

복합다상시스템을 이용한 범용적 지하수 모형의 개발 및 적용

김 준 현

강원대학교 공과대학 지구환경공학부

Development and Application of Comprehensive Groundwater Model Using Composite Multiphase System

Joon Hyun Kim

Division of Earth and Environmental Engineering, Kangwon National University

1. 서론

지하에 존재 가능한 모든 상과 유체의 이동 형태를 다음 복합다상시스템으로서 Fig. 1과 같이 나타낼 수 있다. 통상 이러한 시스템은 불연속체이기 때문에 연속체를 가정으로 한 지배 방정식을 유도하기 위해서 Fig. 1의 대표적 요소부피²⁾를 선정하여 이러한 부피내의 모든 속성들을 평균화하여 연속체 내에서의 질량 및 운동에 대한 지배방정식을 유도한다. 이러한 과정은 미시적인 불연속체를 거시적인 연속체로 변화하는 과정을 의미한다. 통상 복잡한 수학적 이론을 이용하여 나타나게 되는데, 이러한 수학적 유도과정 대신에 Fig. 2의 체계적 검사 부피를 개발하여 간단히 지배식을 유도할 수 있다. 체계적 검사 부피는 각상의 부피분을 또는 포화도와 각 상내에 존재하는 물질의 질량분율로 표현되는 복합다상시스템을 표현하는 방법이다.

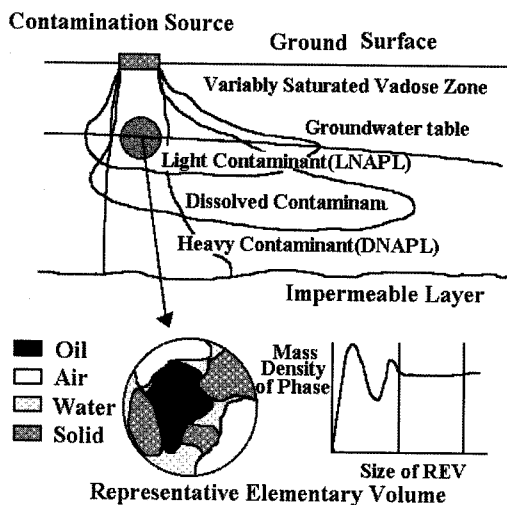


Fig. 1. Composite Multiphase System.

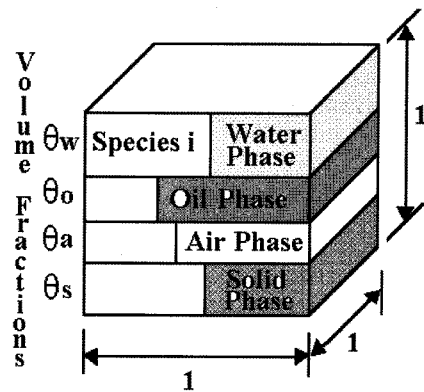


Fig. 2. Schematic Control Volume.

이러한 복합다상유동 시스템에 대해서 물질평형 및 힘평형 관계를 고려하여 지하수 유동 및 오염 물질 이동에 대한 범용적 지배방정식을 유도하였다. 이러한 지배방정식의 파라미터만 조정하면 기존의 각종 지하수유동 및 오염물 이동을 해석할 수 있다. 본 모형의 범용성은 이러한 파라미터 조정 기법에 의해 이루어질 수 있었다. 즉, 사용자는 전산모형 운영 시 입력자료에서 파라미터를 선택적으로 조절함으로써 복합다상유동 문제이외에 기존의 각종 지하수 유동 및 오염현상을 모델링할 수 있다. 이러한 범용성은 기존의 각종 전산모형이 지하수 유동 형태별로 개발되어 현상이 복잡하거나 여러 형태에 걸쳐서 발생하는 경우 해석이 불가능하다는 단점이 있으나, 본 모형을 사용하면 이러한 문제점을 해결할 수 있다. 사용자의 편의성을 도모하기 위하여 현재 파라미터 조정 및 입력자료의 입력에 관련된 GUI(Graphical User Interface)를 개발하였다. 본 모형은 수치해석기법으로서 다차원 유한요소법을 사용하여 문제에 따라 1, 2, 3차원을 선택적으로 모델링할 수 있으며, 유한요소법의 특징에 의하여 지리정보시스템과 연동이 매우 용이하다. 지리정보시스템과의 연동을 프로그램 엔진 수준에서 구현하기 위하여 지리정보시스템을 Visual Basic상에서 운영하면서 GUI와 연결하는 작업을

E-mail: joonhkim@kangwon.ac.kr

Tel: 033-250-6354

Fax: 033-254-6357

수행하였다.

2. 범용적 지배방정식의 유도 및 적용

2.1. 복합다상유동의 질량평형방정식

위의 체계적 검사 체적을 이용하여 각 상내 포함되어 있는 물질 i 에 대한 질량평형관계를 고려하여 미시적 물질수지식을 유도한 다음, Fick 플럭스를 사용하여 거시적 물질수지식을 얻을 수 있다. 입자의 유속에 의한 이동과 자체 발생을만 고려하여 전체 상내의 i 물질에 대한 질량평형관계를 고찰하면 다음과 같다.

$$\sum_{\alpha=1}^4 [(m_{\alpha}^{i,n+1} - m_{\alpha}^{i,n}) \Delta x \Delta y \Delta z = \left(\frac{m_{\alpha}^{i,n} V_{\alpha,x}^i - m_{\alpha}^{i,n} V_{\alpha,x+\Delta x}^i}{\Delta x} + \dots + g_{\alpha}^i \right) \Delta t]$$

여기서, i = 각 상내 구성물의 종류를 표시하는 지수
 α = 물, 유류, 가스, 고형물(토양) 상등을 나타내는 지수
 n = 시간공간을 나타내는 지수

$$m_{\alpha}^{i,n} = \frac{M_{\alpha}}{\Delta x \Delta y \Delta z} = \frac{M_{\alpha}}{U} = \frac{U_{\alpha}}{U} \frac{M_{\alpha}^i}{U_{\alpha}} = \theta_{\alpha} C_{\alpha}^i = \frac{U_{\alpha}}{U} \frac{M_{\alpha}}{U_{\alpha}} \frac{M_{\alpha}^i}{M_{\alpha}} = \theta_{\alpha} \rho_{\alpha} w_{\alpha}^i$$

= n 시각에서의 복합다상시스템내의 단위부피당 질량
 $V_{\alpha,x}^i$ = 입자의 x 방향의 유속
 g_{α}^i = 생화학적반응이나 유입원에 의한 α 상내 i 물질의 생성속도
 $\theta_{\alpha} = \frac{U_{\alpha}}{U} = \frac{U_{\alpha}}{U} \frac{U_v}{U} = \phi S_{\alpha}$ = 각 상의 부피분율
 ϕ = 토양의 공극율, S_{α} = 각 상의 포화도
 $C_{\alpha}^i = \frac{M_{\alpha}^i}{U_{\alpha}} = \rho_{\alpha} w_{\alpha}^i$ = α 상내의 i 물질의 농도
 $w_{\alpha}^i = \frac{M_{\alpha}^i}{M_{\alpha}} = \frac{\alpha \text{상내 } i \text{ 물질의 질량}}{\alpha \text{상의 질량}} = \alpha \text{ 상내 } i \text{ 물질의 질량분율}$

위의 물질평형식을 미분식으로 변환한 후에 각 물질의 농도차에 의한 분자확산에 의한 이동을 더하면 다음과 같은 미시적 물질수지식을 얻을 수 있다.

$$\sum \left[\frac{\partial m_{\alpha}^i}{\partial t} + \nabla (m_{\alpha}^i \vec{V}_{\alpha}^i) = \nabla \cdot \mathbf{D}_{m,\alpha}^i \nabla m_{\alpha}^i + g_{\alpha}^i \right]$$

여기서, i = 각 상내 구성물의 종류를 표시하는 지수
 α = 물, 유류, 가스, 고형물(토양)상 등을 나타내는 지수

$$\vec{V}_{\alpha}^i = \alpha \text{ 상내의 } i \text{ 물질의 속도}$$

$$D_{m,\alpha}^i = \alpha \text{ 상내의 } i \text{ 물질의 농도차이에 의한 분자 확산 계수}$$

거시적 물질평형식을 유도하기 위하여 입자유속을 상의 유속 및 확산으로 표현하기 위하여 다음과 같이 유체 상의 유속을 가감한다.

$$\vec{V}_{\alpha}^i = \vec{V}_{\alpha} + \vec{V}_{\alpha}^i - \vec{V}_{\alpha}$$

미시적 입자의 유속에 의한 유송은 다음과 같이 거시적 상의 유속에 의한 유송과 난류 유송의 합으로 표현될 수 있다. 이때 난류 유송은 Fick의 수리적 확산의 형태로 표현된다.

$$m_{\alpha}^i \vec{V}_{\alpha}^i = m_{\alpha}^i \vec{V}_{\alpha} + m_{\alpha}^i (\vec{V}_{\alpha}^i - \vec{V}_{\alpha}) = \theta_{\alpha} C_{\alpha}^i \vec{V}_{\alpha} + \theta_{\alpha} C_{\alpha}^i (\vec{V}_{\alpha}^i - \vec{V}_{\alpha}) = \theta_{\alpha} C_{\alpha}^i \vec{V}_{\alpha} - \theta_{\alpha} \mathbf{D}_{\alpha}^i \nabla C_{\alpha}^i = \theta_{\alpha} \rho_{\alpha} w_{\alpha}^i \vec{V}_{\alpha} - \theta_{\alpha} \mathbf{D}_{\alpha}^i \nabla (\rho_{\alpha} w_{\alpha}^i)$$

위의 유속에 의한 이류항 및 확산항을 미시적 물질평형식에 삽입하면 다음과 같은 거시적 물질수지식을 얻을 수 있다. 본 식은 각 상의 i 물질의 유속 및 확산에 의한 이동, 내부 발생을 포함한다.

$$\sum_{\alpha=1}^4 \left[\frac{\partial (\theta_{\alpha} \rho_{\alpha} w_{\alpha}^i)}{\partial t} + \nabla (\theta_{\alpha} \rho_{\alpha} w_{\alpha}^i \vec{V}_{\alpha}) = \nabla (\theta_{\alpha} \mathbf{D}_{\alpha}^i \nabla (\rho_{\alpha} w_{\alpha}^i)) + \theta_{\alpha} J_{\alpha}^i + \theta_{\alpha} g_{\alpha}^i \right]$$

여기서, 확산계수 \mathbf{D}_{α}^i 는 각 상의 유속 및 복합물질의 특성에 좌우된다.

복합다상유동의 물질이동식을 운동방정식과 연계하여 풀어 주면 지하의 유체 유동의 압력 및 유속을 구할 수 있다. 각 상별 토질 공극내에서의 존재 정도 즉 포화도 혹은 부피분율은 각 상간의 압력차에 의한 실험식이나, 부피 분율에 대한 방정식을 물질이동식, 연속방정식과 연계하여 해석함으로써 구할 수 있다. 또한, 각 상에 존재하고 있는 물질의 농도는 이미 계산된 각 상의 압력 및 유속을 이용하여 물질이동식을 질량분율 혹은 농도에 대하여 재구성하여 해석함으로써 계산할 수 있다.

2.2. 복합다상유동의 운동방정식

유체의 압력, 중력, 점성력 및 각 상의 상대적 유속차에 의한 반발력을 고려하여, α 상내의 i 물질에 대하여 힘 평형관계를 고려하여 미시적 Navier-Stoke식을 유도하면 다음과 같다.

$$\rho_{\alpha}^i \frac{D \vec{V}_{\alpha}^i}{D t} = - \nabla (P_{\alpha}^i + \rho_{\alpha}^i g y) + \mu_{\alpha} \nabla^2 \vec{V}_{\alpha}^i + \vec{R}_{\alpha}^i$$

여기서, ρ_{α}^i 는 α 상내의 i 물질의 밀도이고, P_{α}^i 는 이 물질

에 작용하는 압력이고, \vec{R}_α^i 는 상간 유속차에 의한 반발력, μ_α 는 동역학적 점성계수, y 는 수직방향을 나타낸다.

반발력은 운동량 교환에 대한 개념으로 α 상내의 i 물질의 운동에 비하여 천천히 움직이는 유체가 저항하는 힘을 나타내는 것이다. 다음과 같은 실험식으로 나타낼 수 있다.

$$\vec{R}_\alpha^i = \theta_\alpha \frac{\mu_\alpha}{\lambda_\alpha} (\vec{V}_s^i - \vec{V}_\alpha^i)$$

여기서, λ_α 는 α 상의 유체 전도도 계수이고, \vec{V}_s^i 는 토양 상내의 i 물질의 유속이다.

각 상내의 모든 물질에 대한 힘평형 관계를 합하면 다음과 같은 다중다상시스템에서의 미시적 운동방정식을 얻을 수 있다.

$$\sum_{i=1}^{ns} \left[\rho_\alpha w_\alpha^i \frac{D\vec{V}_\alpha^i}{Dt} = -\nabla(P_\alpha^i + \rho_\alpha w_\alpha^i g y) + \mu_\alpha \nabla^2 \vec{V}_\alpha^i + \vec{R}_\alpha^i \right]$$

지하에서 유체의 유동은 유속이 느린 점을 고려하고, 각 상간의 점성 효과를 무시하고, 복합의 영향을 무시하면($\sum \rho_\alpha w_\alpha^i = \rho_\alpha, \sum P_\alpha^i = P_\alpha, \sum R_\alpha^i = R_\alpha$), 이동성 토질의 공극 매질에 있어서의 각 상의 유속은 운동방정식을 풀 필요없이 다음과 같이 수정된 Darcy의 식으로 나타내게 된다.

$$\begin{aligned} \vec{V}_\alpha &= -\frac{\lambda_\alpha}{\theta_\alpha \mu_\alpha} \nabla(P_\alpha + \rho_\alpha g y) + \vec{V}_s \\ &= -k \frac{k_{r\alpha}}{\theta_\alpha \mu_\alpha} (\nabla P_\alpha - \rho_\alpha \vec{g}) = \vec{V}_D + \vec{V}_s \\ \vec{V}_D &= -k \frac{k_{r\alpha} \rho_w g}{\theta_\alpha \mu_\alpha} \nabla \left(\frac{P_\alpha}{\rho_w g} + \frac{\rho_\alpha}{\rho_w} y \right) = \\ &\quad -\frac{K_\alpha}{\theta_\alpha} \nabla \left(h_\alpha + \frac{\rho_\alpha}{\rho_w} y \right) = -\frac{K_\alpha}{\theta_\alpha} \nabla H_\alpha \end{aligned}$$

여기서, $K_\alpha = k \frac{k_{r\alpha} \rho_w g}{\mu_\alpha}$ 는 유체 투과도계수, k 는 토양 및 유체 특성에 따라 결정되는 고유 투과도 계수, $k_{r\alpha}$ 는 상대적 투과도 계수, \vec{V}_D 은 수정된 Darcy의 유속, \vec{V}_s 은 토양의 이동 속도이다.

2.3. 복합다상유동의 물질이동식

지점별 물의 밀도의 변화를 무시할 수 있다면, 압력항을 물의 수두항으로 변환하여, 지배식의 표현을 간단화할 수 있다. 흡착항을 분리시킨 다음, 연속방정식과 운동방정식을 합하면 복합다상시스템에서의 유체 유동에 대한 일반적인 이동방정식이 유도된다. 통상, 지하 매체 공극 변화 정도가 작으므로, 지하 매체의 토양 구조의 변화 및 유체의 압축성에 의한 저류능을 고려하여야 한다. 이러한 토양의 저류능력은

각 유체상의 압축성 및 대수층 토질의 압축성에 의존한다. 따라서, 공극 매질 및 유체의 저류능력에 대한 계수를 고려하여 이동방정식의 시간 미분항들을 변환하면, 다음의 지하내 유체의 복합다상유동의 일반적인 지배방정식을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} &\sum_{\alpha=1}^3 \left[\sum_{\beta=1}^3 (\rho_\beta w_\beta^i S_\beta S_{\beta\alpha}) \frac{\partial h_\alpha}{\partial t} + \phi \rho_\alpha w_\alpha^i \frac{\partial S_\alpha}{\partial t} + \phi \rho_\alpha S_\alpha \frac{\partial w_\alpha^i}{\partial t} \right] + \\ &\quad \frac{\partial((1-\phi)\rho_s w_s^i)}{\partial t} \\ &= \sum_{\alpha=1}^3 \left[\nabla(\rho_\alpha w_\alpha^i K_\alpha (DEL h_\alpha + \frac{\rho_\alpha}{\rho_w} j)) + \nabla(\phi S_\alpha D_\alpha^i \nabla(\rho_\alpha w_\alpha^i)) \right] \\ &\quad - \nabla((1-\phi)\rho_s w_s^i \vec{V}_s) + \sum_{\alpha=1}^4 [\theta_\alpha (I_\alpha^i + g_\alpha^i)] \end{aligned}$$

2.4. 기존의 지하 유체 유동의 지배방정식

기존의 지하 유동 및 오염물의 이동에 대한 각종 지배방정식은 다음과 같이 파라미터 조정 기법에 의해 유도할 수 있다. 다음의 Table 1에 이러한 지배식을 나타내었다. Table 1에 나타난 지배식은 기존 지하수 유동의 지배방정식과 동일한 형태를 보인다.

3. 모형의 파라미터 분석

복합다상시스템의 지배식은 여러 계수를 필요로 하는데, 상의 거동에 대한 계수와 흡성 물질의 변환에 대한 계수로 크게 나눌 수 있다. 상의 거동에 대한 계수는 각상의 압력차에 따라 변하는 포화도의 실험식, 상의 포화된 정도에 따라 변하는 상대적 투과도의 실험식 등이 있다. 각 물질의 변환에 대한 계수는 해석을 간단히 하기 위하여 순간적 변환을 가정하여, 분배의 개념을 사용하여 분배계수로서 나타내거나, 흡탈착이나 유류의 용해의 경우 시간에 의존도가 크므로 시간에 따라 변하는 반응식을 이용하여 해석한다.

이외에도 중요한 계수로서, 생화학적 반응식 등에 포함되는 계수들이 있다. 비록 유체 유동 및 물질 이동이 매우 불규칙적이고 불확실한 지하에서 일어나지만, 일반적 지표수내의 물질 이동과 마찬가지로 대부분의 생화학적 반응들은 유체내에서 일어나고, 토질 각 알맹이에 흡착되거나 탈착되는 현상을 부가로 고려하여 주면 되기때문에, 식의 형태는 호소나 하천의 생태계 각 인자의 식들과 매우 비슷한 형태를 가지리라 사려되며, 오염물의 종류(예를 들면, 유기물과 무기물)와 토양내의 산소 존재 유무에 따라 다르다. 따라서, 생화학적 인자들을 모두 고려하려면, 일반 지표수 수질 관리의 접근 방식과 마찬가지로 산소 이동을 살펴서 산소의 존재여부가 생화학적 반응의 제한 여부로 작용하는지 반드시 확인하여야 한다.

반응식의 형태가 같다고 하더라도, 지표수와는 환경이 매우 틀리기 때문에 반드시 실험실에서 반응계수에 대한 추정 작업이 필요하다. 이러한 계수는 실험을 통한 구성식의 도출 방

Table 1. Governing Equations of Conventional Groundwater Problems

종류	조정된 계수 값	지배 방정식
포화 지하수 유동	$S_w = k_{rw} = w_w^w = 1$ $\nabla w_w^j = 0 \quad g_w^w (= g_w)$	$S_w w \frac{\partial h_w}{\partial t} = \nabla(\mathbf{K}_w(\nabla h_w + \vec{j})) + \frac{g_w}{\rho_w}$
불포화 지하수 유동	$w_w^w = u_a^p = 1, \nabla w_w^j = 0, S_w + S_\alpha = 1,$ $h_{\alpha w} = f(S_w)$	$\left(S_w S_{ww} + \phi \frac{\partial S_w}{\partial h_w} + \frac{\rho_a}{\rho_w} S_\alpha S_{\alpha w} + \phi \frac{\rho_a}{\rho_w} \frac{\partial S_w}{\partial h_w} \right) \frac{\partial h_w}{\partial t}$ $= \nabla(\mathbf{K}_w(\nabla h_w + \vec{j})) + \frac{g_w}{\rho_w}$ $S_w = f(h_w, h_\alpha)$
불포화 토양내 오염물 이동	$H_{aw}^o = \frac{w_a^o}{w_w^o}$ $H_{aw}^o = \frac{w_a^o}{w_w^o}$	$\frac{\partial}{\partial t} (w_w^o (\phi S_w \rho_w + \phi S_\alpha \rho_a H_{aw}^o + (1-\phi) \rho_s H_{sw}^o))$ $= \nabla(\rho_w w_w^o \mathbf{K}_w (DEL h_w + \vec{j})) + \nabla(\phi S_w \mathbf{D}_w^o \nabla(\rho_w w_w^o))$ $+ \nabla(\phi S_\alpha \mathbf{D}_\alpha^o \nabla(\rho_a H_{aw}^o w_w^o)) + g_w^o + g_a^o$
물상, 유류상, 개스상의 삼상 유동	$w_w^w = w_o^o = w_a^a = 1$ $S_w + S_o + S_a = 1$	$\frac{\partial(\phi S_w \rho_w)}{\partial t} = \nabla(\rho_w \mathbf{K}_w(\nabla h_w + \vec{j})) + g_w$ $\frac{\partial(\phi S_o \rho_o)}{\partial t} = \nabla(\rho_o \mathbf{K}_o(\nabla h_o + \frac{\rho_o}{\rho_w} \vec{j})) + g_o$ $\frac{\partial(\phi S_a \rho_a)}{\partial t} = \nabla(\rho_a \mathbf{K}_a(\nabla h_a + \frac{\rho_a}{\rho_w} \vec{j})) + g_a$
복합 다상 유동	$H_{ow}^o, H_{aw}^o, H_{sw}^o$ $=$ 분배계수	$\frac{\partial}{\partial t} (w_w^o (\phi S_w \rho_w + \phi S_o \rho_o H_{ow}^o + \phi S_\alpha \rho_a H_{\alpha w}^o$ $+ (1-\phi) \rho_s H_{sw}^o)) = -(\nabla(\phi S_w \rho_w w_w^o \vec{V}_w))$ $+ \nabla(\phi S_o \rho_o H_{ow}^o w_w^o \vec{V}_o) + \nabla(\phi S_\alpha \rho_a H_{\alpha w}^o w_w^o \vec{V}_\alpha)$ $+ \nabla(\phi S_w \mathbf{D}_w^o \nabla(\rho_w w_w^o)) + \nabla(\phi S_o \mathbf{D}_o^o \nabla(\rho_o H_{ow}^o w_w^o))$ $+ \nabla(\phi S_\alpha \mathbf{D}_\alpha^o \nabla(\rho_a H_{\alpha w}^o w_w^o)) + g_w^o + g_o^o + g_a^o$

범 이외에도, 현장에서 직접 관계되는 주 변수의 측정을 통하여, 수치 해석적인 자동적 예측 기법에 의하여 추정될 수

도 있다. 각 계수에 대한 실험식을 다음 Table 2에 나타내었다.

Table 2. Experimental Equations of Relevant Parameters

파라미터	실험식
상간 압력차와 포화도의 관계	- Brooks and Corey ³⁾ $S_w^e = (P_{dow}/P_{cow})^\lambda$ for $P_{cow} - P_{dow} > 0, = 1$ for $P_{cow} - P_{dow} \leq 0$ $S_t^e = (P_{dgo}/P_{cgo})^\lambda$ for $P_{cgo} - P_{dgo} > 0, = 1$ for $P_{cgo} - P_{dgo} \leq 0$ $S_g^e = 1 - S_t^e$ - Parker et al. ⁶⁾ $S_w^e = (1 + (\alpha_{ow} h_{ow})^n)^{-m}$ for $h_{ow} > 0, = 1$ for $h_{ow} \leq 0$ $S_t^e = (1 + (\alpha_{ao} h_{ao})^n)^{-m}$ for $h_{ao} > 0, = 1$ for $h_{ao} \leq 0$ $S_a^e = (1 + (\alpha_{aw} h_{aw})^n)^{-m}$ for $h_{aw} > 0, = 1$ for $h_{aw} \leq 0$
상대적 투과도와 포화도의 관계	- Brooks and Corey ³⁾ $K_{rw} = (S_w^e)^{(2+3\lambda)/\lambda}$ $K_{ro} = (S_t^e - S_w^e)^2 (S_w^e - (S_w^e)^{(2+\lambda)/\lambda})$ $K_{ra} = (1 - S_w^e)^2 (1 - (S_w^e)^{(2+\lambda)/\lambda})$ - Parker et al. ⁶⁾ $K_{rw} = (S_w^e)^{1/2} \{1 - (1 - (S_w^e)^{1/m})^m\}^2$ $K_{ro} = (S_t^e - S_w^e)^{1/2} \{1 - (1 - (S_w^e)^{1/m})^m\}^2 (S_w^e - (S_w^e)^{(2+\lambda)/\lambda})$ $K_{ra} = (1 - S_w^e)^2 (1 - (S_w^e)^{(2+\lambda)/\lambda})$
확산계수	- Corapcioglu and Baehr : $\mathbf{D}_\alpha^i = d_\alpha \lambda_\alpha + D_{m\alpha}^i \theta_\alpha \xi_\alpha$ - Kim, ⁵⁾ Abriola et al. ¹⁾ : $\mathbf{D}_{ij,\alpha}^i = a_{T,\alpha}^i \vec{V}_\alpha \delta_{ij} + (a_{L,\alpha}^i + a_{\alpha,T}^i) \frac{\vec{V}_{i,\alpha} \cdot \vec{V}_{j,\alpha}}{ \vec{V}_\alpha } + D_{m,\alpha}^i$

Table 2. Experimental Equations of Relevant Parameters(Cont.)

파라미터	실험식
유류상의 용해계수	<ul style="list-style-type: none"> - NAPL-물 평형분배식 : $x_w^i = \frac{\gamma_o^i x_o^i}{\gamma_w^i}$ - 평형 물질 용해 : $x_w^i = x_{w_s}^i x_o^i$ - 비평형 NAPL-물 물질이동 : $J = k_f(C_w^o - C_{ow}^o), \frac{\partial w_w^o}{\partial t} = k_{ow}^o (w_{w_s}^o - w_w^o)$
유류상 및 개스상의 휘발계수	<ul style="list-style-type: none"> - NAPL-물 분배식 : $w_a^o = \frac{P^o M^o}{\rho_a RT} \quad w_s^i = w_o^i \frac{P^o M^o}{\rho_a RT}$ - 공기 - 물 분배식 : $w_a^o = H_{aw}^o w_w^o$
복합물의 흡착계수	<ul style="list-style-type: none"> - 평형 흡착 : $w_s^o = H_{ws}^o w_w^o$ - 비평형 흡착 : $\rho_{wi} \frac{\partial w_{wi}^o}{\partial t} = \frac{k_{wwi}^o}{\phi S_{wi} R_i} (\rho_w w_w^o - \rho_{wi} w_{wi}^o)$ - van Genuchten : $\frac{\partial C_{wi}^o}{\partial t} = \frac{\alpha}{\theta_{wi} R_i} (C_w^o - C_{wi}^o)$
화학반응	<ul style="list-style-type: none"> - 평형 반응 $\frac{\partial}{\partial t} (\theta_w C_w^j) = \nabla \theta_w D_w^j \nabla (C_w^j + C_{wc}^j) - \overline{V_w^j} \nabla (C_w^j + C_{wc}^j) + \theta_w (g_w^j + I_w^j + g_{wc}^j + I_{wc}^j), \quad j = 1, 2, \dots, N_a$ $C_w^j = C_w^j + \sum_{i=1}^{M_x} a_{ij}^x x_i + \sum_{i=1}^{M_y} a_{ij}^y y_i + \sum_{i=1}^{M_z} a_{ij}^z z_i + \sum_{i=1}^{M_p} a_{ij}^p p_i$ - 흡착 반응 $\frac{\partial}{\partial t} (\theta_s C_s^j) = \theta_s (g_s^j - \lambda_s^j C_s^j), \quad \text{for } j = 1, 2, \dots, N_s$ $C_s^j = \sum_{i=1}^{M_y} a_{ij}^y y_i + \sum_{i=1}^{M_z} b_{ij}^z z_i + \sum_{i=1}^{M_x} a_{ij}^x x_i \quad \text{for } j = 1, 2, \dots, N_s$
화학반응	<ul style="list-style-type: none"> - 이온교환 $\frac{\partial}{\partial t} (\theta_w C_w^e) = \theta_w (g_w^e - \lambda_w^e C_w^e)$ $C_w^e = \sum_{i=1}^{M_e} v_i z_i$ 1) 착화반응 : $A_i^x = K_i^x \prod_{k=1}^{N_x} X_k^{a_{ik}^x}, \quad i = 1, 2, \dots, M_x$ 2) 흡착반응 : $B_i^y = K_i^y \left(\prod_{k=1}^{N_a} X_k^{a_{ik}^y} \right) \left(\prod_{k=1}^{N_s} Y_k^{b_{ik}^y} \right), \quad i = 1, 2, \dots, M_y$ 3) 침강 및 용해반응 : $1 = K_i^p \prod_{k=1}^{N_a} X_k^{a_{ik}^p}, \quad i = 1, 2, \dots, M_p$ 4) 산화 환원반응 : $C_e = C_e + \sum_{j=1}^{N_a} a_{je}^a c_j + \sum_{i=1}^{M_x} a_{ie}^x x_i, \quad S_e = \sum_{j=1}^{N_s} a_{je}^s S_j + \sum_{i=1}^{M_y} a_{ie}^y y_i, \quad P_e = \sum_{i=1}^{M_p} a_{ie}^p P_i$ $T_e = C_e + \sum_{j=1}^{N_a} a_{je}^a c_j + \sum_{i=1}^{M_x} a_{ie}^x x_i + \sum_{j=1}^{N_s} a_{je}^s S_j + \sum_{i=1}^{M_y} a_{ie}^y y_i + \sum_{i=1}^{M_p} a_{ie}^p P_i$ $a_{je}^a = \sum_{k=1}^{N_e} h_{jk}^a (v_{mk} - v_{jk}^a) \quad j = 1, 2, \dots, N_a$ $a_{ie}^x = \sum_{k=1}^{N_e} h_{ik}^x (v_{mk} - v_{ik}^x) \quad i = 1, 2, \dots, M_x$ $a_{je}^s = \sum_{k=1}^{N_e} h_{jk}^s (v_{mk} - v_{jk}^s) \quad j = 1, 2, \dots, N_s$ $a_{ie}^y = \sum_{k=1}^{N_e} h_{ik}^y (v_{mk} - v_{ik}^y) \quad i = 1, 2, \dots, M_y$ $a_{ie}^p = \sum_{k=1}^{N_e} h_{ik}^p (v_{mk} - v_{ik}^p) \quad i = 1, 2, \dots, M_p$

Table 2. Experimental Equations of Relevant Parameters(cont.)

계수	실험식
생물학적 반응	- 평형모형 : $H_{ox,w}^i = \frac{C_w^i}{C_w^{ox}} = -\frac{1}{f_{ox}}$
	- Monod 반응모형 : $\sum_{\alpha=1}^4 \left[\frac{\partial(\theta_\alpha \rho_\alpha w_\alpha^i)}{\partial t} + \nabla(\theta_\alpha \rho_\alpha w_\alpha^i \vec{V}_\alpha) = \nabla(\theta_\alpha \mathbf{D}_\alpha^i \nabla(\rho_\alpha w_\alpha^i)) + \theta_\alpha (I_\alpha^i + g_\alpha^i) \right] - \theta_w k_i M^i (\rho_w w_w^i - C_m^i)$
	- 생물학적 반응식 : $k_i M^i (\rho_w w_w^i - C_m^i) = \sum_j E_j^i k_j^i \left(\frac{C_w^i}{K_{sij} + C_w^i} \right) \left(\frac{C_w^j}{K_{aij} + C_w^j} \right) \left(\frac{C_w^{Ai}}{K_{Aij} + C_w^{Ai}} \right) f_{ij} (C_w^{ox}) M^i$
	- 미생물의 성장식 : $\frac{dM_i}{dt} = \sum_j \left\{ Y_j^i K_j^i \left(\frac{C_w^i}{K_{sij} + C_w^i} \right) \left(\frac{C_w^j}{K_{aij} + C_w^j} \right) \left(\frac{C_w^{Aj}}{K_{Aij} + C_w^{Aj}} \right) f_{ij} (C_w^{ox}) M^i - k_{dj}^i \right\} M_i$ for $i \in \{T,B\}, j \in \{0,n\}$

4. 다차원 수치해석 기법

본 모형의 지배방정식을 압력, 포화도, 질량분율의 주변수에 따라 다시 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \sum_{\alpha=1}^3 \left[\sum_{\beta=1}^3 (\rho_\beta w_\beta^i S_{\beta\alpha}) \frac{\partial h_\alpha}{\partial t} + \phi \rho_\alpha w_\alpha^i \frac{\partial S_\alpha}{\partial t} \right. \\ & \left. + \phi S_\alpha \rho_\alpha \frac{\partial w_\alpha^i}{\partial t} \right] + \frac{\partial}{\partial t} ((1-\phi) \rho_s w_s^i) \\ & = \sum_{\alpha=1}^3 \left[\nabla(\rho_\alpha w_\alpha^i \mathbf{K}_\alpha (DELh_\alpha + \frac{\rho_\alpha}{\rho_w} \vec{j})) \right. \\ & \left. + \nabla(\phi S_\alpha \mathbf{D}_\alpha^i \nabla(\rho_\alpha w_\alpha^i)) + \phi S_\alpha (I_\alpha^i + g_\alpha^i) \right] \end{aligned}$$

다차원 유한요소 모형을 도출하기 위하여 다음과 같이 비대칭 가중함수를 곱한 후 전 공간영역에 대하여 적분하여 가중잔차식을 유도한다.

$$\begin{aligned} & \sum_{\alpha=1}^3 \left[\int W_i \sum_{\beta=1}^3 (\rho_\beta w_\beta^i S_{\beta\alpha}) \frac{\partial h_\alpha}{\partial t} dR \right. \\ & \left. + \int W_i \phi \rho_\alpha w_\alpha^i \frac{\partial S_\alpha}{\partial t} dR + \int W_i \phi S_\alpha \rho_\alpha \frac{\partial w_\alpha^i}{\partial t} dR \right] \\ & \quad + \int W_i \frac{\partial}{\partial t} ((1-\phi) \rho_s w_s^i) dR \\ & = \sum_{\alpha=1}^3 \left[\int W_i \nabla(\rho_\alpha w_\alpha^i \mathbf{K}_\alpha (DELh_\alpha + \frac{\rho_\alpha}{\rho_w} \vec{j})) dR \right. \\ & \left. + \int W_i \nabla(\phi S_\alpha \mathbf{D}_\alpha^i \nabla(\rho_\alpha w_\alpha^i)) dR + \int W_i \phi S_\alpha (I_\alpha^i + g_\alpha^i) dR \right] \end{aligned}$$

다차원 해석을 용이하게 수행하고, 유한요소 알고리즘을 일반화하기 위하여 다음과 같은 요소행렬을 정의하였다.

$$\begin{aligned} [EM_{i,j}] &= \langle W_i, N_j \rangle, [EV_{i,j}] = \langle W_j, \frac{dN_j}{dy} \rangle, \\ [ED_{id,jd,i,j}] &= \langle \frac{dW_j}{dx_{id}}, \frac{dN_j}{dx_{jd}} \rangle \end{aligned}$$

여기서, N_j 는 절점 j 에서의 기저함수, W_i 는 절점 i 에서의 가중함수, id, jd 는 각 방향을 나타내는 지수($1=x, 2=y, 3=z$)이다. 기저함수는 공간 요소의 형상에만 의존하기 때문에 프로그램 초기에 한번만 계산됨으로서 계산 시간을 줄일 수 있다. 슈퍼컴퓨터의 계산 알고리즘인 벡터 연산 기법이 활용되었다. 프로그램의 모든 벡터는 이러한 기법을 이용하여 계산되었다.

일반적인 유한요소법과 마찬가지로 사상의 개념을 이용하여 국지좌표계에서 적분이 이루어진다. 적분은 수치적분 기법을 이용하여 수행되며, 기저함수는 다차원 선형보간함수로 표현된다. 수치적분은 Gauss점에서 수행되기 때문에 모든 파라미터는 다음과 같이 가우스점에서 평가되어야 한다.

$$\begin{aligned} (\rho_\beta w_\beta^i S_{\beta\alpha}) &= \sum_{ig=1}^{ng} (\rho_\beta w_\beta^i S_{\beta\alpha})_{ig} N_{i,ig}, \\ (\rho_\alpha w_\alpha^i \mathbf{K}_\alpha)_i &= \sum_{ig=1}^{ng} (\rho_\alpha w_\alpha^i \mathbf{K}_\alpha)_{ig} N_{i,ig}, \\ (\phi S_\alpha \rho_\alpha)_i &= \sum_{ig=1}^{ng} (\phi S_\alpha \rho_\alpha)_i N_{i,ig} \end{aligned}$$

여기서 ng 는 각 요소에서의 총 가우스점의 갯수이다.

그런의 정리를 이용하고, 위의 정의된 요소행렬을 이용하여 적자화된 가중잔차식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \sum_{e=1}^l \left[\sum_{j=1}^{nn} \left[\sum_{\alpha=1}^{na} \left[[EM_{i,j}] \left\{ \left(\sum_{\beta=1}^{na} (\rho_\beta w_\beta^i S_{\beta\alpha})_j \right) \frac{\partial h_{\alpha,j}}{\partial t} \right. \right. \right. \right. \\ & \left. \left. \left. + (\phi \rho_\alpha w_\alpha^i)_j \frac{\partial S_{\alpha,j}}{\partial t} + (\phi \rho_\alpha S_\alpha)_j \frac{\partial w_{\alpha,j}^i}{\partial t} \right\} \right. \right. \\ & \left. \left. + \sum_{id=1}^{nd} \sum_{jd=1}^{nd} \left\{ [ED_{jd,i,j}] (\rho_\alpha w_\alpha^i \mathbf{K}_\alpha)_{h_{\alpha,j}} + (\phi S_\alpha \rho_\alpha \mathbf{D}_\alpha^i)_j w_{\alpha,j}^i \right\} \right. \right. \\ & \left. \left. + [EM_{i,j}] \frac{\partial}{\partial t} ((1-\phi) \rho_s w_s^i)_j \right] \right] \\ & = \sum_{\alpha=1}^{na} \left[\sum_{j=1}^{nn} \left[[EV_{i,j}] \left(\rho_\alpha w_\alpha^i \mathbf{K}_\alpha \frac{\rho_\alpha}{\rho_w} \right)_j \right. \right. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & + [EM_{i,j}] (\phi S_\alpha (I_\alpha^i + g_\alpha^i)) \\
 & + \int W_{ib} \rho_\alpha w_\alpha^i \mathbf{K}_\alpha \left(DELh_\alpha + \frac{\rho_\alpha}{\rho_w} j \right) \cdot \vec{n} dB \\
 & + \int W_{ib} \phi S_\alpha \mathbf{D}_\alpha^i \nabla (\rho_\alpha w_\alpha^i) \cdot \vec{n} dB \Big] \Big]
 \end{aligned}$$

여기서, nel은 총 요소 갯수, nn는 각 요소의 절점수, na는 상의 갯수 nd는 차원을 나타낸다.

경계지역에서의 이류 및 확산에 의한 부하는 다음과 같이 평가된다.

$$\int W_{ib} \rho_\alpha w_\alpha^i \mathbf{K}_\alpha \left(\nabla h_\alpha + \frac{\rho_\alpha}{\rho_w} j \right) \cdot \vec{n} dB = - \int W_{i q_{\alpha,h}}^i dB$$

$$\int W_{ib} \phi S_\alpha \mathbf{D}_\alpha^i \nabla (\rho_\alpha w_\alpha^i) \cdot \vec{n} dB = - \int W_{i q_{\alpha,d}}^i dB$$

여기서, $q_{\alpha,h}^i$ 는 수질유출이류플럭스, $q_{\alpha,d}^i$ 는 수질유출확산플럭스를 나타낸다.

시간영역을 일반적인 차분형태로 격자화하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 & \sum_{e=1}^{ne} \left[\sum_{j=1}^{nn} \left[\sum_{\alpha=1}^{na} \left[\frac{1}{\Delta t} [EM_{i,j}] \left[\sum_{\beta=1}^{na} (\rho_\beta w_\beta^i S_{\beta\alpha}) \right] (h_{\alpha,j}^{n+1} - h_{\alpha,j}^n) \right. \right. \right. \\
 & \quad \left. \left. + (\phi \rho_\alpha w_\alpha^i)_j (S_{\alpha,j}^{n+1} - S_{\alpha,j}^n) + (\phi \rho_\alpha S_\alpha)_j (w_{\alpha,j}^{i,n+1} - w_{\alpha,j}^{i,n}) \right] \right. \\
 & + \sum_{id=1}^{nd} \left[\sum_{jd=1}^{nd} \left[\varepsilon [ED_{id,jd,i,j}] \{ (\rho_\alpha w_\alpha^i \mathbf{K}_\alpha)_j^{n+1} h_{\alpha,j}^{n+1} \right. \right. \\
 & \quad \left. \left. + (\phi S_\alpha \rho_\alpha \mathbf{D}_\alpha^i)_j^{n+1} (w_{\alpha,j}^{i,n+1}) \right] \right. \\
 & + (1 - \varepsilon) [ED_{id,jd,i,j}] \{ (\rho_\alpha w_\alpha^i \mathbf{K}_\alpha)_j^n h_{\alpha,j}^n + (\phi S_\alpha \rho_\alpha \mathbf{D}_\alpha^i)_j^n (w_{\alpha,j}^{i,n}) \} \\
 & \quad \left. \left. + \frac{1 - \phi}{\Delta t} [EM_{i,j}] \{ (\rho_s w_s^i)_j^{n+1} - (\rho_s w_s^i)_j^n \} \right] \right] \\
 & = \sum_{a=1}^{na} \left[\sum_{j=1}^{nn} \left[[EV_{i,j}] \left(\rho_\alpha w_\alpha^i \mathbf{K}_\alpha \frac{\rho_\alpha}{\rho_w} \right)_j \right. \right. \\
 & \left. \left. + [EM_{i,j}] (\phi S_\alpha (I_\alpha^i + g_\alpha^i))_j^n - \int W_{i q_{\alpha,h}}^i dB - \int W_{i q_{\alpha,d}}^i dB \right] \right]
 \end{aligned}$$

경계지역에서의 플럭스는 다음과 같이 다차원 기저함수를 이용하여 평가된다.

$$f_{\alpha,d,i}^i = \int W_{i q_{\alpha,d}}^i dB = \sum_{ib=1}^{nb} \langle W_{ib}, N_j \rangle q_{\alpha,d,ib}^i$$

위의 식을 주 변수인 수두, 포화도, 질량분율에 대하여 다시 정리하기 위하여 행렬을 정의하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 [Ah_\alpha^i] &= \sum_e \sum_j \left[\frac{1}{\Delta t} [EM_{i,j}] \sum_\beta (\rho_\beta w_\beta^i S_{\beta\alpha})_j^{n+1} \right. \\
 & \left. + \sum_{id} \sum_{jd} \{ \varepsilon [ED_{id,jd,i,j}] (\rho_\alpha w_\alpha^i \mathbf{K}_\alpha)_j^{n+1} \} \right] \\
 [As_\alpha^i] &= \sum_e \sum_j \frac{1}{\Delta t} [EM_{i,j}] (\phi \rho_\alpha w_\alpha^i)_j^{n+1}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 [AM_\alpha^i] &= \sum_e \sum_j \left[\frac{1}{\Delta t} [EM_{i,j}] (\phi \rho_\alpha S_\alpha)_j^{n+1} \right. \\
 & \left. + \sum_{id} \sum_{jd} \{ \varepsilon [ED_{id,jd,i,j}] (\phi \rho_\alpha S_\alpha \mathbf{D}_\alpha^i)_j^{n+1} \} \right] \\
 \{fh_\alpha^i\} &= \sum_e \sum_j \left[\left[\frac{1}{\Delta t} [EM_{i,j}] \sum_\beta (\rho_\beta w_\beta^i S_{\beta\alpha})_j^n \right. \right. \\
 & \left. \left. + \sum_{id} \sum_{jd} (\varepsilon - 1) [ED_{id,jd,i,j}] (\rho_\alpha w_\alpha^i \mathbf{K}_\alpha)_j^n \right] (h_{\alpha,j})^n \right. \\
 & \left. + \sum_j \left[[EV_{i,j}] \left(\rho_\alpha w_\alpha^i \mathbf{K}_\alpha \frac{\rho_\alpha}{\rho_w} \right)_j + [EM_{i,j}] (\phi S_\alpha (I_\alpha^i + g_\alpha^i)) \right. \right. \\
 & \left. \left. - \int W_{ib} q_{\alpha,h}^i dB - \int W_{ib} q_{\alpha,d}^i dB \right] \right] \\
 \{fs_\alpha^i\} &= \sum_e \sum_j \left[\frac{1}{\Delta t} [EM_{i,j}] (\phi \rho_\alpha w_\alpha^i)_j^n (S_{\alpha,j})^n \right]
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \{fm_\alpha^i\} &= \sum_e \sum_j \left[\frac{1}{\Delta t} [EM_{i,j}] (\phi \rho_\alpha S_\alpha)_j^n \right. \\
 & \left. + \sum_{id} \sum_{jd} \{ (\varepsilon - 1) [ED_{id,jd,i,j}] (\phi \rho_\alpha S_\alpha \mathbf{D}_\alpha^i)_j^n \} \right] (w_{\alpha,j}^i)^n
 \end{aligned}$$

따라서, 전체 행렬식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 \sum_{\alpha=1}^{na} [Ah_\alpha^i] \{h_\alpha\} + [As_\alpha^i] \{S_\alpha\} + [Am_\alpha^i] \{w_\alpha^i\} \\
 = \{fh_\alpha^i\} + \{fs_\alpha^i\} + \{fm_\alpha^i\}
 \end{aligned}$$

위의 행렬식은 문제에 따라서 적절하게 구성되어야 한다. 즉, 문제의 주 변수에 따라 행렬을 적절하게 합치는 것이 필요하며, 이러한 작업은 프로그램의 메인 프로그램에서 수행된다. 본 논문의 모델링 결과에서는 기존의 여러 지하수 유동 프로그램의 모델링 결과를 보여주고 있는데 이러한 기법이 활용되었다.

다음에 TCE 모델링의 경우 몰과 유류상의 수두, 포화도, 질량분율에 대하여 위의 행렬을 정리한 것을 나타내었다.

$$\begin{aligned}
 [Ah_w^w] \{h_w\}^{(n+1)/2} &= - \{ [Ah_o^w] \{h_o\}^n \\
 & \quad + [Ah_\alpha^w] \{h_\alpha\}^n + \sum_\alpha \{ - [As_\alpha^i] \{S_\alpha\}^n \\
 & \quad - [Am_\alpha^i] \{w_\alpha^i\}^n + \{fh_\alpha^i\}^n + \{fs_\alpha^i\}^n + \{fm_\alpha^i\}^n \} \\
 [Ah_o^o] \{h_o\}^{n+1} &= - \{ [Ah_w^o] \{h_w\}^{(n+1)/2} \\
 & \quad + [Ah_\alpha^o] \{h_\alpha\}^{(n+1)/2} + \sum_\alpha \{ - [As_\alpha^i] \{S_\alpha\}^n \\
 & \quad - [Am_\alpha^i] \{w_\alpha^i\}^n + \{fh_\alpha^i\}^n + \{fs_\alpha^i\}^n + \{fm_\alpha^i\}^n \}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \{S_\alpha\}^{n+1} &= f(h_\alpha) \\
 \sum_\alpha [Am_\alpha^o] \{w_\alpha^o\}^{n+1} &= \sum_\alpha \{ - [Ah_\alpha^i] \{h_\alpha\}^{n+1} - [As_\alpha^i] \{S_\alpha\}^{n+1} \\
 & \quad + \{fh_\alpha^i\}^n + \{fs_\alpha^i\}^n + \{fm_\alpha^i\}^n \}
 \end{aligned}$$

전체 행렬을 구성할 때 행렬의 크기 및 계산 시간을 줄이기 위하여 행렬은 띠행렬로 합쳐진다. 차원이 커짐에 따라 행렬의 크기는 제곱승으로 커지기 때문에 이러한 행렬의 저장 방법 및 계산 알고리즘은 매우 중요하다. 비대칭 띠행렬 해법이나 벡터 행렬해법이 사용되었다.

5. 범용적 지하수 모형의 적용

본 모형의 범용성을 검증하기 위하여 다음과 같이 다양한 지하수 유동 문제를 모델링 하였으며 계산 결과를 기존의 결과와 비교하였다.

5.1. 불포화 지하수 유동

댐내에서의 지하수 유동 문제를 다음과 같이 해석하였다. Fig. 3은 문제의 조건을 Fig. 4는 계산 결과를 나타낸다. 계산결과는 기존의 문헌 결과와 비교하였다.⁴⁾

5.2. 다차원 다상 유동

모형의 정확성을 검증하기 위하여 TCE의 포화도를 일, 이, 삼차원으로 모델링하였다. 수평방향에 대해서는 경계유출이 없는 것으로 가정하였다.

5.3. 복합다상시스템의 유동 및 오염물 이동

다음과 같이 TCE에 대하여 3차원 모델링을 수행하였으며, 경계 및 오염원 등의 조건에 대하여 모델링 결과의 예민도를 살펴보았다.

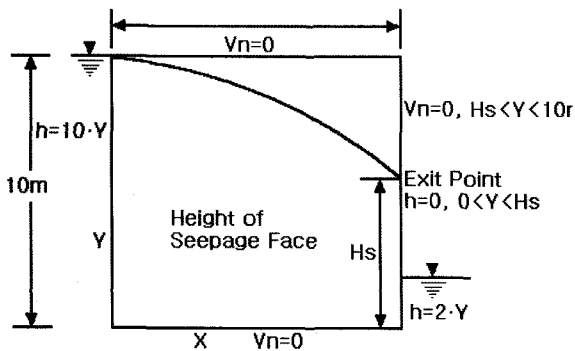


Fig. 3. Problem definition of dam seepage flow.

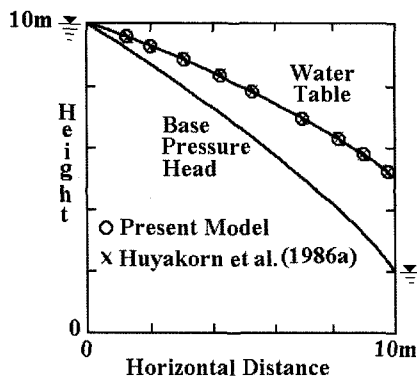


Fig. 4. Computational result of dam seepage problem.

Table 3. Simulation results of multidimensional multiphase flow

	x=0	x=0	x=0	x=0	x=2	x=2	x=2
	1-dim.	2-dim.	3-dim.	3-dim.	2-dim.	3-dim.	3-dim.
	z=0	z=0	z=0	z=2	z=0	z=0	z=2
Time=	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
y=4	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77
y=2	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20
y=0	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20
Time=	0.0504	0.0504	0.0504	0.0504	0.0504	0.0504	0.0504
y=4	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77
y=2	0.21	0.23	0.27	0.27	0.23	0.27	0.27
y=0	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20
Time=	0.1074	0.1074	0.1074	0.1074	0.1074	0.1074	0.1074
y=4	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77
y=2	0.26	0.33	0.40	0.40	0.33	0.40	0.40
y=0	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20

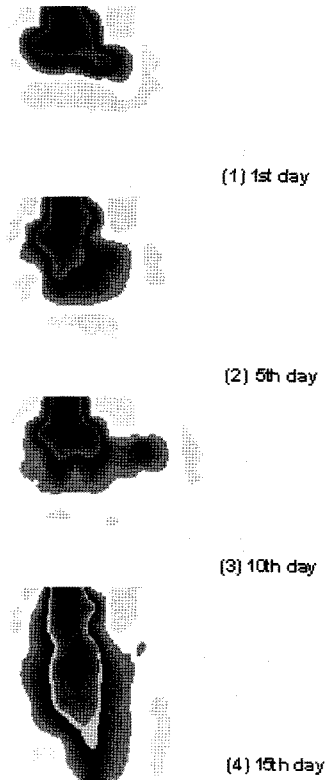


Fig. 5. 3-dimensional migration of TCE phase in the case of no flow boundary conditions(scale x = 23, y = 10, z = 2 m).

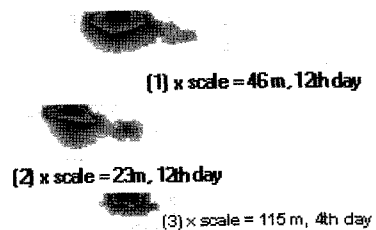


Fig. 6. Effect of boundary location in the case of head and inflow boundary conditions.

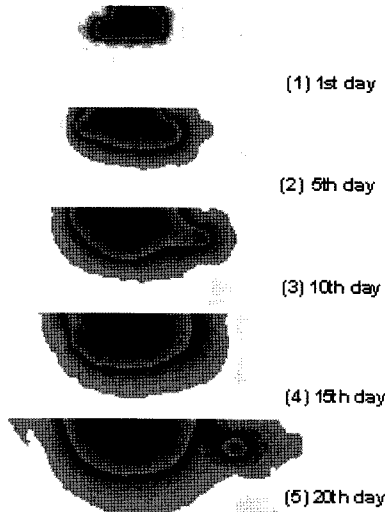


Fig. 7. 3-dimensional migration of TCE concentration in water phase in the case of problem (2) in Fig. 6.

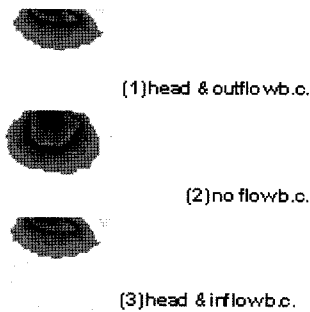


Fig. 8. Effect of the characteristic of boundary conditions(scale x = 46, y = 10, z = 2 m).

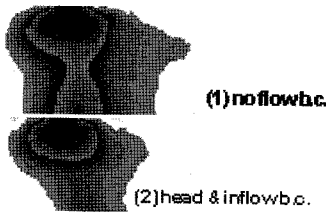


Fig. 9. Magnitude effect of contaminant source(5 times larger than Fig. 12).

6. 결론

범용적 지하수 모형을 개발하기 위하여 다음과 같은 연구를 수행하였다.

- o 복합다상시스템에서의 지하 유동 및 오염물 이동에 대한 지배방정식 개발

- o 파라미터 조정 기법에 의해 기존의 지하수 유동에 대한 지배방정식 유도
- o 범용적 전산 모형 개발을 위한 다차원 유한 요소 알고리즘 개발
- o 개발된 모형의 범용성 검증을 위한 다양한 지하수 문제 해석

본 모형이 최초로 개발된 것은 1989년도⁵⁾이었으나 그 이후 1993년도에 프로그램에 대하여 전체적으로 수정이 이루어졌으며, 2000년도 이후로 PC의 개선, Fortran 컴파일러의 개선, 지리정보시스템 등의 영향으로 인하여 좀 더 사용자가 편한 프로그램으로 개선이 이루어지고 있다.

현재는 지리정보시스템 프로그램인 ArcView와 결합되어 운영되고 있으며 전후처리 프로세서를 개선하기 위하여 Visual Basic을 활용하였다. 또한 웹 상에서 모형을 운영하기 위한 연구도 수행하였다.

향후 웹 상에서 운영될 수 있는 범용적 지하수 모형으로 발전되면 국내의 관련 사업에 파급 효과가 클 것으로 판단되며 모형의 효용성 또한 입증될 것이다.

참고문헌

1. Abriola, L. M., and K. Rathfelder, Mass balance errors in modeling two-phase immiscible flows: causes and remedies, *Adv. in Water Res.*, **16**, 223~239(1993).
2. Bear, J., *Hydraulics of Groundwater*, McGraw-Hill, Ind., New York(1979).
3. Brooks, R. H., and A. T. Corey, Properties of porous media affecting fluid flow, *J. Irrig. Drain. Div. ASCE*, **92** (IR2), 61~88(1966).
4. Huyakorn, P. S., E. P. Springer, V. Guvanasen, T. D. Wadsworth, A three-dimensional finite-element model for simulating water flow in variably saturated porous media, *Water Resour. Res.*, **22**(13), 1790~1808(1986).
5. Kim, J. H., *Composite Multiphase Groundwater Model*, Ph.D. dissertation, University of California, Los Angeles (1989).
6. Parker, J. C., Lenhard, R. J., and Kuppusamy, T., A Parametric Model for Constitutive Properties Governing Multiphase Flow in Porous Media, *Water Resour. Res.*, **23**(4), 618~624(1987a).
7. Parker, J. C., Lenhard, R. J., A Model for Hysteretic Constitutive Relations Governing Multiphase Flow, *Water Resour. Res.*, **23**(12), 2178~2206(1987b).