

물관리 소프트웨어

-지하수 모형-

이상일 (동국대학교 토목환경공학과)

우리 학회의 수자원 교육 및 국제협력분과에서는 1998년 과업의 일환으로 물관련 소프트웨어를 조사하여 왔다. 조사의 목적은 대표적인 모형을 소개하되, 이론적인 분석보다는 모형의 개요와 구입처 등에 관한 정보를 독자들에게 제공하는데 있었다. 이번 호부터 총 4회에 걸쳐 조사 결과를 요약하여 싣고, 종합본은 1999년 12월에 별도의 책자로 발간될 예정이다

- 편집자 주 -

심는 순서

1. 지하수 모형
2. 수문 모형
3. 하천/해안 모형
4. 상하수도 모형

1. 배경

포화, 비등방성 매질에서의 지하수 흐름은 식(1)과 같은 유동방정식으로 기술될 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial x} (K_x \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (K_y \frac{\partial h}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (K_z \frac{\partial h}{\partial z}) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1)$$

이 때 K_x, K_y, K_z 는 각각 x, y, z 방향으로의 투수계수를, h 는 수두, S_s 는 비저류계수를 나타낸다. 불포화 흐름은 Richards 방정식으로 알려진 식(2)로 서술된다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} (K(\Psi) \frac{\partial \Psi}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (K(\Psi) \frac{\partial \Psi}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (K(\Psi) (\frac{\partial \Psi}{\partial z} + 1)) \\ = C(\Psi) \frac{\partial \Psi}{\partial t} \end{aligned} \quad (2)$$

이 때 Ψ 는 압력수두이고 $C(\Psi)$ 는 함수비의 압력수두에 대한 기울기($d\theta/d\Psi$)로 정의되는 비수분용량(specific moisture capacity)이다. 위의 식들은 초기

및 경계조건이 주어지면 적절한 수치해석 기법에 의해 매 시간 혹은 각 지점에서의 수두분포를 제공하게 된다.

수두분포가 알려지면, Darcy의 법칙에 의해 공간 평균유속을 계산할 수 있다. 예를 들면 x -방향에 대하여는 다음과 같다.

$$u_x = -\frac{K_x}{n} \frac{\partial h}{\partial x} \quad (3)$$

이 때 n 은 공극률이다.

한편, 지하수에서의 오염물질의 이동은 지하수 흐름에 오염물질이 실려감으로써 이송(advection)되는 흐름을 및 분자운동에 의하거나 복잡한 매질을 통과해 가면서 분산(dispersion)되는 흐름을 고려함으로써 얻어진다.

$$\begin{aligned} [-\frac{\partial}{\partial x} (D_x \frac{\partial C}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (D_y \frac{\partial C}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (D_z \frac{\partial C}{\partial z})] \\ - [\frac{\partial}{\partial x} (u_x C) + \frac{\partial}{\partial y} (u_y C) + \frac{\partial}{\partial z} (u_z C)] = \frac{\partial C}{\partial t} \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 C 는 오염물질의 농도, D 는 분산계수로서 x -방향의 경우

$$D_x = \alpha_x u_x + D_d \quad (5)$$

로 표현된다. 이 때 α_x 는 x -방향 분산도(dispersivity), D_d 는 분자확산계수이다. u_x 는 식 (3)으로부터 얻어진

다. 여기에 흡착을 고려하고, 생물학적(방사성) 분해 또는 가수분해 등을 first-order decay로 모형화 할 경우는 다음과 같다.

$$\left[\frac{\partial}{\partial x} (D_x \frac{\partial C}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (D_y \frac{\partial C}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (D_z \frac{\partial C}{\partial z}) \right] - \left[\frac{\partial}{\partial x} (u_x C) + \frac{\partial}{\partial y} (u_y C) + \frac{\partial}{\partial z} (u_z C) \right] - \lambda C = R \frac{\partial C}{\partial t} \quad (6)$$

이 때 λ 는 감쇄상수, R 은 지체인자이다.

식(4) 혹은 (6)을 유한차분법이나, 유한요소법 등의 수치기법을 이용하여 풀므로써 시공간적 농도분포를 알 수 있다.

2. 지하수 흐름 및 오염물질 이동모형

지하수 관련 모형은 1970년대 초부터 USGS(미지질조사국)를 비롯한 국립연구소와 대학을 중심으로 개발이 이루어지다가, 80년대 말부터는 기존의 공공 소프트웨어를 기반으로 하여 이용자가 사용하기 편리한 방향으로 개조한 상용 프로그램들이 소개되기 시작하였다. Colorado School of Mines에 소재한 International Ground Water Modeling Center에서는 다양한 기관에서 개발된 지하수 모형을 수집하여 관리·판매하며, 소비자 지원도 하고 있다. 표 1에는 대표적인 지하수 흐름 모형, 표 2에는 오염물질 거동해석 모형이 정리되어 있다. 한편, 각 모형에 관한 보다 자세한 정보는 아래의 기관을 통해 얻을 수 있다.

- ◆ Adrian Brown Consultants, Inc.
Home Page : <http://www.abch2o.com>
Phone : (303)698-9080
FAX : (303)698-9241
Address: 333 W. Bayaud Ave. Denver, CO 80223 U.S.A.
- ◆ Bureau of Reclamation
Home Page : <http://www.usbr.gov>
Address : Technical Service Center, P.O. Box

25007, Denver CO 80225, U.S.A.

- ◆ Dames & Moore
Home Page : <http://www.dames.com>
Phone : (213)996 2200
Fax : (213)996 2290
Address : Dames & Moore Groupe, 911 Wilshire Blvd., Ste. 700, Los Angeles, CA 90017, U.S.A.

- ◆ Ecole des Mines de Paris
Home Page : <http://www.ensmp.fr>
Tel : (33 1)40 51 90 00
Fax : (33 1)43 54 18 98
Address : 60-62, Boulevard Saint Michel 75272 PARIS cedex 06, France

- ◆ ES&T(Environmental Science & Technology)
Home Page : <http://pubs.acs.org/journals/esthag/index.html>
Phone : (304)725-7050, ext. 782(outside the US)
FAX : (304)728-2170(outside the US)
Address : American Chemical Society, P.O. Box 2537, Kearneysville, WV 25430, U.S.A.

- ◆ Golder Associates
Home Page : <http://www.golder.com>
Phone : (425)883-0777
Fax: (425)882-5498
Address : 4104 148th Ave NE, Redmond, WA 98052, U.S.A.

- ◆ HydroSolve, Inc.
Home Page : <http://www.hydrosolveinc.com>

- ◆ HydroGeoLogic, Inc.

Home Page : <http://www.hgl.com>

◆ IGWMC(International Ground Water Modeling Center)

Home Page : <http://magma.Mines.EDU/igwmc>

Phone : (303)273-3103

FAX : (303)384-2037

Address : Colorado School of Mines, 1500 Illinois Street, Golden, CO 80401-1887, U.S.A.

◆ INTERA Environmental Consultants, Inc.

Home Page : <http://www.intera.com>

Phone : (310)979-4777

Address : 2100 Wilshire Blvd, Suite 430, Los Angeles, CA 90025, U.S.A.

◆ Lawrence Livermore National Laboratory

Home Page : <http://www.llnl.gov>

Address : 7000 East Ave., P.O. Box 808, Livermore, CA 94550, U.S.A.

◆ ORNL(Oak Ridge National Lab.)

Home Page : <http://www.ornl.gov>

◆ Pacific Northwest Laboratory

Home Page : <http://www.pnl.gov>

FAX : (509)372-4791

Address : P.O. Box 999, Richland, Washington 99352, U.S.A.

◆ Sandia National Laboratories

Home Page : <http://www.sandia.gov>

Address : P.O. Box 969, Livermore, CA 94551, U.S.A.

◆ Scientific Software Group

Home Page : <http://www.scisoftware.com>

Phone : (703) 620-9214

FAX : (703) 620-6793

Address : P.O. Box 23041, Washington, DC 20026-3041, U.S.A.

◆ Stone & Webster Engineering Corp.

Home Page : <http://www.StoneWeb.com>

Phone : (212)290-6022

Fax : (212)290-7094

Address : 250 W. 34th Street, New York, NY 10119, U.S.A.

◆ USDA Salinity Lab.

Home Page : <http://www.ussl.ars.usda.gov/MODELS/MODELS.HTM>

◆ US EPA

Home Page : <http://www.epa.gov>

◆ USGS(United States Geological Survey)

Home Page : <http://water.usgs.gov>

Phone : (303)202-4200

Fax : (303)202-4695

◆ Waterloo Hydrogeologic

Home Page : <http://www.flowpath.com>

Phone : (519)746-1798

Fax : (519) 885-5262

Address : 180 Columbia St. W. Waterloo, Ontario, N2L3L3, Canada. ●

표 1. 지하수 흐름 모형

모형명	설명	개발자	Contact
ASM (1994)	정상/비정상 피압대수층/비피압대수층, 함양, 우물 등을 포함한 흐름에 대한 2차원 유한차분 모형	W. Kinzelbach R. Rausch	University of Kassel
MICRO-FEM (1994)	피압대수층/반피압대수층 등의 다층대수층 내 지하수흐름에 대한 3차원 유한요소 모형	C.J. Hemker H. van Elburg	C.J. Hemker
FLOWPATH (1994)	비등방-비균질 피압대수층/비피압대수층에서의 수두, 속도, 유선, 물수지 등을 해석하기 위한 2차원 유한차분 모형	Waterloo HydroGeologic	Waterloo HydroGeologic
NETFLO (1993)	비균등 매질내 흐름 해석을 위한 3차원 네트워크 모형	B.S. RamaRao S.B. Pahwa	INTERA
MODFLOW (1988)	비등방-비균질 대수층의 흐름을 해석하기 위한 준3차원 유한차분 모형	M.G. McDonald A.W. Harbaugh	U.S. Geological Survey
FEMWATER/ RECWATER (1987)	포화 또는 불포화 비등방-비균질 다공성 매질에서의 비정상 단면 흐름 해석을 위한 2차원 유한요소 모형	G.T. Yeh D.S. Ward	IGWMC
VS2D (1987)	포화 또는 불포화된 다공성 매질에서의 흐름해석을 위한 2차원 유한차분 모형	E.C Lappaia R.W. Healy E.P. Weeks	IGWMC
HELP (1987)	지표 저류, 유출, 침투, 수평배수 등을 고려한 매립지의 수문학적 평가를 위한 물수지 모형	P.R. Schoeder et al.	US EPA
FE3DGM (1985)	정상 또는 비정상 상태에서의 대형 다층 대수층에서의 흐름을 해석하기 위한 3차원 유한요소 모형	S.K. Gupta C.R. Cole F.W. Bond	IGWMC
USGS-2D- FLOW (1982)	비등방-비균질 대수층에서의 비정상 2차원 수직, 수평 흐름의 유한차분 모형	P.C Trescott S.P. Larson G.F. Pinder	U.S. Geological Survey
USGS-3D- FLOW (1982)	비등방-비균질 대수층에서의 비정상 포화흐름의 3차원 또는 준3차원 유한차분 모형	P.C Trescott S.P. Larson	U.S. Geological Survey
UNSAT2 (1979)	불포화, 비균질 다공성 매질에서의 비정상 흐름을 수직적, 수평적으로 해석하기 위한 2차원 유한요소 모형	S.P. Neuman	Princeton University
AQUIFEM (1979)	등방-비균질 피압대수층 혹은 누수 피압대수층에서의 비정상 2차원 평면 지하수 흐름을 위한 유한요소 모형	G.F. Pinder C.I Voss	IGWMC
PLASM (1971)	단일 또는 다층의 대수층, 피압대수층, 누수 피압대수층 등에서 비정상 포화흐름의 2차원 또는 준3차원 유한차분 모형	T.A. Prickett C.G. Lonquist	IGWMC

표 2. 오염물질 이동 모형

모형명	설명	개발자	Contact
MT3D (1994)	이송-확산-반응 물질이동 해석을 위한 3차원 혼합 Eulerian-Lagrangian 해석 모형	C. Zheng	S.S. apadopoulos
ABCFEM (1994)	Random Walk를 이용하여 정상/비정상 피압/비피압 혼합 대수층에서의 지표수/지하수 상호작용을 포함한 흐름과 물질이동을 해석하기 위한 2차원 유한요소 모형	A. Brown	Adrian Brown Consultants
AIR3D (1994)	불포화 지역내 공기 흐름과 Soil Vapor Extraction(SVE) 관정의 위치결정을 위한 SVE 시스템 설계용 3차원 유한차분 모형	Joss & Baehr	USGS

(계속)

■ 학술기사

물관리 소프트웨어

모형명	실명	개발자	Contact
CANVAS (1994)	이송, 확산, 흡착, 콜로이드 여과를 포함한 물질이동과 피압/비피압, 포화/불포화 흐름을 해석하기 위한 2차원 유한요소 모형	N-S. Park et al.	HydroGeoLogic
VLEACH (1994)	액상, 기상, 흡착상 오염물질의 정상상태 이송과 확산을 해석하기 위한 1차원 유한차분모형	J. Turin et al.	US EPA
AIRFLOW/ SVE(1993)	비균질, 비정상 매질내 NAPL 이동흐름에 대한 3차원 다성분 수치 모형	Waterloo Hydrogeologic	Waterloo Hydrogeologic
HYDRUS (1992)	root uptake, hysteresis, 이온/분자 확산, 확산, 선형/비선형 평형 흡착, 감쇄를 포함한 현상을 해석하기 위한 1차원 유한요소 불포화 흐름 및 물질 이동 모형	J. B. Kool M. Th. Van Genuchten	U.S.D.A. Salinity Lab.
VS2DT (1990)	선형 혹은 비선형 흡착, 이온교환등 비등온 불포화 흐름과 물질 이동을 해석하기 위한 2차원 유한차분 모형	R.W. Healy	USGS
CHEMFLO (1989)	3가지 형태의 경계조건 선택, Richards 식에 의해 표현되는 흐름과 이송, 확산, 선형적 평형 흡착, 감쇄, 생성을 포함한 물질 이동을 해석하기 위한 1차원 유한차분 스크리닝 모형	D. L. Notziger	Oklahoma State Univ.
ICE-1 (1989)	불포화, 부분적 빙결 토양내 물, 열, 물질의 흐름을 해석하기 위한 1차원 유한요소 모형	A.I. El-Kadi J.W. Cary	Pacific orthwest Lab.
TOSPAC (1988)	정상/비정상 흐름에 대한 Richards 식 해석과 이송, 확산, 지체, 방사성 감쇄를 포함한 이동을 해석하기 위한 불포화 흐름 및 균열이 있는 매질내 방사성 핵종 이동 1차원 유한차분 모형	A. Dudley et al.	Sandia Nat.Lab.
USGS-2D- Transprot/MOC (1988)	(부분적) 피압대수층에서 유한차분법과 MOC를 이용한 비정상 2차원 지하수 흐름의 수평적 흐름과 물질 이동에 관한 모형	L. E. Konikow J.D. Bredehoeft J.V. Tracy	USGS
HST3D (1987)	열과 물질의 이동 해석을 위한 밀도류 3차원 유한차분법 모형	K.L. Kipp	USGS
MOTIF (1986)	포화 또는 불포화된 지하수 흐름, 열전달, 균열이 있는 암반 매질에서의 물질 이동 등을 위한 1차, 2차, 3차원 유한요소법 모형.	V. Guvanasen	HydroSolve, Inc.
FEMTRAN (1985)	이송, 확산, 선형 흡착, 감쇄, 증가를 고려한 불포화 흐름과 방사성 핵종 이동 해석을 위한 2차원 유한요소 모형	M.J. Martinez	Sandia Nat. Lab.
FTRANS (1983)	균열이 있는 매질내 이송, 확산, 흡착, 감쇄에 관한 2차원 유한요소법 흐름/이동 해석 모형	INTERA Environmental Consultants	Battelle
TRUST+PLUX/ MLTVL (1982)	포화/불포화 변형 다공성 매질내 흐름과 이송해석을 위한 2차원 통합 유한차분 모형	T.N.Narasimhan A. E. Reisenauer K.T. Key R W. Nelson	Lawrence Berkeley Lab., Pacific Northwest Lab.
MMT (1977)	포화/불포화 흐름내 이송, 확산, 흡착, 감쇄, 이온교환, 강수, 용해를 포함한 물질 이동 해석을 위한 2차원 random walk 모형	S.W. Ahlstrom H.P. Foote R.C. Arnett C.R. Cole R.J. Serne	Pacific Northwest Lab.
3-D Saturated/ Unsaturated Transport Model (1976)	비정상, 포화/불포화 흐름과 이송, 확산, 흡착, 감쇄를 포함한 이동을 해석하기 위한 3차원 유한요소 불포화 흐름 및 이동 모형	G. Segol E.O. Frind	Univ. of Waterloo

(계속)

모 형 명	설 명	개 발 자	Contact
Dissolved Constituent Transport Code (1976)	포화 혹은 불포화 흐름내 이송, 확산, 흡착, 감쇄를 포함한 물질이동을 해석하기 위한 2차원 수직 유한요소 모형	J.O. Duguid, M. Reeves	Oak Ridge Nat. Lab.
HCTM (1975)	포화/불포화 흐름내 이송, 확산, 흡착, 감쇄를 포함한 3차원 유한차분 지하수 물질이동 모형	INTERA Environmental Consultants, Inc.	INTERA Environmental Consultants, Inc.
Salt Transport in Irrigated Soils (1972)	비정상, 포화, 불포화 비균질, 등방 매질의 흐름내 이온교환을 해석하기 위한 1차원 유한차분 수직 물질이동 모형	G.R. Dutt M.J. Shaffer W.J. Moore	Bureau of Reclamation

착해방수(捉蟹放水)

게를 잡아서 물에 놓아줌.

죽게 옥을 보고 게를 잡아가지고 다시 물에 놓아준다는 것은 힘들여 한 일이 애만 쓰고 아무런 보람이나 소득이 없음을 비유한 말.

좌정관천(坐井觀天)

우물에 앉아서 하늘을 봄.

좁은 우물에 앉아서 하늘을 보면 하늘이 작게 보임으로 과연 하늘이 작은 것이라고 인식하듯이 견문이 부족하고 시야가 좁아서 사리에 어두운 것을 이름.