

DRASTIC을 이용한 지하수 오염 가능성 분석 및 그래픽 사용자 인터페이스 개발연구

Analysis of Groundwater Pollution Potential and Development of Graphic User Interface using DRASTIC System

민경덕(Kyung - Duck Min)* · 이영훈(Young - Hoon Lee)* · 이사로(Sa - Ro Lee)** ·
김윤중(Youn - Jong Kim)*** · 한정상(Jung - Sang Hahn)*

요 약 : 본 연구에서 사용한 DRASTIC 시스템은 미국 EPA에서 개발한 것으로, 수리지질학적 인자를 사용하여 상대적인 지하수 오염 가능성을 분석하는데 널리 이용된다. 또한 정호 및 매립지 위치 선정과 지하수 보호책으로의 토지이용 기초자료, 감시 목적과 오염지역 복원시 자금을 효율적으로 할당하는데 유용하게 이용될 수 있다. 본 연구는 이러한 시스템을 이용하여 충주호 주변의 지하수 오염 가능성을 분석한 것이다. 이번 연구에서는 지하수면의 깊이, 함양도, 대수층과 토양의 구성성분, 지형과 수리전도도 등의 수리지질학적 인자를 사용하였다. 보다 정밀한 분석을 위해 원격탐사자료에서 끌어낸 선구조를 DRASTIC 시스템에 이용하였다. 본 연구에서는 지구정보시스템(GIS)과 그래픽 사용자 인터페이스를 개발 연구하여 지하수 오염 가능성과 위험도를 지도화하여 쉽고 빠르게 이해할 수 있도록 하였다.

Abstract : DRASTIC system was used in this study that was developed by U.S. EPA and is widely used for evaluating relative groundwater pollution potential by using hydrogeological factors. The DRASTIC system can be used for selection of well sites, selection of waste disposal sites and basic data of landuse for groundwater protection, and monitoring purpose and efficient allocation of resource for remediation. This study analyzed regional groundwater pollution potential around Chungju Lake using the DRASTIC system. Hydrogeological factors used in this study are depth to water, net recharge, aquifer media, soil media, slope and hydraulic conductivity. For accurate analysis, lineament density that is extracted from image processing of satellite image is overlaid to the DRASTIC system. Results of this study are mapped so groundwater pollution potential and risk degrees can be understood easily and quickly. A graphic user interface is developed to process the data conveniently.

서 론

지난 몇 년동안 가뭄으로 농업용수, 공업용수 뿐 아니라 생활용수도 부족하여 사회경제 전반에 큰 타격을 주었다. 현재 우리나라는 경제의 급속한 성장, 산업의 고도화, 인구의 팽창, 생활수준의 향상 등으로 물의 사용량은 급격히 증가하고 있다. 그러나 이용 가능한 지표수는 제한되어 있어 지표수만으로는 물의 수요를 충족하기 어렵고, 가뭄으로 지표수가 부족하거나 지표수를 이용할 수 없는 지역에서는 지하수의 이용이 절대적으로 필요하다. 우리나라의 경우 지하수 총이용량은 연간 25.7억톤(한국 수자원공사, 1993)으로 우리나라의 연간 총강수량의

2%이며 이는 지하수 적정개발량 138억톤(한국 수자원공사, 1991)과 비교할 때 약 19%에 불과하다. 우리나라에서도 1970년대 부터 정부기관, 각 산업체에서 농업, 공업, 생활 용수로 지하수를 적극적으로 개발, 이용하고 있다. 그러나 지하수 자원의 개발, 이용에만 급급한 나머지 지하수 자원의 보존과 오염 방지에 중점을 두지 못하는 실정에 있다. 지하 대수층내로 오염물질이 침입하여 지하수가 오염된 경우에 자연적으로 오염물질이 대수층으로 부터 이를 정화하려면 많은 비용과 시간이 소요된다. 그리고 만약 오염된 지하수를 사용할 경우 그 피해는 더욱 커질 수 있다. 따라서 지하수가 오염되기 이전에 철저한 오염 방지 대책과 관리가 필요하다.

이러한 관리를 위해 먼저 지하수 오염 가능성에 따라 과학적이고 적절한 관리 방안 마련이 필요하다. 본 연구에서 사용된 DRASTIC 시스템(Aller *et al.*, 1987)은 수리지질학적 요인을 분석하여 지하수 오염가능성을 간접적으로 평가하는 표준화된 시스템으로 1987년 미국 EPA에서 개발되어 현재 널리 이용되고 있다. 이러한 DRASTIC 시스템은 Merchant(1994)에 의해 지구

*연세대학교 지질학과(Dept. of Geology, Yonsei Univ., 134 Shinchondong, Seoul 120-749, Korea)

**한국자원연구소(Korea Institute of Geology, Mining & Materials, 30 Kajung-dong, Yuseul-ku, Taejon, Korea, 305-350, Tel.(042)868-3073)

***서울시정개발연구소(Seoul Development Institute, 171, Samsung-dong Kangnam-ku, Seoul 135-091, Korea)

정보시스템(GIS)을 이용하여 적용되었고, Lars Rosen에 의해 스웨덴에서 적용되었다. 그리고 농약 오염을 평가하기 위해 Majid Ehteshami(1991)에 의해 적용되었고, Kalinski(1994)에 의해 본 시스템과 Volatile Organic Carbon(VOC) 오염과의 관계에 대해 연구되었다.

본 연구는 이러한 시스템을 사용하여 충주호 주변지역에 대해 광역적인 지하수 오염 가능성을 분석하였고, 이러한 작업을 GIS와 그래픽 사용자 인터페이스 프로그램을 개발, 이용하고 자동화하여 많은 양의 자료를 빠른 시간에 손쉽게 처리할 수 있게 하고 경제적으로 지하수 오염 가능성에 대해 평가할 수 있게 하였다. 그리고 좀 더 정확한 분석을 위하여 DRASTIC 시스템에 선구조 밀도를 추가하였다. DRASTIC 시스템은 미국 EPA에서 개발된 것이지만 선구조 밀도를 추가하여 분석한 변형된 DRASTIC 시스템과 그래픽 사용자 인터페이스 프로그램은 급변 연구에서 개발되었다.

DRASTIC 시스템 및 활용

DRASTIC 시스템 개요 및 이용 가능성

DRASTIC 시스템은 1987년 EPA에서 개발된 시스템으로 수리지질학적 요인을 사용하여 지하수 오염 가능성을 상대적으로 평가하기 위한 표준화된 시스템이다. 이 시스템은 강우로 인해 오염물질이 물과 섞여서 지표면에서 지하수로 이동한다는 가정하에 개발된 시스템으로 특정 지역 평가 방법이 아닌 광역적(100 acres 이상), 1차적 분석 시스템이다. DRASTIC 시스템의 종류에는 일반 DRASTIC 시스템과 농업 DRASTIC 시스템이 있다. 각각은 고려되는 수리지질학적 요인은 같으나 각 요인에 대한 중요성(가중치)을 다르게 하여 일반 DRASTIC 시스템은 일반적인 목적으로, 농업 DRASTIC 시스템은 농업지역에서 농약에 대한 오염 가능성을 평가하기 위해 사용된다.

DRASTIC 시스템에서 지하수 오염 가능성에 영향을 미치는 수리지질학적 요인들은 아래와 같다.

- 지하수위까지의 깊이 D - Depth to water
- 충진량 R - net Recharge
- 대수층 매체 A - Aquifer media
- 토양 매체 S - Soil media
- 지형 혹은 경사 T - Topography or slope

Table 1. Assigned weights for DRASTIC features

Feature	General	Agricultural
	DRASTIC Weight	DRASTIC Weight
Depth to Water	5	5
Net Recharge	4	4
Aquifer Media	3	3
Soil Media	2	5
Topography	1	3
Impact of the Vadose Zone Media	5	4
Hydraulic Conductivity of the Aquifer	3	2

- 비포화대 매체의 영향 I - Impact of vadose zone media
- 수리 전도도 C - hydraulic Conductivity

이처럼 DRASTIC는 7가지 수리지질학적 요인의 두음어로 지하수의 오염 가능성을 평가하기 위한 시스템이다. 이러한 DRASTIC 시스템은 우물(취수정) 위치 선정, 쓰레기 매립지 적지 선정, 토지 이용 등에 지하수 보호 기초 자료로 이용될 수 있고, 감시 목적을 위해 이용될 수도 있다. 즉 오염가능성이 많고 토지이용이 잠재적 오염원인 지역에 더 많은 감시 시스템이 설치될 수 있다. 또 오염이 발견된 후에는 정화와 복구 노력에 대한 자원의 효율적 배치를 위해 이용될 수 있다. 비록 DRASTIC 시스템은 오염이 발생된 지역은 알 수 없지만, 더 높은 오염 가능성을 가진 지역을 확인할 수 있고 그 지역에 대한 정화 노력을 더 집중시키는 정책을 세우는 자료를 제공할 수 있다.

각 DRASTIC 요인은 다른 요인과의 상대적인 중요성으로 평가된다. 이러한 상대적인 중요성은 가중치(Weight)로 나타낸다. 각 DRASTIC 요인은 1부터 5까지 상대적 가중치를 갖는다. 가장 중요한 요인은 5이고 가장 덜 중요한 요인은 1이다. 일반 DRASTIC와 농업 DRASTIC 시스템의 가중치는 Table 1과 같다(Aller et al., 1987).

각 DRASTIC 요인은 오염 가능성에 대해 영향을 주는 범위 혹은 매체 종류로 분류되며 이것을 범위(Range)라 한다. 각 DRASTIC 요인에 대한 범위는 오염가능성에 대한 각 범위의 상대적 중요성을 결정하기 위해 상대적으로 평가되고, 이것을 등급(Rating)이라 한다. 각 DRASTIC 요인은 1부터 10까지의 값을 가지는 등급이 할당된다. 각 수리지질학적 요인들의 범위 및 등급은 Table 2~Table 8과 같다(Aller et al., 1987).

이 시스템은 부가 모형을 사용해서 수리지질학적 설정에 대해 DRASTIC 지수값을 결정한다. DRASTIC 지수를 결정하기 위한 식은 다음과 같다.

$$\text{DRASTIC지수} = DrDw + RrRw + ArA + SrSw + SrSw + TrTw + Irlw + CrCw \quad (1)$$

Table 2. Ranges and ratings for depth to water

Range (cm)	Rating
0 - 152.4	10
152.4 - 457.2	9
457.2 - 914.4	7
914.4 - 1524.0	5
1524.0 - 2286.0	3
2286.0 - 3048.0	2
3048.0 +	1

Table 3. Ranges and ratings for net recharge

Range (cm)	Rating
0 - 50.8	1
50.8 - 101.6	3
101.6 - 177.8	6
177.8 - 254.0	8
254.0 +	9

Table 4. Ranges and Ratings for aquifer media

Range	Rating	Typical Rating
Massive Shale	1 - 3	2
Metamorphic/Igneous	2 - 5	3
Weathered Metamorphic/Igneous	3 - 5	4
Glacial Till	4 - 6	5
Bedded Sandstone, Limestone & Shale Sequences	5 - 9	6
Massive Sandstone	4 - 9	6
Massive Limestone	4 - 9	6
Sand and Gravel	4 - 9	8
Basalt	2 - 10	9
Karst Limestone	9 - 10	10

Table 5. Ranges and ratings for soil media

Range	Rating
Thin or Absent	10
Gravel	10
Sand	9
Peat	8
Shrinking and/or Aggregated Clay	7
Sandy Loam	6
Loam	5
Silty Loam	4
Clay Loam	3
Muck	2
Nonshrinking and Nonaggregated Clay	1

Table 6. Ranges and ratings for topography

Range(%)	Rating
0 - 2	10
2 - 6	9
6 - 12	5
12 - 18	3
18 +	1

(D: 지하수위까지의 깊이, R: 충전률, A: 대수층 매체, S: 토양 매체, T: 경사, I: 비포화대 매체, C: 수리 전도도, r: 등급, w: 가중치)

일단 DRASTIC 지수가 결정되면, 지하수 오염에 상대적으로 더 민감한 지역을 확인하는 것이 가능하다. 즉 DRASTIC 지수가 높을수록 지하수 오염 가능성이 상대적으로 크고, 반대로 DRASTIC 지수가 낮을수록 지하수 오염 가능성이 상대적으로 적다. DRASTIC 지수는 상대적인 평가 도구만을 제공하지 절대 평가의 해는 제공하지 않는다.

변형된 DRASTIC 시스템

변형된 DRASTIC 시스템은 기존의 DRASTIC 시스템에 선구조의 밀도를 더한 것이다. 지질학적 선구조는 지하수의 유동을 원활하게 함으로써 지하수의 오염의 확산을 용이하게 할 수 있는 매개체이다. 특히 우리나라의 경우 지하수는 암반 대수층에 포함된 암반 지하수가 대부분으로 주로 단층, 균열 등에 존재하

Table 7. Ranges and ratings for impact of the vadose zone media

Range	Rating	Typical Rating
Confining Layer	1	1
Silt/Clay	2 - 6	3
Shale	2 - 5	3
Limestone	2 - 7	6
Sandstone	4 - 8	6
Bedded Limestone, Sandstone, Shale	4 - 8	6
Sand and Gravel with significant Silt and Clay	4 - 8	6
Metamorphic/Igneous	2 - 8	4
Sand and Gravel	6 - 9	8
Basalt	2 - 10	9
Karst Limestone	8 - 10	10

Table 8. Ranges and ratings for hydraulic conductivity

Range(GPD/Ft ²)	Rating
1 - 100	1
100 - 300	2
300 - 700	4
700 - 1000	6
1000 - 2000	8
2000 +	10

고 이를 통해 유동하므로 선구조의 밀도를 분석하여 DRASTIC 시스템을 첨가함으로써 지하수 오염 가능성을 좀 더 정확하게 평가할 수 있게 하였다.

선구조는 지표 부근의 구조를 반영하는 것으로 대체로 선형 지형을 나타내며, 주로 단층, 절리 및 습곡축 등의 지질구조선을 나타낸다. 단층과 절리 등과 관련된 선구조는 지하수 유동과 부존성을 결정하므로 지하수와 밀접한 관련이 있으나, 선구조의 연장성에 따른 지하수 부존성과 규모의 관계는 아직까지 정확히 규명되지는 않았다. 그러나 큰 규모의 선구조를 따라 그 주변부에 2차적인 균열구조가 우세하게 발달될 것으로 예상됨에 따라, 지하수 부존성을 높여 줄 것으로 보인다. 그리고 소규모의 선구조도 지역적으로 고르게 발달되고 이들의 교차점이 많을수록 많은 지하수 산출량을 기대할 수 있다. Lattman(1964)는 균열 추적과 짧은 선구조를 조사하여 균열이 많은 기반암에 있는 우물이 근처의 균열이 없는 같은 종류의 암석보다 10~1000배 많은 지하수 산출량을 보인다고 분석하였다. 이와 같이 실제로 선구조가 발달한 지역에서 측정할 경우 지하수 산출이 높으며 특히 선구조의 교차점에서 지하수 산출량이 더욱 많다고 알려져 있다. 그러므로 선구조의 밀도가 높게 나타나는 지역에서 지하수 부존성이 높을 것으로 예상된다.

본 연구에서는 충주호 주변지역에 대해 Landsat TM 센서 영상의 7개 밴드 중 5번, 7번 밴드를 선정하여 주성분 분석, 고역 통과 여과, 경계선 추출 및 개선 등의 영상처리기법을 적용하여 선구조를 추출하였다. 추출된 선구조들을 DRASTIC 시스템에 적용하기 위하여 1 km×1 km 크기의 격자내의 선구조의 발생 빈도와 총길이의 값을 이용하여 Hardcastle(1995)이 제안한 다음과 같은 분포밀도로서 정량화하였다.

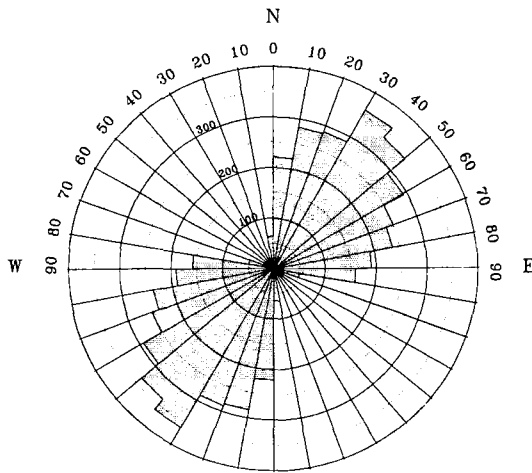


Figure 1. Frequencies of lineament trends in study area.

Table 9. Ranges, ratings and frequencies for lineament distribution density

Range of distribution density	Rating	Frequency
0	1	122
0~0.8	2	132
0.8~1.2	3	114
1.2~1.6	4	125
1.6~2.0	5	118
2.0~2.4	6	137
2.4~2.8	7	121
2.8~3.3	8	117
3.3~3.9	9	106
3.9~	10	97

$$\frac{\text{격자당 선구조 갯수}}{\text{평균 격자당 선구조 갯수}} + \frac{\text{격자당 선구조의 총 길이 (km)}}{\text{평균 격자당 선구조의 총 길이 (km)}} = \text{분포밀도 값} \quad (2)$$

연구지역인 충주호 주변 지역의 총 선구조 개수는 1068개였고, 평균 격자당 선구조 개수는 2.5개, 평균 격자당 선구조의 총 길이는 1150.5 m였다. 그리고 분포밀도 값의 평균은 2, 최소값은 0, 최대값은 7.05, 표준편차는 1.3이었다. 선구조의 방향은 북동쪽 방향이 우세하였다(Figure 1). 이렇게 선구조 분포밀도 값을 구한 후 빈도수를 고려하여 10 등분한 다음 DRASTIC 시스템의 등급 범위인 1부터 10까지 등급을 주고(Table 9), 일반 DRASTIC 시스템과 중첩하였다. 가중치는 선구조의 중요성을 고려하여 일반 DRASTIC 시스템의 가중치 중 가장 큰 값인 5를 주었다. 변형된 DRASTIC 시스템의 지수를 구하기 위한 식은 다음과 같다.

$$\text{변형된 DRASTIC 지수} = \text{일반 DRASTIC 지수} + (\text{분포밀도 값} \times 5) \quad (3)$$

사용자 인터페이스 프로그램 개발

사용자 인터페이스는 GIS 소프트웨어에 대해 잘 모르는 초보자도 사용하기 쉽고, 작업을 빠르게 할 수 있도록 하기 위하여

Table 10. Main menu which was developed for user interfaces

Display and Query	Display and query about data layers
General DRASTIC System	Analysis, display and query about general DRASTIC system
Agricultural DRASTIC System	Analysis, display and query about agricultural DRASTIC system
Modified DRASTIC System	Analysis, display and query about modified DRASTIC system
Statistical Analysis	Perform statistical analysis about data layers
Help	Help on this program
Quit	Quit this program

개발되었다. 본 사용자 인터페이스 프로그램은 UNIX 환경(SUN OS)에서 ARC/INFO 소프트웨어의 매크로 언어인 AML(Arc Macro Language)을 이용하여 개발되었다.

사용 방법

초보자도 쉽게 사용할 수 있도록 그래픽 사용자 인터페이스를 사용하였다. 본 프로그램은 마우스를 이용하여 원하는 메뉴를 고르고 원하는 기능을 실행시킬 수 있다. 또한 여러개의 메뉴를 화면에 띄어놓고 사용할 수 있고, 메뉴의 위치도 원하는 곳으로 이동시킬 수 있다. 그리고 도움말 기능이 있어 필요할 때 언제나 참조할 수 있다.

메뉴 설명

본 프로그램은 주메뉴와 하부메뉴로 구성되어 있다. 주메뉴와 그에 대한 설명은 Table 10과 같다.

각각의 주메뉴는 여러가지 기능을 하는 하부메뉴로 구성되어 있으며 그에 대한 설명은 Table 11~Table 16과 같다.

충주호 주변 지역에 대한 적용 연구

연구 지역 적용 연구의 전체적인 자료 흐름은 Figure 2와 같이 연구지역에 대해 자료를 수집하고 이를 토대로 데이터베이스를 구축한 다음 여기에서 DRASTIC 분석에 필요한 수리지질학적 요인들을 뽑아내어 일반 DRASTIC, 농업 DRASTIC, 변형된 DRASTIC 분석을 실시하였다.

연구 지역 현황

본 연구지역은 충청북도의 북동부 지역에 위치하고 있으며 행정구역상 충주시, 단양군, 증원군, 제원군 등으로 구성되어 있다. 그리고 축척 1/5만 지형도로 엄정, 제천, 영월, 충주, 덕산, 단양도곡(위도 36° 52' 30"- 37° 07' 30", 경도 127° 22' 30"-128° 22' 30")의 충주호 주변 지역으로 약 1182.17 km² 정도의 면적이다. 지형 및 지질은 중부내륙의 남한강 중상류 산악지대로서 충주호를 둘러싸고 있고, 육천지향사대에 속하며 암종과 암상이 다양하며 지질구조 또한 복잡하다. 기상은 년 평균 기온은 충주 11.1°C, 제천 10°C, 단양 8.7°C이고, 년 평균 강우량은 충주 1159.4 mm, 제천 1237.6 mm, 단양 1040.3 mm로 우리나라 연

Table 11. Display and query submenu

Display	Depth to Water	Display depth to water
	Net Recharge	Display net recharge
	Soil Media	Display soil media
	Topography	Display slope
	Hydraulic Conductivity	Display hydraulic conductivity
	Other Polygon Coverage	Display other polygon coverage
	Other Line Coverage	Display other line coverage
Identify	Depth to Water	Identify depth to water
	Net Recharge	Identify net recharge
	Soil Media	Identify soil media
	Topography	Identify slope
	Hydraulic Conductivity	Identify hydraulic conductivity
	Other Polygon Coverage	Identify other polygon coverage
	Other Line Coverage	Identify other line coverage
Select	Depth to Water	Select depth to water by logical expression
	Net Recharge	Select net recharge by logical expression
	Soil Media	Select soil media by logical expression
	Topography	Select slope by logical expression
	Hydraulic Conductivity	Select hydraulic conductivity by logical expression
	Other Polygon Coverage	Select other polygon coverage by logical expression
	Other Line Coverage	Select other line coverage by logical expression
Draw select	Depth to Water	Display selected depth to water in select menu
	Net Recharge	Display selected net recharge in select menu
	Soil Media	Display selected soil media in select menu
	Topography	Display selected slope in select menu
	Hydraulic Conductivity	Display selected hydraulic conductivity in select menu
	Other Polygon Coverage	Display selected other polygon coverage in select menu
	Other Line Coverage	Display selected other line coverage in select menu
List	Depth to Water	List selected depth to water attribute in select menu
	Net Recharge	List selected net recharge attribute in select menu
	Soil Media	List selected soil media attribute in select menu
	Topography	List selected slope attribute in select menu
	Hydraulic Conductivity	List selected hydraulic conductivity selected in select menu
	Other Polygon Coverage	List selected other polygon coverage attribute in select menu
	Other Line Coverage	List selected other line coverage attribute in select menu

Table 12. General DRASTIC system submenu

Analysis	Overlay hydrogeologic factors and calculate general DRASTIC system index
Display	Display general DRASTIC output coverage
Identify	Identify general DRASTIC output coverage
Select	Select records by general DRASTIC index
'Draw' Select	Display selected records
List	List selected record attribute
Clear	Clear screen
Clearset	Clear selected set

Table 13. Agricultural DRASTIC system submenu

Analysis	Overlay hydrogeologic factors and calculate agricultural DRASTIC index
Display	Display agricultural DRASTIC output coverage
Identify	Identify agricultural DRASTIC output coverage
Select	Select records by agricultural DRASTIC index
Draw Select	Display selected records
List	List selected record attribute
Clear	Clear screen
Clearset	Clear selected set

Table 14. Modified DRASTIC system submenu

Analysis	Overlay general DRASTIC and N and P load
Display	Display risk analysis output coverage
Identify	Identify risk analysis output coverage
Select	Select records by risk analysis output value
Draw Select	Display selected records
List	List selected record attribute
Clear	Clear screen
Clearset	Clear selected set

Table 15. Statistical analysis submenu

Calculate statistical value	Maximum, minimum, mean, standard deviation, sum
-----------------------------	---

Table 16. Help submenu

About DRASTIC system	Display this program overview
Using the system	Display how to use this program
General DRASTIC system	Display help on general DRASTIC system
Agricultural DRASTIC system	Display help on agriculture DRASTIC system
Modified DRASTIC system	Display help on modified DRASTIC system
ArcDoc	Display help on ARC/INFO

강우량 1159 mm와 비슷한 편이며, 6~8월에 전강우량의 57.3%가 집중된다. 인구수는 충주시 113345명, 제천시 102309명, 중

원군 85577명, 제원군 49452명, 단양군 62965명이고(1985년도), 농가인구 구성비는 충주시 13.1%, 제천시 12.0%, 제원군 80.4%, 중원군 78.3%, 단양군 44.0%이다(한국관광공사, 1988).

연구지역의 데이터베이스 구축
시추공 데이터베이스는 수리지질도와 충주댐 관련 시추조사

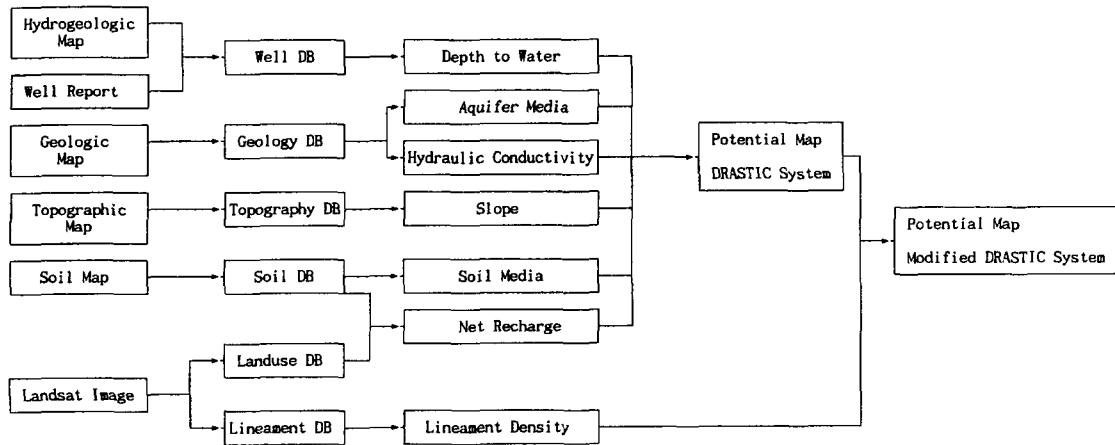


Figure 2. Data flow diagram.

자료 등을 이용하여 구축하여 총 229정을 데이터베이스로 입력하였다. 수리지질도는 1987년도 부터 1992년도까지 충청도지역에 대해 농어촌진흥공사에서 발간한 것을 사용하였다. 시추공 데이터베이스는 시추공의 고유 숫자, 시추지점의 표고, 지하수 위까지의 깊이, 토양대 깊이, 풍화대 깊이, 연암대 깊이 등으로 구성되어 있다.

지질 데이터베이스는 지질도를 이용하여 암상과 단층을 입력하여 지질 데이터베이스를 구축하였다. 수리전도도는 단층, 균열 등에 의해 차이가 많이 생기지만 자료가 부족하고, 단층, 균열 등은 변형된 DRASTIC 시스템에서 고려하였으므로 암상을 이용하여 값을 주었다. 또한 DRASTIC 시스템에서 제시된 수리전도도 분류 범위가 넓어 수리전도도 구분에 큰 어려움이 없었다. 사용된 지질도는 1965년 국립지질조사소에서 발간된 목계, 체천, 영춘, 충주, 황강리, 단양 도폭 지질도를 사용하였다. 넓이, 둘레, 암상, 대수층 등급, 수리전도도 등급 등으로 구성되어 있다.

토양 데이터베이스는 1978년 농촌진흥청 농촌기술연구소에서 발간한 정밀 토양도를 통일분류법으로 재분류 입력하였다. 토양 데이터베이스는 넓이, 둘레, 통일분류법에 의한 토양분류, 토양 매체 등급 등으로 구성되어 있다.

토지이용 데이터베이스는 토지이용도를 구하기 위해 1991년 3월에 촬영한 Landsat TM 인공위성 영상을 이용하였다. 이 영상을 영상처리하여 토지이용을 구분하고 ARC/INFO 자료로 변환시켜 토지이용 데이터베이스를 구축하였으며, 넓이, 둘레, 토지이용분류 등으로 구성되어 있다.

지형 데이터베이스는 국립지리원 발간한 지형도를 이용하여 입력, 구축하였다. 등고, 도로망, 철도망, 수계, 가구 등으로 분류 구축하였으며, 등고자료를 입력한 후 TIN(Triangulated Irregular Network)구조로 변경하여 경사도를 구하였다.

선구조 데이터베이스는 인공위성 영상을 처리하여 선구조를 구하였다. 이렇게 구한 선구조를 밀도로 표현하기 위해 일정크기의 격자 안의 선구조 길이와 빈도를 고려하여 선구조 밀도도를 구하였다.

연구지역의 수리지질학적 요인들

본 연구지역의 수리지질학적 요인들 즉 지하수위까지의 깊

Table 17. Range and rating of depth to water

Range(m)	Rating	Area(km ²)	Area Ratio(%)
less than 4.5	9	132.3	11
4.5 - 9.1	7	969.9	85
more than 9.1	5	42.9	4

이, 충진률, 대수층 매체, 토양 매체, 경사, 수리전도도에 대한 설명과 범위 및 등급은 다음과 같다. 비포화대의 영향은 자료 부족으로 분석에 포함시키지 못하였다.

지하수위까지의 깊이

수맥도와 충주댐 관련 보고서에서 총 229개 공에 대해 구축된 시추공 데이터베이스를 이용하여 회귀분석법으로 지하수위를 예측하였다. 지하수위 자료의 부족과 편중으로 지하수에 대해 고도와 지하수위의 관계를 회귀분석으로 구하였으며, 관계식은 다음과 같다.

$$wt = 0.990185203 \times s - 3.32505955 \quad r^2 = 0.985256719 \quad (4)$$

(s: 지표면의 고도, wt: 지하수위의 고도)

상관계수(r^2)의 값은 0.985로 비교적 높은 상관성을 갖는다. 이러한 식을 이용하여 연구지역에 대한 지하수위의 범위, 등급 및 면적은 Table 17과 같다.

충진률

충진률이란 강우량에서 유출량, 증발산량, 차단량을 뺀 것으로 대수층으로 침투하는 물의 양을 말한다. 강우가 지상에 도달하기까지 낙하 도중의 증발, 식물 등에 의한 차단 등에 의해 강우의 일부는 손실 되고 나머지는 지상에 도달하게 된다. 지상에 도달한 강우량의 일부는 흙의 표면을 통하여 침투하고, 그 초과분은 흙의 표면으로 흘러 유출을 형성하게 된다. 본 연구에서는 지표 유출량 계산은 토질과 토지 이용에 기초하는 SCS 방법을 이용하였다. 본 연구지역의 강수량 자료는 제천 측후소(기상월보, 1986-1993)에서 측정한 자료를 이용하였다. 증발산량은 보완관계식을 이용한 토지이용별 한강유역의 증발산량 추정값(신사철 외, 1995)을 이용하여 구하였고, 차단량은 다음과 같은

Table 18. Runoff, evapotranspiration, intercept and infiltration for landuse and soil type

Landuse	Soil Type	Area Ratio (%)	Precipitation (mm)	Runoff (mm)	Evapotranspiration (mm)	Intercept (mm)	Infiltration (mm)
Vegetation (loose)	A	8.2	1442.7	130.5	612.5	249.5	450.17
	B	27.4	1442.7	278.2	612.5	249.5	302.45
	C	6.5	1442.7	393.7	612.5	249.5	186.92
	D	2.4	1442.7	495.7	612.5	249.5	84.98
Vegetation (dense)	A	1.8	1442.7	21.6	628.8	266.7	527.62
	B	5.4	1442.7	156.1	628.8	266.7	393.06
	C	1.4	1442.7	276.9	628.8	266.7	272.77
	D	0.9	1442.7	359.1	628.8	266.7	190.15
Rice Field	A	6.7	1442.7	296.7	667	130.9	348.06
	B	3.0	1442.7	428.6	667	130.9	216.19
	C	5.4	1442.7	580.7	667	130.9	64.12
	D	0.9	1442.7	688.0	667	130.9	-43.25
Field	A	4.7	1442.7	200.9	667	130.9	443.93
	B	15.0	1442.7	291.9	667	130.9	352.93
	C	4.0	1442.7	376.2	667	130.9	268.56
	D	1.9	1442.7	428.5	667	130.9	216.34
Grass	A	0.3	1442.7	34.6	626.8	277.7	623.50
	B	0.5	1442.7	173.7	626.8	277.7	484.43
	C	0.2	1442.7	291.9	626.8	277.7	366.24
	D	0.2	1442.7	376.3	626.8	277.7	281.78
Residential Area	A	0.7	1442.7	358.5	230.4	0	853.79
	B	0.9	1442.7	512.3	230.4	0	700.05
	C	0.6	1442.7	640.0	230.4	0	572.34
	D	0.7	1442.7	710.4	230.4	0	501.88

Table 19. Ranges and ratings for net recharge

Range (mm)	Rating	Are (km ²)	Area Ratio (%)
0 - 50.8	1	18.4	3
50.8 - 101.6	3	36.4	3
101.6 - 177.8	6	1.8	0
177.8 - 254.0	8	164.4	15
more than 254.0	9	872.0	80

Table 20. Ranges and ratings of aquifer media

Type	Rating	Area (km ²)	Area Ratio (%)
Alluvium	8	117.9	10
Dolomite and limestone	6	389.0	34
Sand and shale, limestone and shale, slate and shale	5	2.5	1
Granite	4	308.8	27
Silicate, Chlorite, schist, amphibolite and gneiss	3	313.0	28

Horton(1983)의 식을 이용하여 구하였다.

$$I = a + bp \quad (5)$$

(I: 차단에 의한 손실, p: 총강우량, a, b: 차단손실 계수)

이 식은 특정강우에 대한 차단에 의한 손실을 계산하는 식이다. 위의 결과들을 이용하여 다음식을 이용하여 침투량을 구하였다.

$$INF = P - R - E - INT \quad (6)$$

(INF: 침투량, P: 강우량, R: 유출량, E: 증발산량, INT: 차단량)

본 연구지역의 토지이용 및 토질에 따른 지표유출량, 증발산량, 차단량, 침투량은 Table 18과 같다.

토지이용 데이터베이스와 토양 데이터베이스를 이용하여 구한 연구지역의 충전률에 대한 범위, 등급 및 면적은 Table 19와 같다.

대수층 매체

대수층 매체는 지질 데이터베이스를 이용하였다. 연구지역에

Table 21. Ranges and ratings of soil media

Range	Rating	Area (km ²)	Area Ratio (%)
Mountain	10	330.6	29
Loamy sand	9	0.8	0
Sandy loam	6	229.7	20
Loam	5	273.1	24
Silt loam	4	65.8	6
Clay loam	3	229.1	20
River deposit	2	5.7	1

대한 범위, 등급 및 면적은 Table 20과 같다.

토양 매체

토양 매체는 토양 데이터베이스를 이용하였다. 연구지역에 대한 범위, 등급 및 면적은 Table 21과 같다.

경사

경사는 지형 데이터베이스의 등고자료를 이용하여 경사도를 구하여 연구지역에 대한 병위, 등급 및 면적은 Table 22와 같다.

수리 전도도

수리 전도도는 지질 데이터베이스를 이용하여 구하였고, 연구지역에 대한 범위, 등급 및 면적은 Table 23과 같다.

분석 결과

위에서 설명한 수리지질학적 요인들을 GIS를 이용하여 각각 지도화하고 이들을 중첩, 분석하여 일반 DRASTIC 지수, 농업 DRASTIC 지수, 변형된 DRASTIC 지수의 분포를 분석 및 분류

Table 22. Ranges and ratings of slope

Range (%)	Rating	Area (km ²)	Area Ratio (%)
0 - 2	10	642.4	40
2 - 6	9	2.8	1
6 - 12	5	15.2	1
12 - 18	3	21.1	2
more than 18	1	643.6	56

Table 23. Ranges and ratings of hydraulic conductivity

Range (m/day)	Rating	Area (km ²)	Area Ratio (%)
0.04 - 4.1	1	1027.2	90
4.1 - 12.2	2	117.9	10

하였고, 이를 지도화하여 지하수 오염 가능성에 대해 Figure 3와 같이 쉽고 빠르게 파악할 수 있게 하였다.

식 (1)에 의한 일반 DRASTIC 시스템의 분석 결과값인 오염 가능성 지수(비포화대의 영향을 제외)는 총 58791개의 면에 대해 최소값이 57, 최대값이 139였으며, 평균값은 104.7, 표준편차는 12.0이었다. 지수의 범위에 해당하는 지수의 변동수와 면적은 Table 24와 같다. 지역, 제천군 지역이 상대적으로 지하수 오염 가능성이 높게 나타났으며, 단양군, 증원군 지역은 상대적으로 지하수 오염 가능성이 낮게 나타났다.

식 (1)에 의한 농업 DRASTIC 시스템의 분석 결과값인 지수는 총 58791개의 면에 대해 최소값이 67, 최대값이 184였으며, 평균값은 1340, 표준편차는 21.1이었다.

지수의 범위에 해당하는 지수의 변동수와 면적은 Table 25와 같다. 지수의 지역적인 분포는 일부 지역을 제외하고는 일반 DRASTIC 결과와 비슷하게 분포하였다.

변형된 DRASTIC 시스템은 일반 DRASTIC 시스템에 선구조 요인을 더한 것이다, 식 (3)에 의한 변형된 DRASTIC 시스템의 분석 결과값인 지수는 총 68792개의 면에 대해 최소값이 62,

Table 24. Ranges, frequencies and area of general DRASTIC system

Range of index	Area (km ²)	Area ratio (%)
less than 80	35.1	3
80 ~ 90	31.4	3
90 ~ 100	317.3	29
100 ~ 110	363.8	33
110 ~ 120	236.7	22
more than 120	104.3	10

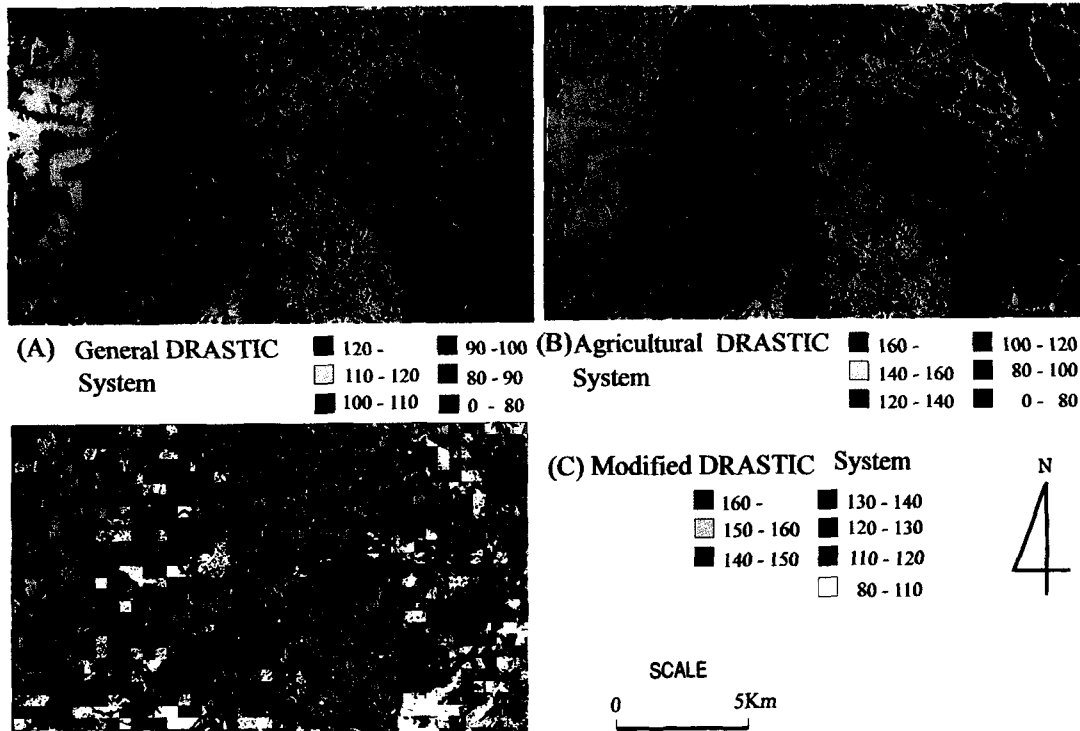


Figure 3. General, Agricultural, and Modified DRASTIC Maps.

최대값이 184였으며, 평균값은 131.9, 표준편차는 18.5였다. 지수의 범위에 해당하는 지수의 빈도수와 색 분류는 Table 26과 같다.

결론 및 토의

1. 광역적인 지하수 오염 가능성 분석을 GIS를 이용하여 정확하고, 쉽고, 빠르게 분석할 수 있었다. 지하수 오염 가능성 분석은 U.S. EPA에서 개발한 DRASTIC 시스템을 사용하였고, 여기에 선밀도를 추가한 변형된 DRASTIC 시스템을 개발하여 사용하였다.
2. 그래픽 사용자 인터페이스를 개발하여 지구정보시스템(GIS)에 대한 전문지식이 없는 사람도 쉽게 분석을 하고 그 결과를 이용할 수 있게 하였다. 본 그래픽 사용자 인터페이스 프로그램으로 마우스를 이용 해당 메뉴를 선택함으로써 자료를 분석하고 검색할 수 있게하였다.
3. 충주호 주변지역에 대한 지하수 오염 가능성 분석 결과 대체로 충주시 지역과 충주시 위쪽 지역, 제천군 지역이 상대적으로 지하수 오염 가능성이 높게 나타났으며, 단양군, 증원군 지역은 상대적으로 지하수 오염 가능성이 낮게 나타났다.
4. 지하수위 자료, 비포화대에 대한 자료, 물수지 분석을 위한 기초 자료의 부족으로 정확한 분석에 한계가 많았다. 그렇지만 본 DRASTIC 시스템이 광역적인 지역을 대상으로 상대적 비교만을 하였으므로 연구지역에 대한 1차적인 조사로는 가치가 있다고 생각된다. 앞으로 실제 시추 조사 자료를 이용하거나 시추 조사를 행하여 정확한 자료를 획득하고 물수지 분석을 위한 실측 자료를 획득, 적용하여 그 결과를 비교 검토함으로써 우리 환경에 맞는 시스템을 개발하여 보다 정확하고 체계적인 지하수 관리 체계 확립에 이용될 수 있어야 하겠다.

참고문헌

농어촌진흥공사, 1987-1992, 수맥도 조사보고서.

- 농촌진흥청, 1978, 정밀토양도.
- 선우중호, 1983, 수문학, 동명사, p. 92-93.
- 신사철, 澤本正樹, 김치홍, 1995, NOAA-AVHRR data를 이용한 중발산량추정, 한국수자원학회지, 28, p. 71-79.
- 원주지방환경처, 1991, 충주호의 수질오염 방지대책 연구.
- 한국관광공사, 1988, 충주호권역 관광종합 개발계획 환경영향평가서.
- 한국수자원공사, 1968, 충주댐예정지역 시추조사 보고서.
- 한국수자원공사, 1991, 수자원 관련법령 개선 연구.
- 한국수자원공사, 1993, 지하수자원 기본조사 보고서.
- 한국자원연구소, 1965, 한구가지질도(목계, 제천, 영춘, 충주, 황강리, 단양).
- Kenneth C. Hardcastle, 1995, Photolineament Factor: A new computer aided method for remotely sensing the degree to which bedrock is fractured. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 61, p. 739-747.
- Lars Rosen, 1994, A study of the DRASTIC methodology with emphasis on swedish conditoins. GROUND WATER, 32, p. 278-285.
- Lattman L. H. and Parizek R. R., 1964, Relationship between fracture traces and the occurrence of ground-water in carbonate rocks. Journal of Hydrology, 2, p. 73-91.
- Majid Ehteshami, Richard C. Peralta, Hubert Eisele, Howard Deer, and Terry Tindall, 1991, Assessing pesticide contamination to ground water: A rapid approach. GROUND WATER, 29, p. 862-868.
- Robert J. Kalinski, William E. Kelly, Istvan Bogardi, Ricard L. Ehrman, and Paul D. Yamamoto, 1994, Correlation between DRASTIC vulnerabilities and incidents of VOC contamination of municipal wells in nebraska. GROUND WATER, 32, p. 31-34.
- Uames, W. Merchant, 1994, GIS-based groundwter pollution hazard assessment: a critical review of the DRASTIC model. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 60, p. 1117-1127.