

다중상 흐름과 다종성분의 거동에 관한 수치적 모의와 문제점

Numerical simulations and related problems in multiphase flow and multicomponent transport

이강근, 이진용, 천정용, 유동렬, 하규철, 이철효*

서울대학교 자연과학대학 지질학과

*삼성건설 기술연구소

ABSTRACT

Most models for the simulation of multi-phase flow and multi-species transport employ the capillary approach which uses the Darcy's law for the representation of mass flux of each phase. The capillary approach based on the Darcy's law require many empirical coefficients with complex functional dependencies rather than rigorous mathematical and physical formulation. The shortcoming of the capillary approach cause the numerical errors in the simulations by the multi-phase flow and transport models. This study discuss some of the problems related with the use of models.

Key word : multi-phase flow, multi-species transport, capillary approach, numerical errors

I. 서론

토양/지하수 오염에 관한 사회 전반의 인식이 제고되고 있는 상황에서 NAPLs에 의해 오염된 토양/지하수 환경을 어떻게 효과적으로 복원하느냐의 문제는 이 분야의 전문가들의 관심사이자 이에 대한 해답을 찾는 것은 시대적 책임이 되었다. 오염된 토양/지하수 환경의 복원을 위해서는 우선 문제의 원인 규명, 오염의 상태 파악, 지중 매체의 특성 파악 등이 선행되어야 한다. 이런 기본 내용들이 파악된 상태에서 오염정화 계획을 수립하고 시험적인 복원 과정을 통해서 그 효율성을 파악하고 최종적인 복원 계획을 완성하여 본격적인 복원 작업에 들어가는 순서를 밟을 것이다. 이러한 과정들에서 효율적인 복원 계획의 수립, 복원 완료 기간과 비용의 산출, 복원상의 문제점 예상 및 대처가 미흡할 경우 복원 예상 기간의 초과뿐만 아니라 과다 비용 투입 및 복원 효율 저하 등의 문제가 복합적으로 발생할 수 있다. 이러한 과정상의 문제들을 예측하고 대처하기 위해 수치적 모의가 사용된다. 수치적 모의의 정확성이 높다면 복원 계획의 수립 단계나 복원 중에 그 효율을 비교하여 계획을 수정·보완하는데 큰 도움이 될 것이다. 그러나 모의의 정확성이 떨어진다면 수치적 모의가 별 도움이 되지 못할 뿐만 아니라 계획 수립단계에서 큰 혼선을 야기할 수도 있을 것이다. 본

연구에서는 현재 상용되고 있는 여러 종류의 관련 모델을 검토해 보고 상용되고 있는 모델과 다른 형태의 모델을 만들어 봄으로써 파악한 수치적 모의의 몇 가지 문제점들을 논의해 보고자 한다.

지중에서 다중상 흐름과 결합된 다중성분의 거동에 관한 수치적 모의는 대부분 NAPLs의 이동을 모의하는 것을 의미한다. 미국의 환경청(US EPA)의 주도로 토양/지하수 오염 정화를 위한 기술개발의 측면에서 NAPLs의 거동에 관한 많은 종류의 모델들이 이미 개발되었다. 그래서 이 분야에 관한 수치적 모델 개발과 수치적 모의가 이제 더 이상 연구의 범주를 떠나 효과적 활용단계로 들어서 있는 상태라고 생각하는 경우가 많다. 그러나 대부분의 모델들이 모델 개발을 위해서 사용한 지배방정식이나 경계조건식들이 갖고 있는 문제를 극복하지 못한 채 모델을 적용할 대상이나 상황을 바꾸는 과정에서 다양한 이름과 종류의 모델들이 만들어진 결과가 초래되었다. 최근의 연구들에 의하면 단상의 유체인 물의 흐름을 표현하기 위하여 사용되었던 이론들을 다중상유동에까지 확장, 적용하고 있지만 이 방법이 다중상 흐름에서 상간의 질량, 운동량, 에너지 보존이나 열역학적 관계를 표현하는데 문제점이 있다고 파악되고 있다. 따라서 현재 일반화되어 수치적인 모델로 까지 개발되어 있는 기존의 이론과 방법들에 대한 근본적인 논의와 수정이 필요한 시점이다. 이러한 근본적인, 지배방정식 단계의 문제 뿐만 아니라 현재 상용되고 있는 모델들을 이용한 수치적 모의에서도 실제 상황과 근접하게 지중상태를 개념화하여 모델 영역을 잡거나 경계조건을 세우면 수치적 모의가 원활히 되지 않는 문제점들도 있다. 본 연구는 이러한 다양한 형태와 내용의 문제점들 중에서 몇가지에 대해 논의해 보았다. 논의할 내용은 1) 물-기름-가스의 3중상 흐름에서 가스 흐름 처리상의 문제점, 2) 지중 매체의 지질학적 경계면에서 다중상 흐름 모의상의 문제점, 3) biomass의 증가의 따른 biofilm의 생성과 수리적 특성의 변화를 고려하는 문제, 4) 매립장 환경에서 침출수와 가스 거동의 모의 문제 등이다.

II. 본론

1. 물-기름-가스 3상 시스템에서 가스 거동 처리의 문제

현재 대부분의 상용 모델에서 다루고 있는 물-기름-가스의 3상 문제에서 가스의 압력 변화가 없어서 가스의 흐름이 없거나 가스상의 압력 변화가 대단히 완만하여 물이나 기름의 흐름 방정식에서 사용되는 방정식의 형태가 그대로 적용되는 것으로 취급하여 문제를 풀이한다. 대부분의 모델은 가스의 흐름을 허용치 않고 물과 기름 속에 있는 다중 성분의 분배에 가스상이 관여하는 것으로만 취급한다. 그러나 공극율이 변하지 않는 상태에서 물과 기름의 상포화도가 변하면 당연히 가스가 차지할 수 있는 공간이 변하게 된다. 이 때 가스의 흐름을 허용치 않는다면 가스의 밀도 변화가 수반되어야 한다. 이 경우와 달리 다중 성분의 거동에서 물이나 기름상에 존재하던 성분들이 가스상으로 변환되면 가스의 농도 변화가 수반되며 따라서 가스의 밀도 변화가 수반된다. 가스의 밀도 변화를 고려하면 이 때의 방정식은 물이나 기름의 흐름에 사용하는 압력수두에 선형적인 방정식과는 다른 형태의 방정식이 사용되어야 하며 그렇게 된다면 다중상 흐름에서 대부분 사용하고 있는 행렬 방정식의 형태와 풀이 방법이 대폭 수정되어야 할 것이다. 또한 가스상의 농도 변화와 성분 변화는 가스상의 점성을 변화시키게 되므로 물이나 기름상에서 취급하는 것보다는 훨씬 복잡한 형태의 방정식과 풀이 단계가 필요할 것이다.

2. 지중 매체의 지질학적 경계면에서 다중상 흐름 모의상의 문제

NAPLs가 지중에서 지질학적으로 뚜렷한 경계면을 가지는 불균질 매질내에서 어떻게 이동하는가에 대해서는 이론적으로도 명확히 이해되지 못하고 있는 부분이다. 이 부분에 대한 이론적 해석의 기초 자료를 얻고자 불균질 매질 조건을 잘 맞출 수 있는 실내 실험이 많이 이루어 졌다. <그림 1>은 Schroth et al. (1998)에 의한 실내 실험으로 세립모래 매질 속에 조립모래 매질이 경사져서 분포하고 있을 때 지표에서 누출된 NAPLs이 어떻게 이동해 가는가를 실험하여 나타난 결과이다. 이 실험에 의하면 불포화대의 지질학적 매질의 경계면에서 모세관압에 의한 흐름의 장벽이 생겨서 세립질 모래속을 수직으로 이동해 오던 물이나 NAPLs이 수리전도도가 큰 세립질 모래로 된 경사층으로 통과하지 못하고 경계면 상부를 따라서 경사져 이동해 감을 알 수 있다. 이 경우 흐름에 큰 영향을 미치는 것은 모세관 장벽과 k-S-P의 정확한 관계라고 할 수 있다. 이러한 현상을 상용모델에서 수치적으로 재현해 보고자 하였으나 잘 되지 못했다. 모세관대 장벽을 따라서 이동하는 현상이 잘 나타나지 않고 조립질 모래층을 통과하는 것으로 나타났다. 이 것은 k-S-P 관계에 관해서 채택하고 있는 모델이 S의 변화가 심하게 나타날 경계면 부근에서 정확하지 않거나 수치적으로 반복 연산을 해 나가는 과정에서 수치적 분산의 결과로 초래한 것으로 보이며, 따라서 지상 누출에 의한 오염현상이 실제로 나타날 현장 매질의 많은 지질학적 불연속면과 수직 crack 들을 감안하면 현재의 상용모델이 수정 보완되어야 함을 말해 준다. <그림 2>는 토양의 수직 단면에서 건물이나 기타 구조물에 의하여 유체 흐름의 장벽이 있을 때 NAPLs의 거동을 MOFAT (DAEM, Inc., 1995)으로 모의한 것이다. 이 모의도 어떤 면에서는 매체의 불연속면이 있는 경우로 볼 수 있는데, NAPLs의 plume front가 경계면에 도달하면서 수치 계산이 계속 수행되지 못했다.

3. Biomass의 증가의 따른 biofilm의 생성과 수리적 특성의 변화를 고려하는 문제

다중성분의 거동 모의 중에서 microbe에 의한 유기물의 분해와 이에 사용되는 전자수용체의 상관관계가 대표적인 것 중의 하나이다. 이를 모의하는데 성분간의 분배계수나 kinetics를 사용하게 되며, 연관된 모든 성분의 변화를 연계하여 해를 구하게 된다. 그런데 유기물과 전자수용체가 소모되면서 microbe가 증가하게 되고 microbe가 biofilm을 형성하게 될 경우 매질의 수리상수가 변하게 된다.

본 연구에서는 microbe의 증가에 따른 매질의 공극률, 수리전도도, 비저유계수 등의 변화를 다중성분 거동 모델과 결합하여 모의하였다. 그 결과 용존 유기 오염물질의 이동이나 정화 계획을 수립할 때 매질의 수리상수 변화를 고려하지 않는다면 오염물 최고농도값의 과소 평가, 오염범위의 과대 평가를 초래할 수 있음이 파악되었다.

4. 매립장 환경에서 침출수와 가스 거동의 모의 문제

매립장 환경에서 다중상, 다중성분의 거동 모델 개발을 시도하여 침출수의 농도와 가스 발생량 및 성분 농도를 계산하는 모델을 개발하였다. 기존의 다중상 흐름 모델과는 달리 가스의 발생과 거동 부분에서는 가스의 점성, 농도등이 성분에 따라서 변화할 수 있게 하였으며, 가스는 침출수와 달리 압력에 따라 밀도의 변화가 자유롭게 나타나게 함으로써 침출수와 가스의 지배방정식을 단순화시키지 않고 최대한 이론적으로 근사하게 적용하고자 하였다. 이 모델을 이용한 결과와 모의 매립조 실험 결과를 비교분석하였다.

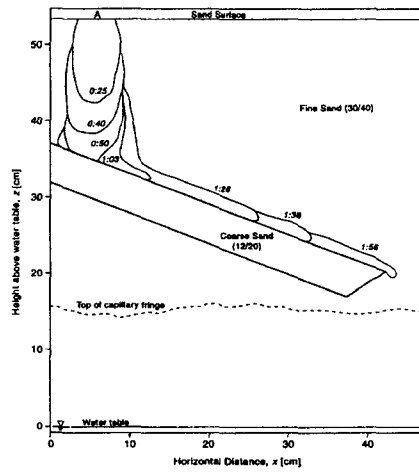


그림 1. 세립모래층내 조립모래층의 NAPLs 거동에 대한 영향을 보여주는 Schroth et al.(1998)이 수행한 실험의 결과.

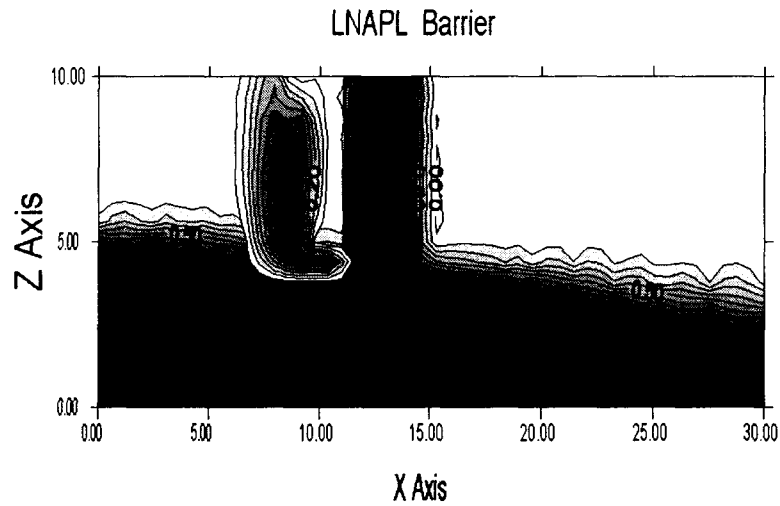


그림 2. 유체흐름의 장벽이 있을 경우에 대한 MOFAT를 이용한 NAPLs 거동 모의결과

Ⅲ. 결론

다중상 유체의 흐름과 다중 성분의 거동에 관한 수치적 모의는 많은 종류의 상용 모델들이 있음에도 불구하고 개선, 수정, 보완되어야 할 점이 많으며, 어쩌면 근본적으로 지배방정식을 바꾸는 방향으로 나아가야 할 지도 모른다. 다중상 유체의 흐름과 다중 성분의 거동 모델은 다양한 경우를 모두 잘 다룰 수 있는 범용모델의 개발이 대단히 어렵다. 오히려 어떤 한정된 경우의 문제들을 다루기 위해 다중상 유체의 특성과 관련된 현상을 정밀하게 취급할 때 수치 모델로서 가치를 갖고 있을 것이다. 이런 측면에서 본 연구는 기존 모델에서 다루지 않는 몇가지 현상을 다루는 모델을 개발하여 다른 모델의 결과나 관측값과 비교해 보았다. 그 결과 현재까지 개발되어서 사용되고 있는 이 분야의 많은 수치 모델들이 본 연구에서 다루어 보았던 몇가지 문제들을 풀이하는데 적지 않은 문제점을 노출시켰다고 할 수 있다.

참 고 문 헌

1. DAEM, 1997, MOFAT Version 2.21, Draper Aden Environmental Modeling, Inc.
2. DAEM, 1997, Technical documentation & User guide with pre-processor, mesh editor, and post-processor. Blacksburg VA.
3. ES&T, 1996, Areal multiphase organic simulator for free phase hydrocarbon migration and recovery, User and guide. Blacksburg VA.
4. Mercer, J. W. and R. M. Cohen, 1990, A review of immiscible fluids in the subsurface: properties, models, characterization and remediation. Journal of Contaminant Hydrology, 6, pp.107-163.
5. Mucinno, J. C, W. G. Gray, and L. A. Ferrand, 1998, Towards an improved understanding of multiphase flow in porous media. Reviews of Geophysics, 36(3), pp.401-422.
6. Pinder, G. F. and L. M. Abriola, 1986, On the nonaqueous phase organic compounds in the subsurface. Water Resources Research, 22(9), pp.109s-119s.
7. Schroth, M. H., Istok, J. D., and Selker, J. S., 1998, Three-phase fluid movement in the vicinity of textural interfaces. Journal of Contaminant Hydrology, 32, pp.1-23.