잠재오염원을 이용한 포항지역의 광역적 지하수 오염 위험성 평가

이사로[1※] · 김용성[2] · 김덕근[3]

Assessment of Regional Groundwater Pollution Hazard using Potential Pollutant of Pohang Area

Sa-Ro LEE[1※] · Yong-Seong KIM[2] · Deuk-Geun KIM[3]

요 약

본 연구에서는 미국 EPA에서 개발된 DRASTIC 시스템을 이용하여 지하수 오염 취약성을 평가 후, 잠재오염원 자료를 이용하여 광역적인 지하수 오염 위험성을 평가하였다. 이를 위해 포항지역에 대해 지하수면의 깊이, 충진량, 대수층, 토양층, 지형경사, 수리전도도, 선구조, 잠재오염원 등 수리지질학적 자료와 현장조사를 통해 잠재오염원을 공간 데이터베이스로 구축하였다. 구축된 공간 데이터베이스를 GIS 기반으로 DRASTIC 시스템에 적용하여 광역적 지하수 오염 취약성을 평가하였으며, 지하수 오염 취약성 평가 결과와 잠재오염원의 분포를 중첩 분석하여 지하수 오염 위험성을 평가하였다. 이를 통해 지하수 오염 위험성은 대수층의 지하수 오염에 대한 취약성과 잠재오염원의 분포 정도에 따라 4가지 유형으로 분류할 수 있으며, 그 유형에 따라 적절한 지하수 수질관리의 방향을 제시할 수 있도록 하였다. 또한 그 결과는 행정구역별로 도출하여 향후 관리상의 편의를 도모할 수 있도록 하였다. 본 연구에서 도입한 지하수 오염 위험성 평가 기법은 비교적 손쉽게 기존의 지하수 오염 취약성 평가를 실제 지하수 수질관리 계획 수립 시에 활용될 수 있다.

주요어 : 지하수, 지하수 오염 취약성, 지하수 오염 위험성, 잠재오염원, DRASTIC, GIS, 포항

ABSTRACT

The aim of the study is to assess groundwater pollution hazard of Pohang city using the DRASTIC system developed by the US Environmental Protection Agency (USEPA). Hydrogeological spatial databases of the system include information on depth to groundwater, net recharge, aquifer media, soil media, topographic slope, hydraulic conductivity, lineament and

2006년 3월 7일 접수 Received on March 7, 2006 / 2006년 6월 23일 심사완료 Accepted on June 23, 2006

1 한국지질자원연구원 지질자원정보센터 Geoscience Information Center, Korea Institute of Geoscience & Mineral Resources
2 (주)유신코페레이션 응용지질부, 경북대학교 지질학과, Yooshin Engineering Corporation Geology Dept., Kyungpook national university Geology Dept.
3 수자원공사 조사기획처 지하수조사팀 Groundwater Investigation Team, Korea Water Resources Corporation
※ 연락저자 E-mail: leesaro@kigam.re.kr

potential pollution source. With GIS based on these hydrogeological databases and the DRASTIC system, the regional groundwater vulnerability of the study area was assessed. Then the vulnerability was overlaid with potential pollution source and the regional groundwater pollution hazard was assessed by administrative district. From the results of the study, areas where need the counter plan for groundwater pollution and where should be managed for the groundwater pollution, are identified.

KEYWORDS : Groundwater, Groundwater vulnerability, Groundwater pollution hazard, Potential pollutant, DRASTIC, GIS, Pohang

서 론

수자원으로서 지하수의 효용성은 적정한 수질을 지속적으로 유지하면서 소요 수량을 안정적으로 공급하는데 있으므로, 지하수자원의 효율적 이용과 체계적인 관리를 위해서는 지하수의 산출특성과 함께 지하수 오염에 대한 정확한 평가 및 예측이 필요하다. 지하수에 영향을 미치는 잠재 오염원은 그 종류가 다양하고 변화양상 또한 매우 유동적인 관계로 오염원인 분석과 오염 물질의 이동 경로에 대한 예측이 어려우며, 지표수와 달리 지하수는 일단 오염물질이 대수층으로 유입, 확산되면 이의 정화와 원상복구에는 엄청난 비용과 시간이 소요된다. 따라서 경제적이고 효율적인 지하수 관리를 위해서는 적절한 오염방지 대책을 마련하여 지하수 및 대수층을 오염원으로부터 사전에 차단하는 것이 필수적이다. 합리적인 지하수의 오염방지 대책을 수립하기 위해서는 해당 지역의 잠재 오염원 분포현황 및 지역별 수문지질 특성에 따른 지하수의 오염 취약성을 정확하게 평가하여 이를 토대로 이들의 상호작용과 기타 토지이용 등 인위적 요인에 따른 지하수의 오염가능성을 예측하는 것이 중요하다.

따라서 본 연구의 목적은 1987년 미국 환경청(EPA)에서 개발한 DRASTIC 시스템(Aller 등 1997)을 적용하여 포항 지역의 지하수 오염 취약성(vulnerability)을 평가하고, 잠재 오염원 자료를 이용하여 지하수 오염 위험성(hazard)을 평가하는 것이다. 본 연구에서 지하수 오염 취약성 평가를 위해 적용한 DRASTIC 시스템은 대상 지역의 수문지질특성을 토대로 지하수 오염취약성을 간접적으로 평가하는 기법으로, 본 연구에서는 지하수 심도(D), 자연 함양량(R), 대수층 매질(A), 토양매질(S), 지형(T), 비포화대 매질의 영향(I), 수리전도도(C) 등 7개의 구성인자 별로 지하수 오염물질의 유입 및 이동성 등과의 상관성에 따라 가중치와 등급범위를 설정하여 곱한 값들을 합산하여 구한 DRASTIC 지수를 토대로 지하수의 상대적인 오염취약성을 평가하였다. 그리고 지하수 오염 취약성 결과에 연구지역의 잠재오염원을 중첩하여 행정구역별로 지하수 오염 위험성을 평가하였다. 본 연구에서는 기존의 수리지질학적인 공간 DB(건설교통부, 한국수자원공사, 2003)를 기반으로 GIS 공간분석 기법에 의거 각 항목별 주제도면을 작성하고 이를 중첩분석하여 평가하였다.

기존의 GIS를 이용한 DRASTIC 시스템 응용 연구에는 국외의 경우 Smith 등, 1994; Merchant, 1994; Rosen 등, 1994; Melloul와 Collin 1998; Secunda 등, 1998; Fritch 등, 2000a, b; Cameron와 Peloso, 2001; Mclay 등, 2001; Al-Zabet, 2002; Davis 등, 2002 등이 있다. 그리고 국내의 경우에는 민경덕 등, 1996; 이사로와 김윤종, 1996; 이사로와 최순학, 1997; Lee 등, 1998; 조시범 등, 1999; Kim와 Hamm, 1999; Lee, 2003; 조시범과 손호웅, 2004 등이 있다. 이러한 연구들과 본 연구의 주요한 차이점은 지하수 오염 취약성 뿐 아니라, 잠재 오염원을 고려하여 이에 따른 지하수 오염 위험성을 평가한 것이다.

연구 지역

연구지역은 경상북도 포항시로 동해안에 접해있는 항구도시이며, 경·위도상 북위 35°50′07″ - 36°19′49″, 동경 128°59′20″ - 129°34′57″에 위치하고 있다. 연구지역의 면적은 1,127.62㎢이다.

연구지역의 지형은 대체로 지질분포와 지질구조 요소를 반영하여, 산계는 대체로 양산단층대의 방향과 유사한 N10~20E방향성이 가장 우세하며, 이외에 양산단층에서 파생된 단층들의 방향을 따른 N60~70W의 소규모 산계들이 발달하고 있는 양상을 보인다. 서북부는 태백산맥의 지맥이 남주하면서 깊고 높은 지형기복의 험준한 산악지역을 형성하고, 해안 및 동남부로는 구릉지와 제 3기층이 융기된 소구릉선이 발달하여 시가지를 둘러싸고 있다. 화산암 및 화강암이 분포하고 있는 양산단층대의 서측의 주요 산계는 대개 해발고도 700m 이상의 산악지형을 이루고 있다. 이에 비해 제 3기 퇴적암이 주로 분포하고 있는 양산단층대의 동측은 해발고도 200m 미만의 얕은 구릉성 산지를 이루고 있다. 제 3기 말에 이어진 화산활동과 제 4기에 태백산맥이 형성되며 동해안의 융기작용으로 소구릉지 및 요철지형이 형성되며 지각변동에 의해 형산강과 영일만 및 장기반도가 형성되었다.

연구지역의 지질은 크게 중생대 백악기의 퇴적암류와 이를 관입한 화성암류 및 화산암류, 그리고 신생대 제 3기의 퇴적암류와 화산암류 및 화성암류로 구성되어 있다. 지질 분포를 규제하는 가장 큰 구조 요소는 경상북도 영덕에서 부산, 양산지방으로 연결되는 대규모 단층대인 N10°~20°E방향의 양산 단층과 N10°~20°W의 울산단층을 들수 있다. 본 양산 단층과 울산 단층을 경계로 서측은 중생대 백악기 화산암류 및 화강암류가 대부분의 분포를 보이고 있으며, 경상분지의 퇴적암층은 비교적 좁은 분포를 보이고 있다. 동측은 주로 신생대 제3기의 포항분지내의 퇴적층들이 분포하며, 남측에 일부 화산암류와 화강암류가 분포하는 양상을 보인다. 제4기층인 충적층은 주로 자갈과 모래로 구성된 퇴적층으로 하천과 계곡을 따라 제 지층을 부정합으로 피복하며 발달하고 있다. 연구지역의 지질도로는 1/250,000 안동(황재하 등, 1996) 및 부산(김동학 등, 1998) 지질도를 수정 이용되었다

DRASTIC 시스템

DRASTIC 시스템은 1987년 미국 EPA와 NGWA(National Groundwater Association)에서 지하수 오염취약성의 정성적인 평가를 목적으로 개발한 것으로 오염물질은 강수에 혼합되어 지표에서 지하로 이동된다는 가정을 전제로 한 광역적인 예비 분석 시스템이다. DRASTIC 시스템에서 적용되는 기본 가정은 1) 오염원은 지표상에 위치하며, 2) 오염물질의 지하유입은 강수량에 의존하며, 3) 오염물질은 물과 함께 유동하며, 4) 평가 대상 지역 면적은 0.4㎢ 이상이다. 이러한 DRASTIC 시스템의 구성 인자는 지하수위까지의 깊이(depth to water), 자연 함양량(net recharge), 대수층 매질, 토양 매질, 지형, 비포화대 매질의 영향, 대수층의 수리전도도 등 7가지로 구성되며, 각각의 등급값은 표 1과 같다. 결과적으로 DRASTIC 시스템에서 지하수 오염 취약성 DRASTIC 지수(index)로 표현되며, 이는 각 인자의 등급값 및 가중치를 곱한 후 모두 합한 것으로, 식(1)과 같다.

$$\text{DRASTIC Index} = DrDw+RrRw+ArAw+SrSw+TrTw+IrIw+CrCw \quad (1)$$

(D - Depth to water, R - net Recharge, A - Aquifer media, S - Soil media, T - Topography, I - Impact of vadose zone, C - hydraulic conductivity, r - Rating, w - Weight)

TABLE 1. Assigned weights and rating for DRASTIC features

Factors	Weight		Range	Rating	Typical rating
	General	Agricultural			
Depth to groundwater(cm)	5	5	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	
Net recharge(cm)	4	4	0 - 50.8	1	
			50.8 - 101.6	3	
			101.6 - 177.8	6	
			177.8 - 254.0	8	
			254.0 +	9	
Aquifer media	3	3	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
Soil media	2	5	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		
Topography(%)	1	3	0 - 2	10	
			2 - 6	9	
			6 - 12	5	
			12 - 18	3	
			18 +	1	
Impact of the vadose zone media	5	4	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 wit 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
Hydraulic conductivity (GPD/Ft^2)	3	2	1 - 100		1
			100 - 300		2
			300 - 700		4
			700 - 1000		6
			1000 - 2000		8
			2000 +		10

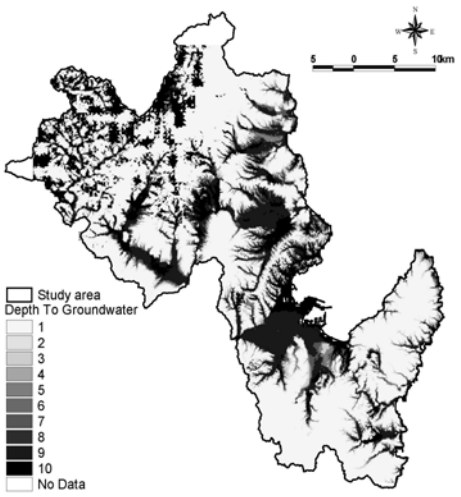
DRASTIC 지수는 지하수 오염에 대한 취약성과 민감성을 상대 평가하는 것이며, 지하수의 오염도를 직접적으로 나타내는 것은 아니다. 일반적인 평가방법에서 DRASTIC 지수는 23~226의 범위에 있으며, 농업지역에서 농약에 의한 오염가능성을 고려할 경우에는 DRASTIC 지수는 23~256의 범위를 갖는다. DRASTIC 지수는 값이 클수록 상대적으로 지하수 오염 가능성이 높고, DRASTIC 지수가 작으면 지하수 오염 가능성이 상대적으로 낮음을 지시한다.

DRASTIC 시스템의 적용

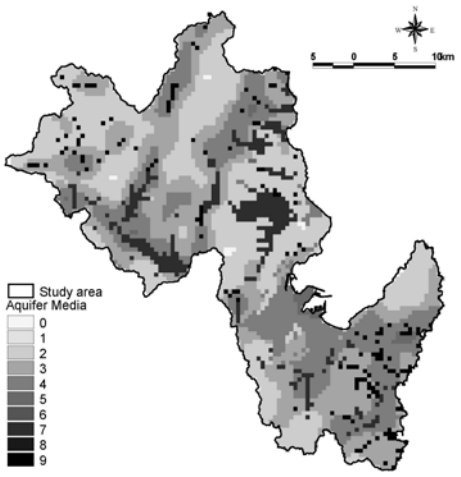
연구지역에 대한 지하수 오염취약성 평가를 위해 500m×500m 격자망(4,441개)을 설정하고 7개 인자에 대한 기본 정보를 추출하였다. 또한 일반적인 DRASTIC 시스템을 연구지역의 특성을 고려하여 수정 및 조정하여 연구지역의 오염취약성을 평가하였다. 각 인자에 대한 주제도면 작성 및 분석은 다음과 같다.

1. 지하수위 심도

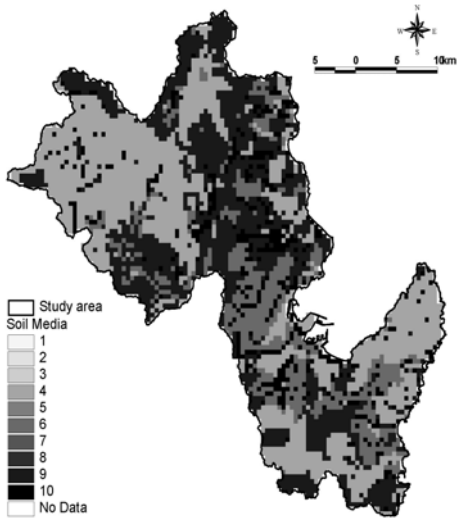
지하수위 심도는 지표면에서 지하수면까지의 깊이로서 지하수위 심도가 클수록 지표오염물질의 지하 유입 가능성이 적다. 지하수 심도는 지하수위 관측자료를 통해 지하수위를 모사하고, 모사된 지하수위와 지형고도와의 차를 이용해 연구지역 전반에 대해 평가하였다. 지하수위 입력자료는 '포항지역 지하수 기초조사'(건설교통부, 2003)에서 조사한 257개소의 지하수위 자료를 이용하였으며, 지하수위와 지형고도간의 상관관계를 이용한 만능 복합 크리깅(universal cokriging)을 통해 지하수위 분포를 모사하였다. 모사된 지하수위와 동일한 격자의 DEM(digital elevation model)의 차를 연산하여 지하수 심도분포도를 작성하고 이를 DRASTIC 시스템의 기준에 따라 7개 등급으로 재분류하여 전술한 격자자료를 구축하였다. 연구지역은 전체적으로 DRASTIC지수 5 이상이며, 일부 산악지역이 3에 해당한다. 연구지역의 지하수위 심도 분포는 그림 1(a)과 같다.



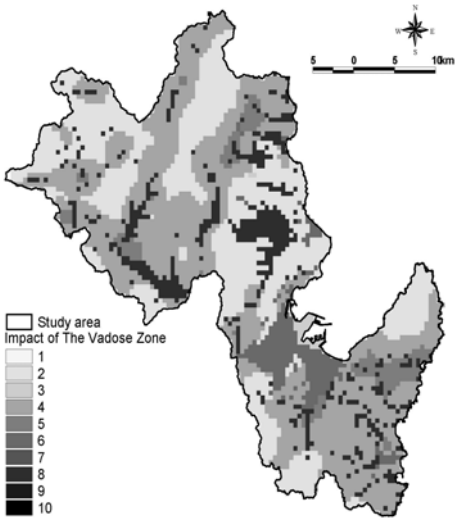
(a) Depth to groundwater



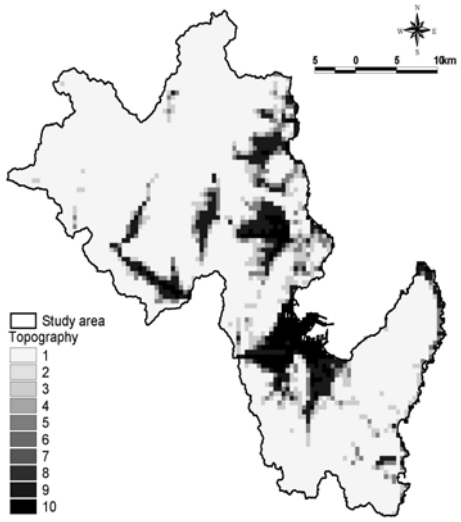
(b) Aquifer media



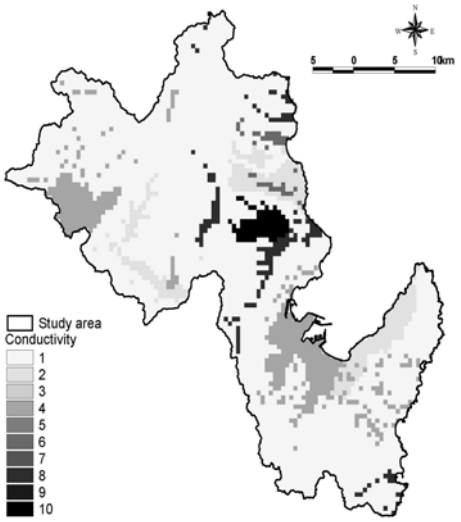
(c) Soil media



(e) Impact of the vadose zone



(d) Topography



(f) Conductivity

FIGURE 1. Input factor for DRASTIC system

2. 자연 함양량

지하수 함양량은 강우량에서 증발산량과 직접 유출량을 뺀 값으로, 포항기상대의 기상자료를 이용해 Penman식을 이용해 잠재증발산량을 산정하고, 연구지역의 5개 유역별로 실시한 유량 실측자료를 기초로 Tank 모델을 적용해 직접/중간 유출량을 추정하였으며, 이를 통해 수문학적 물수지 분석을 통해 도출된 기저유출량을 지하수의 자연 함양량으로 적용하였다. 증발산량은 잠재증발산량과 실제증발산량으로 구분되며, 잠재증발산량은 최대 가능증발산이며 본 연구에서는 포항 기상관측소의 기상자료를 Penman식에 적용하여 산정하였고, 실제증발산량은 토양수분평형법(soil moisture balance method)를 통해 산정하였다.

연구지역을 32개 소유역으로 구분하여 유역단위로 산정한 지하수의 자연 함양량은 182.2㎜~209.3㎜로 전반적으로 균질한 분포를 보이며 DRASTIC 등급으로는 8에 해당한다.

3. 대수층 매질

연구지역에 분포하는 대수층은 모래, 자갈로 구성된 공극성의 충적 대수층과 화강암류 및 편마암류 등으로 구성된 열극성의 암반 대수층으로 대별된다. 암반층의 대수성은 대체적으로 층리, 절리 및 단층 등 불연속면 또는 파쇄대의 발달상태와 투수성에 좌우되므로 표 2와 같이 암상에 따른 수문지질단위 분류 결과에 암반대수층에는 선구조의 발달 상태를, 충적층 대수층에서는 입도분포를 각각 반영하여 대수층의 매질을 평가하였다. 본 연구지역의 대수층 매질 분포는 그림 1(b)와 같다.

4. 토양 매질

토양 매질은 강우의 지하침투에 큰 영향을 미치는 지표피복인자로서 일반적으로 토양단면에서 통기대(vadose zone) 또는 비포화대(unsaturated zone) 상부의 부식토양을 의미한다. 지하수 오염성 평가에서는 지표 상부 토양의 투수성 및 배수에 직접 영향을 미치는 토양의 입도, 점착력, 수축/팽창성 및 토양의 피복 두께 등이 중요하다. 미국 토양보존국(U.S. Soil Conservation Servic, SCS)에서는 토양의 수문학적 조건을 고려하여 A~D의 4가지 유형으로 분류하며 이는 토양 유출률의 역순이다. 이러한 토양의 수문학적 SCS분류를 DRASTIC의 토양매질 평가에 직접 적용하는 데에는 다소 무리가 있으므로, 개략토양도(1:50,000, 농림부)를 기초로 침투율, 배수 및 유출성 및 기왕의 조사에서 실시한 입도분석성과를 고려하여 재분류한 토양분류성과를 기초로 토양매질을 평가하였으며 조정된 평가등급은 표 3과 같다. 연구지역의 토양 매질 분포는 그림 1(c)와 같다.

TABLE 3. Rating of soil media

Soil media	SCS Soil Type	Rating
Rock	A, D	10
Sand	B	9
Sandy loam	C	6
Clay loam	C,D	4

TABLE 2. Rating of aquifer media considering lineament and grain size

Aquifer media	Original rating	Modified rating			
Metamorphic/igneous	2-5	Modified rating considering lineament			
		<0.2	0.2~0.4	0.4~0.8	0.8 <
		2	3	4	5
Sand and gravel	4-9	Modified rating considering grain size			
		Fine	Medium	Coarse	Gravel
		4	5	7	9

5. 지형경사

지형경사는 지하수의 함양과 직접 유출을 지배하는 인자로서 지형 경사가 급할수록 유속이 높아져 유출율은 증가하고 함양율은 감소하는 반면에 완만한 경사지형에서는 반대 현상이 나타나며 이에 따라 지하수의 오염 가능성이 높아진다. 지형경사를 구하기 위해 1:25,000 수치지형도를 이용하여, DEM을 작성하고, 이 DEM을 이용하여 지형경사도를 구하였다. 지형경사에 따른 오염취약성을 평가하였다. 연구지역의 지형 경사 분포는 그림 1(d)와 같다.

6. 비포화대 매질의 영향

일반적으로 비포화대 매질은 토양층 하단에서 지하수면 상단 사이의의 포화되지 않은 구간을 지칭한다. 따라서 물이 비포화대 구간을 따라 하부로 유동하는 과정에서 생물학적 분해, 중화작용, 여과, 화학반응, 흡착 및 분산 등이 발생된다. 피압 대수층의 경우 대수층을 구속하는 압층은 대부분 오염물질의 대수층 내로 유입을 차단하므로 비포화대 매질의 영향이 가장 낮은 등급을 적용된다. 연구지역은 충적지하수의 대부분이 자유면 지하수 형태의 천층 지하수이다. 암반대수층에 있어 비포화대 매질은 대수층 매질의 경우와 마찬가지로 단층 및 선구조의 발달상태를 반영하여 표 4와 같이 평가등급을 조정하였다. 연구지역의 비포화대 매질의 영향 분포는 그림 1(e)와 같다.

7. 대수층의 수리전도도

대수층의 수리전도도는 충적층과 암반층으로 구분하여 '포항지역 지하수 기초조사' 등 기존의 지하수 관련 조사 및 연구 자료를 종합해 총 57개의 수리전도도 자료를 데이터베이스로 구축하고, 소유역별 대수층의 대표적인 수리전도도를 도출하여 확대 적용하였다. 소유역내에 수리전도도 자료가 없는 경우는 해당 유역의 평균을 적용하였다. 암반대수층은 대부분 1등급에 해당하며 연구지역 북부의 소동천 유역 및 자호천 본류은 2등급으로 분류된다. 충적대수층은 2-10등급까지 분포하며 연구지역의 충적대수층 평균 수리전도도는 4등급에 해당한다. 연구지역의 수리전도도 분포는 그림 1(f)와 같다.

광역적 지하수 오염 취약성 및 위험성 평가

1. 오염 취약성 평가

본 절에서는 전술한 바와 같이 연구지역을 500m×500m 격자 단위로 분할하여 DRASTIC 시스템의 구성 인자별로 해당되는 오염지수를 산정하고 이를 합산하여 구한 격자 단위의 DRASTIC 지수를 토대로 연구지역의 지하수 오염 취약성 분포도를 작성하였다. 이에 따른 DRASTIC 지수값을 도면으로 나타내면 그림

TABLE 4. Rating of vadose zone

Vodose zone	Original rating	Modified rating			
		Modified rating considering lineament			
Metamorphic/igneous	2-8	<0.2	0.2~0.4	0.4~0.8	0.8 <
		2	3	4	5
Silt/clay	2-6	3			
Sand and gravel with significant silt and clay	4-8	6			
Sand and gravel	6-9	8			

2와 같다. 연구지역의 DRASTIC 지수는 59-208의 범위를 보이며, DRASTIC 지수값 분포 면적은 표 5와 같다.

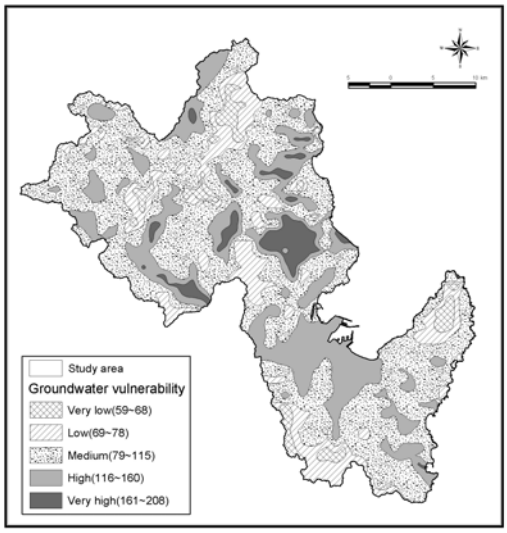


FIGURE 2. Groundwater vulnerability map

2. 오염 위험성 평가

본 연구에서는 '포항지역 지하수 기초조사'에서 2002년에 현장조사를 통해 구축한 잠재오염원자료를 이용하였다. 조사된 잠재오염원은 총 434개소였고, 행정구역별 잠재오염원 현황은 표 6 및 그림 3과 같다. 잠재오염원의 분류기준 중 보편적으로 알려진 6군 33종의 경우 대상범위가 광범위하여 현장조사에 적용키는 무리가 있다. 따라서 당 조사에서는 해당 시군에서 관리중인 환경관련 자료와 주유소 및 축산농가에 대한 자료를 확보하고 이를 우선으로 현장조사를 실시하였으며, 잠재오염원의 분류기준을 단순화하여 8가지로 분류하였다. 유해화학물질은 플라스틱 제조업 등, 축산폐수는 각종 축산 농가, 특정수질유해물질은 유독물을 다량 이용하는 병원 등, 폐기물매립장은 쓰레기매립지, 폐기물처리는 폐기물처리업체, 폐수배출시설은 각종 산업체 및 세차장, 폐수처리는 폐수처리장 등이 해당된다.

본 연구에서는 잠재오염원 현장조사 결과와 오염취약성 평가를 이용하여 포항지역의 지하수 오염 위험성을 4가지 유형으로 분리하였다. 행정구역별 잠재오염원 수를 집계하고 이때 축산폐수 배출시설은 사육 두수에 따라 잠재적 오염가능성을 차등을 두어 사육 두수를 기준으로 50두 까지 1, 100두 까지 2, 500두 까지 3, 500두 이상은 4로 가중치를 부여하였다. 이에 따라 연구지역의 행정구역별 잠재오염원의 개소 수는 0-45까지의 범위를 보이며 표 6에 정리한 바와 같다. 또한 지하수 오염취약성은 행정구역별로 오염취약성 지수의 평균치를 구해 전술한 표 6의 오염취약성을 구분하였다. 그리고 이러한 지하수 오염 취약성을 행정구역별 잠재오염원과 중첩하여 지하수 오염 위험성을 평가하였다. 지하수 오염 위험성 분류에 따른 행정구역수는 표 8과 같다.

잠재오염원의 등급은 1(오염원이 매우 많음), 2(오염원이 많음), 3(오염원이 보통), 4(오염원이 적음), 5(오염원이 매우 적음)까지

TABLE 5. Distribution of groundwater vulnerability index

Pollution vulnerability	Pollution vulnerability Index	Area (㎢)
Very low	59 ~ 68	120.00
Low	69 ~ 78	224.25
Medium	79 ~ 115	440.25
High	116 ~ 160	221.00
Very high	161 ~ 208	104.75

5등급으로 분포하며, 오염 취약성은 I(매우 취약함), III(취약함), III(보통), IV(취약하지 않음)까지 4등급으로 분포한다. 표 7을 보면 잠재오염원이 매우 많거나, 많은 상위 2개 등급(1, 2)에서 대수층의 오염취약성이 매우 취약하거나, 취약한 경우(I, II)는 유형 1로 분류하였고, 오염취약성이 보통이거나, 취약하지 않은 경우(III, IV)는 유형 2로 분류하였다. 그리고 잠재오염원이 보통이거나, 적은 경우(3, 4)에서 대수층의 오염취약성이 매우 취약하거나, 취약한 경우 (I, II) 유형 3으로 분류하였고, 잠재오염원이 매우 적으나 (5), 대수층의 오염취약성이 매우 취약한 경우(I)는 유형 4로 분류하였다. 이에 따른 연구지역의 행정구역별 지하수 오염위험성 평가결과 및 평가도는 표 8 및 그림 4와 같다. 이러한 유형들을 보이는 지역들은 지하수 오염 위험성이 높은 지역들이며, 나머지 지역들은 지하수 오염 위험성이 낮은 지역들이다. 특히 유형 1을 보이는 지역은 지하수 오염 위험성이 매우 높은 지역들이다.

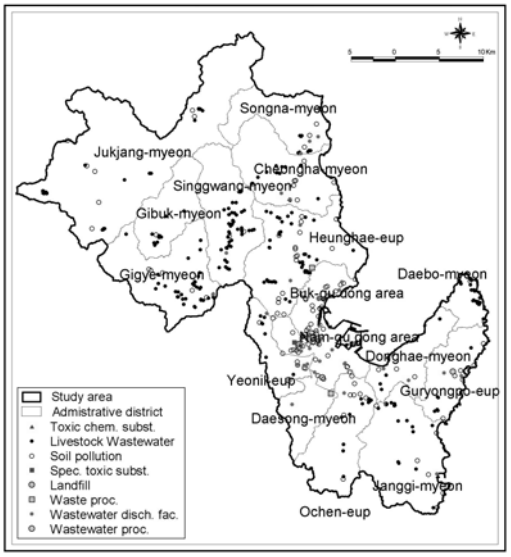


FIGURE 3. Potential pollutant map

TABLE 6. Potential pollutant

Area	Total	Toxic chemical substance	Livestock wastewater	Soil pollution	Specific toxic substance	Landfill	Waste processing	Waste water discharge facility	Waste water processing
Total	434	1	251	130	2	1	2	45	2
Guryongpo-eup	15	-	6	6	-	-	-	2	1
Yeonil-eup	18	-	7	6	-	1	-	4	-
Ocheon-eup	23	-	13	9	-	-	-	1	-
Daebo-myeon	4	-	-	1	-	-	1	2	-
Donghae-myeon	10	-	4	4	-	-	-	2	-
Janggi-myeon	23	-	15	7	-	-	-	1	-
Daebo-myeon	22	-	20	2	-	-	-	-	-
Heunghae-eup	66	-	47	16	-	-	1	2	-
Singwang-myeon	47	-	43	2	-	-	-	2	-
Cheongha-myeon	25	1	13	7	-	-	-	4	-
Songna-myeon	17	-	10	4	-	-	-	3	-
Gigye-myeon	42	-	35	5	-	-	-	2	-
Jukjang-myeon	32	-	25	7	-	-	-	-	-
Gigye-myeon	14	-	13	1	2	-	-	-	-
City area	76	-	-	53	-	-	-	20	1

TABLE 7. Distribution of potential pollutant and pollution vulnerability per administrative district

Number of administrative district		Level of pollution vulnerability				Type of pollution hazard				
		I	II	III	IV	Rating	I	II	III	IV
Level of potential pollutant	1	-	1	4	1	1	Type 1		Type 2	
	2	-	3	8	-	2				
	3	2	7	13	1	3	Type 3			
	4	1	14	22	2	4				
	5	8	21	81	6	5	Type4			

TABLE 8. Groundwater pollution hazard per administrative district

Administrative district		Pollution vulnerability level	Potential pollutant level	Pollution hazard level
Guryongpo-eup	Seongdong-ri	III	2	2
Yeonil-eup	Goejeong-ri	II	4	3
	Dongmun-ri	II	4	3
	Ocheon-ri	II	4	3
	Hakjeon-ri	III	2	2
Ocheon-eup	Gujeong-ri	II	4	3
Ocheon-eup	Segye-ri	II	2	1
Ocheon-eup	Yongdeok-ri	II	4	3
Daesong-myeon	Songdong-ri	II	4	3
Donghae-myeon	Yakjeon-ri	II	4	3
Janggi-myeon	Mopo-ri	II	4	3
	Sin-gye-ri	II	4	3
	Yangpo-ri	II	4	3
Daebo-myeon	Daebo-ri	IV	1	2
Heunghae-eup	Namseong-ri	I	3	3
	Deokjang-ri	II	3	3
	Masan-ri	I	5	4
	Mangcheon-ri	I	5	4
	Buksong-ri	I	5	4
	Seongnae-ri	I	5	4
	Yakseong-ri	I	5	4
	Yangbaek-ri	II	4	3
	Yongjeon-ri	I	4	3
	Yongcheon-ri	I	5	4
	Iin-ri	III	1	2
	Hakseong-ri	I	5	4
	Hakcheon-ri	III	2	2
Singgwang-myeo	Sajeong-ri	II	3	3
	Sangeup-ri	III	1	2
	Jukseong-ri	II	3	3
	Toseong-ri	II	2	1
Cheongha-myeon	Sangdae-ri	III	2	2
	Seojeong-ri	II	4	3
	Wolpo-ri	I	5	4
	Pilhwa-ri	II	3	3
	Hadae-ri	I	3	3
Songna-myeon	Gwangcheon-ri	III	2	2
	Josa-ri	II	4	3
	Hasong-ri	II	3	3
Gigye-myeon	Naedan-ri	II	2	1
	Munseong-ri	III	2	2
	Seonggye-ri	II	3	3
	Hyeonnae-ri	II	3	3
Jukjang-myeon	Duma-ri	III	2	2
	Sang-ok-ri	III	1	2
Gibuk-myeon	Gwancheon-ri	II	4	3
	Daegok-ri	III	2	2
Buk-gu dong area		III	1	2
Nam-gu dong area		II	1	1

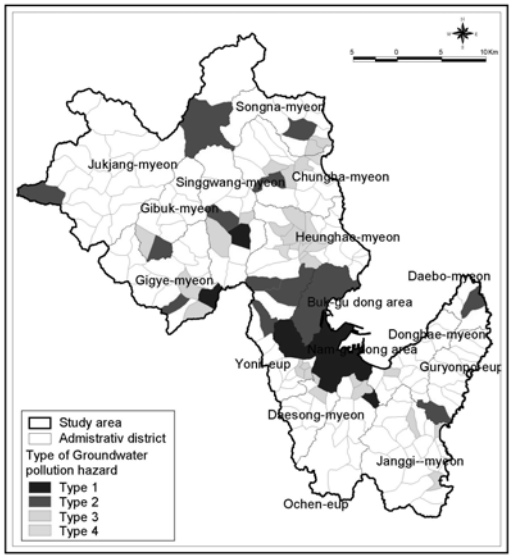


FIGURE 4. Groundwater pollution hazard map

결론 및 토의

본 연구결과 행정구역별 지하수 오염 위험성이 높은 지역으로 지하수 오염에 대해 우선관리 가 필요한 지역은 유형 1 지역으로 오천읍 세교리, 신광명 토성리, 기계면 남단리, 시내지역(남구) 등이 있다. 다음의 관리 대상지역으로는 유형 2, 3, 4 지역으로 구룡포읍 성동리, 기계면 문성리, 성계리, 현내리, 기북면 관천리, 대곡리, 대보면 대보리, 송동리, 동해면 약전리, 송라면 광천리, 조사리, 하송리, 시내지역(북구), 신광면 사정리, 상읍리, 죽성리, 연일읍 괴정리, 동문리, 오천리, 학전리, 오천읍 구정리, 용덕리, 장기면 모포리, 신계리, 양포리, 죽장면 두마리, 상옥리, 청하면 상대리, 서정리, 월포리, 필화리, 하대리, 흥해읍 남성리, 덕장리, 마산리, 망천리, 북송리, 성내리, 약성리, 양백리, 용전리, 용천리, 이인리, 학성리, 학천리 등이 해당된다. 따라서 이러한 지역은 보다 체계적인 지하수 관리가 요구된다.

이러한 연구결과인 광역적 지하수 오염 취약성 및 위험성 평가 결과는 지하수의 개발 및 보전 관리에 유용하게 활용될 수 있는 기초자료로서 지역단위의 토지이용, 수자원계획 수립, 지하수 정화와 원상 복구 및 기초환경 시설의 입지 선정 등에 필요한 정보의 제공이 가능하다.

사 사

본 연구에 적극 협조해 주신 한국수자원공사 지하수 조사팀 및 (주)유신코퍼레이션 직원분들께 감사드립니다. KAGIS

참 고 문 헌

건설교통부. 2003. 포항지역 지하수 기초조사. 462.

권영일, 이인기. 1973. 1:50,000 도평 도폭 지질도. 국립지질광물연구소.

김동학, 황재하, 박기하, 송교영. 1998. 1:250,000 부산 지질도. 한국자원연구소.

농림부. 개략토양도. 1:50,000.

민경덕, 이영훈, 이사로, 김윤종, 한정상. 1996. DRASTIC을 이용한 지하수오염 가능성 분석 및 그래픽 사용자 인터페이스 개발연구. 지하수환경 3(2):101-109.

이사로, 김윤종. 1996. DRASTIC SYSTEM을 이용한 지하수 오염 가능성 및 위험 분석 연구. 한국GIS학회지 4(1):1-11.

이사로, 최순학. 1997. GIS 기법을 이용한 영광지역의 지하수 오염 취약성 평가. 지하수환경 4(4):223-230.

조시범, 민경덕, 우남칠, 이사로. 1999. GIS를 이용한 경기도 평택군 지역의 지하수 오염 가능성 평가 연구. 지하수환경 6(2):87-94.

조시범, 손호웅. 2004. 지하수오염 예측을 위한 GIS 활용연구. 지구물리 7(2):121-134.

황재하, 김동학, 조등룡, 송교영. 1996. 1:250,000 안동 지질도. 한국자원연구소.

Al-Zabet, T.. 2002. Evaluation of aquifer vulnerability to contamination potential

using the DRASTIC method. Environmental Geology 43:203-208.

Aller, L., T. Bennett, J.H. Lehr, R.J. Petty and G. Hackett. 1987. DRASTIC: A standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic settings. US Environmental Protection Agency, EPA/600/2-87/036, 622.

Cameron, E. and G.F. Peloso. 2001. An application of fuzzy logic to the assessment of aquifers' pollution potential. Environmental Geology 40:1305-1315.

Davis, A.D., A. Long and M. Wireman. 2002. KARSTIC: a sensitivity method for carbonate aquifers in karst terrain. Environmental Geology 42:65-72.

Fritch, T.G., C.L. Mcknight, J.C. Yelderman and J.G. Arnold. 2000a. An aquifer vulnerability assessment of the Paluxy Aquifer, Central Texas, USA, using GIS and a modified DRASTIC approach. Environmental Management 25(3):337-345.

Fritch, T.G., C.L. McKnight, J.C. Yelderman, S.L. Dworkin and J.G. Arnold. 2000b. A predictive modeling approach to assessing the groundwater pollution susceptibility of the Paluxy Aquifer, Central Texas, using a Geographic Information System. Envrionmental Geology 39(9):1063-1069.

Kim, Y. and S. Hamm. 1999. Assessment of the potential for groundwater contamination using the DRASTIC/EGIS technique, Cheongju area, South Korea. Hydrogeology Journal 7:227-235.

Lee, S., D. Lee, S. Choi, W. Kim and S. Lee. 1998. Regional groundwater pollution susceptibility analysis using DRASTIC system and lineament density. 1998 User Conference Proceedings, San Diego.

Lee, S.. 2003. Evaluation of waste disposal site using the DRASTIC system in Southern Korea. Environmental Geology 44:654-664.

McLay, C.D.A., R. Dragten, G. Sparling and N. Selvarajah. 2001. Predicting groundwater nitrate concentrations in region of mixed agricultural land use: comparison of three approaches. Environmental Pollution 115:191-204.

Melloul, A.J. and N. Collin. 1998. A proposed index for aquifer water-quality assessment: the case of Israel's Sharon region. Journal of Environmental Management 54(2):131-142.

Merchant, J.W.. 1994. GIS-based groundwater pollution hazard assessment: A critical review of the DRASTIC model. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing 60(9):1117-1127.

Rosen, L.. 1994. A study of the DRASTIC methodology with emphasis on Swedish conditions. Ground Water 32(2):278-285.

Secunda, S., M.L. Collin and A.J. Melloul. 1998. Groundwater vulnerability assessment using a composite model combining DRASTIC with extensive agricultural land use in Israel's Sharon region. Journal of Environmental Management 54(1):39-57.

Smith, P.A., H.D. Scott and T. Fugitt. 1994. Influence of geographic database scale on prediction of groundwater vulnerability to pesticides. Journal of Soil Contamination 3(3):1-14. KAGIS