

## 우물수원 보호구역의 범위 결정에 대한 지형정보시스템의 응용

### Geographic Information System Application to Wellhead Protection Area Delineation

김 철\*

Kim, Chul

---

#### Abstract

Groundwater simulation model using GIS and Arc/Info Grid functions were used to delineate wellhead protection areas. Groundwater simulation model was developed within Arcview GIS. The model, which integrates the data input and manipulation, process simulation, and display of the results, was developed by considering time variations of the parameters. The model was applied to the EPA data. The hydraulic distributions from the EPA data and those calculated from groundwater simulation model agree well and zone of influence from EPA data and that calculated using GRID functions seem to be consistent. The developed model may be an efficient tool to delineate WHPA because it integrates all the processes inside the GIS.

*Keywords:* ground water simulation models, GIS, wellhead protection areas, Arcview, WHPA

---

#### 요 지

우물수원의 보호구역의 범위를 결정하기 위해서 GIS를 이용한 지하수 모의모형과 Arc/Info의 Grid 함수를 이용하였다. GIS를 이용한 지하수 모형은 Arcview GIS를 사용하여 모형의 시간 변화를 고려하고 자료의 입력 및 조작, 모의, 결과의 표시 등을 GIS내에 통합한 모형으로 개발하였다. 모형을 적용하기 위해 미국 환경청의 자료를 사용하였으며 적용시킨 결과 지하수 모형에서 계산된 수두 분포와 우물의 영향권을 계산한 값이 본 논문에서 계산한 값과 거의 비슷한 값을 나타내어 모형의 타당성을 검증하였다. 본 모형은 GIS내에서 모든 처리가 이루어지므로 우물수원의 보호구역의 범위를 설정하는데 효율적인 방법이 될 수 있을 것이다.

**핵심용어 :** 지하수 모의모형, GIS, 우물수원의 보호구역, Arcview, WHPA

---

\* 호남대학교 토목공학과 교수

## 1. 서 론

오염되지 않은 맑은 물은 인간의 생존과 직결되어 있고 따라서 예로부터 여러 사람에게 공급할 수 있는 맑은 물이 있는 수원 부근에 도시가 위치하고 사회가 발달하였다. 산업의 발달과 인구의 증가는 용수 수요를 늘어나게 할 뿐만 아니라 물의 오염 가능성을 증가시켜 여러 나라에서는 먹는 물을 확보하고 물의 오염을 방지하기 위해 다각적인 노력을 기울이고 있다. 미국은 1986년에 만든 안전 음용수법(Safe Drinking Water Act)에서 지하수를 오염으로부터 보호하기 위해서 우물수원 보호구역(WHPA: Wellhead Protection Area)을 지정하도록 하였으며 1996에는 이 법을 다시 개정하였는데 우물수원 보호구역의 개념이 더욱 확장되어 수원 보호구역(Source Water Protection Area)이 되었으며 음용수의 수원으로서 지하수 뿐만 아니라 지표수(surface water)도 포함하게 되었다.

지하수는 일반적으로 수질이 좋고 물의 수요처와 가까운 이점이 있으므로 미국에서는 국민의 절반 이상이 지하수를 음용수로 사용하고 있는데(U.S. EPA, 1993) 우리 나라에서도 최근 각종 용수 수요가 대폭 늘어날 전망이다. 비해 계속되는 가뭄 등과 같은 이유로 댐이나 강에서 공급되는 지표수자원의 양이 부족하게 되고 각종 오염 등에 의해 음용수로서의 수요를 충족시키기 어렵기 때문에 지하수가 음용수의 수자원으로서 점점 중요성을 더해가고 있다. 이에 따라 정부에서도 그 중요성을 인식하고 최근 광역상수도 개발 때 지하수 및 지표수의 연계 개발을 위해 조사를 진행하고 있고 지역적인 지하수 부존자원을 조사하여 수원에서 먼 지역, 도서 지역, 소규모 지역 등에는 지하수를 공급하도록 추진계획을 세우고 있다. 또한 우리 나라에서는 지금까지 지하수의 개발에 관한 법적, 제도적 장치가 미비되어 지하수가 무분별하게 개발되어 왔으나 이제 지하수 보존 및 수질오염 등에 대한 규제와 보존 대책을 수립해야 할 필요성에 직면하고 있다. 이와 같은 필요성에 따라 최근 지하수법이 제정되었으며 이 법에서는 지하수의 효율적인 개발이용과 적절한 보전관리에 대한 사항을 규정하고 있다.

지하수는 지표수에 비해 느리게 움직이고 오염물질은 우물이나 지표수가 영향을 받을 때까지 감지되지 않고 남아있으며 지하수는 한 번 오염되면 복구하기가 매우 어려운 특성이 있으므로 경제적, 사회적 및 환경적 결과를 고려하여 지하수의 오염을 미리 방지할 방법을 강구하여

야 할 것이다. 이와 같은 지하수의 오염을 방지하기 위하여 우물수원 보호구역(WHPA)을 설정하는데 미국 환경청은 6가지의 방법을 제안하고 있다. 그 방법들은 임의고정 반경 방법(Arbitrary Fixed Radius Method), 계산 고정반경 방법(Calculated Fixed Radius Method), 단순변수형태 방법(Simplified Variable Shapes Method), 해석적 방법(Analytical Methods), 수리지질 도화 방법(Hydrogeologic Mapping Method) 및 컴퓨터를 이용한 해석적 흐름 및 수송 모형을 사용하는 방법이다.(U.S. EPA, 1991) 이 방법들 중에서 가장 과학적이고 효율적인 방법은 컴퓨터를 이용한 해석적 흐름 및 수송 모형을 이용하는 것이다. 이와 같은 지하수 모형은 그 입력자료로서 지질자료와 수리학적 자료를 필요로 하고 있는데 이들 자료를 수작업에 의해 준비하기 위해서는 많은 시간과 비용을 필요로 하므로 GIS를 이용하면 매우 효율적으로 자료를 처리할 수 있으며 또한 모형에서 계산된 결과를 디지털 지도로 잘 표시할 수 있을 것이다. GIS와 관련된 지하수모형에 대한 많은 연구가 수행되고 있는데 원래 GIS는 시계열 자료를 다루는데 적합한 데이터베이스 구조를 가지고 있지 않아서 변수의 시간변화를 고려하지 않는 모형에만 적용할 수 있었으나 최근 객체지향 GIS 프로그램 언어의 발달과 더불어 변수들의 시간변화를 고려하는 모형들을 개발할 수 있게되었다.

본 연구에서는 객체지향 GIS 프로그램 언어인 Arcview의 Avenue 언어를 이용하여 변수들의 시간변화를 고려하는 지하수 모의 모형을 개발하였다. 개발된 모형에서는 입력자료, 계산과정, 출력결과가 모두 GIS 내에서 처리되므로 매우 편리한 모형이다. 우물수원 보호구역의 범위를 결정하기 위하여 개발된 지하수 모의 모형과 Arc/Info의 GRID를 이용하였다.

모형을 적용하기 위해 미국 환경청의 자료를 사용하였다. 개발된 모형은 우물수원 보호구역의 범위를 과학적이고 정확하게 계산할 수 있고 계산결과가 지도로 표시되므로 복잡한 과정을 거치지 않고 직접 최종 결과를 얻을 수 있는 이점이 있다.

## 2. GIS를 이용한 지하수모형

지하수모형은 지하 환경(subsurface environment)에서의 물과 기타 성분의 흐름을 수학적으로 나타낸 모형이다. 지하수 모형은 크게 유동 모형과 수송 모형으로 나눌 수 있는데 컴퓨터의 발전과 더불어 1970년대 이후 수 많은 컴퓨터를 이용한 지하수 모형이 개발되었다.

현재 전세계적으로 셀 수 없이 많은 지하수 계산 컴퓨터 프로그램이 사용되고 있는데 지하수 모형은 일반적으로 그 프로그램에 특정한 입력과 출력 양식을 사용하는 독자적인(stand-alone) 프로그램으로 되어있다. 따라서 어느 한 개인이나 특정 그룹에서 개발한 모형을 특정 지역에 적용하기 위해서는 그 프로그램에서 요구하는 입력 양식의 데이터를 준비해야 하거나 프로그램을 수정해야하고 그 결과를 쉽게 판단할 수 있는 도형(graphic)의 형태로 나타내기 위해서는 또 다른 소프트웨어를 필요로 한다. 그러므로 하나의 지하수 모형을 사용하기 위해서 자료 변환 소프트웨어, 중간 데이터 파일 및 그래픽 소프트웨어 등과 같은 소프트웨어 및 파일들이 필요하게 된다. GIS는 공간적으로 분포된 데이터의 입력, 수정, 저장 및 표현 등과 분석을 위해 개발된 시스템으로서 현재는 여러 가지 환경 분석을 하는데 많이 사용되고 있다. 이와 같은 GIS와 지하수 모형을 함께 결합하여 사용하면 자료의 관리, 출력 결과의 도형 처리 및 모형 분석을 수행하는 데 필요한 도구를 통합할 수 있는 환경을 제공해준다.

Maidment(1993)는 GIS와 연관된 수문학적 모형을 몇 가지의 수준으로 분류하였는데 그것들은 수문학적 평가(hydrologic assessment), 수문학적 변수 결정(hydrologic parameter determination), GIS 내에서의 수문 모형 구축(hydrologic modeling inside GIS), GIS와 수문 모형의 결합(linking GIS and hydrologic models) 등이다. 수문학적 평가는 특정한 수문학적 요소들을 GIS에서 도화(mapping)하는 것을 말하는데 지하수 오염가능성과 관련된 DRASTIC 도화를 예로 들 수 있다. 수문학적 변수결정은 지형분석과 지표면 특성분석에 의해 수문학 변수를 결정하는 것으로서 지표면 경사, 유로장, 토지 이용, 토양 특성 등의 변수들을 래스터 GIS 및 벡터 GIS로부터 추출하는 것이며 지형을 나타내는 3가지 형태는 Grid, Contour 및 TIN을 사용한다. GIS 내에서의 수문 모형 구축은 GIS 내에 모형을 구축함으로써 자료관리, 분석 및 결과의 도형표시 등의 모든 작업이 GIS에서 이루어지는 것으로서 지하수 분석의 해석적 해를 GIS로 분석하는 작업은 하나의 예가 될 수 있다. GIS와 수문 모형의 결합은 특히 지하수 흐름과 연관되어 활발히 연구되고 있는 분야로서 수두(hydraulic head), 투수계수(hydraulic conductivity), 오염원 등과 같이 모형에 공간 자료를 입력하거나 출력 결과를 표시하기 위해 2차원의 유한 요소 및 유한차분 모형을 GIS와 결합한

것이다. Watkins 등(1996)은 GIS와 지하수 모형의 관계를 3가지 형태로 분류하였는데 GIS와 연계된(Linked) 모형, GIS와 통합된(Integrated) 모형 및 GIS 내에 구축된(Embedded) 모형이다. GIS와 연계된 모형은 GIS와 지하수 모형이 서로 독립적으로 운영되며 이들 사이를 연계 프로그램이 연결시키는 역할을 하는데 대개 연계 프로그램은 GIS 양식의 자료를 지하수 모형의 자료로 또는 그 역으로 변환하는 역할을 한다.

Van Metre(1990)와 Brown 등(1996)은 Arc/Info GIS와 MODFLOW를 연결시키는 연계 프로그램 ARCMOD를 개발하였는데 이것은 이 모형의 좋은 예가 될 것이다. 또한 Rindahl(1996)은 Arcview GIS와 MODFLOW를 연결시키는 프로그램을 개발하였다. GIS와 통합된 모형은 GIS와 지하수 모형이 하나의 데이터베이스를 공유하며 각각의 시스템에서 필요한 데이터의 양식은 시스템 내부에서 상호 변환된다. 이 모형의 대표적인 예는 Orzol과 McGrath(1992)이 개발한 MODFLOWARC인데 이것은 Arc/Info GIS와 통합된 MODFLOW의 향상된 프로그램으로서 GIS 데이터 파일을 직접 읽어들이 수 있고 출력도 GIS 양식으로 할 수 있다. GIS 내에 구축된 모형은 GIS 내의 고유한 모형 구축 능력을 이용한 모형으로서 GIS 내에서 제공되는 언어를 사용하며 프로그램한 것으로 이 경우에는 자료의 변환이 필요 없다.

이 모형의 예로서는 McKinney와 Tsai(1993), Tauxe 등(1992), Zichuan (1996)이다. McKinney 등은 Arc/Info의 Macro를 사용하여 프로그램 하였으며 Tauxe 등은 Arc/Info GRID의 새로운 함수를 개발하였다. Zichuan은 Arcview를 이용하여 지하수 유동모형을 구축하였다. 우물수원 보호구역을 결정하는 방법으로서 지하수 유동모형과 GIS를 사용하는 경우가 많이 있으며 이 때 유동모형은 해석적 방법이나 수치해를 구하는 방법으로 해를 구하고 있다. Baker 등(1993)은 유동모형으로서 등류 해석모형(uniform flow analytical model)을 사용하였으며 모형에 대한 입력 자료 및 출력 결과를 표시하는데 Arc/Info GIS를 이용하였다. Avalos 등(1995)과 Garcia 등(1996)은 유동 모형으로서 MODFLOW를 사용하였고 영향권(Zone Of Contribution : ZOC)을 계산하기 위해서 PATH3D를 이용하였다. Smith와 Hornberger(1996)과 Lachmar 등(1993), Cheung 등(1996)은 유동 모형으로서 MODFLOW를 사용하였고 보호구역을 결정하는데 미국 환경청의 WHPA를 사용하였다.

### 3. 지하수 유동모형

#### 3.1 지도에 기초한 지하수 모의모형

자유 수면을 가진 지하수 층에서의 지하수의 흐름에 대한 2차원 연속 방정식은 다음 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial x} (K_x h \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (K_y h \frac{\partial h}{\partial y}) + R(x, y, t) - P(x, y, t) = S \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1)$$

여기서  $K_x$ 와  $K_y$  는  $x$ 와  $y$ 방향의 투수계수(hydraulic conductivity) , $R(x, y, t)$ 는 시각에 있어서  $(x, y)$ 점에 대한 보충량 (recharge),  $P(x, y, t)$ 는 시각  $t$ 에 있어서  $(x, y)$ 점에 대한 양수량 (揚水量),  $S$ 는 저류계수(specific storage)를 나타낸다. 또한 Darcy법칙의 형태로 표시되는 운동량 방정식은 다음 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$q = -K \nabla h \quad (2)$$

여기서  $q$ 는 Darcy 속도,  $K$ 는 투수계수,  $\nabla h$ 는 수두 경사를 나타낸다. 본 연구에서는 모의 모형에서 필요로 하는 데이터, 계산과정 및 결과의 수치지도를 GIS내에서 통합할 수 있는 모형을 개발하였으며 개발된 모형은 특히 변수들의 시간 변화를 고려하는 모형으로서 객체 지향 프로그래밍의 개념을 적용하였다. Arc/Info의 자료구조를 가진 데이터를 Arcview의 Object로 변환하여 사용하였으며 Avenue 언어를 모형 개발에 사용하였다. 모형의 구축을 위해서 그림 1에 나타난 바와 같이 대상지역에 대한 다각형(polygon) 커버리지와 다각

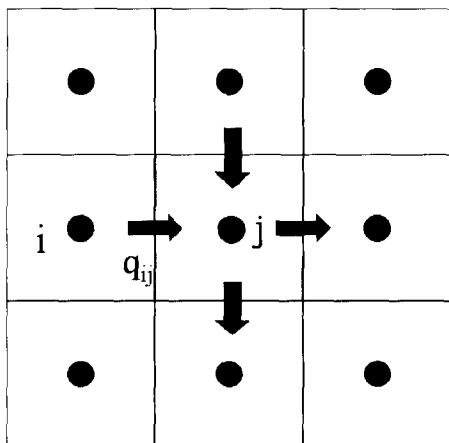


그림 1. 모형의 개념설계

형의 경계를 이루는 선(arc) 커버리지를 생성하였다.

연속 방정식 (1)을 다각형 커버리지에 적용하고 운동량 방정식 (2)를 선 커버리지에 고대로 적용하기 위해 식 (1)을 유한차분 형태인 다음 식 (3)과 같이 이산화시켰다.

$$\Delta t^t \cdot A_i \cdot (R_i^t - P_i^t - Q_i^t) + \sum_j V_{ij}^t = A_i \cdot S_i \cdot (h_i^t - h_i^{t-1}) \quad (3)$$

여기서  $\Delta t^t$ 는 시간 단계  $t$ 에서의 시간 간격,  $A_i$ 는 격자  $i$ 의 면적,  $R_i^t$ 는 시간 단계  $t$ 에서의 격자  $i$ 의 보충량,  $P_i^t$ 는 시간 단계  $t$ 에서의 격자  $i$ 의 양수량,  $Q_i^t$ 는 시간 단계  $t$ 에서의 격자  $i$ 의 방출량,  $V_{ij}^t$ 는 시간 단계  $t$ 에서의 경계  $j$ 를 통해 격자  $i$ 로 들어오는 물의 양,  $S_i$ 는 격자  $i$ 의 저류계수,  $h_i^t$ 는 시간 단계  $t$ 에서의 격자  $i$ 의 수두,  $h_i^{t-1}$ 는 시간 단계  $(t-1)$ 에서의 격자  $i$ 의 수두를 나타낸다. 또한 식 (2)를 이산화하면 유한차분 형태인 다음 식(4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\vec{q}_{ij}^t = -K_{ij} \cdot \frac{dh}{ds} \cdot \vec{s} = -K_{ij} \cdot \frac{h_j^{t-1} - h_i^{t-1}}{\Delta S_{ij}} \cdot \vec{s} \quad (4)$$

여기서  $K_{ij}$ 는 다각형  $i$ 와  $j$ 사이의 투수계수,  $\vec{q}_{ij}^t$ 는 시간 단계  $t$ 에서의 다각형  $i$ 와  $j$ 사이의 경계선을 지나는 물의 유속(flus),  $\vec{s}$ 는 다각형  $i$ 의 중점에서 다각형  $j$ 의 중점으로 향하는 단위벡터,  $\Delta S_{ij}$ 는 다각형  $i$ 의 중점과 다각형  $j$ 의 중점 사이의 거리,  $h_j^{t-1}$ 는 시간 단계  $(t-1)$ 에서의 다각형  $j$ 의 수두,  $h_i^{t-1}$ 는 시간 단계  $(t-1)$ 에서의 다각형  $i$ 의 수두를 나타낸다.

모형의 알고리즘은 다각형 커버리지에 대한 초기 수두조건으로부터 다각형의 경계선을 통해 흐르는 유량을 구하기 위해 (4)식을 선 커버리지에 적용한다. 이 결과 시간 단계  $t$ 에서의 유량  $V_{ij}$ 가 구해지고 이 값을 사용하여 연속 방정식을 다각형 커버리지에 대해 적용하면 시간 단계  $t$ 에서의 수두를 구할 수 있다. 여기서 계산된 수두의 값을 사용하여 다시 선 커버리지에 대한 유량을 구하고 이 계산을 평형 상태에 이를 때까지 반복한다. Arc/Info의 자료구조에서 선은 그림 2에 표시된 것처럼 연결성과 인접성을 가지고 있다. 연결성은 하나의 선을 나타낼 때 시작점(from-node)과 끝점(to-node)으로 정의하는 것이며 인접성은 선이 방향을 가지고 있으므로 하나의 선을 기준으로 그 왼쪽의 다각형( $Lpoly$ )과 오른쪽의 다각형( $Rpoly$ )이 서로 인접해

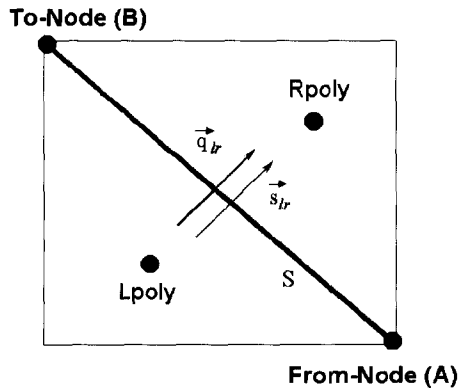


그림 2. 모형의 다각형 커버리지와 선 커버리지

있다는 것이다. (4)식을 이와 같은 Arc/Info의 자료구조에 맞도록 나타내면 다음 (5)식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\vec{q}_{lr} = -K_{lr} \cdot \frac{h_l^{t-1} - h_r^{t-1}}{SL_{lr}} \cdot \vec{s}_{lr} \quad (5)$$

여기서  $\vec{q}_{lr}$ 은 *Lpoly*에서 *Rpoly*로 향하는 질량 유속,  $K_{lr}$ 은 *Lpoly*와 *Rpoly*사이의 투수계수로서 *Lpoly*의 투수계수와 *Rpoly*의 투수계수의 평균값,  $SL_{lr}$ 은 *Lpoly*의 중점과 *Rpoly*의 중점사이의 거리,  $h_l^{t-1}$ 과  $h_r^{t-1}$ 은 시간 ( $t-1$ )에서 *Lpoly*와 *Rpoly*의 수두,  $\vec{s}_{lr}$ 은 *Lpoly*의 중점에서 *Rpoly*의 중점을 향하는 단위 방향벡터이다.

*A*점에서 *B*점을 잇는 선 *S*를 지나는 질량유량  $\vec{Q}_s$ 는 다음 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\vec{Q}_s = h_s \cdot (\vec{q} \times \vec{\ell}) = h_s \cdot (q_x \ell_y - q_y \ell_x) \quad (6)$$

여기서  $h_s$ 는 *A*점과 *B*점을 잇는 선의 대수층의 평균깊이,  $\vec{q}$ 는 식 (5)의  $\vec{q}_{lr}$ 이고,  $\vec{\ell} = \ell_x \vec{i} + \ell_y \vec{j}$ 로서 *S*의 선벡터를 나타낸다.  $\Delta t$ 시간 동안 *S*를 통한 유량  $\vec{V}_s$ 는 다음 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\vec{V}_s = \vec{Q}_s \cdot \Delta t \quad (7)$$

식 (7)에서 구한  $\vec{V}_s$ 가 양의 값이면 유량은 *Lpoly*에서 *Rpoly*방향이고 음의 값이면 반대 방향이다.

### 3.2 Arc/Info의 PARTICLETRACK

Arc/Info의 입자추적 알고리즘은 유체의 흐름 벡터가 정의된 구역에서 어떤 한 점 *P*로부터 출발하여 입자가 움직이는 경로를 추적하는 것으로서 연속되는 점을 결정하는 방법은 predictor-corrector scheme을 이용한다. 그림 3에 이 방법을 나타내었는데 그림에서

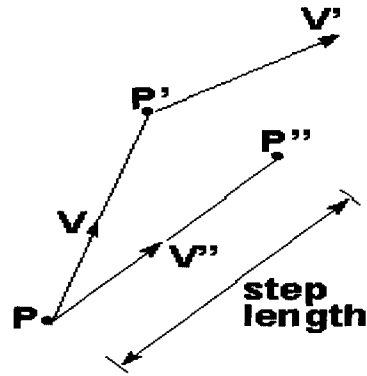


그림 3. 입자추적 Scheme

출발점은 임의의 점 *P*이며 그 점의 유속 *V*는 그 주위에 있는 격자 점들의 중심에서 정의되는 유속을 사용하여 보간된 값을 구한다. 이 *V*를 사용하여 다음 점 *P'*를 구하고 똑같은 방법으로 *P'*의 유속 *V'*를 구한다. *V*와 *V'*의 평균 값 *V''*를 구하고 이 값을 사용하여 새로운 위치 *P''*를 결정하며 이 점이 새로운 출발점이 되고 똑같은 알고리즘이 반복되어 경로를 추적한다.

## 4. 모형의 구축 및 적용 결과

### 4.1 지하수 모의모형의 구축

개발된 지하수모형은 크게 3부분으로 구성되는데 전 처리부, 처리부, 후 처리부이며 전 처리부는 일반적인 GIS 수치지도로부터 지하수 모형 object를 만드는 것인데 이것은 Arc/Info의 다각형 커버리지를 사용하여 만들 수 있다. 만들어진 다각형 커버리지로부터 선 커버리지를 만들고 전 처리부는 이들 커버리지를 새로운 다각형 object와 선 object로 변환하고 새로운 속성 (attribute) 값을 object에 첨가한다. 다각형 object에 부가된 속성 값의 주요 항목들은 수두, 투수계수, 보충량, 양수량 등이며 선 object에 부가된 속성 값의 주요 항목들은 선의 시작 노드, 끝 노드, 길이, 왼쪽 다각형, 오른쪽 다각형, 유속 등이다. 처리부에서는 속성 값이 부가된 다각형 커버리지와 선 커버리지에 대해 식 (3)과 식 (7)을 적용하여 모의한다. 후 처리부에서는 모형의 결과를 표시한다.

모형을 적용하기 위한 대상으로서 미국 환경청의 자료를 이용하였다. 이 자료는 New York주 Corning 근처에 있는 지하수층에 대한 것이며 대상 지역은 36 × 42의 격자로 나타낼 수 있으며 격자 간격은 250 ft 이다. 우선 Arc/Info를 이용하여 대상지역에

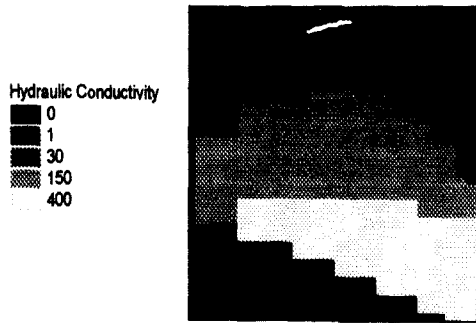


그림 4. 대상지역의 투수계수

대한 다각형 커버리지를 생성하고 이것을 사용하여 다각형 object와 선 object를 구축한 후 투수계수, 수두, 공급률, 지하수층의 두께, 강우에 의한 지하수의 보충량 및 양수량 등에 관한 속성 값을 첨가하였다. 대상지역은 균질 등방성으로 가정하여 투수계수는  $T_x = T_y = T$ 로 하였고 강우에 의한 지하수 보충량은 0.00297 ft/day가 전 지역에 공급되는 것으로 하였으며 대상 지역 내에는 3개의 양수정이 있는데 맨 왼쪽에 있는 양수정은 25,000 ft<sup>3</sup>/d, 나머지 두 개는 30,000 ft<sup>3</sup>/d를 양수한다. 그림 4는 대상 지역에 대한 다각형 object이며 투수계수 값의 분포를 나타내었는데 그림에서 투수계수가 0으로 표시된 지역은 흐름이 발생하지 않는 불투수층을 나타내고 왼쪽 윗쪽과 오른쪽 아래쪽에 이중 선으로 나타난 부분은 항상 일정한 수두 값이 유지되는 경계 조건이다.

#### 4.2 모형의 적용

대상 지역에 대한 경계조건과 초기 조건이 주어진 다각형 object와 선 object에 대해 모형을 적용하여 모의하였다. 경계조건으로 주어진 수두 값은 각 셀마다 서로 다른 값이며 이 값은 계산 도중 항상 일정하게 유지되고 초기조건은 대상지역에 대해 경계조건으로 주어진 수두 값을 선형 보간한 수두 값으로 주어 계산하였다. 모의 결과 계산된 수두 분포를 그림 5에 나타내었다. 그림에는 각 격자점의 수두 분포를 일정 범위로 구분하여 나타내었을 뿐만 아니라 수두의 등고선을 계산하여 나타내었으며 이 결과는 미국 환경청의 자료에 나온 결과와 거의 비슷한 분포를 하고 있음을 알 수 있었다. 이 그림에는 양수정의 위치를 점 커버리지로 나타내었는데 그림에서 알 수 있는 바와 같이 이 지역에 3개의 양수정이 있다.

#### 4.3 GRID 함수의 적용 결과

그림 5에 표시된 수두 분포를 비롯하여 공급률, 지하수층의 두께, 전달계수에 대한 grid자료를 생성하였으며 생성된 자료를 사용하여 Arc/Info의 GRID함수를 적용하였다. 그 결과 각 격자점에 대한 유속의 크기와 방향을 얻을 수 있었으며 그림 6에 각 격자점에 대한 흐름의 방향벡터를 나타내었는데 이 그림은 유속의 방향만 표시한 것이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 대상 지역의 전체적인 경향은 왼쪽 윗 부분으로부터 오른쪽 아래쪽으로 흐름이 있으며 3개의 양수정을 향하여 흐름이 발생하고 있음을 알 수 있다. 양수정에 영향을 미치는 영향권, 즉 우물수원 보호구역을 추정하기 위해서는 대상 지역의 임의의 점에 있는 한 입자가 흐름을 따라 흘러가는 궤적을 추적하면 그 영향권을 추적할 수 있을 것이다. 이와 같은 입자의 궤도를 추적하기 위해

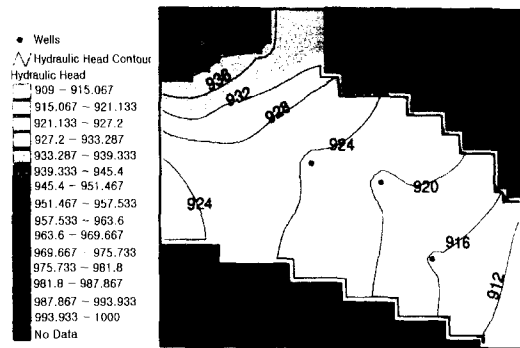


그림 5. 계산된 수두값의 분포도

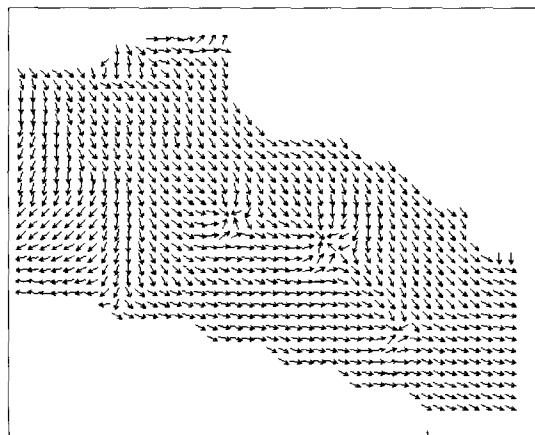


그림 6. 각 격자점에 대한 흐름방향 벡터

서 PARTICLETRACK함수를 이용하였으며 그 결과를 그림 7에 나타내었다. 이 그림으로부터 각 양수정에 영향을 미치는 영향권을 명확하게 구분할 수 있으므로 각 우물에 대한 보호구역은 이와 같은 영향권에 따라서 결정할 수 있을 것이다. 그림 7의 결과를 미국 환경청의 자료와 비교하기 위해 미국 환경청에서 계산한 결과의 그림을 그림 8에 나타내었다. 두 그림을 비교하면 거의 비슷한 경향을 보이고 있음을 알 수 있으므로 본 연구에서의 계산 방법의 타당성을 입증할 수 있었다.

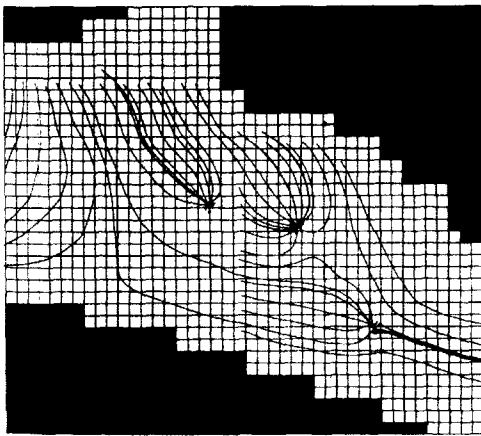


그림 7. 대상지역에 대해 계산된 우물의 영향권

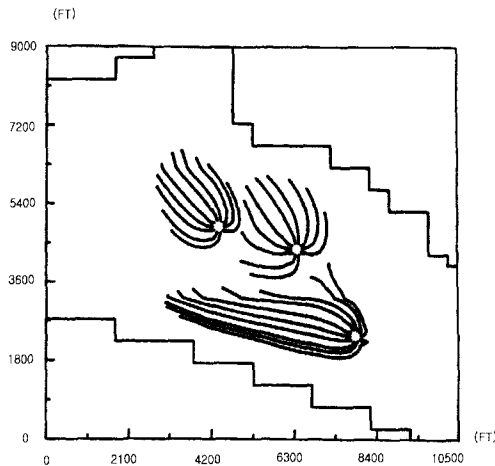


그림 8. Corning 예제에 대한 우물의 영향권 (U.S. EPA, 1991)

## 5. 결 론

인간의 생존을 위해서는 맑은 물이 필수적인데 그와 같은 목적을 달성하기 위해서는 상수원을 여러 가지 오염원으로부터 보호하여야한다. 우물수원 보호의 첫 번째 작업은 우물수원 보호구역의 범위를 설정하는 것인데 범위결정 방법은 여러 가지가 있지만 그 중에서 가장 과학적이고 효율적인 방법은 컴퓨터를 이용한 지하수 모형을 이용하는 것이다. 대부분의 지하수 모형들은 복잡하고 많은 수리 및 지질 자료를 필요로 하는데 이런 자료를 손쉽게 데이터베이스로 구축하고 관리하기 위해서는 GIS를 이용하는 방법이 효율적이라고 생각된다. 본 연구에서는 지형정보 시스템을 이용하여 우물수원 보호구역을 추정하는 모형을 구축하는 것인데 이를 위해서 여러 가지 지하수 모형과 GIS를 이용한 수문 모형에 대해 조사하였으며 이를 기초로 모형의 시간 변수를 고려하고 데이터의 입력 및 조작, 모의, 결과의 표시 등을 GIS내에 통합한 지하수 모의모형을 개발하였다. 또한 우물수원의 보호구역을 설정하기 위해서 Arc/Info의 Grid함수를 이용하였다. 개발된 모형은 여러 가지 복잡한 전 처리 및 후처리 작업을 거치지 않고 최종 결과를 GIS 형태의 자료로 얻을 수 있는 이점이 있고 이 결과가 직접 Grid함수의 입력 자료로 사용되어 우물에 대한 영향권을 추정할 수 있었다. 모형을 적용한 대상지역은 미국 환경청의 자료를 이용하였는데 지하수 모형에서 계산된 수두 분포의 값과 우물의 영향권을 계산한 값이 서로 비슷하여 본 논문에서 구축한 모형의 타당성을 입증하였다. 여기서 개발된 방법이 점점 더 오염 가능성이 많아지고 있는 여러 우물수원의 보호구역을 설정하는데 효율적인 방법이 될 수 있을 것이다.

### 감사의 글

이 연구는 LG 연암문화재단의 1996년도 교수 해외 연구 지원비의 연구지원에 의하여 수행된 결과로서 연암재단의 지원과 Center for Research in Water Resources, University of Texas at Austin의 David R. Maidment 교수에게 감사를 드립니다.

### 참 고 문 헌

Avalos, B., Samani, Z., and Garcia, J.A. (1995). "Use of a particle tracking model and GIS in the delineation of wellhead

- protection areas and mapping of potential pollution sources." *Groundwater management*, Edited by Charbeneau, R. J., ASCE, New York, N.Y., pp. 235-240.
- Baker, C.P., Bradley, M.D., and Bobiak, S.M.K. (1993). "Wellhead protection area delineation : Linking flow model with GIS." *J. of Water Resources Planning and Management*, ASCE, Vol. 119, No. 2, pp. 275-287.
- Brown, M.C., Davis, D.H., Greenwald, R.M., Srinivassan, P., and Ward, D.S. (1996). "ModelGIS, An interface for the USGS three dimensional finite difference model MODFLOW." *Proc., 16th Annu. ESRI User Conf.*, Environmental Systems Research Institute, Redlands, Calif.
- Cheung, F.K., Bhowmik, S.K., Chen, W.W. (1995). "Use of capture zone analyses in delineation of wellhead protection areas." *Integrated Water Resources Planning for the 21st Century*, Edited by Domenica, M. F. , ASCE, New York, N.Y., pp. 916-920.
- Garcia, J.A., Samani, Z., Avalos, B. (1995). "Terrain modeling applications in the delineation of wellhead protection areas." *Groundwater Management*, Edited by Charbeneau, R. J., ASCE, New York, N.Y., pp. 223-228.
- Lachmar, T.E., Gadt, J.W., Forster, C.B. (1993). "Ground water management for wellhead protection in a confined to semiconfined aquifer, Salt Lake County, Utah." *Management of Irrigation and Drainage Systems: Integrated Perspectives*, Edited by Allen, R. G., ASCE, New York, N.Y., pp. 289-296.
- Maidment, D.R. (1993). "GIS and hydrologic modeling." *Environmental modeling with GIS*, Edited by Goodchild, M.F., Parks, B.O., and Steyaert, L.T., Oxford University Press, New York, N.Y., pp.147-167.
- McKinney, D.C., and Tsai, H.-L. (1993) "Solving ground water problems using multigrid methods an a grid-dell based GIS." *2nd NCGIA Int. Symp./Workshop on GIS and Envir. Modeling*, Breckenridge, Colo.
- Orzol, L.L., and McGrath, T.S. (1992). *Modification of the U.S. Geological Survey modular finite difference ground water flow model to read and write geographic information system files*. USGS open file rep. 92-50, Portland, Greg.
- Rindahl, B. (1996). "Using the USGS MODFLOW program and Arcview." *Proc., 16th Annu. ESRI User Conf.*, Environmental Systems Research Institute, Redlands, Calif.
- Smith, D.M., and Hornberger, T.A. (1995). "Utilization of a GIS for wellhead protection." *Groundwater management*, Edited by Charbeneau, R. J., ASCE, New York, N.Y., pp. 229-234.
- Tauxe, J.D., Maidment, D.R., and Charbeneau, R.J. (1992). "Contaminant transport modeling using new GRID operators." *Proc., 12th Annu. ESRI User Conf.*, Vol.3, Environmental Systems Research Institute, Redlands, Calif., pp.57-62.
- U.S. EPA Office of Ground Water Protection. (1991). *A modular semi-analytical model for the delineation of wellhead protection areas*. No. 68-08-0003. EPA, Washington, D.C.
- U.S. EPA Office of Ground Water Protection. (1993). *Guidelines for delineation of wellhead protection areas*. EPA 440/5-93-001. EPA, Washington, D.C.
- Van Metre, P.C. (1990). *Structure and application of an interface program a geographic information system and a ground water flow model*. USGS Open file rep. 90-165, Tucson, AZ.
- Watkins, D.W., McKinney, D.C., Maidment, D.R., and Lin, M.-D. (1996) "Use of geographic information systems in ground-water flow modeling." *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, Vol. 122, No. 2, pp. 88-96.
- Zichuan, Y. (1996). *Map-based surface and subsurface flow simulation models: An object-oriented and GIS approach*. Doctoral dissertation in Civil Eng., UT Austin, Austin, TX.

<최종본 접수일 : 1997년 12월 11일>