

지하수의 오염물질 확산에 관한 모델링

- 日本 秦野盆地; 지하수 함양량 추정과 물수지를 중심으로 -

A Modeling on the Spread of Groundwater Pollutant

- Case Study of Hadano Basin, Japan; Groundwater Recharge and Water Balance -

양 해근(立正大, 일본학술진흥회 특별연구원), 新井 正(立正大)

YANG, Heakun(Rissho Univ., JSPS Fellow), Tadashi ARAI(Rissho Univ.)

1 머리말

현재까지 대부분의 지하수 모델링은 순수한 학술적인 연구보다도 정책결정의 도구로서 이용되어 왔다는 점에서 학제적 가치에 대한 논의가 끊이지 않았다(樵根, 1978). 그리고 파라메타 산정에 대한 객관성이 결여되어 있고, 파라메타 값을 시행착오적으로 수정한다는 점에서 모델의 신뢰성이 의문시 되어 왔다(山本, 1983). 그러나, 지하수 모델링의 개발이 끊임 없이 이루어지고 있으며, 최근에는 3차원모델이 개발되면서 지하수 흐름에 관한 정량적 연구가 활기를 띠고 있다.

본 연구에서는 지하수 유동기구를 정량적으로 평가하고, 오염물질의 확산을 분석하기 위해 지하수의 모델링에 필요한 파라메타의 설정이 용이한 일본 하다노(秦野; Hadano) 분지를 연구대상으로 하였다. 먼저, 수치모델을 통해 지하수 유동기구를 구축하고, 기존 연구성과와 장기간의 모니터링 자료를 이용하여 모델을 검증하였다. 검증된 모델을 이용하여 분지의 물수지를 명확히 하고, 유기염소물질 등의 오염물질에 의한 확산 메커니즘을 밝히고자 한다. 본 대한지리학회 광주춘계학술대회에서는 지하수 함양기구와 함양량 그리고 총괄적인 물수지를 중심으로 보고하고자 한다.

2. 연구지역의 개관

하다노 분지의 수문지질은, Hakone화산과 Fuji산의 화산쇄설물과 분지의 둘러싸고 있는 Tazawa산지로부터 운반된 퇴적물로 구성되어 있으며, 이들 사력층은 화산쇄설물과 서로 호층을 구성하고, 풍부한 대수층을 제공하여, 하다노 분지의 상수·공업 용수원으로서 이용되고 있다. 퇴적층은 퇴적환경에 따라 크게 신기 롬층과 고기 롬층으로 구분되고, 다시 4개의 대수층으로 세분된다. 보다 상세한 분지의 층서구분에 관해서는 양해근(1999)을 참조하면 좋겠다.

3. 모델의 설정과 경계조건

1) 수치프로그램의 개요

지하수 모델링은 지하수의 수리수두의 시공간적 변화를 추적하여, 그 결과를 바탕으로 지하수의 적정이용을 설정하고, 오염물질의 확산을 예측하는 도구로서 연구 개발되

어 왔다. 지하수 모델은 다공질모델(Porous media models)과 아날로그모델(Analog models), 분석 모델(Analytical models), 수치모델(Numerical models)로 구분된다(Todd, 1980). 수치모델은 지하수 유동 등의 물리적 현상을 미분방정식으로 설명하는 방법으로 서 컴퓨터의 급속한 발전에 힘입어 현재 가장 널리 사용되고 있다. 수치모델은 복잡한 수문지질구조 조건에서도 충분한 가용성이 인정되고 있다.

본 연구에서는, 룬층과 사력층이 복잡하게 호층을 이루고 있는 하다노 분지의 지하수 유동기구의 해석과 오염물질의 확산모델을 구축하기 위해 수치모델을 이용하였다. 수치 해석 프로그램은, 미국 Brigham Young 대학 EMRL(Environmental Modeling Research Laboratory)가 미 국방성 육군공병대와 공동 개발한 GMS(Groundwater Modeling System)를 사용하였다. GMS는 미 지질조사소(USGS)의 3차원 유한차분식 지하수유동 해석 프로그램인 MODFLOW(McDonald and Harbaugh, 1988)와 입자 추적분석 프로그램인 MODPATH(Pollock, 1989), 그리고 미 환경보전국(USEPA)의 이류·분산과 지하수 계에서의 3차원 용질운송 모델인 MT3D(Zheng, 1990) 등의 인터페이스와 GIS object를 직접 이용하여 개념모델 등을 구축할 수 있는 Map모듈, 2D와 3D의 Mesh, 2D와 3D의 Grid, 각 층 boring자료로부터 토양과 지층구조를 모델화할 수 있는 Geo모듈 등으로 구성되어 있다. MT3D에서는 MODFLOW로부터 얻은 지하수 유동해석의 결과를 이용하여 오염물질의 확산 시뮬레이션을 실행할 수 있도록 고안되어 있다.

양해근(1995, 1999)에 의하면, Mizunashi Riv.와 Kaname Riv. 등의 하천 상류부에서 복류한 지하수가 하류부에서 용출하고, 선단부에서 천층지하수 뿐만 아니라 피압지하수가 용출하는 것은 산소동위원소의 조성으로도 확인이 되었다. 이러한 3차원적인 지하수 유동기구를 재현하기 위해서는 3차원 모델을 적용하는 것이 바람직하다. 그리고, 하다노 분지는 과거 유기염소계 물질에 의해 지하수오염이 발생하였으며, 장기간 지하수 모니터링이 이루어졌다는 점에서 3차원모델에 의한 연속적인 지하수 유속분포가 포착될 수 있으리라 생각한다. 3차원 지하수흐름의 기본식은 다음과 같다(Anderson and Woessner, 1992).

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} - R$$

여기서, K_x , K_y , K_z 는 x, y, z 좌표방향의 투수계수, S_s 는 비저유율, R 은 단위시간내에 대수층의 단위체적당 유출·유입량(유입의 경우에는 +), t 는 경과시간이다. 위식은 경계 조건과 초기 수두값의 설정으로 답을 얻을 수 있으며, 일반적으로 유한차분법(finite difference methods) 등과 같은 수치해석으로 유도되어 진다.

2) 모델의 입력자료

(1) 경계조건 : 분지의 기반암을 이루고 있는 중신세 Tanzawa산지와 접하는 부분은 지하수의 교류가 없는 폐쇄역으로 간주했다. 그리고, 서쪽에 위치한 Shijuhasse Riv.과의 지형적 분수계, 남쪽에 위치한 Oiso구릉을 경계로 폐쇄조건을 설정했다.

(2) Mesh의 구분과 적용 : 일본 국토지리원 1/25,000의 지형도(Hadano, Isehara도폭)에

250m250m를 설정하고, 동서방향으로 40열, 남북으로 28열의 mesh로 구분하였다. 수직 방향으로는 각각의 대수층과 립층을 하나의 셀로 간주하여, 대수층을4(G1, G2, G3, G4) 개의 층으로, 립층을 4(L1, L2, L3, L4)개로 구분하였다. 퇴적환경에 따라 지역별 각 대수층의 두께가 다르므로 가변적 셀을 전제로 250m mesh단위로 대수층 기반의 평균 심도를 구하였다. 여기서 자료가 결여된 분지 상류부의 각 대수층 심도의 경우에는 주변 셀의 심도에 지표면 고도를 고려해 추정했으며, 분지의 남동부는 Shibusawa 단층의 변위를 20m로 가정하고, mesh값을 산정하였다. 40288로서 셀수는 총 8,960개이다. 그리고 지표면의 고도는 국토지리원에서 제작한 수치지도 50m mesh의 고도로부터 250m mesh마다 평균값을 추출하여 적용하였다.

(3) 투수계수, 비저유계수, 유효공극율 : 하다노시 수도국의 양수실험 자료와 기존 문헌으로부터 각 대수층의 투수계수와 비저유계수, 유효공극율을 구했다. 그러나, 자료 수가 적어 분포도를 작성하기 곤란하므로, 전 대상 셀을 몇 개의 구간으로 나누어 각각의 파라메타 값을 부여했다.

대수층별 투수계수는 다음과 같다. 즉, 동남부의 전 대수층(G1, G2, G3, G4)은 110-1cm/sec으로 간주하였다. 그 이외 지역의 G1과 G2층에 대해서는 310-2cm/sec, G3층은 210-2cm/sec, G4층은 110-1cm/sec으로 구분하였으나, Kaname Riv. 상류부인 북동부의 G4에는 510-3cm/sec의 투수계수를 적용하였다. 한편, 립층에 대한 투수계수는 L1에서 110-4cm/sec, L2와 L3, L4에서 110-5cm/sec로 간주했다. 단, 지표면에 노출된 L4의 투수계수는 110-4cm/sec로 보았다.

비저유계수에 관해서는 대수층(G1~G4)에서 110-5m, 립층(L1~L4)에서 110-4m로 간주하였으며, 유효공극율은 대수층(G1~G4)에서 0.05, 립층(L1~L4)에서 0.07로 간주했다. 이들 파라메타는 보정계산을 통해 실제 지하수위의 변동에 적합하도록 수정할 예정이다.

(4) 함양량

연구대상 전 영역에 대해 함양량을 산정하기에는 지하수위의 관측지점의 수가 적고, 관측지점 역시 분지 중앙부에 편재되어 곤란하므로, 梁海根(1995)이 산출한 토지이용별 직접유출량으로부터 분지 전지역에 대한 침투량을 각mesh별로 추정하였다. 함양량은 월 단위로 산출하였으며, 그 결과는 지하수 모델링에 대한 보정자료로 사용하였다. 그리고 하천으로부터 용출량과 복류량은 하천수위와 지하수위의 차이로부터 산출하였다. 단, 하천수위와 하천폭은 일률적으로 각각 5m, 10m로 간주하였다.

(5) 양수량

대상 영역내에는 심층(G3, G4) 지하수를 양수하는 64개의 상수 또는 공업용수의 관정이 분포하고 있으며, 심도 10m내외의 천층 지하수의 상수원 관정이 20개의 분포하고 있다. 이들 대부분의 관정은, 스크린 심도가 파악되고 있으며, 불분명한 일부 공업용수 관정에 대해서는 케이싱의 심도를 고려해 G3과 G4층에 스크린 위치를 고정하였다. 그리고, 복수의 스크린이 설치된 관정의 양수량은 각 대수층에 위치한 스크린 길이의 비에 따라 배분하였다.

(6) 초기조건

시물레이션 기간은 1990년부터 1997년까지로 설정하고, 각 mesh에 대한 1990년 1월

양수량과 함양량을 입력하고, 각 대수층의 초기 수위와 수질농도를 부여하였다.

4. 지하수의 함양량의 추정

함양이란 강우, 하천수, 관개용수 등의 지표수가 지하수계에 흡수 보충되는 과정을 의미하는 것으로서(地學團體研究會, 1996), 물수지의 분석과 평가뿐만 아니라 지하수 모델링에 매우 중요한 파라메타로 작용한다. 지하수 함양량은 라이시미터(Lysimeter)에 의한 투수량 측정 또는 지중의 토양수분량 측정 등과 같은 직접적인 관측에 의해 산출되기도 하지만, 대부분의 경우 투수계수, 대수층의 분포, 토지이용 등과 같은 침투 조건이 다르고, 지역에 따라 강우의 강도가 다르기 때문에 지하수 함양량을 산출은 용이하지 않다(표 1).

지하수의 양수와 하천의 영향이 없고, 지하수의 유입과 유출을 무시할 수 있을 정도의 짧은 기간이라면, 단기간의 지하수의 변동으로부터 강우의 침투량을 추정할 수 있다. 지하수의 변동량(dh/dt)은

$$\frac{dh}{dt} = (P - R_{\text{runoff}}) / n_e \cong R_{\text{per}} \times P / n_e$$

으로 나타낼 수 있으며, dh/dt 는 단위시간당 지하수위의 상승량, n_e 는 대수층의 유효 공극율, P는 강수량, R_{runoff} 은 직접 유출량, R_{per} 은 침투율이다(平山,1999). Arakami 관측지점에 대한 침투율은 표1과 같다. 평균 침투율은 0.24이다. 그리고 하다노 분지 전 지역에 대해 각 년대별로 토지이용도를 작성하고, 항공사진을 이용하여 토지이용별 직접 유출량을 산정한 梁海根(1995)의 결과를 바탕으로, 각mesh별 지하수 침투능력 즉, 함양량을 추정하였다. 1990년과 1993년, 1995년, 1997에 대한 계산영역의 총 지하수 함양은 각각 $26.8106\text{m}^3 \cdot \text{y}^{-1}$, $13.8106\text{m}^3 \cdot \text{y}^{-1}$, $9.8106\text{m}^3 \cdot \text{y}^{-1}$, $9.5106\text{m}^3 \cdot \text{y}^{-1}$ 으로 추정된다.

표 1. 강우 이벤트의 지하수위 상승량으로부터 산정한 침투량($n_e=1.2$).

강우기간	강수량(mm)	지하수위(m)		수위차(m)	침투율
		강우이전	강우이후		
1990/04/20-1990/04/23	96	142.60	142.75	0.14	0.178
1990/07/02-1990/07/05	81.5	143.72	143.85	0.13	0.186
1990/08/09-1990/08/10	220	144.23	144.44	0.21	0.113
1990/09/13-1990/09/18	153.5	144.86	145.00	0.14	0.107
1990/12/11-1990/12/12	19.5	145.57	145.61	0.05	0.283
1991/02/14-1991/02/16	54.5	144.29	144.57	0.28	0.617
1991/03/08-1991/03/09	27	143.70	143.83	0.12	0.547
1991/06/15-1991/06/16	34.5	143.32	143.41	0.09	0.323
1991/08/20-1991/08/23	212	144.06	144.09	0.03	0.019
1993/11/10-1993/11/14	101	144.30	144.43	0.13	0.154
1994/03/22-1994/03/24	54	142.34	142.40	0.06	0.127

5. 물수지 산출

분지의 물수지에 대한 개념적 모델은 그림 1과 같다.

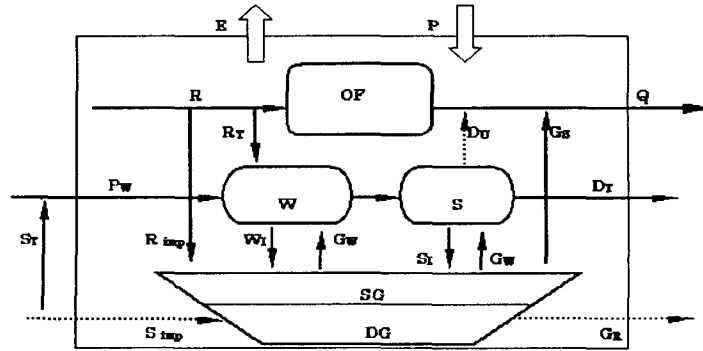


그림 1. 물수지 개념적 모델 (Yang et al., 1999 을 가필)

梁海根(1995)에서는 도시화와 물이용 구조변화에 의한 유출원과 유출형태의 변화에 관한 물수지를 산정하였으나, 지하수의 물수지를 명확하게 추정하지 못했다. 그러나, 지하수의 오염물질 확산 모델구축을 위한 파라메타 선정작업의 실시와 관련 지하수위에 대한 자세한 자료가 수집되어 하다노 분지의 물수지를 재고찰하였다. 특히, 자료수집이 용이한 1990년 이후의 지하수 물수지의 결과는 표 2와 같다.

표 2. 우 이벤트의 지하수위 상승량으로부터 산정한 침투량(ne=1.2).

Years	P	E	R	ST+RT	Gw	DT	OF	Pw	Rimp	Q
1990	126.7	48.9	38.1	2.5	21.0	4.9	12.9	7.2	26.8	70.9
1993	98.8	46.6	29.7	2.3	22.3	6.1	8.7	6.8	13.8	39.8
1995	70.1	48.5	10.4	2.0	20.1	6.5	11.9	8.2	9.8	41.2
1997	70.2	49.1	8.9	1.7	18.6	7.2	12.0	9.9	9.5	40.0

P: precipitation, Es: evapotranspiration, R: mountain outflow, RT: river intake for municipal water, Rimp: groundwater recharge in the basin, Pw: Prefectural waterworks, ST: R. Shijuhasse in take for municipal water, SImp: groundwater recharge from R. Shjuihasse, W: municipal water supply, Gw: groundwater pumping for municipal water, factory and sewerage, WL: waterworks leakage, G: groundwater, OF: overland flow, S: sewerage, SL: sewerage leakage, Du: untreated discharge, DT: treated discharge, Gs: spring, GR: groundwater runoff, Q: discharge from the basin

6. 문제점 및 과제

본 연구는 하다노 분지의 지하수오염물질의 확산 메커니즘을 규명하기 위한 일환으로 진행된 연구로서 그 동안 불분명했던 지하수의 함양기구와 지하수의 물수지를 정량화하였다. 시뮬레이션 과정에서 파라메터 선정의 오류로 계산값과 관측값 간의 편차가 크게 나타나는 부분을 아직 해결하지 못했으나, 적절한 보정 작업이 이루어질 경우, 분지의 지하수 유동계와 오염기구를 보다 명료하게 해석할 수 있으리라 본다.

참 고 문 헌

- 양해근, 1995, 인위적인 요인이 하천 수질과 유량에 미치는 영향 일본, 하다노 분지를 사례로-, 대한지리학회지, 30, 242-254.
- 양해근, 1999, 秦野盆地 지하수의 수문환경, 대한지리학회지, 34, 1-16.
- 榎根勇, 1978, 地下水のシミュレーション, 市川. 榎根 編 「日本の水収支」, 古今書院, p.344.
- 菅原正己, 1972, 流出分析, 共立出版. p.257.
- 山本莊毅, 1983, 地下水調査法, 古今書院, p.490.
- 梁海根, 1995, 秦野盆地の都市化に伴う流出源と流出形態の變化, 日本水文科學會誌, 25, 105-114.
- 地學團體研究會, 1996, 新版 地學辭典, 平凡社, p.1443.
- 秦野市水導局, 1999, 平成10年度 秦野市地下水解析業務報告書, アジア航測株式會社. p.270.
- 平山利晶, 1999, 地下水モデリングのためのデータ解析手法の基礎 (2. 地下水へのかん養量のモデリング 2.1 雨水浸透・地下水かん養), 地下水學會誌, 41, 205-212.
- Anderson, M.P. and W.W. Woessner, 1992, Applied Groundwater Modeling, Academic Press, p.381.
- Toddy, D.K., 1980, Groundwater Hydrology, John & Wiley Sons, p.535.
- McDonald, M. G., and A. W. Harbaugh, 1988, A Modular Three Dimensional Finite-Difference Groundwater Flow Model, U.S. Geological Survey, Techniques of Water-Resources Investigation, Book6, Chapter A1, p.586.
- Pollock, D. W., 1989, Documentation of Computer Programs to Compute and Display Pathlines Using Results from the U.S. Geological Survey Modular Three-Dimensional Finite-Difference Groundwater Flow Model, U.S. Geological Survey, Open File Report 89-381, p.188.
- Yang, H.K., H.C. Choi, T. Arai and In S. Kim, 1999, The Change of Hydrological Environments of Groundwater due to Urbanization in Hadano Basin, Japan, Water Science and Technology, accept for publication.
- Zheng, C., 1990, A Modular Three-Dimensional Transport Model for Simulation of Advection, Dispersion and Chemical Reactions of Contaminants in Groundwater Susyem, Prepared for U.S. Environmental Protection Agency, p.163.