$$-\frac{\partial(\rho_w v_x)}{\partial x} - \frac{\partial(\rho_w v_y)}{\partial y} - \frac{\partial(\rho_w v_z)}{\partial z} = 0 \quad \text{〈식 7〉}$$

이 때, 물과 같은 비압축성 유체의 경우 밀도가 일정하므로,

$$-\frac{\partial v_x}{\partial x} - \frac{\partial v_y}{\partial y} - \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \quad \text{〈식 8〉}$$

대상영역이 대수층인 경우, <식 8>은 단위부피의 대수층에 유출입되는 지하수의 질량은 동일하여 대수층 내 지하수의 질량변화가 없음을 나타낸다. <식 8>에 대수층에서의 지하수흐름의 기본법칙인 Darcy의 법칙을 적용하면 다음 식이 된다.

$$\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} = \nabla \cdot \mathbf{q} = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = \nabla \cdot (\mathbf{K} \cdot \nabla h) = 0 \quad \text{<식 9>}$$

대수층이 균질하고 등방성을 지닌 경우에 <식 9>는 Laplace 등식으로 간략하게 정리된다.

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = \nabla^2 h = 0 \quad \text{<식 10>}$$

만약 <식 9>에서 특정한 지하수 공급원(source) 또는 흡수원(sink), W , 이 존재할 경우에는 지하수 유동은 다음의 식에 의해 지배받는다.

$$\nabla \cdot (\mathbf{K} \cdot \nabla h) \pm W = 0 \quad \text{<식 11>}$$

일반적으로 지하수의 정상상태는 수두의 변화 요인 (강우, 양수, 기압변화 등)이 효과적으로 작용하지 않거나, 또는 작용 후 충분한 시간이 흘러 더 이상의 수두 변화가 없는 상태에 이르렀을 때 나타난다.

2) 비정상상태 (transient state)

비정상상태는 시간에 따른 지하수의 수두변화가 있는 경우이다. 다시 말해 단위부피의 대상영역(control volume)에 유입되는 유체질량의 속도와 유출되는 유체질량의 속도에 차이가 있어서 대수층 내 유체질량에 변화가 생기는 경우이다.

비정상상태의 지하수유동방정식은 지하수의 공급원이거나 흡수원이 없는 경우 다음의 식을 따른다.

$$S_s \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) \\ S_s \frac{\partial h}{\partial t} = \nabla \cdot (\mathbf{K} \cdot \nabla h) \quad \text{<식 12>}$$

대수층의 두께가 일정한 2차원의 대수층의 경우, <식 12>는 다음의 식이 된다.

$$S \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(T_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(T_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) \quad \text{<식 13>}$$

이 때, T 는 투수계수이고 S 는 저유계수이다.

3. 지하수유동 시스템과 유선망(flow nets)

지하수 유선망 (flow nets)

지하수는 에너지 차에 의해서 등수위선의 높은 곳에서 낮은 곳으로 흐른다. 따라서 지하수의 흐름경로를 나타내는 유선은 등수위선과 직각으로 교차한다. 이런 유선과 등수위선이 교차하여 이루어진 곡선군을 유선망(flow nets)이라고 한다.

유선망의 유선은 함양지역에서 발산하고 배출지역에서 수렴한다. 일반적으로 강우가 많은 우기에는 하천으로 지하수가 배출되고 건기에는 지하수위가 하천수위보다 낮아져 하천에서 지하수로 물이 유입이 발생한다.

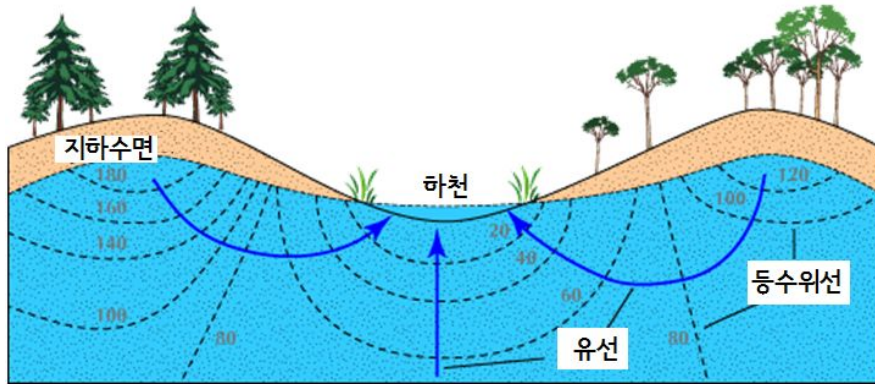
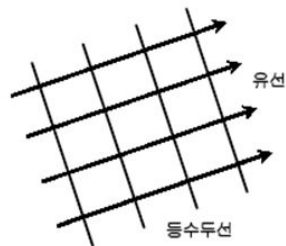


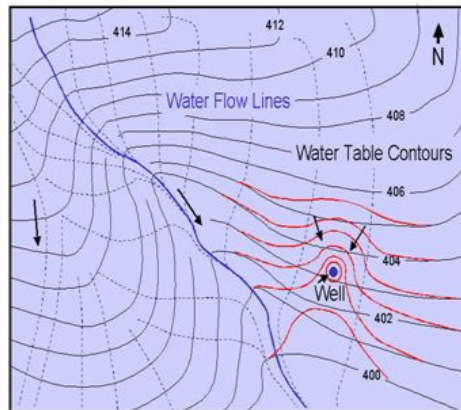
그림 4 유선망 (출처: <http://www.gg.uwyo.edu/geol1100j/index.asp>)

지하수 유동시스템에서의 유선망의 대표적인 특성인 다음과 같다.

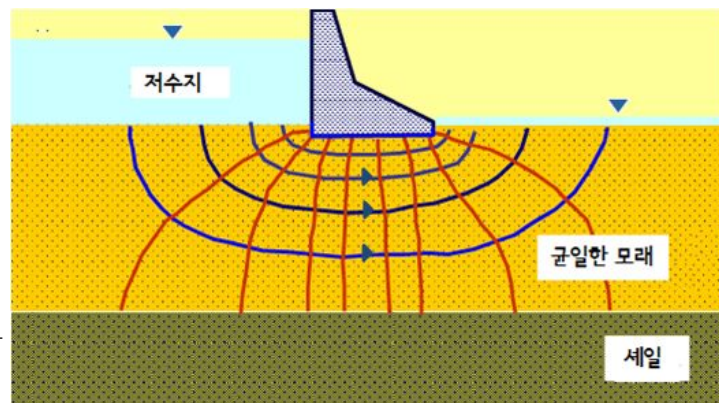
- 등수위선은 일정한 수두간격으로 작성한다.
- 수두구배는 등수위선의 간격에 반비례한다.
- 등방성 매질에서 등수위선과 유선은 항상 직교한다.



- 등수위선 사이의 거리가 멀면 유선의 간격도 멀어진다.
- 대규모의 강이나 바다, 호수 등의 지표수체는 수두가 일정하므로 등수위선과 같은 역할을 한다. 따라서 유선과 수직으로 교차하고 유선이 시작되거나 끝나게 된다.

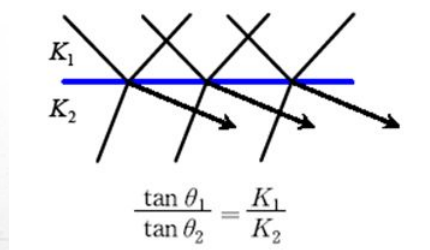


- 지하수유동이 불가능한 불투수성 경계면(예를 들어, 차수벽, 절리가 거의 없는 기반암 등)은 등수위선과 수직으로 교차하고 유선과 평행하다.

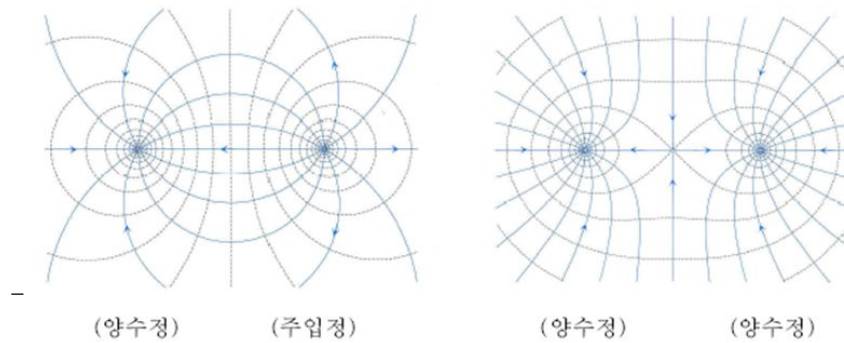


- 출처: <http://www.docstoc.com/docs/33022217/Illustrations-of-flow-nets>

- 불균질한 매질을 통과할 때 그 경계면에서 유선은 tangent law를 따른다.



- 수리전도도가 큰 지역에서 등 수위선의 간격이 넓어진다.
- 지하수관정에서 지하수 채수 시에는 유선이 수렴하고, 지하수 주입시에는 유선이 발산한다.



- 이방선 매질에서는 등수위선과 유선이 수직으로 교차하지 않는다.

지하수유동 시스템

실제 포화대에서의 지하수의 유동은 매우 복잡하다. 각기 다른 규모, 다른 심도의 지하수유동 시스템이 동시에 형성될 수 있다. 국지적인 유동시스템은 가장 다이나믹하면서 얇은 지점에 형성되는 유동시스템인데 지하수면에서 함양된 지하수가 인접한 낮은 지점으로 유출된다. 따라서 지하수는 국지적 유동시스템에서 지표수와와의 상호작용이 가장 활발하게 일어난다. 국지적 유동 시스템보다 깊은 심도에는 지하수유동이 중간적 규모 또는 광역적 규모로 일어난다. 깊은 유동시스템에서 물은 좀 더 긴 이동경로를 가지고 지하매체와 더 오래 접촉하게 된다. 따라서 광역적 유동시스템(regional flow system)에서의 지하수는 용존 화학물질의 농도가 높게 나타난다. 광역적인 규모에서 지하수는 지형적으로 높은 곳에서 지하수의 함양이 일어나서 낮은 곳으로 흘러 결국에는 낮은 곳에 위치한 하천이나 바다로 배출하게 되는데(그림 2), 그럼으로써 하천의 수질에 상당한 영향을 미치게 된다. 광역적 규모의 유동 시스템에서는 지하수가 함양되어 배출되는 데까지 수 천년에서 수 만년 정도의 시간이 소요된다. 지하수함양과 배출지점 간에 지형적 요철에 의한 지형물이 있는 경우에는 일시적인 지하수배출이 발생하는데 이 때는 지하수의 이동시간은 수 십년에서 수 백년정도인 중간유동시스템이 형성된다. 한편 수십 내지 수백미터 이내의 인접한 지형으로 물이 유출될 때 물의 체재시간과 이동경로가 짧은 국지적 유동시스템인 경우에는 지하수 수질이 대수층의 지질학적 성분에 크게 영향을 받지 않는다(그림 *).

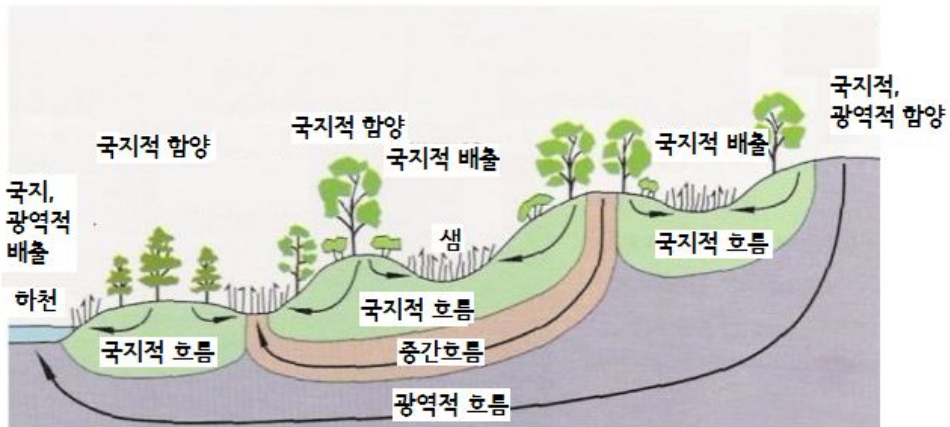


그림 5. 지하수 유동 시스템 (Brown et al., 2007)