

포화다공매질내의 밀도종속흐름과 열 및
용질수송해석을 위한 수치모형에 관한 연구

책임연구원 : 조 원 철

(연세대학교 사회환경·건축공학부 교수)

연 구 원 : 김 지 태

(연세대학교 토목공학과 박사과정)

이 정 우

(연세대학교 토목공학과 박사과정)

1. 서론

지하수내에서 이송확산연구의 대상은 열과 용존물질로 대표된다. 대수층에서 열과 용존물질은 밀도와 점성을 변화시키므로 지하수 오염의 특성을 파악하기 위해서는 이를 고려할 수 있는 모형을 필요하다. 밀도 증속흐름에 대한 공용소프트웨어는 SUTRA, MOC DENSE, VARDEN, 그리고 HST3D 등 U.S.G.S. 코드들이 대부분이다. SUTRA(Voss, 1984)는 포화 및 부분포화조건하에서 2차원 문제를 모의하기 위해 유한요소법과 적분유한차분모형을 결합하였다. SUTRA의 적용에 관한 내용은 Voss와 Souza(1987)와 Bush(1988)의 문헌에 나타나 있다. MOC DENSE(Sanford와 Konikow, 1985)는 흐름과 용질수송모형인 MOC(Konikow와 Bredehoeft, 1978)로부터 개발된 포화조건에 대한 2차원 유한차분모형이다. 이 코드는 밀도와 점성이 농도만의 함수이고 구성물질은 화학적으로 보존된다고 가정하였다. VARDEN은 Kuiper(1983, 1985)와 Kontis와 Mandle(1988)에 의해 설명되었다. HST-3D(Kipp, 1987)는 상대적으로 새로운 3차원 유한차분모형으로서 지하수흐름, 열 및 용질수송을 모의한다. 유한요소코드인 CFEST(Gupta 등, 1987)은 3차원 혼합용질수송에서 밀도와 온도의 영향을 포함한다.

본 보고서에서는 포화다공매질 내에서 열 및 용질수송을 모의하는 기 개발된 소프트웨어들을 조사한 후 이 중에서 각 흐름과 수송방정식을 밀도와 점성의 변화로 연립하여 흐름과 수송을 동시에 해석할 수 있는 3차원 모형인 HST-3D의 최신 버전인 버전 2.0(Kipp, 1997)에 대해 소개하고 그 특성을 예제를 통해 파악하고자 한다.

2. 다차원 수송모형의 종류

2.1 열수송(Heat Transport) 모형

2.1.1 HOTWR

J. Reed(U.S.G.S.)에 의해 개발되고 P. K. M. van der Heijde (IGWMC)에 의해 변형된 것으로서 block-centered 유한차분기법을 이용하여 등방 균질의 피압대수층에서 정상상태의 지하수 흐름과 열이동을 3차원으로 해석할 수 있는 모형이다. Block 사이의 투수계수는 인접한 block의 평균으로 구하며 강우에 의한 충전과 고정된 수두경계조건을 고려할 수 있다. IGWMC 버전은 양수와 주입정에 의한 효과를 모의할 수 있다. 수두의 flux는 지열의 흐름, 대수층으로부터 지표면으로의 대류, 지역적 충전에 의한 이송과 고정된 수두경계로부터의 이송을 포함한다. IGWMC 버전은 또한 주입정으로부터의 열의 유입과 양수정에 의한 열의 손실을 고려할 수 있다.

본 모형은 지하수 흐름과 열수송 방정식의 해를 반복법을 이용하여 구하며 흐름 방정식의 해를 구한 후에 flux 값을 보정하고 열수송 방정식의 해를 구한 후 수리전도도의 값을 구하는 방법을 이용한다. 결합은 수리전도도-점성-온도의 선형 보간을 이용한다. 직접해법을 이용하여 흐름과 열이동에 대한 유한차분방정식의 해를 구하며 밀도는 공간에 대하여 일정한 것으로 가정한다.

2.1.2 HST-3D

HST-3D(Heat and Solute Transport Program)는 U.S.G.S.의 K. L. Kipp에 의해 개발된 모형으로서 3차원 대수층에서 지하수 흐름과 열·용질의 이동을 모의할 수 있다. 3개의 지배방정식이 간극유속(pore velocity), 온도와 용질의 농도에 대한 유체 점성의 종속도, 압력, 온도, 용질의 농도에 대한 유체 밀도의 종속도를 통해 결합되며 압력, 온도, 농도 등에 대한 수치해를 구할 수 있다.

기본적인 공급-소멸원은 우물을 나타낸다. 지표면 또는 대수층 내에서 특정한 유량과 압력조건을 모의하기 위해 complex well-flow model이 사용될 수 있다. 경계조건은 flux, 하천으로의 누출, 열전도, 자유면 등을 포함하며 모든 경계조건은 시간의 함수이다.

본 모형은 흐름, 열과 용질의 균형, 특정한 압력, 온도경계를 통한 flux 등을 계산한다. 지배방정식의 공간차분을 위해 유한차분기법이 사용되었으며 partial Gauss-reduction scheme을 이용하여 흐름, 열, 용질이동 방정식을 변형, 결합하여 계산하므로 보다 안정적인 수치해를 구하게 된다.

2.1.3 SUTRA

SUTRA(Saturated- Unsaturated TRANsport)는 C. I. Voss(U.S.G.S.)에 의해 개발된 것으로 지하환경에서 용질 또는 에너지의 이동과 유체의 운동을 모의하는 모형이다. 본 모형은 지배방정식을 근사화하기 위해 2차원 혼합형 유한요소와 적분유한차분법(hybrid finite-element and integrated-finite-difference method)을 사용하며 유체의 압력, 용질의 농도 및 온도를 계산한다. 본 모형은 포화·비포화 지하수 흐름장의 단면 모형에 이용할 수 있다.

용질이동은 단일 반응종으로 제한되며 흡착, 0차, 1차 감쇠, 동수역학적 분산과 분자확산을 고려할 수 있다. 또한 밀도가 변화하는 용질이동(예 : 흐름과 이동의 결합)과 염수침투 문제에도 적용될 수 있다.

에너지 이동은 매질과 유체내에 저장되어 있는 에너지의 시간에 따른 변화에 기초를 둔다. 여기에는 열이송, 온도가 다른 물의 유입, 저류효과, 열대류와 에너지분산이 포함된다.

2.2 염수침투(Salt Water Intrusion) 모형

2.2.1 BEAVERSOFT

본 모형은 J. Bear(Technion)와 A. Verruijt(Delft Technical

University)에 의해 개발된 교육용 프로그램으로서 해석해와 수치해법(유한차분, 유한요소, random walk methods)을 이용하여 지하수 흐름과 용질이동을 모의하며 비균질 대수층, 댐으로의 침윤, 이송확산에 의한 오염물의 이동, 염수침투 등의 문제를 정상, 비정상 상태의 2차원 흐름에 대해 해석할 수 있다.

2.2.2 MOCDENSE

MOCDENSE는 W. E. Sanford와 L. F. Konikow(U.S.G.S.)에 의해 개발된 2차원 염수침투 모형으로 밀도류를 동반한 지하수 흐름장에서 용질이동을 모의한다. 본 모형은 Konikow와 Bredehoeft가 유한차분과 특성곡선법을 이용하여 흐름과 용질이동 방정식의 해를 구한 U.S.G.S. 2D-TRANSPORT/MOC 모형을 변형한 것으로 밀도가 농도의 함수로 고려됨에 따라 흐름과 용질이동 방정식을 결합하여 해를 구하였다. 또한 충전량의 변화, 대수층의 비균질성, 다양한 대수층의 두께, 복잡한 경계조건 등을 고려할 수 있는 특징이 있다.

2.2.3 SHARP

본 모형은 H. I. Essaid(U.S.G.S.)가 개발한 것으로 층상해안 대수층에서 담수와 해수의 분리된 흐름을 준3차원(quasi-3D) 유한차분기법을 이용하여 해석하는 프로그램이다. 피압, 비피압 대수층을 모두 고려할 수 있으며 지하수 충전량과 양수량의 변화에 대해서도 모의할 수 있는 특징이 있다. flux, 일정한 담수/염수의 수두, 혼합형태의 경계조건 등을 고려할 수 있으며 균질, 등방대수층에 적용이 가능하다. 또한 수평과 연직단면을 모두 모의할 수 있다.

2.2.4 SWICHA

B. Lester(Geo Trans, Inc)에 의해 개발된 모형으로 해안대수층에서

염수침투를 모의할 수 있는 3차원 모형이다. 완전히 포화된 다공매질내의 밀도류 흐름과 용질이동을 해석할 수 있으며 흐름과 용질이동 방정식의 해를 분리하여 동시에 계산할 수 있다. 용질이동의 기작은 이송, 확산, 흡착과 1차감쇠를 반영할 수 있다.

흐름과 용질이동 방정식은 유한요소법을 이용하여 근사화되며 사각형과 삼각형 요소가 사용된다. 요소행렬의 해는 수치적분을 수행하지 않고 slice successive over-relaxation(SSOR) scheme을 이용하여 계산된다. 이 방법은 많은 수의 미지수를 효과적으로 계산할 수 있는 장점이 있다. 결합된 흐름과 이동문제에서 비선형 방정식은 Picard 반복법을 이용하여 계산된다.

본 모형은 지하수자원의 평가, 양수시험, 지하수오염 조사, 유해폐기물의 지하저장, 염수침투 등의 다양한 분야에 이용될 수 있다.

2.2.5 TARGET

본 모형은 Dams & Moore, Inc.에서 개발한 것으로 포화 다공매질내에서 지하수 흐름과 화학물질의 이동을 모의할 수 있다. 복잡한 경계조건, 다양한 매질의 특성, 공급-소멸원에 적용될 수 있으며 다음과 같은 4개의 독립된 코드로 구성되어 있다. 1) 2차원, 연직적분, 피압/비피압, 천이 지하수 흐름, 용질이동(TARGET-2DH); 2) 2차원 연직, 포화, 밀도결합, 천이 지하수 흐름, 용질이동(TARGET-2DU); 3) 층상, 피압/비피압, 천이 지하수 흐름, 용질이동(TARGET-2DM); 4) 3차원, 포화, 밀도결합, 천이 지하수 흐름, 용질이동(TARGET-3DS). 흐름방향의 상류부 또는 연직방향에서 수치분산을 감소시키기 위해 적분 유한차분기법을 사용하였으며 질량균형과 수렴을 위해 비포화대의 계산에서 moisture content averaging scheme을 사용하였다. 또한 수치해의 수렴성을 향상시키기 위해 under-over relaxation과 결합한 Iterative Alternating Direction Implicit algorithm을 사용하였다.

2.3 포화 용질수송모형

2.3.1 BIOPLUME II

BIOPLUME II는 산소가 제한된 미생물 분해의 영향을 받는 용존탄화수소의 거동을 모의하는 2차원 수치모형이다. 이 코드는 재포기와 탄화수소 농도의 1차 감쇠로서의 혐기성 분해도 모의한다. 이 모형은 Konikow와 Bredehoeft가 개발한 U.S.G.S. 2차원 MOC수송모형의 1987년 버전을 기본으로 한다. 이송, 분산, 혼합과 분해에 의한 시간별 농도변화를 모의할 수 있다.

BIOPLUME II는 수송방정식을 두 번 푼다. 한번은 탄화수소에 대해서 또 한번은 산소에 대해서 푼다. 그 결과 매시간 단계마다 두 개의 plume이 계산된다. 이 모형은 분해과정을 모의하기 위해 산소와 탄화수소간의 순간적인 반응을 모의한다. 또한 오염된 대수층으로 산소공급원을 지정하기 위한 주입정을 허용한다. 추가적인 세가지 산소 공급원은 1) 오염되지 않은 대수층내의 초기 용존산소; 2) 경계를 통한 산소의 자연 충전; 3) 비포화대로부터 산소의 연직교환(재포기)이다. 저자는 H.S.Rafai 등(Rice University)이다.

2.3.2 MOC(U.S.G.S. 2D TRANSPORT)

MOC는 포화된 지하수계에서 비보존 용질수송을 모의하는 모형이다. 이 모형은 적용성과 디자인의 유연성 모두 일반적이다. 즉, 광범위한 문제에 적용이 가능하다. 이송수송(convective transport), 동수역학적 분산, 충전과 화학반응으로부터의 혼합과 회석등으로 인한 시간에 따른 공간적인 농도변화를 계산한다. 화학반응은 비가역적 1차 rate 반응(예를들면 방사능 감쇠), 가역적인 Freundlich, Langmuir isotherms의 평형-조절흡착, 가역적인 1가 혹은 2가이온의 평형-조절 이온교환을 포함한다. 모형은 유체밀도변화, 점성변화, 온도경사 등이 유속분포에 영향을 미치지 않는다는 가정을 한다. MOC는 비균질 이방성, 피압대수층에 적용이 가능

하다.

MOC는 지하수 흐름방정식과 비보존 용질수송방정식을 단계별(uncoupled)로 푼다. 컴퓨터 프로그램은 교대방향음해법(Alternating Direction Implicit)혹은 SIP(Strongly Implicit Procedure)을 사용하여 흐름방정식의 유한차분근사를 푼다. SIP 기법은 ADI해가 수렴하지 않거나 투수량계수가 불연속적인 영역의 경우 매우 유용한 해법이다. MOC는 용질수송방정식을 풀기위해 특성곡선법을 이용한다. 동수역학적 분산, 유체공급원과 소멸원, 유속의 발산의 영향을 설명하기 위한 유한차분방정식을 풀기위해 2단계 양해법을 사용하며, 이송수송을 표현하기 위해서 입자추적법(particle tracking procedure)을 사용한다. 직사각형 블록중심 유한차분 그리드를 사용하여 플럭스와 수송계산을 한다. 격자크기는 최대 100×100 을 허용한다. 저자는 L.F. Konikow와 J.D. Bredehoeft(U.S. Geological Survey)이다.

2.3.3 MOC3D

MOC3D는 3차원 흐름과 수송모형이다. 특성선법 수송모형이 MODFLOW와 통합되었다. 이송, 분산, 다른 유체 공급원과의 혼합, 선형 흡착 그리고 방사능 감쇠등을 모의한다. 저자는 Leonard Konikow이다.

2.3.4 MODFLOWT

MODFLOWT는 3차원 수송을 모의하는 모듈을 포함한 MODFLOW의 새로운 버전이다. 새로운 모형은 GeoTrans, Inc에 의해 개발된 상업용 코드 FTWORK의 알고리즘인 완전음해법을 사용하여 흡착과 1차감쇠항을 포함한 이송-분산방정식을 풀게 된다. 이 모형은 중앙차분과 상향가중근사읍선을 이송항에, 완전음해법 혹은 Crank Nicolson 근사읍선을 시간도함수에 대해 적용한다. 분산텐서의 외적(cross product)의 선택적인 확장을 지원한다.

MODFLOWT는 이전의 MODFLOW버전과 완전하게 호환된다. MODFLOWT는 BST (Basic Transport)와 BCT(Block Centered Transport) 그리고 Orthomin 해법의 새로운 모듈을 추가함으로써 수송을 모의한다.

MODFLOWT는 흐름에 대해서 SSOR, SIP, PCG해법을 사용한다. 수송에 대해서는 Orthomin 해법과 함께 향상된 SSOR의 버전을 사용할 수 있다. 수송에 대해 적응조절을 하는 자동시간단계 (automatic time stepping)를 포함한다. 저자는 Glenn Duffield (HYDROSOLVE).

2.3.5 MT3D

MT3D는 지하수계내의 용존물질의 이송, 분산, 화학반응을 모의하는 3차원 수송모형이다. 이 모형은 MODFLOW에서 수행된 모듈구조와 유사한 구조를 가진다. 이 모듈구조는 이송, 분산, 소멸/공급 혼합, 화학반응들을 각각 독립적으로 모의하며 사용되지 않는 옵션에 대해서는 기억용량을 예비시키지 않아도 된다.

MT3D 수송모형은 혼합된 Eulerian-Lagrangian 접근방법을 사용하여 3차원 이송-분산-반응방정식의 해를 구한다. 세가지 기본적인 옵션은 특성선법(MOC), 수정된 특성선법(MMOC), 그리고 이 두가지 방법의 혼합형(HMOC)이 그것이다. 이 접근방법은 수치분산을 제거하는 MOC기법의 강점과 MMOC의 계산상의 효율성을 결합한 것이다. 더불어 MT3D는 수치진동이 문제되지 않는 상황에서는 일반적인 유한차분기법을 이용해서 매우 불규칙한 격자망에 대한 질량보존해를 얻을 수 있다.

MT3D는 지하수내의 혼합되는 단일종 오염원의 농도변화를 모의하는데 이송, 분산, 몇 가지 단순한 화학반응을 고려한다. 화학반응은 평형-조절 선형 혹은 비선형 흡착과 1차 비가역적 감쇠 혹은 분해등을 포함한다. 현재 MT3D는 다음과 같은 공간근사능력과 수송경계조건을 수용한다. 1) 피압, 비피압, 변동적인 피압/비피압 대수층; 2) 동일한 층내의

변화하는 셀의 두께와 경사진 층; 3) 지정된 농도 혹은 질량플럭스 경계; 4) 우물, 하천, 면적충전과 증발산등의 외부 공급원/소멸원의 영향. 저자는 C. Zheng(S.S.Papadopulos & Assoc.)

2.3.6 PHREEQM-2D

PHREEQM-2D는 두 개의 결합된 모의 프로그램(HST2D와 PHREEQE)으로 구성된 다중 성분 질량수송모형이다. PHREEQE는 U.S.G.S.에 의해 개발된 지화학반응모형이다. PHREEQM-2D는 용해/침강과 이온교환 그리고 한 가지 광물에 대한 운동학적 계산을 지원한다.

HST2D-PC는 2차원 포화흐름형상에서 밀도종속 지하수 흐름과 관련된 열과 용질수송모형이다. 이는 U.S.G.S.에서 개발한 3차원 모형 HST3D를 근간으로 만들어진 HST2D를 근간으로 한다.

HST2D는 압력분포(필요한 경우 열과 용존물질수송과 결합되는)를 계산하기 위해 사용되며 유속을 유도한다. PHREEQM-2D에 의해 유속들은 화학수송을 계산하기 위해 이용된다. PHREEQE은 화학반응을 계산하는데 이용되며 수치진동의 계산이 뒤따르게 된다. PHREEQM-2D는 이를 보충하며 물리적 분산과 확산을 보정된 분산계수를 이용하여 계산한다. 마지막으로 PHREEQE는 화학반응에 대해 향상된 계산을 수행하는데 이용된다.

저자는 A.Willemsen(IF Technology, Arnhem, The Netherlands :PHREEQM-2D)와 Hagoort & Associates, Delft, The Netherlands (HST2D-PC)이다.

2.3.7 RAND3D(3D Random Walk Solute Transport Model)

RAND3D 프로그램은 Illinois State Water Survey에서 지하수 용질 수송문제를 푸는 효율적인 알고리즘으로 Thomas Prickett(1981)에 의해 개발된 random walk 알고리즘(Prickett, Naymik, and Lonquist, 1981)

의 3차원 버전이다. RAND3D모형은 다음과 같은 특징들을 포함하고 있다. 1) 세가지 서로다른 유속보간기법중 하나를 사용한 수평이송수송의 계산; 2) 각 층의 최상부와 바닥에 입력되는 연직유속벡터간의 선형보간을 기초로 하는 연직 이송수송의 계산; 3) 일정한 분산지수(종방향, 횡방향, 연직방향)를 이용한 분산의 계산; 4) 0차, 1차, 혹은 변동차수의 감쇠 혹은 자유수면으로부터의 휘발(volatilization)의 계산; 5) 선형흡착(지연)의 계산; 6) 복잡한 면적공급원을 나타내는 능력; 7) 소멸원(우물 혹은 이득하천)에서 모형을 통해 나가는 용질농도의 계산; 8) 모형의 선택된 면적에 대한 등고선도를 단면 혹은 평면도로 도시; 9) plotting을 위한 층별 용질농도의 분포; 10) 대화식 화면 그래픽으로 보여지는 플룸의 거동, 지형학적 특징과 화면슬라이드; 11) 임의의 시간에서 모형매개변수의 저장과 재시작; 12) 다중시간단계에 의한 비정상흐름의 모의; 13) 원래 선택된 입자의 배수를 기초로한 입자의 증대를 통해 해상도를 향상시키는 입자의 분할(particle splitting)기능; 14) 규모가 다른 용질수송 문제를 모의함에 있어 크기가 정해진 RAND3D 모형으로부터 다른 크기의 RAND3D 모형의 입력으로 입자를 통과시킬 수 있는 입자전환(particle transfer)기능; 15) 기억용량을 최소화하기 위해 배열의 차원재설정을 자동으로 수행하는 동적 메모리 관리 기능 등이다.

모의가능한 최대 입자수는 16001이다. 모의가능한 특별한 특징들의 수는 10가지이며, 단지 균일한 격자간격(유속벡터파일)만이 모의가능하다. 저자는 Engineering Technologies Associates이다.

2.3.8 RANDOM WALK

RANDOM WALK는 일반화된 2차원 지하수 흐름과 용질수송을 모의하는 컴퓨터 코드로서 T.A. Prickett, T.G. Naymik, 그리고 C.G. Lonquist에 의해 작성되었으며 Illinois State Water Survey에서 1981년에 배포되었다. 지하수 흐름은 해석해 혹은 PLASM 유한차분모형의 2차

원 버전을 사용하여 모의한다. 코드의 용질수송부분은 이송메카니즘에 대해서는 particle in cell 기법과 분산효과에 대해서는 random walk 기법을 기초로 한다. 모형은 1차 감쇠, 선형평형흡착과 0차 생성을 다룰 수 있다.

RANDOM WALK는 DOS 프로그램으로 자유면 혹은 피압 혹은 누수 피압조건하의 비균질 대수층에 대한 2차원 천이/정상 흐름문제를 모의할 수 있다. 더 나아가 프로그램은 시간에 따라 변화하는 양수 혹은 주입정 효과를 반영하며, 자연적 혹은 인위적인 충전, 지표수와 지하수의 관계, 증발산, 피압정으로부터 자유면조건으로의 저류계수의 전환, 용천으로부터의 흐름 등도 고려할 수 있다. 광범위한 수질조건에 대한 지정을 허용하며 이는 화학종 농도와 용질 질량 플럭스를 모형영역의 어떤 구획내에서 그리고 경계를 따라서도 지정할 수 있도록 함으로 반영된다.

이 모형은 우물에 의한 용질의 주입, 매립지 혹은 지표면 오염물 방출로부터 대수층으로 유입되는 침출수, 염수침입으로 나타나는 용질 전면의 연직평균된 위치, 대수층과 다른 수질을 가진 공급하상(source bed)으로부터 대수층으로의 누출, 지표수경계를 따르는 농도의 지정으로 그 수질을 반영하는 것등을 포함한다. 가변적인 직사각형 격자망을 허용한다.

2.3.9 Visual MODFLOW

Visual MODFLOW는 대중적인 U.S.G.S. MODFLOW와 MODPATH 프로그램에 대한 모델링 도구이다. 코드는 변화하지 않고 대화식으로 전-후처리 환경을 포함시킨 것이다. 그리드 설계와 편집, 매개변수 설정, 모의발생 모듈의 실행 및 상호작용과 시각적 측면뿐 아니라 수문지질학적, 지형학적, 물리적 입력도 함께 관리한다. 평면 혹은 단면에 대해 입출력값들을 볼 수 있다. 모든 입력자료는 배경지도상에서 그래픽으로 제공된다. 일정수두셀 혹은 흐름이 없는 셀등의 경계조건은 그리드상에서

마우스로 지정이 된다. 추가적인 그리드 해상도는 영역 어디에서도 행 혹은 열별로 증가될 수 있으며, 층도 쉽게 추가된다. 우물과 하천셀, 일반적인 수두경계와 드레인은 모형영역내에 유사하게 추가될 수 있다. 수문지질학적 특성 즉, 충전, 수리전도도, 그리고 증발산량은 한 층에 대해서 한번에 추가될 수 있다.

Visual MODFLOW의 메뉴시스템은 모든 그래픽 파일들을 MODFLOW와 MODPATH 입력 형식으로 바꾸어 준다. 후처리는 수두의 등고선도, 입자추적, 포획구간(capture zone) 그리고 평면 및 단면에 대한 유속벡터를 나타내 주며 층별 혹은 행·열별로 확인할 수 있다. 오염 정호의 설계를 위해 특별한 우물 편집창이 제공되며, 개개의 우물에 대한 다이어그램을 구축하며 부분관통에 대한 보정도 가능하다. 개발자는 Waterloo Hydrogeologic Software이다.

2.3.10 WinTran

WinTran은 Winflow모형으로부터의 정상지하수 흐름모형을 오염물질 수송모형과 결합한다. 피압/비피압 대수층내의 정상흐름과 비정상 수송을 모의한다. 수송모형은 해석적모형의 느낌이 들지만 실은 유한요소모형이 내재된 상태이다. 유한요소 수송모형은 소프트웨어에 의해 자동으로 구성되지만 수치 혹은 질량균형문제를 피할 수 있도록 수치조건(Peclet과 Courant 수)을 디스플레이 해 준다.

오염된 질량은 우물, 연못, 그리고 선소멸을 포함하는 임의의 해석요소를 이용하여 주입 혹은 배출될 수 있다. 게다가 일정한 농도요소들이 추가된다. WinTran은 수두와 농도 등고선도를 도시할 수 있으며, 농도는 선택된 모니터링 위치에서 시간에 대해 도시된다. 종-횡방향 분산, 분자확산, 선형흡착, 1차 감쇠의 효과를 포함한다. 분산, 확산, 지연 및 감쇠는 모형영역에 대해 균일하게 작용한다. 개발자는 Environmental Simulations, Inc.이다.

3. HST-3D 모형

3.1 모형의 개요

HST-3D 모형은 지하수의 흐름과 열, 용질의 3차원 이동을 모의하는 모형으로서 지하 오염원의 침투, 매립지, 염수의 침입, 담수의 저장과 회복, 방사성 폐기물에 의한 오염, 온천수의 열관계, 지하에너지의 저장에 관련된 문제의 분석 등에 이용될 수 있다. 이를 위해 본 모형에서는 다음과 같은 3개의 지배방정식을 사용하고 있다.

- (1) 전체 유체 질량의 보존과 다공매질 속에서의 흐름을 나타내는 Darcy법칙을 결합한 형태인 포화 지하수 흐름 방정식
- (2) 유체와 다공매질에 대한 엔탈피의 보존으로부터 유도된 열 수송 방정식
- (3) 다공매질로 흡착되거나 감쇠되는 단일 용질 종의 질량 보존으로부터 유도된 용질수송 방정식

위와 같은 3가지 방정식들은 간극 유속장에서의 이송수송(advective transport)의 종속성, 온도와 용질의 농도에 대한 유체점성의 종속성, 그리고 압력, 온도, 농도에 대한 유체밀도의 종속성을 통해 결합된다. 수치해들은 각각의 종속변수(압력, 온도, 용질농도)에 대해 교대로 구해지며 유한차분기법은 방정식들의 공간과 시간 이산화에 사용된다. 적당한 경계 및 초기조건들과 시스템 매개변수 분포 등이 주어지면 모의계산을 수행하므로써 광범위한 열과 용질수송상태를 평가할 수 있다.

3.1.1 버전 2.0의 추가사항

HST-3D 모형은 다양한 이산화, 경계조건, 공급-소멸(source-sink), 방정식-solver 옵션들을 포함한 일반적인 모형이며 본 보고서에서 소개할 코드는 버전 2.0이다. 이는 Kipp(1987)에 의해 수록된 당시의 1.4버전에 대해 여러 가지 주된 수정과 추가가 이루어진 것으로서 수정사항에는 다음과 같은 것이 있다.

- (1) 모든 기하학적인 데이터들은 mesh node number 대신에 좌표위치로써 입력된다.
- (2) 새로운 반복계산 solver는 행렬을 줄이기 위해 red-black이나 격점의 교호대각형(alternating diagonal) 엇갈린 번호부여(zig-zag renumbering)를 사용하는 일반화된 공액경사법 (generalized-conjugate-gradient method)에 기초한다.
- (3) 증발산 경계조건이 추가되었다.
- (4) 하천 누출(leakage) 경계조건은 여러 지류가 한 개의 cell에서 만나도록 확장되었다.
- (5) 자유면 경계조건 알고리즘은 자유면이 모의영역내에서 어떤 표고(elevation)로도 움직일 수 있도록하여 cell들의 마름(dry)과 다시 젖음(rewet)등을 모의할 수 있도록 개정되었다.
- (6) 자동 시간 간격 알고리즘은 더 안정된 방법으로 교체되었다.
- (7) 크고 다양하게 분할되는 배열들은 INCLUDE 선언문에 의해 구체화되고 PARAMETER 선언문에 의해 차원이 정해지는 common block 안에서의 고정 배열 방식으로 교체되었다.
- (8) Common block은 여러 가지 종류와 용도에 의해 재구성되었다.
- (9) 서브루틴 인수(argument) 리스트는 사실상 제거되었다.
- (10) 경계조건 데이터는 경계구획(segment)에 걸쳐 선형분포로써 입력될 수 있다.
- (11) 공간 데이터는 지형정보 시스템(GIS)에 의해 마련된 그리드 데이터로부터 격점별(node-by-node) 혹은 요소별(element-by-element) 기초자료로 입력될 수 있다.
- (12) 흐름과 수송에 대한 차분방정식의 수치적 결합에 사용되는 가우스 소거법은 비피압 흐름에서 cell이 마를 때의 불안정성을 제거하기 위해 사용이 억제된다.
- (13) 전처리(pre-processing) 프로그램은 주어진 시뮬레이션에서 배열

차원의 크기를 검토하고 배열에 대한 차원재설정(redimensioning the arrays)을 위한 PARAMETER 선언을 적절히 설정하기 위해 포함시켰다.

- (14) 출력파일은 매우 큰 파일들의 처리가 어려우므로 여러 데이터의 형식에 기초하여 분리된 여러 개의 파일들로 나누어진다.
- (15) 출력간격은 모의발생 시간단위나 시간단계(time step)의 수에 의해 명기된다.
- (16) 출력파일은 등고선도, 벡터도, 여러 종속 변수들의 임시적인 그림을 만드는 후처리(post-processing)프로그램에 의해 쓰여진다.
- (17) 후처리 프로그램은 경계유량과 사용자에 의해 명기된 경계 영역에 대한 누가 유량의 계산을 포함한다.
- (18) 총 9개의 분산텐서 성분은 교차분산 플럭스 계산에 사용된다.
- (19) 모의발생에서 사용되는 시간단위는 사용자가 선택할 수 있다.
- (20) 입출력 파일을 위한 포트란 단위수는 다른 컴퓨터 시스템에서는 바뀌는 매개변수이다.

3.1.2 적용성과 제한사항

HST-3D는 여러 가지 밀도와 점성을 갖는 포화상태 3차원 유동시스템에서 지하수 흐름과 관련된 열과 용질이동을 모의하기에 적절한 코드이다. 따라서 담수 혹은 염수대수층으로의 쓰레기 매립, 오염물의 이동, 연안지역의 해수 침입, 염분수 처분, 염수대수층내의 담수저류, 대수층내의 열 저장, 액상 지열 시스템, 유사한 수송상황 등의 연구에 적용된다. 대부분의 적용에서 열이나 용질 수송방정식은 지하수 흐름과 연계되어 풀린다. 3차원 직교 및 축대칭, 원통좌표계를 이용할 수 있다.

이 코드의 주된 한계는 공간 및 시간도함수 근사를 위한 유한차분기법의 사용에서 비롯된다. 종분산지수와 횡분산지수가 작을 경우, cell 크기는 수학적인 분산과 진동을 최소화하기 위해 작게 할 필요가 있다. 계

다가 용질 이동 지역이 다소 복잡하고 3차원이라면 격점밀도가 높은 지역으로부터의 격점선의 투영은 다른 지역을 나타내는데 필요한 것 보다 더 많은 격점들을 필요로 할 것이다. 게다가 흐름장을 결정하기 위한 밀도장 변화를 정확하게 나타내기 위해서는 작은 크기의 cell들이 필요하다. 이 3가지 요소들은 주어진 모형에 과다한 수의 격점들을 포함시킴에 따라 모의발생시 엄청난 저장용량과 계산시간을 요구한다. 메카니즘을 조사하거나 가설의 검증 등 시스템의 간단한 모형에 대해서는 실제로 유용하다.

또 다른 한계는 유한차분격자가 좌표축에 평행하지 않은 경계와 일치하지 않는 것이다. 모서리진 경계에 대한 계단식 근사는 지정하기에 불편하고 또한 비현실적인 지하수 흐름장내의 국부적인 변화를 초래할 수 있다. 모의 영역은 점분포격자(point-distributed grid)를 사용하여 공간적으로 이산화된다. 공간적인 성질은 격점간의 면을 경계로 하는 영역들에 의해 정의된다. 이는 cell들에 대한 공간적 평균이 cell 들내의 종속변수 값들에 영향을 미친다는 의미이다. cell들의 경계에서 계산된 변수들은 특성영역에 걸친 대표적인 평균치를 나타내지는 못할 것이다. 이 영향은 특성이 변화하는 경계근처에 cell의 면을 누가시킴으로써 감소시킬 수 있다. 그러면 각 cell의 대부분은 하나 또는 다른 영역에 놓이게 된다. 이러한 조정의 대가는 큰 특성차이를 가진 경계에서 동일한 정확도를 요구하는 셀중심 mesh 보다는 더 많은 격점을 사용하는 것이다. 또 다른 한계점은 영역들은 볼록한 직사각형 모양의 평행6면체이어야만 한다. 계단 경계를 가진 영역들이나 L형 영역들은 허용되지 않는다. 모의영역의 가장자리나 구석에서 cell은 2개나 3개의 경계면을 가지나 주어진 cell에 대해 단지 하나의 플럭스 type과 하나의 누출 type 그리고 하나의 대수층-영향-함수 type의 경계조건이 지정될 수 있다. 예로 측방향 누출 경계면이 연직의 하천 누출 경계면과 만나는 가장자리를 따라 이러한 면들 중의 하나는 반드시 그 가장자리로부터 물러나게 해야 한다. 그래서 그

cell 에 대해 2개의 누출 경계면은 있을 수 없다. 게다가 지정된 압력경계 cell에서 연관된 온도와 농도는 여러 개의 경계면을 가진 cell의 각 면마다 다를 순 없다. 유사하게 어떤 플럭스 경계조건과 관련된 매개변수는 주어진 cell의 모든 경계면에서 같아야만 한다.

자유면과 누출 경계조건들은 연직방향으로 Z축이 바르게 놓일 것을 요구한다. 그러므로 이러한 조건들은 기울어진 좌표시스템에서는 사용될 수 없다.

주어진 어떠한 cell에 대해서도 하나의 정호(well bore)만이 개방된다. 전체 대수층 두께를 통해 걸러지는(screened) 완전관통 정호에 있어서 단지 cell들의 연직 column에 대해 하나의 정호만이 허용됨을 의미한다. 이 시뮬레이터는 수평 사분원에서 각기 다른 다공매질 특성영역을 가지는 cell에서 여과되는 well bore의 일부를 표현할 수는 없다.

또 다른 한계는 cell을 통과하는 뚜렷한 대각선 흐름이 음의(negative) 온도와 농도를 생성할 수 있는 교차 분산 열 및 용질 플럭스를 야기시킨다는 점이다. 하나의 치료책은 수송 방정식에서 교차 분산 플럭스 항을 억제시키는 것이다. HST-3D 시뮬레이터는 여러 가지 옵션을 가진 일반적인 컴퓨터 코드이기 때문에 조사된 주어진 시스템에서 명확히 설계된 모의발생 코드보다는 계산적으로 덜 효과적이다. 이런 한계는 폭넓은 물리적인 상태를 나타내기 위한 시뮬레이터의 능력에 의해 보상된다.

3.2 기본이론

3.2.1 흐름 방정식

지하수의 흐름지역에서 다공성 매질이 완전 포화상태일 때 다공성 매질과 유체를 압축성으로 가정하여, Darcy의 법칙을 사용하여 질량보존법칙을 적용하면 다음과 같은 지하수 흐름방정식을 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial(\epsilon\rho)}{\partial t} = \nabla \cdot \rho \frac{\mathbf{k}}{\mu} (\nabla p + \rho \mathbf{g}) + q\rho^* \quad (3.1)$$

여기서, p 는 유체압력(Pa), ϵ 은 간극비, ρ 는 유체밀도(kg/m^3), μ 는 유체공급원(fluid source)의 점성(kg/m-s), g 는 중력가속도(m/s^2), q 는 유체공급원의 유량강도($\text{m}^3/\text{m}^3\text{-s}$), ρ^* 는 유체공급원의 밀도(kg/m^3)이며, k 는 다공성 매질의 투수성 텐서(m^2)로 다음과 같이 정의된다.

$$k = \frac{\mu}{\rho g} K \quad (3.2)$$

여기서, $K(\text{m/s})$ 는 투수계수를 나타낸다(Bear, 1979 ; Freeze and Cherry, 1979).

3.2.2 용질 이동 방정식

용질은 밀도장이 변화함에 따라 종속변수로 취한다. 용질은 유체의 단위질량당 용존물질의 질량으로 나타난다. 농도항은 일반적으로 유체의 단위부피당의 질량으로, 체적단위의 농도를 사용하지만, 체적단위의 농도는 밀도가 변동하므로 유지되지 않으므로, 용질농도항은 질량을 기반으로 한 농도나 질량으로 나타나게 된다.

유체내에서 용질의 질량보존방정식은 식 (3.3)과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\epsilon \rho w)}{\partial t} = & \nabla \cdot \epsilon \rho \underline{D}_s \nabla w + \nabla \cdot \epsilon \rho D_m \underline{I} \nabla w - \nabla \cdot \epsilon \rho \underline{v} w \\ & - \lambda \epsilon \rho w - \rho_b R_{fs} + q \rho^* w^* \end{aligned} \quad (3.3)$$

여기서, w 는 유체상내의 용질의 농도, w^* 은 유체공급원에서의 용질의 질량, \underline{D}_s 는 역학적분산계수(m^2/s), D_m 은 용질의 유효분자확산계수(m^2/s), \underline{I} 는 단위행렬, \underline{v} 는 간극유속벡터, λ 는 선형 감쇠율 상수(s^{-1}), ρ_b 는 다공성매질의 겉보기(bulk)밀도(kg/m^3)이며, R_{fs} 는 다공성매질의 단위질량당 유체에서 다공성매질로의 용질 이동율을 나타낸다. 단일 용질의 보존 방정식은 열확산과 압력분산을 무시하고, 용질의 양적인 변화는 용질의 선형 감쇠와 소멸에 의하며, 용질과 다공성매질간의 유일한 상호

작용은 선형-평형 흡착에 기초한다.

다공성매질 내에서 용질에 대한 질량보존방정식은 식(3.4)와 같다.

$$\frac{\partial(\rho_b \bar{w})}{\partial t} = \rho_b R_{fs} - \lambda \rho_b \bar{w} \quad (3.4)$$

여기서, \bar{w} 는 다공성매질에서 용질의 질량을 나타낸다.

선형-평형 흡착가정 하에서 유체와 다공성매질의 농도는 평형분포 계수(K_d)를 이용하여 식(3.5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\bar{w} = K_d \rho w \quad (3.5)$$

식 (3.3)에서 식 (3.5)까지를 연결하여 다음과 같은 용질보존방정식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\epsilon + \rho_b K_d) \rho w = & \nabla \cdot \epsilon \rho [D_s + D_m I] \nabla w - \nabla \cdot \epsilon \rho \gamma w \\ & - \lambda (\epsilon + \rho_b K_d) \rho w + q \rho^* w^* \end{aligned} \quad (3.6)$$

식 (3.6)은 유체내의 용질변화율을 확산하는 플럭스, 이송플럭스, 용질 공급원을, 유체공급원, 용질주입율, 용질의 감소율과 연계시킨다. 방정식은 유체와 포화된 다공성매질의 단위체적에 대해 유도되었다. 용질은 유체 공급원에 의해 농도(w^*), 밀도(ρ^*)로서 주입되지만, 유체소멸원에 의해 농도(w)와 밀도(ρ)로 제거된다. 즉, $q < 0$ 이라면, $w^* = w$ 가 된다.

3.2.3 열이동 방정식

열에너지 방정식은 영역체적내의 유체와 다공성매질 두 가지의 엔탈피 보존을 기초로 한다. 엔탈피는 내부에너지와 흐름에너지를 포함한 유도된 특성이다. 온도는 종속변수이다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\epsilon\rho c_f + (1-\epsilon)\rho_s c_s)T = & \nabla \cdot (\epsilon K_f + (1-\epsilon)K_s) \nabla T \\ & + \nabla \cdot \epsilon D_H \nabla T - \nabla \cdot \epsilon \rho c_f \nabla T \\ & + q_H + q \rho^* c_f T^* \end{aligned} \quad (3.7)$$

여기서,

- T : 유체와 다공성 매질의 온도 (°C)
- T* : 유체공급원의 온도 (°C)
- ρ_s : 고체상의 온도 (°C)
- c_f : 일정한 압력하에서 유체의 열용량(J/kg - °C)
- c_s : 일정한 압력하에서 고체의 열용량(J/kg - °C)
- K_f : 유체상의 열 전도도(W/m - °C)
- K_s : 고체상의 열 전도도(W/m - °C)
- D_H : 열역학적 분산텐서 (W/m - °C)
- q_H : 열원방출강도(W/m³)
- I : 단위행렬 (-)

식 (3.7)은 유체와 다공매질의 엔탈피 변화율을 다음의 항목들과 관련 짓고 있다.

- 순(net)전도 엔탈피 플럭스
- 순(net)확산 엔탈피 플럭스
- 순(net)이송 엔탈피 플럭스
- 열원(heat source)
- 주어진 온도에서의 유체 공급원

또한 위 식은 유체와 고체모두 단위체적에 대해 유도되었다. 다시 말하면, 포화된 다공매질의 단위체적이다. 열은 T*의 온도로 유체는 ρ^* 의

밀도로 공급되며, T의 온도와 ρ 의 밀도로 빠져나간다.

3.2.4 특성함수 및 이동계수

지하수에서 흐름과 용질의 보존 방정식을 풀기 전에 유체특성과 다공성매질 특성, 이동계수를 얻어야 한다. 유체 특성은 밀도, 점성 등이며 다공성매질의 특성은 간극비, 압축성, 투수성 등이다. 이동계수는 용질분산 텐서, 유효분자 확산도, 용질의 흡착과 감쇠이다.

1) 유체의 밀도함수

유체 밀도는 압력, 온도, 용질 농도의 함수로 가정된다. 물과 같은 유체의 경우 보통 압력, 온도, 용질농도의 범위에 대해 선형밀도함수가 적절하다. 유체 밀도함수는 다음의 식 (3.8), (3.9)로 표현된다.

$$\begin{aligned} \rho(p, T, w) = & \rho(p_0, T_0, w_0) + \left. \frac{\partial \rho}{\partial p} \right|_0 (p - p_0) \\ & + \left. \frac{\partial \rho}{\partial T} \right|_0 (T - T_0) + \left. \frac{\partial \rho}{\partial w} \right|_0 (w - w_0) \end{aligned} \quad (3.8)$$

$$\begin{aligned} \rho(p, T, w) = & \rho_0 + \rho_0 \beta_p (p - p_0) - \rho_0 \beta_T (T - T_0) \\ & + \rho_0 \beta_w (w - w_0) \end{aligned} \quad (3.9)$$

여기서, ρ_0 는 기준압력(p_0), 온도(T_0), 질량(w_0)에서의 유체 밀도 (kg/m^3), β_p 는 유체 압축성(Pa^{-1}), β_T 는 열팽창의 유체상수($^{\circ}\text{C}^{-1}$), β_w 는 기준 유체밀도로 나눈 질량의 함수로서 유체밀도경사를 나타낸다. 식 (3.9)의 $\rho_0 \beta_w$ 는 다음 식 (3.10)으로부터 얻어진다.

$$\rho_0 \beta_w = \left. \frac{\rho(w_{\max}) - \rho(w_{\min})}{w_{\max} - w_{\min}} \right|_{p_0, T_0} \quad (3.10)$$

여기서, w_{\min} 은 최소 용질의 질량이고, w_{\max} 는 최대 용질의 질량으로 $\rho(w_{\min})$ 와 $\rho(w_{\max})$ 를 따라 지정해 주어야 한다. 최소 용질 질량은 초기 조건에 의해 결정되며, 선형 감쇠가 존재한다면, w_{\min} 은 0이 된다. 최대 용질질량은 보통 공급원이나 경계조건으로부터 정해진다. 용질 질량을 다음 식 (3.11)과 같이 축척화시켜서 사용하며, 이 경우 w' 은 0과 1사이의 값이 된다.

$$w' = \frac{w - w_{\min}}{w_{\max} - w_{\min}} \quad (3.11)$$

일반적으로, 질량자료의 입력과 출력에 대해서, 절대값보다는 축척화된 용질 질량을 다루는 것이 편리하며 이에 대한 밀도식은 식 (3.12), (3.13)과 같다.

$$\rho(p, T, w') = \rho_0 + \rho_0\beta_p(p - p_0) - \rho_0\beta_T(T - T_0) + \rho_0\beta_w'w' \quad (3.12)$$

$$\rho_0\beta_w' = \rho(w_{\max}) - \rho(w_{\min}) \quad (3.13)$$

2) 유체의 점성함수

유체 점성은 온도에 매우 의존하며, 어느 정도는 용질의 농도에도 의존한다. 압력에 대한 점성의 의존도는 무시한다. 온도와 축척화된 용질농도의 함수로서의 점성은 다음 식 (3.14)와 같다.

$$\mu(T, w') = 10^{-3}\mu(T_{ov}, w')\exp\left[(B_0w' + B_1(1 - w'))\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ov}}\right)\right] \quad (3.14)$$

여기서, $\mu(T_{ov}, w')$ 는 기준 온도에서 유체점성(kg/m-s), B_0, B_1 은 농도의 극치(extreme)에서 점성의 온도의존도를 설명하는 변수(°C), T_{ov} 는 점성에 대한 기준 온도(°C)이다.

식 (3.11)에서 축척화된 용질질량은 밀도함수 뿐만 아니라 점성함수에

서도 사용된다. 변수 B_0, B_1 은 온도 자료에 대해서 점성의 최소제곱법을 사용하여 얻는다. 식 (3.15)는 주어진 온도에서 농도의 함수로서 점성을 사용한다.

$$\mu(w') = \mu_1(T_{ov})^{w'} \mu_0(T_{ov})^{1-w'} \quad (3.15)$$

여기서, μ_0 는 최소질량 혹은 0의 축척화된 농도에서의 점성, μ_1 은 1의 축척화된 농도값에서의 점성(kg/m-s)을 나타낸다.

3) 다공성매질의 압축성

다공성매질의 압축성(α_b)은 다음 식 (3.16)과 같이 정의된다.

$$\alpha_b = \frac{1}{V_b} \frac{\partial V_b}{\partial p} \quad (3.16)$$

여기서, V_b 는 다공성매질의 고정된 질량의 겉보기 또는 총 체적(m^3) 즉, 유체와 다공성 매트릭스와의 합이다. 압축성은 압력의 변화에 의해 다공성매질에 변화를 일으킬 수 있으며, 비저류량은 유체와 다공성매질의 압축성과 관련되어 식 (3.17)로 나타난다.

$$S_o = \rho g(\alpha_b + \epsilon\beta_p) \quad (3.17)$$

여기서, S_o 는 비저류량(m^{-1})을 나타낸다.

4) 분산계수

열과 용질의 이동모형에서 동수역학적 분산계수(dispersion coefficients) $D_{Sij}^*(m^2/s)$ 의 형태는 식 (3.18)로 가정한다.

$$D_{Sij}^* = D_{Sij} + D_m\delta_{ij} \quad (3.18)$$

여기서, D_{Sij} 는 역학적 분산텐서 성분(m^2/s), D_m 은 유효분자확산계수

(m²/s), δ_{ij} 는 Kronecker 델타함수이다. 유효분자확산계수는 다공성매질 굴곡(tortuosity)에 의한 회색인자(attenuation factor)가 곱해진 액상의 분자확산도이다. 등방성 다공성 매질에 대해서는 종확산(α_L)과 횡확산(α_T)의 두 매개변수가 역학적 분산을 설명한다(단위: m). 역학적 분산계수의 9개 요소는 다음과 같다.

$$D_{Sij} = (\alpha_L - \alpha_T) \frac{v_i v_j}{V} + \alpha_T v \delta_{ij} \quad (3.19)$$

여기서, v_i 는 i 방향의 간극 유속성분(m/s)이다. 현장자료는 종확산도가 횡확산도에 비해 3~10배까지 큰 것으로 보고되며(Freeze and Cheery, 1979), 크기는 추적자가 경로를 따라 이동한 관측 거리의 규모에 의존한다.

5) 확장된 방정식 계

밀도함수식 식 (3.12)와 식 (3.16)의 다공성매질의 압축성 관계는 식 (3.20)과 같이 정리되어 지배방정식내로 대입된다.

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = \alpha_b \frac{\partial p}{\partial t} \quad (3.20)$$

식 (3.20)을 사용하여 지하수의 흐름방정식과 용질 이동 방정식을 표현하면 다음의 식 (3.21), (3.22), (3.23)으로 표현할 수 있다.

① 지하수 흐름 방정식

$$\begin{aligned} \varepsilon \rho_o \beta_p \frac{\partial p}{\partial t} + \varepsilon \rho_o \frac{\partial T}{\partial t} + \varepsilon \rho_o \beta_w \frac{\partial w}{\partial t} + \rho \alpha_b \frac{\partial p}{\partial t} \\ = \nabla \cdot \rho \frac{k}{\mu} (\nabla p + \rho g) + q \rho^* \end{aligned} \quad (3.21)$$

② 용질이동 방정식

$$\begin{aligned}
 & \rho_o \beta_p (\epsilon + \rho_b K_d) w \frac{\partial p}{\partial t} + \rho_o \beta_T (\epsilon + \rho_b K_d) w \frac{\partial T}{\partial t} \\
 & + \rho_o \beta_w (\epsilon + \rho_b K_d) w \frac{\partial w}{\partial t} + \rho \alpha_b w \frac{\partial p}{\partial t} + \rho (\epsilon + \rho_b K_d) \frac{\partial w}{\partial t} \\
 & = \nabla \cdot \epsilon \rho [\underline{D}_s + D_m \underline{I}] \nabla w - \nabla \cdot \epsilon \rho \underline{Y} w \\
 & \quad - \lambda (\epsilon + \rho_b K_d) \rho w + q \rho^* w^*
 \end{aligned} \tag{3.22}$$

③ 열이동 방정식

$$\begin{aligned}
 & \epsilon \rho_o \beta_p c_f T \frac{\partial p}{\partial t} + \epsilon \rho_o \beta_T c_f T \frac{\partial T}{\partial t} + \epsilon \rho_o \beta_w c_f T \frac{\partial w}{\partial t} + \\
 & \rho \alpha_b c_f T \frac{\partial p}{\partial t} + \epsilon \rho c_f \frac{\partial T}{\partial t} - \rho_s c_s T \alpha_b \frac{\partial p}{\partial t} + (1 - \epsilon) \rho_s c_s \frac{\partial T}{\partial t} \\
 & = \nabla \cdot (\epsilon K_f + (1 - \epsilon) K_s) \underline{I} \nabla T + \nabla \cdot \epsilon \underline{D}_H \nabla T \\
 & \quad - \nabla \cdot \epsilon \rho c_f \underline{Y} T + q_H + q \rho^* c_f T^*
 \end{aligned} \tag{3.23}$$

3.3 버전 2.0에서 추가된 이론

3.3.1 흐름과 수송 방정식

포화 지하수 흐름과 열, 용질 수송 방정식은 Kipp(1987)의 보고서에서 제시된 시뮬레이터를 통해 몇 가지 가정을 가지고 풀 수 있다. 추가된 방정식들이 본 장에서 설명될 것이다. 표기법의 설명들은 첫 번째 사용 이후 나타날 것이다. 이 보고서에서 모든 변수들은 시뮬레이터에 의해 내부적으로 사용되는 SI단위의 척도로써 주어질 것이다. 좌표계는 항상 수직상향을 Z축으로 하는 우수법칙(right-handed)을 따른다. "solute-mass fraction"과 "solute concentration" 항목은 유의어이다.

3.3.2 특성함수와 수송계수

세 가지 보존방정식을 풀기 전에 유체 특성에 관한 정보, 다공매질

특성, 그리고 수송계수를 얻어야만 한다. HST-3D 모형에서 밀도, 점성, 간극률 등은 여러 종속변수 즉, 압력, 온도, 용질농도의 함수이다.

1) 유체-점성 함수

유체의 점성은 온도에 의해 크게 영향을 받고, 작게는 압력과 용질 농도등에 의해서도 영향을 받는다. 압력, 온도, 용질 농도의 함수로서 소금물의 점성에 관한 실험적인 방정식은 Hewlett-Packard(1985, pp.102-107)에 의해 출간된 석유 유체에 관한 계산 프로그램으로부터 도입되었고, 그것은 다음과 같이 쓰여진다.

$$\mu_0(p, T) = 243.18 \times 10^{-7} \cdot 10^{[247.8/(T' - 140)]} \cdot [1 + (P' - P_{sat})1.0467 \times 10^{-6}(T' - 305)] \quad (3.24a)$$

여기서,

- μ_0 : 순수한 물의 유체 점성 ($Pa-s$)
- P' : 압력(bar)
- P'_{sat} : 포화 압력(bar)
- T' : 온도(K)

염분에 의해 조정된 점성에 관한 식은 다음과 같이 주어진다.

$$\mu(p, T, w) = \mu_0(p, T) [1 - 1.87 \times 10^{-3} w_p^{0.5} + 2.18 \times 10^{-4} w_p^{2.5} + [T^{0.5} - 0.0135T][2.76 \times 10^{-3} w_p - .344 \times 10^{-4} w_p^{1.5}]] \quad (3.24b)$$

여기서

- w_p : 염화나트륨의 중량 퍼센트(-)
- T : 온도(F)

포화 압력은 다음과 같이 주어진다.

$$P_{sat} = 22088 \exp\left[\frac{374.136 - T''}{T''} \sum_{i=1}^8 A_i [0.65 - 0.01T'']^{i-1}\right] \quad (3.24c)$$

여기서,

P_{sat} : 포화 압력(kPa)

T'' : 온도(°C)

계수는 $A_1 = -7.419242$; $A_2 = -0.29721$; $A_3 = -0.1155286$; $A_4 = -0.008685635$; $A_5 = 0.001094098$; $A_6 = -0.00439993$; $A_7 = 0.002520658$; $A_8 = 0.0005218684$ 이다. 이 점성함수의 타당한 범위는 $0 < T < 300^\circ\text{C}$; $P_{sat} < P < 8 \times 10^7 \text{ Pa}$; $0.087 \leq P_{sat} \leq 2.2 \times 10^7 \text{ Pa}$; $0 \leq w_p \leq 25\%$ 이다.

식 (3.24b)가 용질 모의를 포함하는 반면에 식 (3.24a)와 식 (3.24c)는 단지 온도 모의의 경우에만 사용된다. 입력변수들의 타당성의 범위와 관련된 정확성에 대해서는 Hewlett-Packard(1985)에 의해 정의되지 않았다.

3.3.3 경계 조건

1) 증발산 경계조건

증발산 경계조건은 유체 플럭스가 지표면 아래에서 자유수면의 깊이의 함수라는 특성을 가지고 있다. 증발산 경계의 수학적 처리는 다음과 같은 간단한 가정들에 기초를 하고 있다 : (1) 증발산 플럭스의 최고치는 자유면이 지표면일 때 발생한다 ; (2) 증발산 플럭스는 자유면의 깊이가 지정된 소멸깊이(extinction depth)아래일 때 0이 된다 ; (3) 소멸깊이와 지표면사이의 자유면의 표고에서 증발산 플럭스는 자유면의 표고에 따라 선형으로 변한다. 자유면과 지표면사이에 부분적으로 포화된 호

름의 영향은 무시되어진다. 이러한 가정하에 증발산 경계 플럭스는 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned}
 q_{ET} &= 0, \quad \eta \leq 0 \text{ 인 경우} \\
 &\eta q_{\max}, \quad 0 \text{인 경우} \quad , \text{ for } x \text{ on } S^7 \\
 &q_{\max}, \quad \eta \geq 1 \text{ 인 경우}
 \end{aligned} \tag{3.25a}$$

이고,

$$\eta = \frac{Z_{FS} - Z_{EX}}{Z_{LS} - Z_{EX}} = \frac{Z_{FS} - (Z_{LS} - b_{ET})}{b_{ET}} \tag{3.25b}$$

여기서,

- q_{ET} : 증발산 경계를 교차하는 유체플럭스 (m^3/m^2-s)
- q_{\max} : 증발산의 최대 플럭스 (m^3/m^2-s)
- η : 완화 매개변수(-)
- Z_{FS} : 자유수면의 표고(m)
- Z_{LS} : 지표면의 표고(m)
- Z_{EX} : 소멸 깊이의 표고(m)
- b_{ET} : 지표면 아래의 소멸깊이(m)
- S^7 : 증발산 경계조건이 존재하는 영역경계표면

그림 3.1은 증발산 플럭스가 지표면 아래의 자유수면 깊이의 함수임을 보여준다. 증발산 플럭스가 마이너스인 것은 지하수 시스템으로부터 유체의 손실을 나타내기 때문이다. 증발산 경계조건이 지표면아래 자유면의 깊이를 가진 증발산 플럭스의 구간(piecewise) 선형 함수이지만 지표면과 소멸깊이에서 함수경사의 날카로운 중단점 때문에 전체적으로는 비선형이 된다.

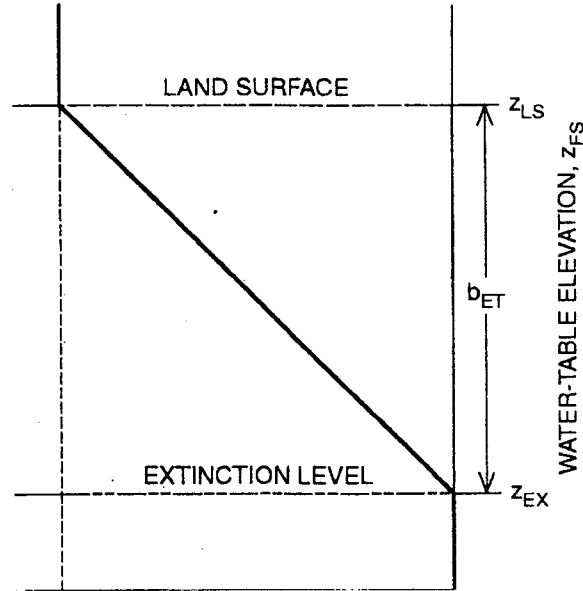


그림 3.1 지표하 자유면 깊이의 함수로서의 증발산 플럭스

증발산 경계는 지표면을 나타내는 모의지역의 어떠한 부분에도 인접할 수 있다. q_{max} , z_{LS} , b_{ET} 항목은 증발산 경계를 따르는 위치의 지정된 함수이고 또한 q_{max} 는 시간의 함수이다. 질량 플럭스는 플럭스가 항상 모의영역으로부터 밖으로 나가기 때문에 증발산 경계에서 고유의 밀도를 사용함으로써 계산할 수 있다. 열과 용질 증발산 플럭스들은 순수하게 이송(advective)으로 가정된다. 그것들은 모의 영역의 증발산 경계에서 고유한 엔탈피와 용질농도로부터 얻어진다.

$$q_{HET} = H_B \rho_B q_{ET}, \quad \text{for } x \text{ on } S^7 \quad (3.26)$$

$$q_{SET} = w_B \rho_B q_{ET}, \quad \text{for } x \text{ on } S^7 \quad (3.27)$$

여기서,

q_{HET} : 증발산 경계를 교차하는 열플럭스 (W/m^2)

H_B : 영역의 경계에서 유체의 고유한 비 엔탈피 (J/kg)

ρ_B : 증발산 경계에서 유체의 고유한 밀도 (kg/m^3)

q_{SET} : 증발산 경계를 교차하는 용질의 플럭스 (kg/m^2-s)

w_B : 영역의 경계에서 고유한 용질 농도(-)

여기서 H_B 와 w_B 는 증발산의 경계와 시간을 따르는 위치의 함수들이다.

2) 자유면 대수층, 자유면 경계 조건

자유면 대수층에 대해서는 흐름방정식들이 풀리기 전에는 미지값이었던 공간과 시간에 대한 위치를 가진 자유면 경계조건이 존재한다. 열, 용질 수송 시뮬레이터는 근사적인 방법으로 자유면 경계를 다룬다. 그 개념은 Prickett과 Lonquist(1971, pp.43-45)의 방법을 3차원 흐름과 밀도 변화 시스템으로 확장시킨 것이다. 압력상태는

$$p = 0, \text{ on } S^6(x,t); \quad (3.28)$$

여기서 S^6 은 공간과 시간적으로 변화하는 자유면 (m^2)이다. 동적인 경계조건은 무시된다. 자유면에서 절대압력은 대기압이므로 상대적인 압력은 0이다. 자유면의 위치는 식 (3.28)을 만족하는 위치를 결정하는 계산된 압력장에서 보간법에 의해 결정된다. 이러한 근사조건하에서 자유면은 그 부근에 유체의 순이익이나 손실에 대응하여 움직인다. 즉, 유체 질량은 보존되나 자유면이동의 운동학적인 것은 무시된다. 이러한 근사는 자유면의 운동속도가 수평간극유속보다 상대적으로 작을 때 받아들여진다. 자유면 흐름체계에서 유체와 다공성 매트릭스의 압축성은 대개 0으로 간주된다. 이러한 시스템에서 비산출률(specific yield)은 유효간극

률에 해당한다. 추가로 계산 영역은 모의기간동안 고정된다. 대기압보다 적은 경계압력은 자유면이 영역내의 경계부분보다 낮다는 것을 의미하며 반면에 대기압보다 큰 경계압력은 자유면이 경계부보다 높음을 의미한다. 자유면은 그 영역의 경계위로 올라가는 것 뿐만 아니라 모의영역 안에서 어떠한 표고로도 움직일 수 있다.

3.3.4 초기 조건

열, 용질 수송 시뮬레이터는 단지 비정상상태의 지하수 흐름과 두 가지 수송 방정식만 풀 수 있다. 그러므로 모의발생의 시작을 위해서는 초기 조건이 필수적이다. 수학적 초기조건은 HST-3D 버전 1.0(Kipp,1987)의 설명서에 나타나 있다. 초기 조건들의 상세설명을 위한 여러 가지 옵션들이 이용 가능하다.

흐름 방정식에서 그 지역내의 초기 압력의 분포가 지정되어야 한다. 가장 간단한 초기조건은 주어진 표고에서 지정된 압력을 가진 정수압조건이다. 좀 더 복잡한 조건은 모의영역의 수평면에 걸쳐 자유면 표고의 초기치 분포가 정해지는 것이다. 그러면 초기 압력분포는 초기 밀도장을 기초로 계산되어질 것이다. 가장 일반적인 초기 조건은 격점별 압력 지정이고, 이 경우 직전의 모의발생으로부터 얻을 수 있을 것이다. 초기조건으로써 속도장을 직접적으로 지정하는 옵션은 없다.

열 수송 방정식에서는 초기 온도장이 지정되어야 한다. 다시 이것은 위치의 함수 또는 좌표방향을 따라서 선형적으로 보간됨으로써 정해진다. 연직 방향에서의 보간법은 초기 지열의 단면을 생성하기 위해 사용되어질 수 있다.

용질 수송 방정식에서는 초기 용질농도장이 지정되어야 한다. 이것은 위치의 함수로, 균일한 영역(zone)별로, 격점별로 혹은 선형보간에 의해 정해진다. 한번의 모의발생으로 계산되는 압력, 온도, 그리고 용질농도장들은 후처리 가시화를 위해 사용되거나 또다른 시뮬레이션의 초기 조건

으로 사용된다. 가장 손쉬운 방법은 수송 모의이전에 정상상태 흐름을 설정하는 것이다. 물론 모의될 물리적 조건의 초기정상 흐름장이 적합한지를 검토할 필요가 있다.

3.4 HST-3D 코드의 설명

HST-3D 코드는 FORTRAN77로 구성되어 있으며 American National Standards Institute(ANSI)를 따른다. 이 표준의 예외는 INCLUDE 선언문의 사용이다. 2.0 버전의 프로그램 코드는 하나의 메인 루틴과 75개의 서브루틴으로 구성되어 있다. 여기서 67개 파일은 INCLUDE 선언문에 의해 소스코드로 통합되었다. 프로그램 길이는 comment와 continuation줄을 포함한 약 16,000줄로 되어있다. 루틴과 함수의 간략한 기술은 다음과 같다.

HST-3D 주프로그램은 프로그램 실행을 주도한다. 기본 과정은

- (1) 파일 열기, 읽기, 에러 체크, 초기화, 문제기술과 공간할당에 대한 output 저장;
- (2) 읽기, 에러 체크, 초기화, 고정적 정보 output 저장;
- (3) 읽기, 에러 체크, 초기화, 시변적인(transient) 정보 output 저장;
- (4) 흐름과 수송방정식 계수 계산, 경계조건의 적용, source-sink well 항 계산에 의한 시간단계의 시작;
- (5) 세 개의 방정식에 대한 조합과 풀이를 번갈아 가며 조합과 풀이를 반복계산에 의한 수렴을 통해 수행한다.
- (6) Summary rate와 누가량의 계산 ;
- (7) 시간단계 종료에 대한 정보 출력 ;
- (8) 필요한 경우, 디스크 파일에 재시작 데이터를 dump시킨다. 그리고 (4)로 돌아가서 다음 시간단계로부터 경계조건이나 source terms가 변하는 시기까지 모의를 진행한다. 새로운 시변성 데이터의 경우에는 (3)으로 돌아간다. 시뮬레이션이 끝날 때까지 타임마

칭을 진행시킨다.

- (9) 파일을 닫고 프로그램을 끝낸다. 만약 에러가 발생하면 진행을 멈추고 에러를 체크한다. 이때 시뮬레이션 정보를 출력하고, 컴퓨터 실행을 종료한다.

다음은 주요 부프로그램들을 실행순서에 따라 기술한 것이다.

표 3.1 주요 부프로그램의 설명

부프로그램명	내 용
OPENF	모의발생을 위한 데이터 입력파일 이름과 identification suffix를 사용자가 입력한다.
READ1	문제 기술과 컴퓨터 저장 공간 요구에 관한 데이터를 읽는다.
INIT1	Common block을 초기화 시킨다. 만약 필요하다면, US-customary-to-metric 변환계수와 그 역산계수를 만들고 단위 명칭을 정의한다.
ERROR1	READ1에서 읽은 데이터의 에러 체크, 보통 배열한계에 관련된다.
WRITE1	차원과 배열크기 요구사항에 관한 정보를 출력한다.
READ2	유체, 다공매질특성, 격자의 기하학적 특성, 방정식 해법, 원하는 출력치들을 포함하는 모든 고정자료를 읽는다.
ERROR2	READ2로 읽은 데이터 에러 체크.
INIT2	모의발생을 위해 추가되는 고정자료를 계산함으로써 초기화시킴
ERROR4	INIT2로 계산된 데이터 에러 체크.
WRITE2	다양한 출력파일로 고정자료를 출력
COEFF	시간단계 초기에 흐름, 열 및 용질수송방정식의 계수를 계산한다. 이 계수들은 전도도(conductances), 분산계수, 그리고 간극유속을 포함한다.
WRITE4	유속장을 출력파일에 저장.
RHSN	시스템 방정식의 우변의 양해적인(explicit) 항들을 계산

표 3.1 주요 부프로그램의 설명(계속)

부프로그램명	내 용
READ3	경계조건과 source-sink 정보, plus time step, 계산, 정보 출력을 포함한 시변성 데이터 읽기.
INIT3	모의발생을 위한 시변성 정보 초기화.
ERROR3	READ3의 시변성 데이터와 INT3 계산 에러 체크.
WRITE3	여러 파일로 시변성 데이터 저장.
WRITE6	출력파일에 전도도와 분산계수 저장
WELLSC or WELLSR	원통좌표계나 직각좌표계를 이용하여 well source-sink terms(우물 유입 소멸항)를 계산과 적용.
APLBCE	시스템 방정식 집합에 경계조건의 양해적 항을 적용.
TIMSTP	자동시간단계와 프린트 시간의 제어를 위한 시간단계의 변화를 계산하고 시간단계 초기에 대해 전체 밸런스를 계산한다.
ITER	현재 시간단계에 대해 세 가지 방정식을 반복하여 조합하고 풀이한다.
SUMCAL	시간단계의 끝에서 요약계산을 수행한다. 여기에는 흐름, 열, 용질-질량 균형과 유량이 포함되어 있다.
WRITE5	시간단계의 마지막에 요구되는 여러 가지 정보 파일을 저장. 여기에는 압력, 온도, 농도(mass-fraction)관계, 간극유속, 유체 점성, 유체 밀도, 유량과 유량균형에 대한 요약 테이블, 열-용질 질량이 포함된다.
DUMP	원하는 시간단계 혹은 값에서 재시작 정보를 파일로 DUMP한다.
CLOSEF	파일 닫기, 사용하지 않은 파일 삭제, 전체적인 모의시간과 타임 플레인의 번호 출력, 재시작의 횟수와 map 레코드, 여러 에러 메시지의 출력.

4. 모형의 적용

모형의 적용성을 검토하기 위해 본 모형의 특징을 나타낼 수 있는 열과 용질의 이송확산과 밀도류 해석을 위한 염수침투에 관한 3가지 예제를 제시하였다.

4.1 열 이송확산

대수층내 열 이송을 모의하고자 그림 4.1과 같은 $4\text{m} \times 1\text{m}$ 의 연직 2차원 영역을 선정하였다. 경계조건으로서 외부경계부는 모두 불투수면으로 하였고, 초기조건으로는 바닥 경계부의 중앙 2m 구간내 일정한 온도의 열원이 유입되고 상부경계부는 초기온도가 유지되도록 하였다. 경계부에서는 정수압 분포를 이루며 고정압력 0 Pa(대기압)이 상부 꼭지점에 작용한다고 가정하였다. 영역은 격자 간격을 수평방향으로 0.091m, 연직방향으로 0.040m로 하여 균등하게 이산화하였다.

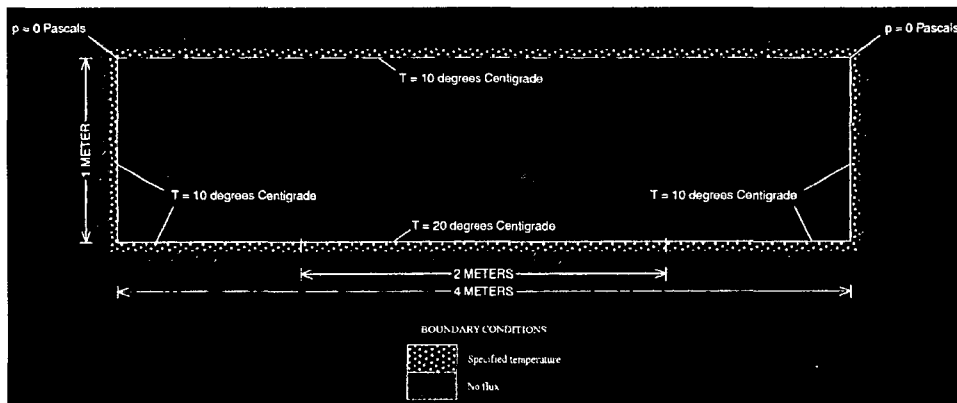


그림 4.1 열 이송확산영역

본 예제에 사용한 매개변수는 다음과 같다.

표 4.1 열 이송확산 해석에 사용된 매개변수

매개변수	입력치
공극률	0.10
투수성	$9.084 \times 10^{-9} \text{ m}^2$
다공성 매질의 열 전도도	$2.0 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$
다공성 매질의 열 용량	$2.0 \times 10^6 \text{ J/m}^3 \cdot ^\circ\text{C}$
담수밀도	$1,000 \text{ kg/m}^3$
유체점성도	$0.001 \text{ Pa} \cdot \text{s}$
확산도	0 m
유체의 열 전도도	$0.6 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$
유체의 열 용량	$4,182 \text{ J/kg} \cdot ^\circ\text{C}$
유체의 열 확산계수	$2.0 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
바닥경계부 온도	20°C
상부경계부 온도	10°C
초기 온도	10°C

이상과 같은 조건하에 시간간격을 496초로 하여 1.1925×10^5 초 동안 영역내 열 이송확산을 모의하였다.

그림 4.2~그림 4.4는 각각 60초, 120초, 240초 후 영역내 온도분포를 나타낸 것이다.

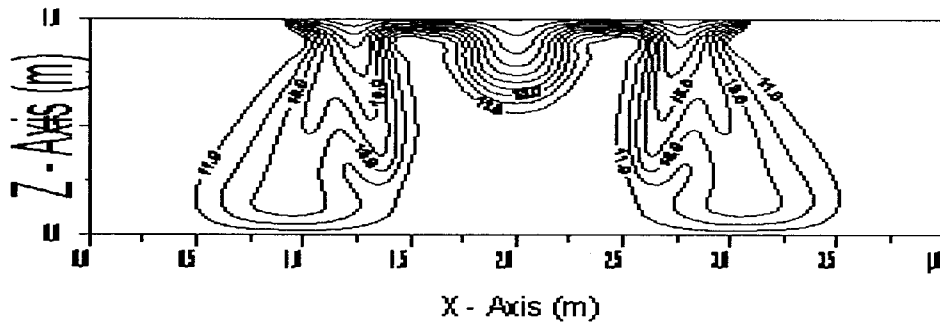


그림 4.2 60초 후 온도분포

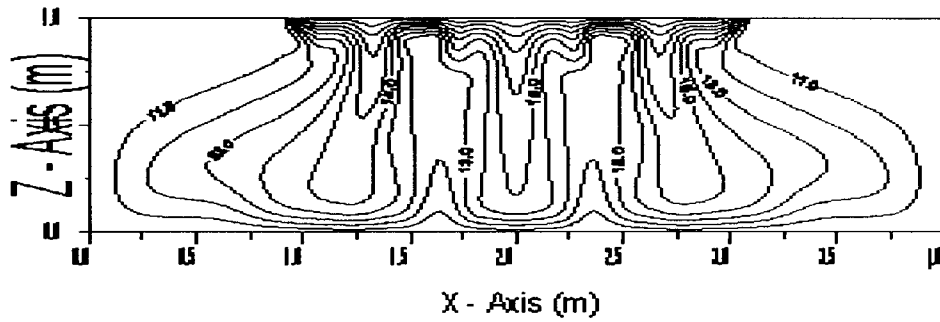


그림 4.3 120초 후 온도분포

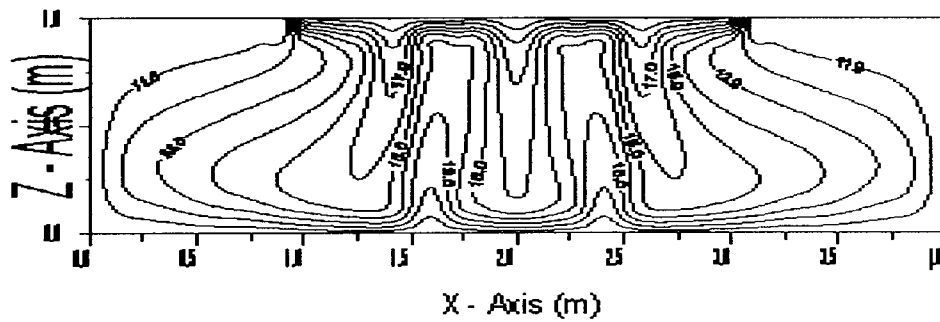


그림 4.4 240초 후 온도분포

4.2 용질 이송 확산

용질 농도변화에 의한 밀도 종속 유체흐름을 모의하고자 그림 4.5와 같은 영역을 선정하였다. 영역은 불투수면으로 둘러싸인 연직 2차원 영역으로서 일정한 농도의 용질이 상부 중앙부분에 유입되고 하부 경계부는 용질 농도를 0으로 하였다. 초기조건은 정수압 분포로 가정하였으며 영역 내부의 용질 농도는 0인 조건을 부여하였다. 흐름내로 확산된 용질은 결과적으로 밀도를 증가시킨다.

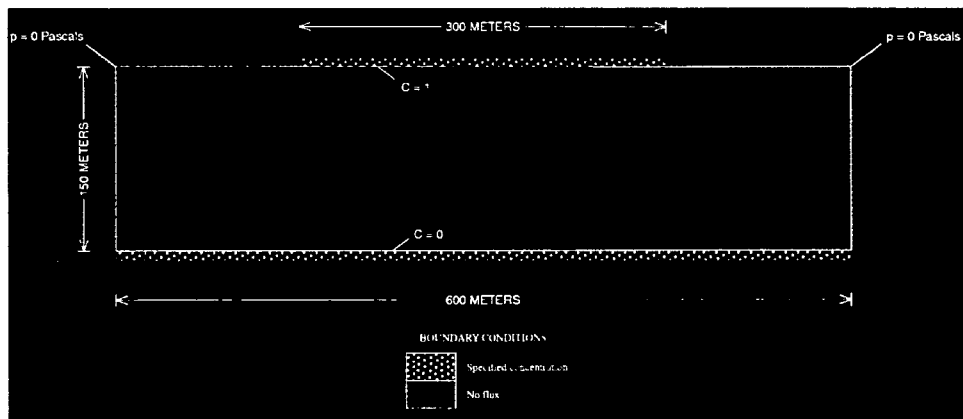


그림 4.5 용질이송확산 영역

대수층내 매개변수들은 Voss와 Souza(1987)가 사용했던 다음과 같은 변수값을 사용하였다.

표 4.2 용질 이송확산 해석에 사용된 매개변수

매개변수	입력치
투수성	$4.845 \times 10^{-13} \text{ m}^2$
확산도	0 m
확산계수	$3.565 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$
공극률	0.20
담수와 염수간의 밀도차	25 kg/m^3
염분도(saltwater salinity)	35 parts per thousand
담수밀도	$1,000 \text{ kg/m}^3$
염수밀도	$1,200 \text{ kg/m}^3$
유체점성도	0.001 Pa-s

영역은 격자 간격을 수평방향으로 13.636m, 연직방향으로 6.0m로 하여 균등하게 이산화하였고 시간 간격을 한달로 균등하게 하여 20년 동안 용질 이송확산을 모의하였다. 시간에 대해 후방차분, 공간에 대해 중앙차분화하여 차분방정식을 구성하였다.

그림 4.6~그림 4.11은 1년~20년 동안 영역내 상대농도분포를 나타낸 것이다.

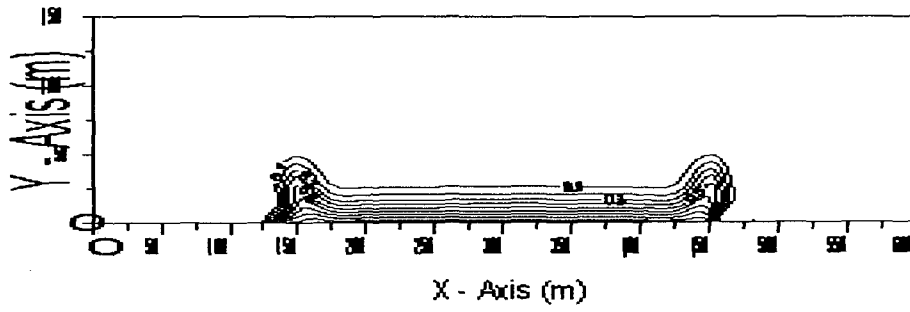


그림 4.6 1년 후 상대농도분포

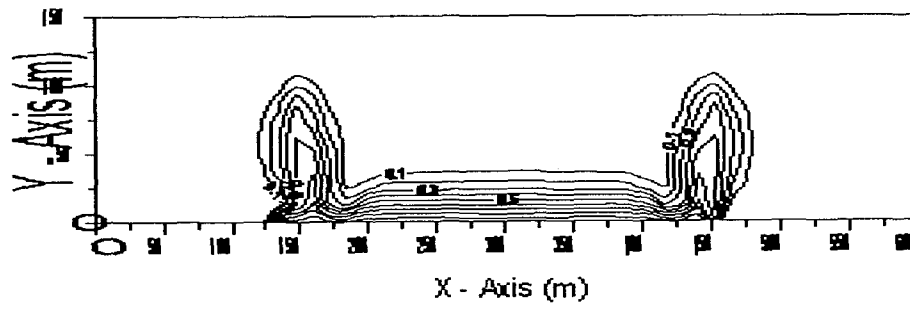


그림 4.7 2년 후 상대농도분포

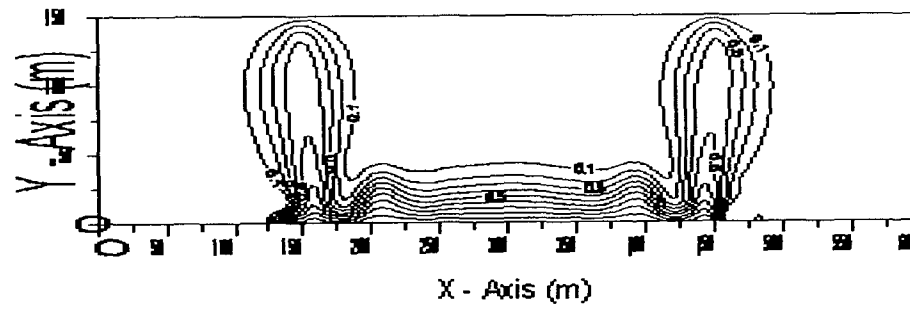


그림 4.8 3년 후 상대농도분포

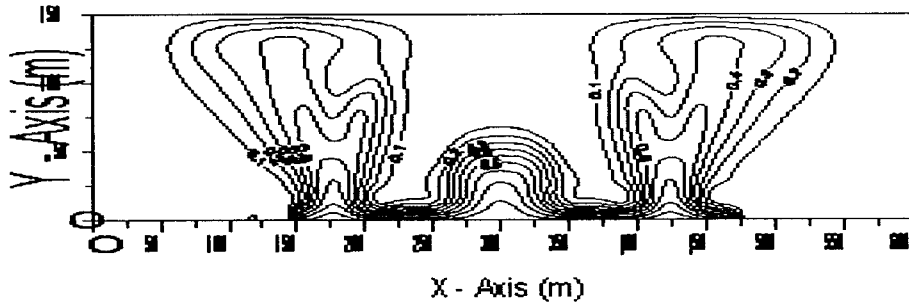


그림 4.9 5년 후 상대농도분포

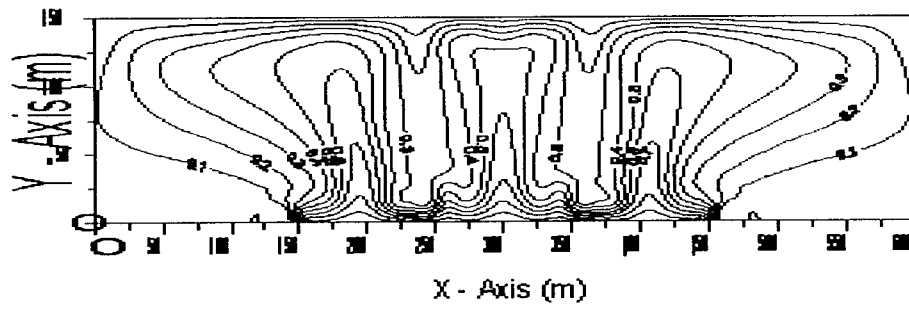


그림 4.10 10년 후 상대농도분포

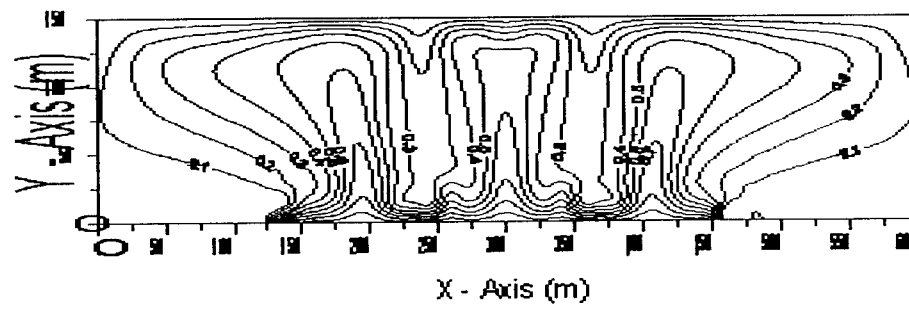


그림 4.11 20년 후 상대농도분포

4.3 염수침투

연안에 인접한 비피압 대수층에서 염수침투에 대한 우물의 안정성을 검토하고자 다음 그림과 같이 14,400ft × 9,600ft × 200ft의 3차원 가상영역을 선정하였다. 경계조건으로서 좌측 경계면에는 그림의 하단부와 상단부에 각각 205ft, 204ft의 수두값을 주었으며 우측경계면에는 200ft의 균등한 수두를 설정하였다.

양수량은 상부경계면로부터 40ft의 스크린 깊이를 갖는 우물과 상부 경계에서 160ft의 심도에서 40ft의 스크린 깊이를 갖는 우물에서 각각 $0.5 \times 10^6 \text{ft}^3/\text{day}$, $1 \times 10^6 \text{ft}^3/\text{day}$ 로 양수하는 것으로 하였고 지표면으로부터 1ft/yr의 주수가 균등하게 분포되는 것으로 가정하였다.

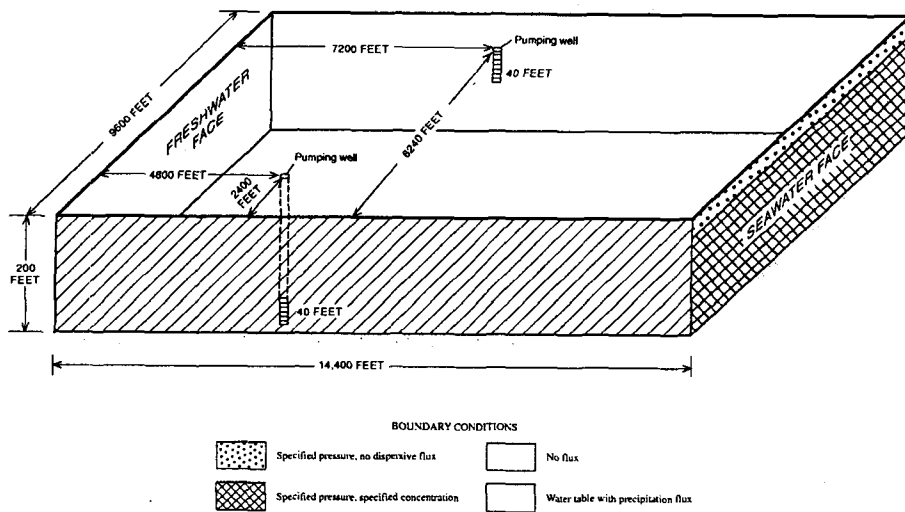


그림 4.12 연안에 인접한 염수침투 대상영역

본 예제에서 선정된 대수층내 매개변수들은 다음과 같다.

표 4.3 염수침투 해석에 사용된 매개변수

매개변수	입력치
투수계수(수평, 연직)	2,000 ft/d, 200 ft/d
중·횡확산도	150 ft, 30 ft
공극률	0.20
담수와 염수간의 밀도차	25 kg/m ³
염분도(saltwater salinity)	35 parts per thousand
담수밀도	62.4 lb/ft ³

유체와 다공성 매질은 비압축성으로 고려되었고, 대상영역을 각 방향 별 등간격으로 이산화하여 x 방향으로 62개 격점, y 방향으로 19개 격점, z 방향으로 11개 격점으로 구성된 격자망을 구성하였다. 약 25,000 일 동안 우측 경계면으로부터의 염수침투 양상을 모의하였다.

그림 4.13~그림 4.15는 각각 5000일, 10000일, 25000일 후 대수층 최상부층과 최하부층에서의 상대농도분포를 나타낸 것이다.

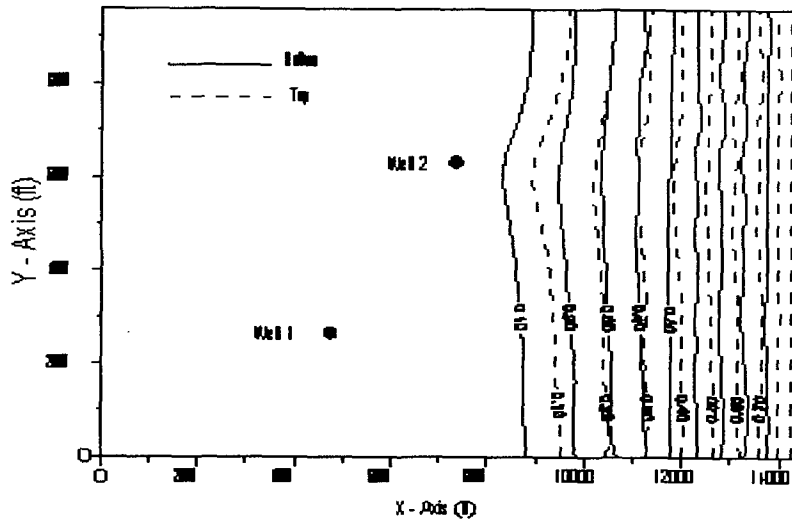


그림 4.13 5000일 후 대수층 최상부와 최하부에서의 상대농도분포를 나타낸 평면도

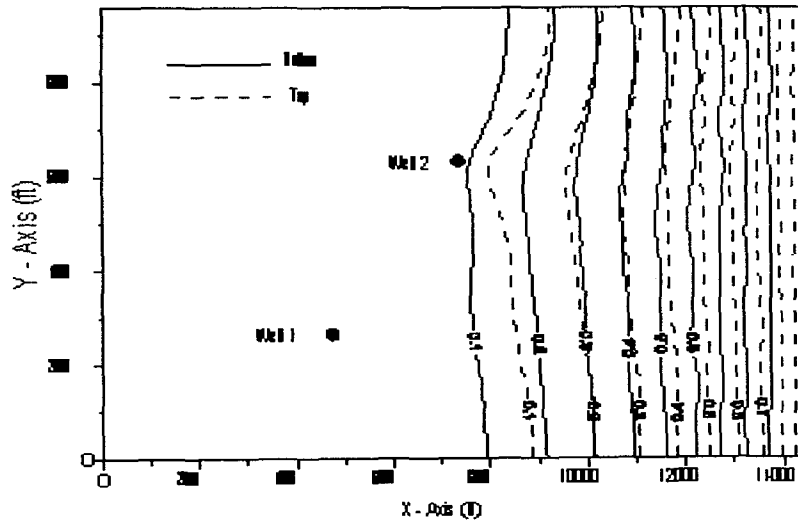


그림 4.14 10000일 후 대수층 최상부와 최하부에서의 상대농도분포를 나타낸 평면도

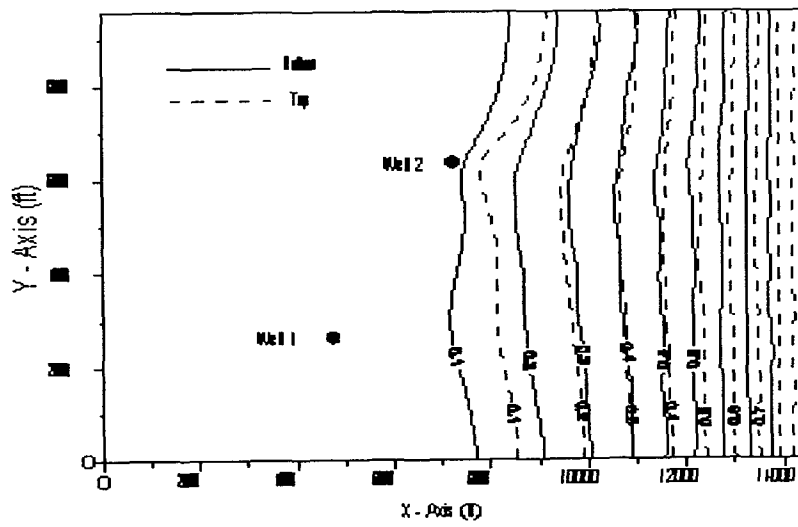


그림 4.15 25000일 후 대수층 최상부와 최하부에서의 상대농도분포를 나타낸 평면도

그림 4.16~그림 4.17은 각각 5000일, 10000일, 25000일 후 대수층 최상부층과 최하부층에서의 수두분포를 나타낸 것이다.

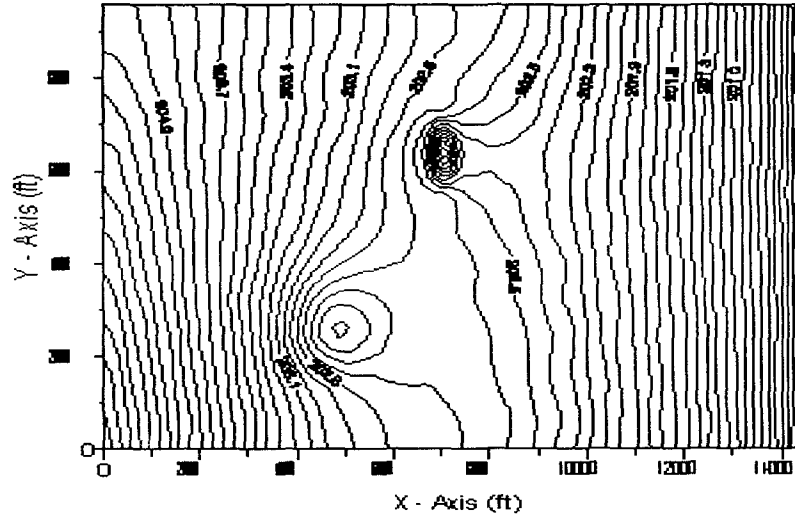


그림 4.16 5000일 후 최상부층에서의 수두분포

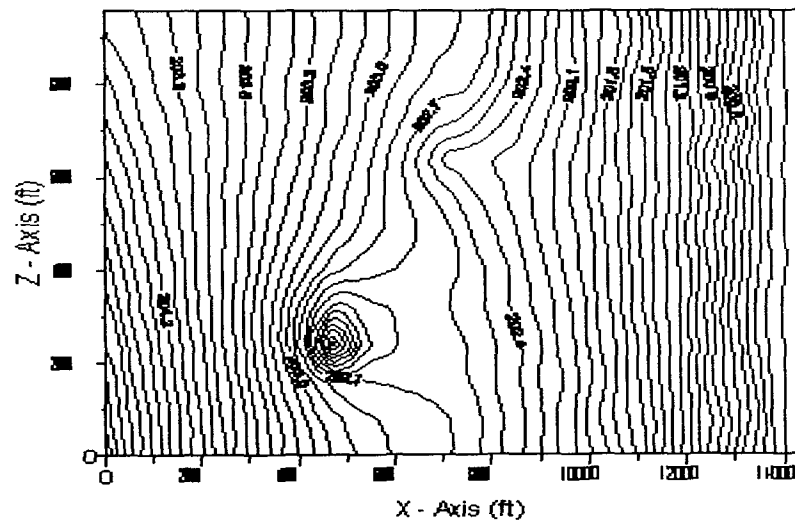


그림 4.17 5000일 후 최하부층에서의 수두분포

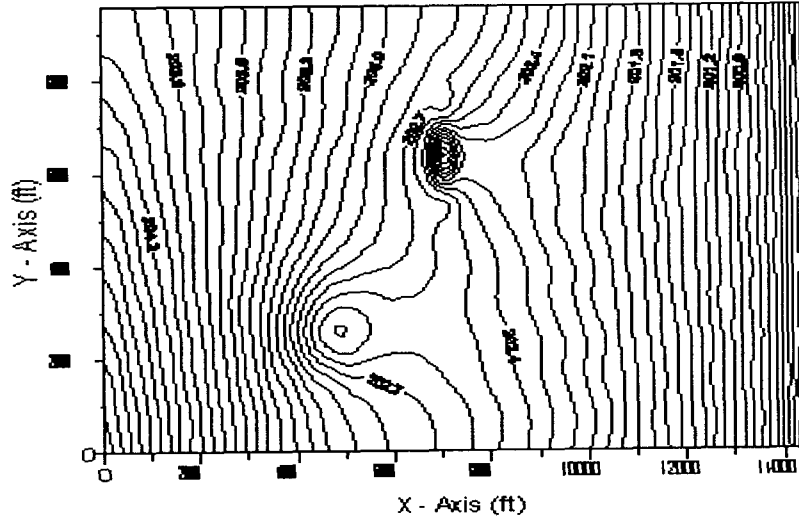


그림 4.18 10000일 후 최상부층에서의 수두분포

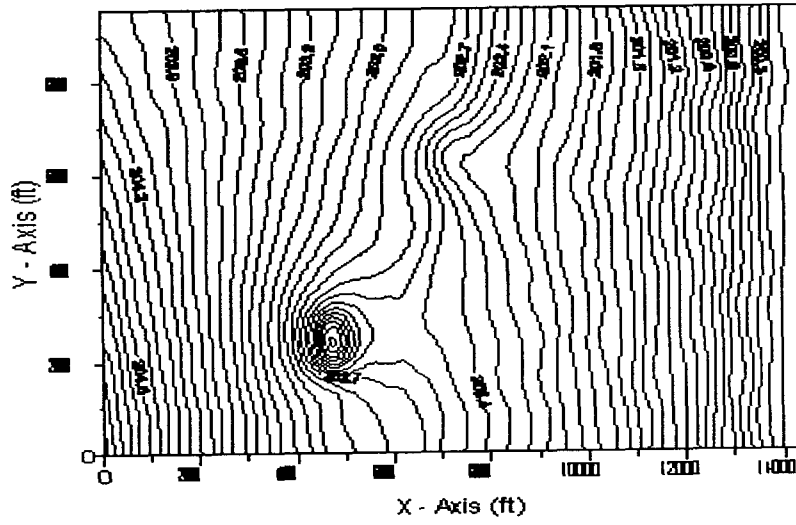


그림 4.19 10000일 후 최하부층에서의 수두분포

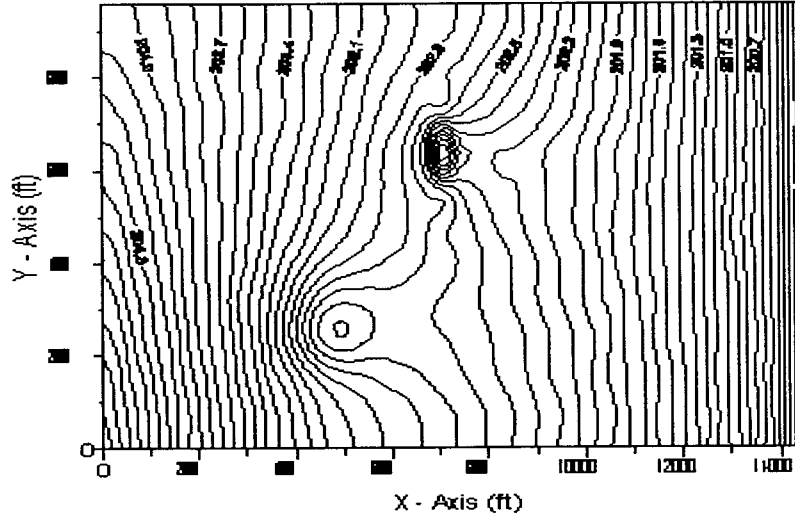


그림 4.20 25000일 후 최상부층에서의 수두분포

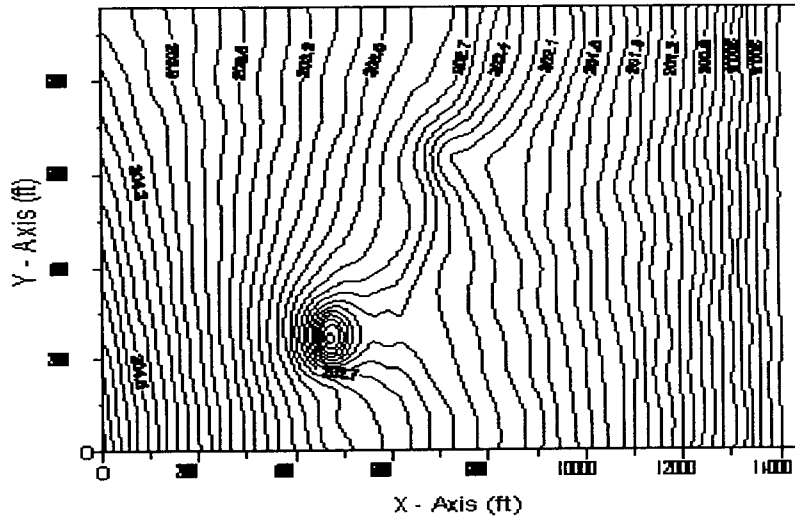


그림 4.21 25000일 후 최하부층에서의 수두분포

그림 4.22~그림 4.25는 최상부층 및 최하부층에서의 수두분포 및 상대농도분포를 3차원으로 나타낸 그림이다.

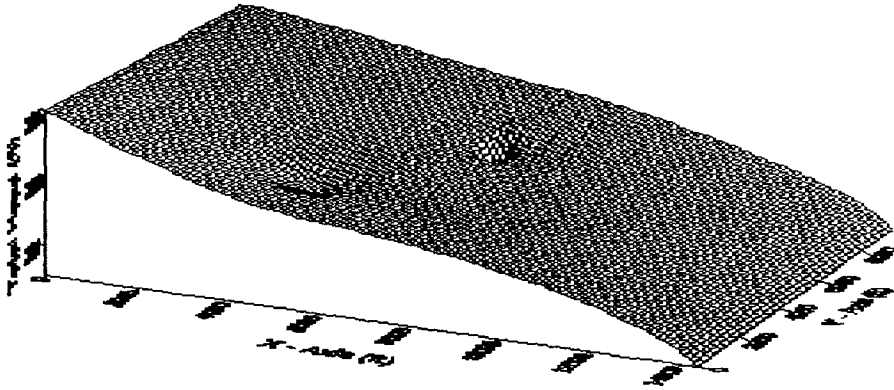


그림 4.22 25000일 후 최상부층에서의 3차원 수두분포

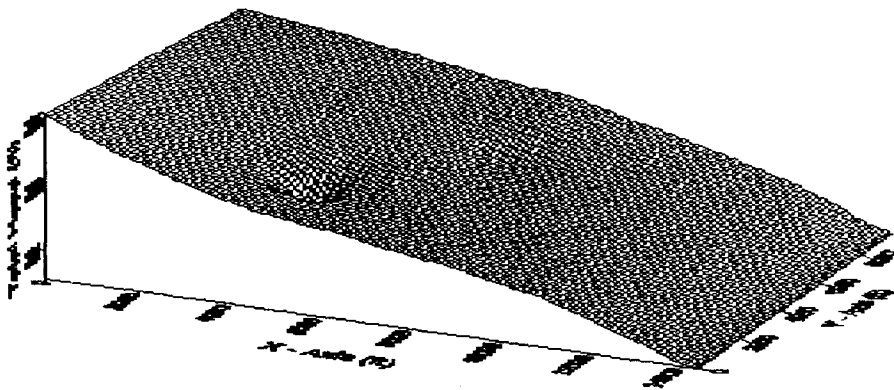


그림 4.23 25000일 후 최하부층에서의 3차원 수두분포

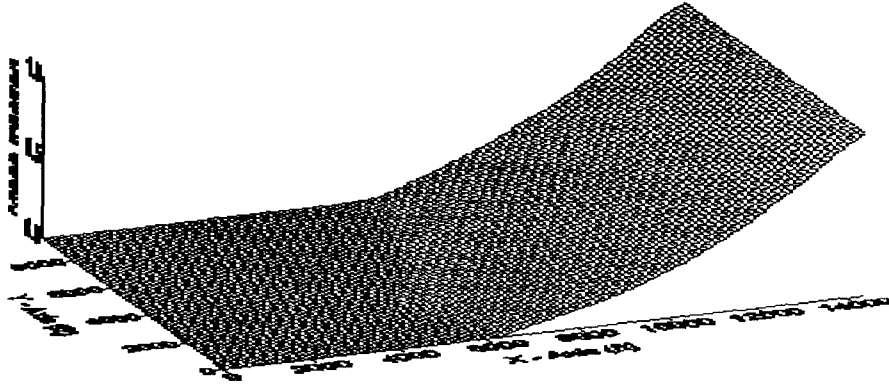


그림 4.24 25000일 후 최상부층에서의 3차원 상대농도분포

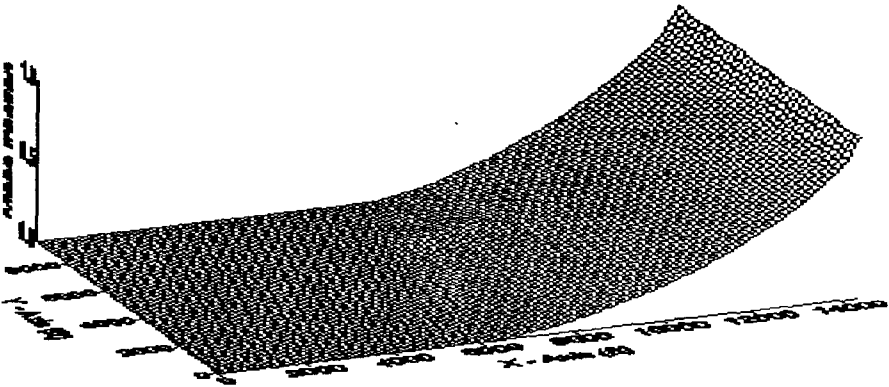


그림 4.25 25000일 후 최하부층에서의 3차원 상대농도분포

5. 결 론

본 연구보고서는 포화 흐름장 내에서 열 및 용질수송을 모의하는 수치모형에 관한 것으로 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 기개발된 열 및 용질수송모형들의 종류와 특성을 조사하였으며, 사용자가 목표로 하는 적용대상문제의 성격에 따라 모형선택이 신중하게 이루어져야 할 것으로 판단된다.
- (2) 실제의 용질이동문제에서 밀도의 변화는 무시할 수 없는 항목이므로 밀도종속 수치모형에 대한 평가는 필수적이라 판단되어 본 연구에서는 밀도종속흐름과 열 및 용질수송을 동시에 풀게 되는 3차원 수치모형 HST-3D(Ver. 2.0)를 선택하였다.
- (3) HST-3D 모형의 최신버전은 기존 버전에 비해 많은 부분(격자구성시 좌표입력, 화면을 통한 자료입력, 행렬계산을 위한 solver추가 등)이 향상되었으며, 열 이동, 용질이동, 염수침투 문제 등의 예제를 통해 실제 유사한 모델링 작업에 효율적으로 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

6. 참고문헌

- Bush, P. W. (1988) "Simulation of saltwater movement in the Floridan aquifer system, Hilton Head Island, South California." USGS Water Resources Investigations Report 88-4000, 52p.
- Gupta, S.K., Cole, C.R., Kincaid, C.T., and Monti, A.M. (1987) "Coupled fluid energy and solute transport (CFEST) model : formulation and user's manual." BMI/ONWI-660, Office of Nuclear Water Isolation, Battelle Memorial Institute, Columbus, Ohio, 466p.
- Kipp, K.L. (1987) "HST3D:a computer code for simulation of heat and solute transport in three dimensional groundwater flow systems." USGS, Water Resources Investigations Report 86-4095, 517p.
- Kipp, K.L. (1997) "Guide to the revised heat and solute transport simulator : HST3D-Version2" U.S.G.S., Water Resources Investigations Report 97-4157.
- Konikow, L.F., and Bredehoeft, J.D. (1978) "Computer model of two dimensional solute transport and dispersion in ground water." Techniques of Water Resources Investigations Book7, Chap. C2, USGS, 90p.
- Kontis, A.L., and Mandle, R.J. (1988) "Modification of a three dimensional groundwater flow model to account for variable water density and effects of multiaquifer wells." USGS Water Resources Investigations Report 87-4265, 78p.
- Kuiper, L.K. (1983) "A numerical procedure for the solution of the steady state variable density ground water flow equation." Water Resources Research 19(1), pp.234~240.
- Kuiper, L.K. (1985) "Documentation of a numerical code for the simulation of variable density ground water flow in three

- dimensions." USGS Water Resources Investigations Report 84-4302, 98p.
- Prickett, T.A. and Lonquist, C.G. (1971) "Selected digital computer techniques for groundwater resource evaluation" Illinois State Water Survey, ISWS-71-BUL-55, Urbana, IL, Department of Registration and Education, Illinois State Water Survey, 62p.
- Prickett, T.A. Naymik, T.G., and Lonquist, C.G. (1981) "A Random-Walk Solute Transport Model for Selected Groundwater Quality Evaluations." Illinois State Water Survey, Bulletin 65, 103p.
- Sanford, W.E. Konikow, L.F. (1985) "A two constituent solute transport model for groundwater having variable density." USGS Techniques of Water Resources Investigations 85-4279, 88p.
- Voss, C.I. (1984) "A finite element simulation model for saturated-unsaturated, fluid density-dependent groundwater flow with energy transport or chemically-reactive single species solute transport." USGS Water Resources Investigations Report 84-4369, 409p.
- Voss, C.I., and Souza, W.R. (1987) "Variable density flow and solute transport simulation of regional aquifers containing a narrow freshwater-saltwater transition zone." Water Resources Research 23(10), pp. 1851~1866.