

〈特輯 地下水〉

地下水의 模型化

Modeling of Groundwater

李 正 圭*
Lee, Jong Kyu

1. 서론

대수층(Aquifer)의 수문지질학적 성질(Hydro-geologic properties)은 일반적으로 아주 복잡하고 경계조건이 대단히 불규칙하고 變化가 심하기 때문에 實際 지하수현상에 대한 정확한 解析을 하기는 어려울 뿐 아니라 장래의 계획된 事業에 대한 응답(Response)을 얻기 위하여 대수층 自體에 대한 실험을 실시한다는 것은 불가능하다. 따라서 지하수의 실제현상을 그대로 취급하는 것이 아니라 여러가지 假定하에 單純化(Simplify)하여 취급하게 되며 이와같은 단순화 과정을 지하수의 模型化(modeling)라고 한다.

地下水를 연구하기 위한 模型은 물리적모형(Physical model)과 수학적모형(Mathematical model)의 2가지로 나눌 수 있다. 수학적모형은 대수층의 성질과 경계조건이 비교적 간단한 경우에 적용할 수 있는 해석적모형>Analytical

model)과 해석적으로 解를 구하기 힘든 경우에 근사해를 구하는 數值모형(Numerical model)을 포함한다. 수학적모형은 간단히 설명하기 어렵기 때문에 紙面관계로 本稿에서는 제외하고 물리적모형에 한정해서 설명하기로 한다.

2. 모형의 종류

물리적모형은 수학적모형과 병행하여 이용될 수 있으며 特히모형이 아주 복잡하여 해석적 解를 직접 구하는 것이 不可能한 경우에 효과적인 方法이라고 할 수 있다.

물리적모형은 크게 모래함모형(Sand tank model)과 아나로그모형(Analog model)으로 나눌 수 있으며 더 상세한 구분은 Fig.1과 같다.

2.1 모래함모형

모래함모형의 축적비율의 결정은 水理모형의 설계와 마찬가지로 기하학적상사, 운동학적상사

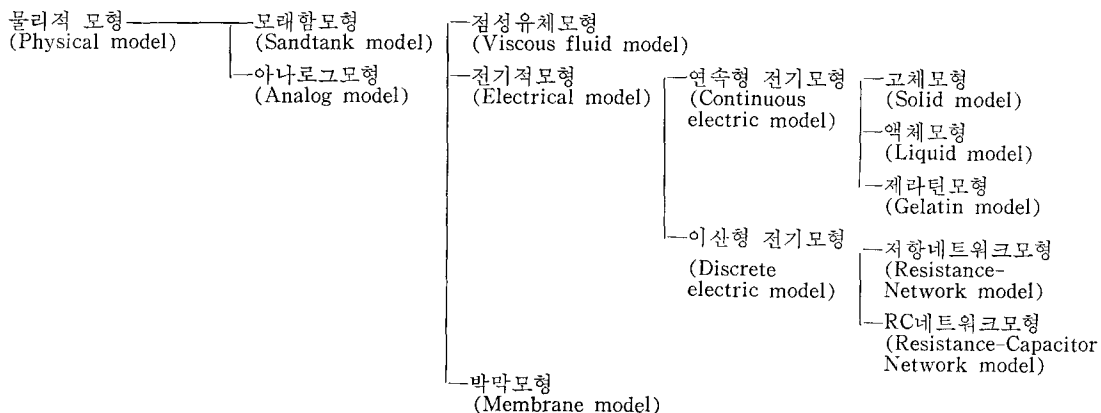


Fig. 1. Typer of physical models of groundwater.

* 漢陽大學校 土木工學科 教授 工博

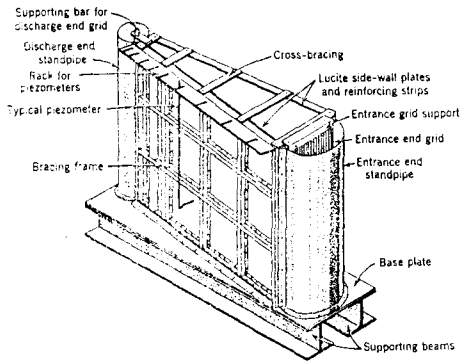


Fig. 2. Sand model of a well sector to study flow to a well penetrating an unconfined aquifer.

와 동역학적상사의 조건을 만족시켜야 한다.

기하학적상사는 모형과 원형의 길이의 비로써 다음과 같이 정의된다.

$$L_r = \frac{L_m}{L_p}$$

여기서 첨자 r 는 비, m 는 모형, p 는 원형을 의미한다.

Darcy의 법칙이 모형과 원형에 적용되므로 等方性매체의 경우에 속도의 비는 다음과 같다.

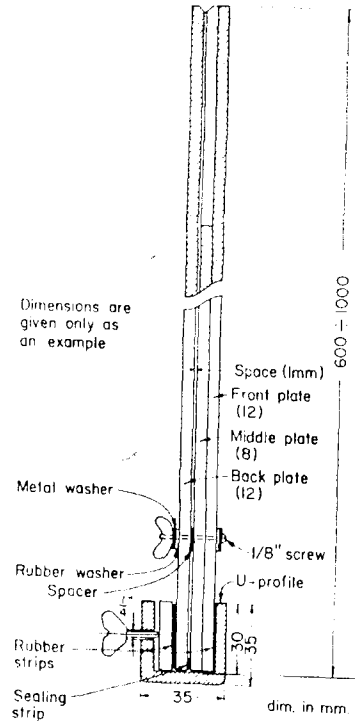
$$V_r = \frac{V_m}{V_p} = \frac{k_m i_m}{k_p i_p}$$

여기서 k 는 투수계수, i 는 동수경사이다.

모래함모형은 多孔性구조체(모래, 흙, 유리球 등)로써 채워진 강성이고 水密性인 용기, 流體 공급시스템 및 계측기기로 이루어지며 형태는 여러가지가 있다. Fig. 2는 그 한 예이다.

水位나 동수두위(Piezometric level)는 피에조미터로 측정하는 것이 바람직하며 모형에 사용되는 액체는 보통은 물이며 점성이 큰 액체나 2가지 이상의 액체가 사용될 수도 있다.

이 모형은 보통 2차원흐름에 이용되며 地下水의 일반적인 문제, 卽 定流, 不定流, 자유대수층과 피압대수층의 흐름, 우물에 관한 문제등에 이용될 수 있다. 모래함모형의 어려운 점은 현장상황을 어떻게 실험실모형으로 축소재현시킬 수 있는가 하는 점이며 모형실험에서는 모세관상승이 실제보다 상당히 크게 나타나므로 이에 대한 보정이 필요하다.



(a) Cross-section of a vertical Hele-Shaw analog.

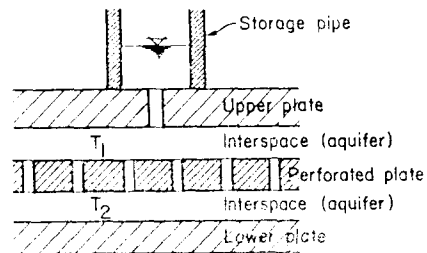


Fig. 3. (b) Simulation of a semipervious layer in a horizontal Hele Shaw analog.

2.2 아나로그모형

2.2.1 점성유체모형

점성유체모형은 Hele-Shaw 모형 또는 平行板 유추모형(Parallel plate analogy)이라고도 하며 2차원 지하수연구에 잘 알려진 方法이다. 이 모형은 多孔媒體속을 흐르는 포화흐름에 대한 미분방정식과 두개의 아주 가까운 平板사이를 흐르는 점성액체흐름(층류)에 대한 미분방정식사이에 相似性이 있다는 데 根據를 두고 있다. 모형의 종류는 수직형과 수평형의 2종류가 있다. (Fig. 3)

Darcy의 법칙에 대한 類推로부터 평판간격과 流體가 투수계수에 일치하도록 결정될 수 있

으며 속도와 時間의 此는 다음과 같다.

$$V_r = \frac{V_m}{V_p} = \frac{\rho_m b^2 \mu_p}{3 \rho_p k \mu_m} = \frac{b^2 \rho_r}{3 k \mu_r}$$

$$T_r = \frac{L_r}{V_r}$$

여기서 b 는 평판간격의 절반, ρ 는 유체밀도, μ 는 유체의 점성계수이다.

모형을 제작할 때 가장 유의할 점은 흐름에 가장 큰 영향을 주는 요소가 평판의 간격이므로 이것을 평판전체에 걸쳐서 일정하게 유지해 주는 것이다.

이 모형의 장점은 불규칙한 경계조건을 가진 부정류에 이용할 수 있으며, 염수침입, 홍수하천에 인접한 堤防貯留, 흠땀의 침투(Seepage) 등에 적용이 가능하다.

2.2.2 전기적모형

전기적모형은 저항(Resistor)과 축전기(Capacitor)의 전기적 네트워크라고 할 수 있으며 전산기가 출현하기 전인 1950년대에 널리 이용되었다.

모형의 유추(Analogy)는 전기도체를 흐르는 전류에 대한 옴의 법칙(Ohm's law)과 지하수 흐름에 대한 Darcy 법칙사이의 相似性에 있다. 전류의 흐름에 대한 옴의 법칙은 다음과 같다.

$$I = \sigma_0 \frac{dV}{dx}$$

여기서 I 는 전류밀도, σ_0 는 비전도도, dV/dx 는 전압구배이다. 전기적모형은 정상류에만 적용될 수 있으나 이 모형의 한가지 한계(Limitation)는 지하수의 水面을 결정해 주는 重力의 유추력(Analogous force)이 없다는 점이다.

1) 연속형 전기모형

연속적인 흐름場내의 모든 점이 모형에서 對應하는 점을 가지며 전기적 매개변수들이 原型場의 분포된 매개변수들에 직접 일치하여 대응한다.

a) 고체모형

전기도체로써 고체가 이용되며 도체로는 얇은 금속판, 카본지(Carbon paper로 Teledolts conducting paper를 사용함), 흑연등이 있다. 교류나 직류 다 같이 사용할 수 있으며 경계전극에 전류를 통하면 도체를 흐를 때 電位差가 발생한다. 등포텐셜은 검류계로 전압의 강하를

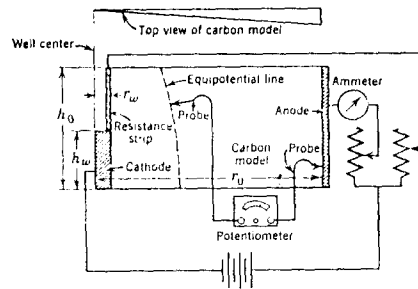


Fig. 4. Graphite model showing electrical circuit and connections to study unconfined radial flow to a well.

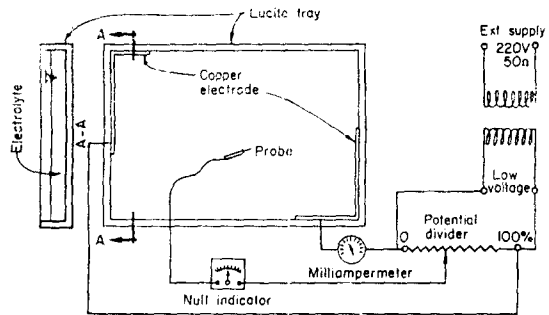


Fig. 5. Simplified circuit of electric analog(electrolytic tank).

을 측정하여 그릴 수 있으며 전압구배는 일정한 간격이 떨어져 있는 점에서 두 개의 측정(Probe)을 이용하여 구한다. Fig. 4는 고체모형의 한 예이다.

b) 액체모형

전기도체로 액체를 사용하는 이 모형은 등포텐셜과 流線의 흐름場을 얻는 데 有用하다. 간단한 모형은 水密性의 용기, 전해질, 예를들면 수도물이나 전도도가 낮은 황산구리용액과 전기쇼크를 피하기 위하여 전압이 낮은 전기회로로 이루어진다. Fig. 5는 액체모형의 한 예이다.

전극은 모형의 경계에 부착되며 등포텐셜이 측침에 의하여 추적된다. 이 모형은 교류를 사용하여 흠땀의 침투문제, 揚水로 인한 지하수위 저하문제에 이용될 수 있다.

c) 제라틴모형

이 모형은 뜨거운 제라틴에 少量의 염화나트륨이나 황산구리를 첨가한 후에 대수층의 경계를 나타내는 형틀(mold)에 이것을 퍼부어서 만

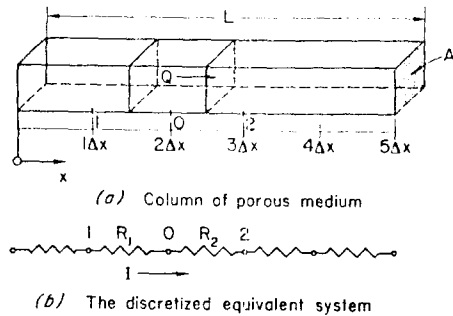


Fig. 6. Electric analog for one-dimensional steady flow.

든다. 투수계수가 다른 영역은 적당한 염분농도를 가진 제라틴의 삼입구간을 넣음으로써 모의 발생시킬 수 있으며 대수층두께의 변화는 제라틴의 두께를 변화시킴으로써再現이 가능하다. 이 모형에 의한 실험예는 피압대수층의 우물문제에 적용한 바 있다. [6]

2) 이산형전기모형

이 모형은 연속형전기모형과는 달리 연속적인 원형場의 대수층의 성질을再現하기 위하여 전기회로요소들이 네트워크의 격자점에 집중되어 있다.

a) 저항네트워크모형

이 모형은 고정저항이나 변저항(Fixed or variable resistor)의 격자망으로 이루어진다. 저항네트워크는 이 저항들을 이용하여 흐름영역을 모의발생한다. 지하수흐름과 전기흐름과의 유추관계는 대수층에 대한 물收支方程式과 전기에 대한 Kirchhoff의 법칙의 유추로부터 解析이 가능하다. [1, 4, 7]

Fig. 6, 7, 8은 모형의 예들이며 1, 2, 3차원 정상류에만 적용할 수 있다.

b) R-C 네트워크 모형

이 모형은 R-C 네트워크로 알려진 확산방정식의 모형에서 축전기가 지수지의 저류용량을 재현하기 위하여 격자점에 추가되어 있다. (Fig. 9)

저항네트워크에 축전기를 연결하면 축전기에 저장된 전기의 양이 축전기를 통한 전압강하에 정비례한다. 네트워크에 전압이 변하면 전기가 소모되거나 축전기로 부터 얻어지게 되며 피압대수층의 저류량으로부터 방출되는 것을 재현시

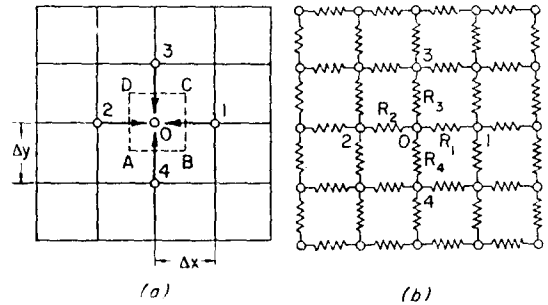


Fig. 7. An electric analog for two-dimensional steady flow.

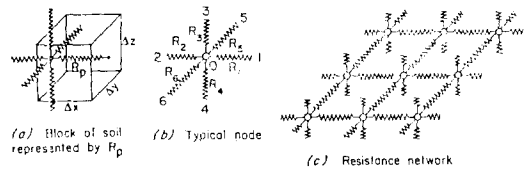


Fig. 8. An electric analog for three-dimensional steady flow.

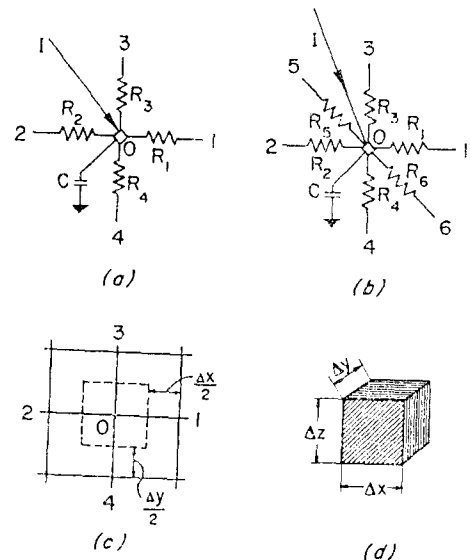


Fig. 9. RC Network for two and three-dimensional domains.

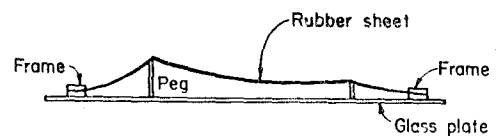


Fig. 10. The membrane analog.

킨다. 이 모형은 2,3 차원 대수층에 적용할 수 있으며 직류를 사용한다.

2.2.3 박막모형

박막모형은 고무박막으로 만들어진다. (Fig. 10)

경사가 작을 때 박막의 표면식은 원주좌표에서 다음과 같이 표시된다.

$$\frac{d^2z}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dz}{dr} = -\frac{W_m}{T_m}$$

여기서 dz 는 중심치점점에서 반경방향 dr 만큼 떨어진 점에서 처짐(Deflection)이고 W_m 는 단위면적당 박막의 무게, T_m 는 균일한 박막張力이다. 윗 식은 W_m/T_m 이 zero에 접근할 때 우물에 관한 Laplace 방정식에 근사하게 된다. 우물주위의 自由水面의 형상을 연구하기 위하여 고무박막은 수평방향으로 원주경계에 균일한 장력을 받도록 고정된다. 이 모형은 유선망의 모양을 직접 보여주며 복잡한 경계조건을 가진 2차원 정상류에 적용할 수 있다. 경계조건들은 박막구조틀(Frame)에 의하여 조절된다.

3. 모형의 검정(Calibration)

모형을 제작한 후에는 예측(Prediction)이 행해지기 전에 검정이 행해 져야 한다. 검정이란 모형의 여러가지 매개변수들이 결정되거나 증명되어 지는 과정을 말한다. 검정은 과거의 관측 기록으로부터 얻은 자료 즉 水位, 揚水量, 수질, 접촉영역지점(Interface position)등에 근거를 두어야 한다. 모형에서 발생된 응답결과는 대수층에서 얻어진 응답기록과 비교되며 두응답의 차가 기준값이하로 되었을 때 검정이 되었다고 말한다. 어제 검정이 끝난 모형을 가지고 장래에 발생가능한 예측실험을 수행할 수가 있다.

4. 맺음말.

지하수의 모형은 요구되는 정밀도, 실험경비, 검정자료의 확보여부에 따라 그 規模와 실험方

法들이 결정된다. 또한 모형은 요구되는 事項에 따라 광역적인 일반적 실험에서 지역적인 세부적 사항으로 단계적으로 나누어 시행될 수 있다.

일반적으로 모든 시스템은 하나의 副시스템(Subsystem)과 이것을 제외한 나머지 시스템과 相互作用을 하는 보다 큰 시스템의 一部라는 것을 알아야 한다. 대수층의 시스템은 경계조건이 주어지면 시스템의 어떠한 부분도 모형화가 가능하다고 할 수 있다.

모형은 주어진 지역 또는 문제에 대하여 유일한 것은 없으며 가장 정교(精巧)한 모형을 만들려고 해서는 안 된다. 本稿는 부족한 면이 많지만 이상으로 끝맺고자 하며 보다 자세한 것은 참고문헌이나 기타 관련 논문들을 참고하기 바란다. 끝으로 물리적모형은 수학적모형과는 別個의 것이 아니고 상호보완적인 역할을 하고 있기 때문에 수학적모형을 검정하는데 유용하고 효율적으로 이용될 수 있다는 점을 잊어서는 안 된다.

참 고 문 헌

- 1) Bear, J., *Dynamics of Fluids in Porous Media*, Elsevier, New York, 1972.
- 2) Bear, J., *Hydraulics of Groundwater*, McGraw-Hill, 1979.
- 3) Wang, H.F. and Anderson, M.P., *Introduction to Groundwater Modeling*, Freeman, San Francisco, 1982.
- 4) Marino, M.A. and Luthin, J.N., *Seepage and Groundwater*, Elsevier, Amsterdam, 1982.
- 5) Verruijt, A., *Theory of Groundwater Flow*, Macmillan, 1970.
- 6) Todd, D.K., *Ground Water Hydrology*, Wiley, 1959.
- 7) Walton, W.C., *Groundwater Resource Evaluations*, McGraw-Hill, 1970.