

지하수 해석 모델을 이용한 지하수 관리시스템의 개발

서정민*, 이창훈**, 김삼근***

A Development of Underground Water Management System Using an Analytic Model

Jeong Min Seo *, Chang Hoon Lee **, Samkeun Kim ***

요약

지하수 분석에서 투수도, 저류 계수, 경계조건 등의 입력 자료를 잘못 추정할 경우 수학적 해석해를 사용하는 수계산 방법보다 부정확한 결과를 얻을 수 있기 때문에 정확한 시스템 모델을 적용하기 위해서는 현장의 파라미터에 대한 정확하고 방대한 조사 작업이 필요하다. 최근 이러한 파라미터를 쉽게 다루고자 하는 연구가 활발히 진행되어 왔다. 본 연구에서는 모델운영에 있어서 이러한 문제점을 방지하기 위하여 대표적으로 많이 사용되고 있는 MODFLOW 모델에 대한 조사를 수행하고, ArcView와 연계방법을 개발하여 입력자료 및 파라미터 등을 정확하고 쉽게 입력할 수 있는 방법을 제안한다. ArcView의 기능과 연계하여 구축된 시스템의 수행결과를 시각적으로 서비스 할 수 있도록 하였다.

Abstract

An accurate system modeling in the underground water analysis requires many accurate parameters on the spot, which have a huge volume, because it may be generated more inaccurate products than to use mathematical analytical solution in a case that a degree of permeation, undercurrent coefficients, boundary conditions, and so on, are inadequately estimated. Recently, handling these parameters easily has been an active area of research. In this paper, we propose a new method which handles these parameters easily and accurately for a system model management using a well-known MODFLOW model. Also, we incorporate this method into ArcView functions. Results of the proposed system incorporated into ArcView are displayed visually.

▶ Keyword : Underground water, Analytic model, ArcView, MODFLOW

• 제1저자 : 서정민

• 접수일 : 2005.06.02, 심사완료일 : 2005.07.20

* 환경대학교 컴퓨터공학과 박사과정, ** 환경대학교 컴퓨터공학과 조교수, *** 환경대학교 컴퓨터공학과 교수

※ 본 연구는 산자부의 RIS 연구지원에 의해 수행되었음.

I. 서론

하천 및 호수 등의 지표수의 오염이 심화되면서 대체 상수원으로 지하수의 이용이 증가하고 있으며, 지하수 자원의 보전은 지하수계뿐만 아니라 전체 물 순환계의 보전이라는 측면에서 매우 중요한 문제로 대두되고 있다. 국내의 지하수 개발은 생활 및 산업용수와 생수 등으로 개발되어왔지만, 외국에서 1970년대에 이미 개발된 양수 수리학에 대한 이론이나 실험 및 현장 조사 방법 등을 적절하게 활용하지 못하여 지하수 고갈 등 많은 문제를 내포하면서 사업이 진행되고 있는 형편이다.

지하수자원 개발 시 양수 시험 등의 결과를 해석하여 개발 가능 지하수자원량을 추정하기 위해서 외국에서 개발된 GIS 모델을 많이 사용하고 있다. 이러한, 지하수유동을 해석하기 위한 컴퓨터를 이용한 수치모델은 경제성이 뛰어나고 적용이 비교적 쉽기 때문에 식용 샘물 개발 등 여러 지하수 개발 분야에서 많이 사용되고 있다[2]. 그러나, 이러한 GIS 모델을 적용하기 위해서는 현장의 파라미터에 대한 정확하고 방대한 조사 작업이 필요하며, 투수도, 저류능 계수, 경계조건 등의 입력 자료를 잘못 추정할 경우 수학적 해석해를 사용하는 수계산 방법보다 부정확한 결과를 나타낼 수도 있으며, 입력자료 구성 시 요구되는 파라미터가 방대하고, 작업량이 많다[5].

따라서, 본 연구에서는 모델운영에 있어서 이러한 문제점을 방지하기 위하여 대표적으로 많이 사용되고 있는 MODFLOW 모델에 대한 조사를 수행하고, ESRI사의 ArcView[6, 7]와 연계방법을 개발하여 입력자료 및 파라미터 등을 정확하고 쉽게 입력할 수 있는 방법을 개발하였으며, 계산 결과를 ArcView의 기능을 이용하여 입체적으로 도시할 수 있도록 하였다. 또한, 모델을 사용하는 대신에 수계산으로 간편하게 지하수 유동 상황을 해석하기 위하여, 지하수 유동에 대한 수학적 해석해를 유도하고, 해석해의 적용성을 검토하기 위해 실제 먹는 지하수를 이용하는 산업체의 현장 자료를 이용하여 해석해에 대한 검증을 실시하였다.

또한, 지하수 개발 및 관리를 위한 종합적인 지하수 관련 정보를 통합적으로 해석할 수 있는 정보처리시스템의 개발

을 시도하였다[11, 12, 13]. ESRI사의 ArcView를 활용한 이 시스템에서는 지표면 하부 대수층의 불규칙적이고 방대한 지질 및 지하수 유동에 관련된 자료의 입체적인 관리를 위하여 GIS 기법을 활용하는 방안을 제시하였다.

II. 관련연구

2.1 지하수 일반이론

땅 위에 내린 빗물은 일부가 지하로 침투하게 되는데, 이 침투된 물중에서 지표 가까이 혹은 토사입자에 부착되어 있거나 암반이나 점토 같은 불침투층에 도달되어 그 이상 통과하지 못하고 토사 사이에 충전되어 있는 지중의 물을 지하수(groundwater)라 하고, 그 수표면을 지하수면(groundwater table)이라고 정의한다[9, 10].

일반적으로 지하수면 부근에는 모세관 현상에 의해 공극 사이로 지하수가 상승되어 있으나 통상 이러한 현상을 무시하여 그것을 생각하지 않는 수면이 지하수면이며, 대기압만이 작용한다고 본다. 이와 같이 대기압이 작용하는 지하수면을 가지는 지하수를 자유수표면 지하수(free surface groundwater)라 부르고 불투수층 사이의 투수층 내에 피압되어 있는 지하수는 지하수면을 갖지 않는 피압지하수(confined groundwater)라고 말한다[10].

지하수가 성립하려면 모래나 자갈같이 물을 잘 통과시키는 층, 즉 투수층과 그 밑에 점토층이나 암반같이 물을 잘 통과 시키지 않는 지층, 즉 불투수층이 있어야 한다. 또 불투수층에는 침니(silt)나 점토같은 난투수층과 암반 같은 비투수층으로 분리된다[9, 10].

2.2 지하수 이동 이론

지하수는 불규칙한 토사입자 사이의 경로를 따라 움직이므로 유선은 규칙적이 아니지만 평균적인 운동 방향으로의 유선을 생각할 수 있고 이 평균적인 유선에 수직한 작은 단면 A를 지나서 유량 Q가 흐른다면 지하수의 단위 면적당

유량은 $q = \frac{Q}{A}$ 라고 할 수 있다.

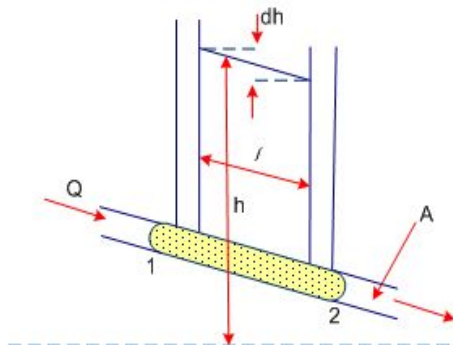


그림 1. Darcy의 법칙
Figure 1. Law of Darcy

Darcy는 지하수의 유속에 대해서 다음과 같은 실험을 하였다. (그림 1)에서 단면 1, 2 사이에 토사를 채우고 물을 흐르게 할 때, 압력차를 dh, 두 단면 사이의 동수경사를 I, 관의 길이를 l, 단면적을 A라 하고 유량 Q를 측정하면,

$$I = \frac{dh}{dx} \quad Q = -K \cdot A \cdot \frac{dh}{dx} = -KAI \dots\dots (수식 1)$$

이다.
따라서,

$$q = \frac{Q}{A} = -\frac{KAI}{A} = -KI = -K \frac{dh}{dx} \dots\dots\dots (수식 2)$$

가 되어 단위유량은 동수경사에 비례한다. 이 관계를 Darcy의 법칙이라 한다. 여기서 K는 투수계수(hydraulic conductivity)라 한다. K의 차원은 [LT⁻¹]이며, K는 대수층 지하수의 특성(토사의 크기, 점성계수 등)에 관계가 있다[1, 3, 4, 9, 10].

Darcy의 법칙은 유체에 대한 운동방정식으로부터 유도할 수도 있다. 즉, Navier-Stokes 식의 항중에 지하수의 유속이 느린 관계로, 관성의 항과 점성의 항을 무시하고, 이동이 적은 토질에 대한 반발력을 고려하면 Darcy의 식이 유도된다. 이러한 유속이 느린 경우의 Reynolds수는 실험에 의하면 대략 Re<4의 범위이다[1, 3, 4, 9, 10].

III. 지하수 수위 변동 조사

3.1 조사 방법

본 조사는 본 연구의 공동참여 업체에 의뢰하여 안성시 죽산면 화봉리[8]에 위치한 한 업체를 중심으로 실시하였다. 이 업체는 3개의 취수정을 보유하고 있다. 본 조사에서는 시간별 관측자료를 이용하여 데이터 변환 과정을 거친 후 MSSQL을 사용하여 데이터베이스(DB)를 구축하였다. 구축된 데이터베이스를 이용하여 데이터 분석을 실시한 후 데이터 상호간에 상관관계가 예상되는 부분에 대해 상관성 분석을 실시하였다.

3.2 양수량과 수위변동의 상관관계

수위변동이 양수량과 관계가 있다고 판단되어 수위변동 자료를 이용하여 양수량과 수위변동의 관계를 조사하였다. (그림 2)에서 보면, 양수량이 수위변동에 영향을 주는 것을 한눈에 알아볼 수 있다. 즉, 취수정에서 양수 시 지하수의 수위는 하강하고, 양수를 하지 않을 경우에는 수위가 상승하는 것을 볼 수 있다.

또한 양수량과 수위변동이 어느 정도 상관성이 있는지 알아보기 위해 몇 일간 계속 양수한 양수량과 수위변동을 비교해 본 결과 (그림 3)과 같은 결과를 얻었다.

(그림 3)에서 보여지는 바와 같이 양수량과 수위와의 관계는 상관계수(R²)가 0.9211인 아래의 관계식으로 나타낼 수 있다.

$$Y = 0.0268 X + 2.7671 \dots\dots\dots (수식 3)$$

Y = 수위강하심도(m)

X = 양수량 (ton/day)

위의 수식 3에 의하면 몇 일간 계속 양수한 양이 200톤 이라면 그동안 수위는 8.1m 감소하는 것을 알 수 있다.

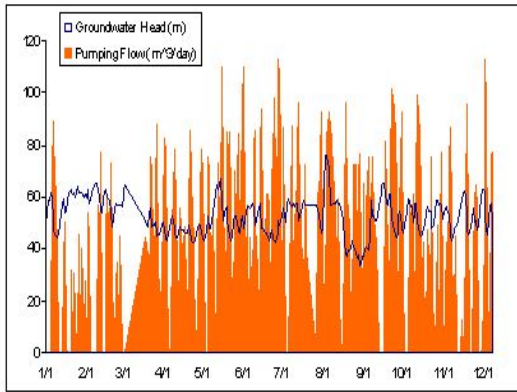


그림 2. 양수량에 따른 수위 변동
Figure 2. Water level change by flow quantity

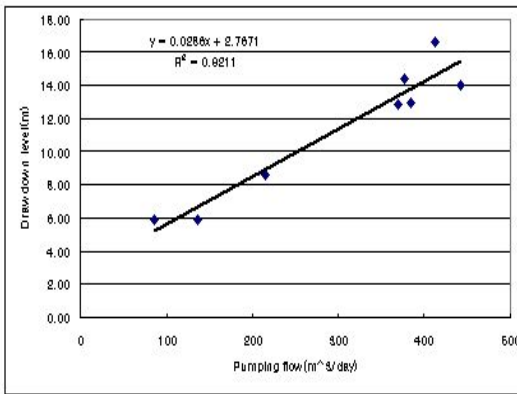


그림 3. 양수량과 수위와의 관계
Figure 3. Relation with flow quantity and water level

여기서, ΔS : 수위 강하 심도 (m)
 T : 투수도 (m²/day)
 r_1, r_2 : 취수정의 깊이 (m)
 Q_w : 취수정에서의 양수량 (m³/day)

투수도 산정은 앞서 조사한 대상 업체에 대해 계산하였고, 계산에 사용된 수위강하심도(ΔS)는 양수량과 수위강하심도와의 선형 상관관계를 나타냈던 업체의 데이터를 이용하였다. 계산 결과 투수도는 1.60~3.84m²/day로 나타났으며, 계산된 투수도의 평균치는 2.97m²/day이었다. 영향 평가 시 투수도는 2.12m²/day로 지하수 유동 이론의 해석해를 이용한 본 계산결과(2.97m²/day)와 유사한 것으로 나타났다.

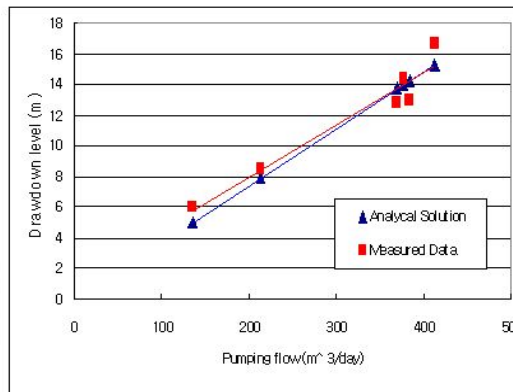


그림 4. 추정치와 실측치 비교
Figure 4. Presume and measure comparison

3.3 지하수 유동 해석해에 의한 추정치와 실측치의 비교

취수정에서 지하수 수위변동은 취수정에서의 양수량과 선형 상관관계를 보이는 것으로 나타났다. 이에 본 연구에서는 취수정에서의 양수량에 따른 감시정의 수위강하를 지하수 유동이론의 해석해를 이용하여 계산한 후, 실제 감시정의 수위강하와 비교해 보았다. 계산은 앞의 지하수 유동이론의 해석에서 유도한 아래의 식을 이용하였다.

$$\Delta S = 2.3 \frac{Q_w}{4\pi T} \log \frac{r_1^2}{r_2^2} \dots\dots\dots (수식 4)$$

IV. ArcView를 이용한 시스템 구축

본 연구에서는 지하수의 보전을 위해 지하수 개발 시 ArcView를 이용하여 GIS상에서 수리지질학적 자료 및 지하수 유동관련 자료를 관리할 수 있는 방법을 제시하였고, 지하수 유동이론의 해석해와 수치모델을 GIS와 결합하여 지하수자원을 종합적으로 관리할 수 있는 정보관리 시스템의 개발을 시도하였다. 아래의 (그림 5)는 본 시스템의 전체 구성도를 간략히 나타낸 것이다.

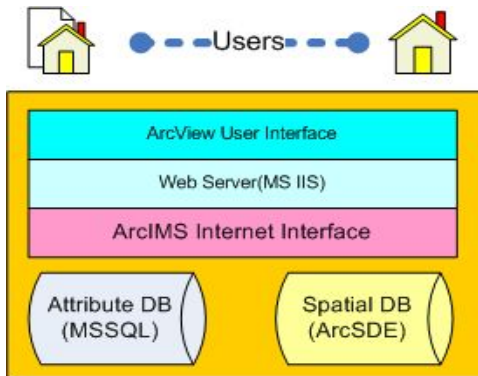


그림 5. 시스템 구성도
Figure 5. System Architecture

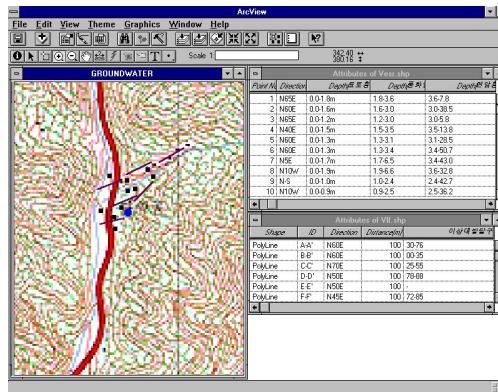


그림 7. VLF탐사와 전기 비저항 수직탐사 자료
Figure 7. VLF inquiry and electricity specific resistance vertically inquiry data

(그림 6)은 연구대상 지역의 지질에 대한 정보를 각각의 면(Polygon)자료로 입력하여 구성한 지질도이다.

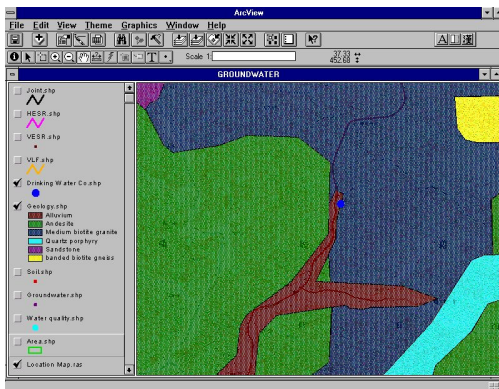


그림 6. 대상 지역 지질도
Figure 6. Target area geographical map

(그림 7)은 VLF(Very Low Frequency) 탐사와 전기 비저항 수직탐사 자료를, (그림 8)은 전기 비저항 탐사 결과를 ArcView를 이용하여 화면상에 나타낸 것이다.

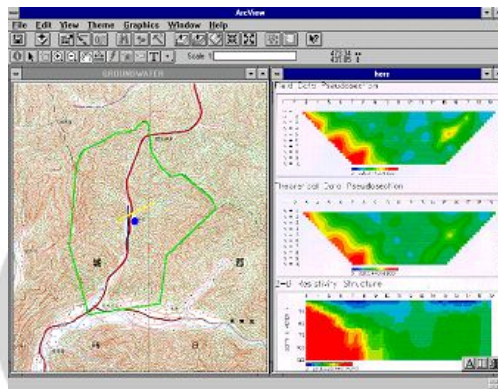


그림 8. 전기 비저항 탐사 자료
Figure 8. Electricity specific resistance inquiry data

각 주제별 속성정보를 관리함에 있어서 ArcView는 각 속성자료를 표로 나타낼 뿐만 아니라 그래프로도 나타낼 수 있어서 자료관리의 효율성을 증대시킬 수 있다. (그림 9)는 지하수 및 지표수의 수질을 조사한 지점에 대한 도면정보와 각 지점별 수질을 나타낸 속성정보와 각 속성자료를 그래프로 나타낸 것이다.

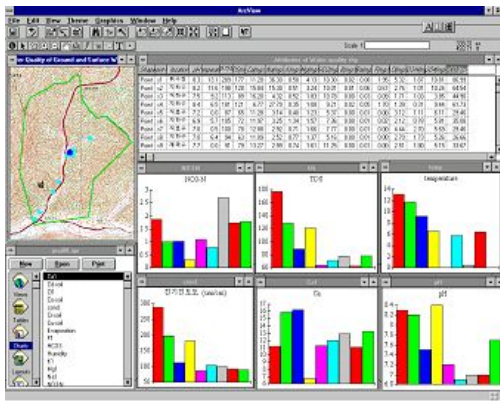


그림 9. 지표수 및 지하수의 수질 특성 자료
Figure 9. Quality of water special quality data of surface water and underground water

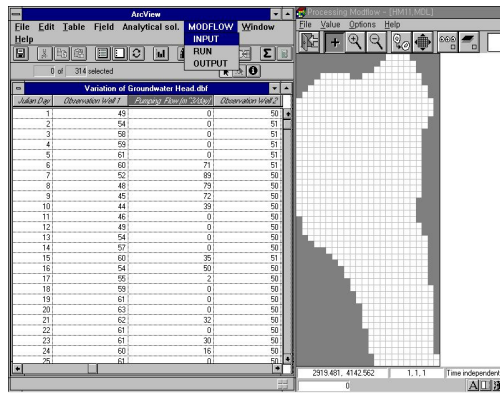


그림 10. ArcView와 MODFLOW
Figure 10. ArcView and MODFLOW

본 시스템은 GIS상에서 지하수 유동이론의 해석해를 이용하여 지하수의 투수도, 저류계수 및 수위강하심도 등을 계산할 수 있도록 GIS와 지하수 유동 해석해의 연계를 시도하였고, 뿐만 아니라 MODFLOW와 같은 수치모형과의 연계도 시도하였다. 그 결과 ArcView의 GUI에 지하수 유동이론의 해석해와 3차원 지하수 유동 모형인 MODFLOW에 대한 메뉴를 삽입하였고, ArcView의 Script를 수정하여 지하수 유동이론의 해석해와 MODFLOW에 직접 연결할 수 있도록 구축하였다.

따라서, 각 프로그램이 한 개의 데이터베이스를 공유하게 되고, 이로 인해 데이터베이스의 수치만 바뀌면 각각의 프로그램에 대한 결과는 모두 변한다. 즉, 본 시스템은 각각의 프로그램이 GIS와 연계되어 있고, 한 개의 속성자료에 의해 여러 프로그램들이 운영되는 통합적인 시스템이다. 아래의 (그림 10)은 ArcView와 MODFLOW를 연계한 예이다.

V. 결론 및 향후 과제

지하수 개발 및 관리를 위한 지질학적 기초자료(지형도, 지질도, 물리탐사 등)와 지하수 유동해석의 기초자료(지하수위, 유속, 취수량, 투수도, 공극율, 주변 하천, 오염원 등)를 효과적으로 관리하기 위해서는 GIS기법의 활용이 필수적이다. 따라서, 본 연구에서는 ArcView를 사용하여 지하수 개발 및 관리를 위한 관련 자료를 관리할 수 있는 방법을 제시하였다. 향후 연구 과제로는 2차원적인 지하수 분포도를 3차원으로 변환하여 웹상에서 서비스를 하기 위한 시스템을 구현하는 것이다. 또한 단순한 정보의 제공뿐만 아니라 각종 속성 정보를 제공하기 위한 지하수 관련 메타데이터에 관한 연구도 함께 진행되어야 할 것이다.

참고문헌

[1] Bear, J., 'Hydraulics of Groundwater', McGraw-Hill, 1979
 [2] Berger, Blaine H., 'The Web Enabling of Spatial Information Technology', GIS97 Conference Proceedings, 1997, pp.218-246

[3] Bouwer, H., 'Groundwater Hydrology', McGraw-Hill, 1978

[4] Cressie, N.A.C., 'Statistics of Spatial Data', Wiley Interscience, 1991

[5] Zhong-Ren, 'An Assessment of the Development of Internet GIS', Abstract for URISA '97, 1997, pp.590-599

[6] ArcInfo, <http://www.esri.com/soft>

[7] ArcViewGIS, <http://www.esri.com/base/product/arcview>

[8] 국립지질조사소, '한국수리지질도-안성천 유역', 1996

[9] 윤용남, '수리학', 청문각, 1993

[10] 이원환, '수리학', 문운당, 1987

[11] 이기영, 노경택, '공간 데이터 변환 시스템의 설계 및 구현', 한국컴퓨터정보학회논문지, 2003.12 v.008, n.004, pp.41-46

[12] 정규장, '웹 기반 공간데이터 공동 컴포넌트 설계 기법', 한국컴퓨터정보학회논문지, 2004.03 v.9, n.1, pp.31-36

[13] 탁보훈, '지리 정보 시스템을 지원하는 공간 객체 저장시스템의 설계와 구현', 1996

저자 소개



서 정 민
 1996년 충주대학교 전자계산학과 (공학사)
 2000년 충북대학교 전자계산학과 (이학석사)
 2003년~현재 한경대학교 컴퓨터공학과(박사과정)
 2001~2003 (주)인트컴 연구개발 이사
 <관심분야> GIS, 웹서비스, 정보검색, SCM



이 창 훈
 1987년 광운대학교 전자계산학과 (이학사)
 1989년 중앙대학교 전자계산학과 (이학석사)
 1998년 중앙대학교 컴퓨터공학과 (공학박사)
 1999~2002년 중앙대학교 정보통신연구소 연구전담교수
 2002~현재 국립 한경대학교 컴퓨터공학과 조교수
 <관심분야> 객체지향 소프트웨어공학, 정형화 명세 및 방법, 컴포넌트기반 방법론 등



김 삼 근
 1985년 부산대학교 계산통계학과 (이학사)
 1988년 숭실대학교 전자계산학과 (공학석사)
 1998년 숭실대학교 전자계산학과 (공학박사)
 1992년~현재 한경대학교 컴퓨터공학과 교수
 <관심분야> GIS, 웹서비스, 신경망, 마이닝, SCM