

## DRASTIC과 지하수 수질에 의한 창원시 지하수 오염취약성 평가

함세영<sup>1\*</sup> · 정재열<sup>1</sup> · 김무진<sup>1</sup> · 김인수<sup>1</sup> · 황한석<sup>2</sup>

<sup>1</sup>부산대학교 지질학과, <sup>2</sup>(주)삼중엔지니어링

## Assessing Groundwater Vulnerability Using DRASTIC Method and Groundwater Quality in Changwon City

Se-Young Hamm<sup>1\*</sup>, Jae-Yeol Cheong<sup>1</sup>, Moo-Jin Kim<sup>1</sup>, In-Soo Kim<sup>1</sup> and Han-Seok Hwang<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Dept. of Geology, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

<sup>2</sup>Samjung Consultant, Changwon 135-080, Korea

This study assesses groundwater vulnerability to contaminants in industrial and residential/commercial areas of the city of Changwon, using DRASTIC technique and groundwater data. The DRASTIC technique was originally applied to situations in which the contamination sources are at the ground surface, and the contaminants flow into the groundwater with infiltration of rainfall. Mostly the industrial area has higher DRASTIC indices than the residential/commercial area. However, a part of the residential/commercial area having much groundwater production and great drawdown is more contaminated in groundwater than other industrial and the residential/commercial areas even if it has lowest DRASTIC indices in the study area. It indicates that groundwater contamination in urban areas can be closely related to excessive pumping resulting in a lowering of the water level. The correlation coefficient between minimum DRASTIC indices and the degree of poor water quality for 10 districts is as low as 0.40. On the other hand, the correlation coefficients between minimum DRASTIC indices and the groundwater discharge rate, and between minimum DRASTIC indices and well distribution density per unit area are 0.70 and 0.87, respectively. Thus, to evaluate the potential of groundwater contamination in urban areas, it is necessary to consider other human-made factors such as groundwater withdrawal rate and well distribution density per unit area as well as the existing seven DRASTIC factors.

**Key words** : DRASTIC, Changwon City, groundwater vulnerability, contamination sources, groundwater production rate

본 연구는 DRASTIC 기법과 지하수 자료를 이용하여 창원시의 공단지역과 주거상업지역의 지하수 오염취약성을 평가하였다. DRASTIC 기법은 원래 오염원이 지표에 있으며 강우의 침투와 함께 오염물질이 지하수로 유입되는 조건에 적용시켰었다. 공단지역은 대체로 주거상업지역보다 높은 DRASTIC 평가지수를 가진다. 그러나, 주거상업지역 중 용지동지역은 연구지역 중에서 가장 낮은 DRASTIC 평가지수를 가짐에도 불구하고 지하수 오염정도가 높다. 이러한 사실은 도시지역의 지하수 오염이 과잉양수와 이에 따른 지하수위 하강과 밀접하게 관련된다는 것을 지시한다. 각 동별 최소 DRASTIC 평가지수와 먹는물 수질 부적합의 상관계수는 0.4로서 비교적 낮다. 그러나, 각 동별 최소 DRASTIC 평가지수와 지하수 사용량의 상관계수는 0.70이고, 각 동별 최소 DRASTIC 평가지수와 지하수 공 분포밀도의 상관계수는 0.87로서 높게 나타난다. 따라서, 도시지역에서 지하수 오염취약성을 평가하기 위해서는 기존의 DRASTIC 평가요소 뿐만 아니라 지하수 사용량과 지하수 공 분포 밀도와 같은 인위적인 요소도 함께 고려하는 것이 필요하다.

**주요어** : DRASTIC, 창원시, 지하수 오염취약성, 오염원, 지하수 사용량

### 1. 서 론

지하수오염 취약성 평가는 토지이용계획이나 지하수

오염 모니터링을 위하여 전세계적으로 점점 더 많이 활용되고 있다. 지난 수십년간 지하수오염 취약성 평가는 여러 나라에서 지하수오염 방지계획의 한 부분으로 수

\*Corresponding author: hsy@pusan.ac.kr

행되어 왔다(Barber 등, 1993; Vrba와 Zaporozec, 1994). Barber 등(1993)은 지하수오염 취약성 평가를 위해서 DRASTIC에 의한 경험적인 방법, 물리적인 성질을 기초로 한 결정론적(deterministic) 방법, 확률적인 방법, 추계론적(stochastic) 방법에 대해서 검토하였다. 그리고 추계론적 방법이 공간적인 수리지질 자료의 가중치를 고려한 모델링을 이용하므로 상대적으로 더 유용한 지하수오염 취약성 평가방법이라고 제안하였다. 스웨덴 환경청(Swedish Environmental Protection Agency)은 기존의 지하수오염 취약성 평가 방법을 검토하는 계획들을 수립하였으며 새로운 평가방법을 개발하였다(Maxe와 Johansson, 1998).

우리나라 대부분의 도시지역에서는 지표수원의 물을

정수하여 수도물로 공급하고 있다. 지표수원의 용수는 수질오염에 취약한 단점을 가지고 있으며, 대용량을 확보하기가 용이하나 갈수기에는 양적으로 부족한 경우가 있다. 이에 대하여 지하수는 지표수원 중심의 용수 공급 단점을 보완할 수 있는 대체수원이며 수질도 상대적으로 우수한 수자원이다. 2002년 한 해 동안 119만공의 시설로부터 34억7천 $m^3$ 의 지하수를 이용한 것으로 보고되어, 2001년보다 지하수공이 약 8만공이 증가되었으며 사용량도 약 2억6천 $m^3$  늘어났다(건설교통부와 한국수자원공사, 2003). 이와 같이 지하수 사용량은 산업화와 인구증가로 인하여 꾸준히 증가하고 있는 추세이다. 그러나 그동안 무분별한 지하수 개발로 인하여 지하수 고갈, 지하수 수질악화 등의 지하수장애

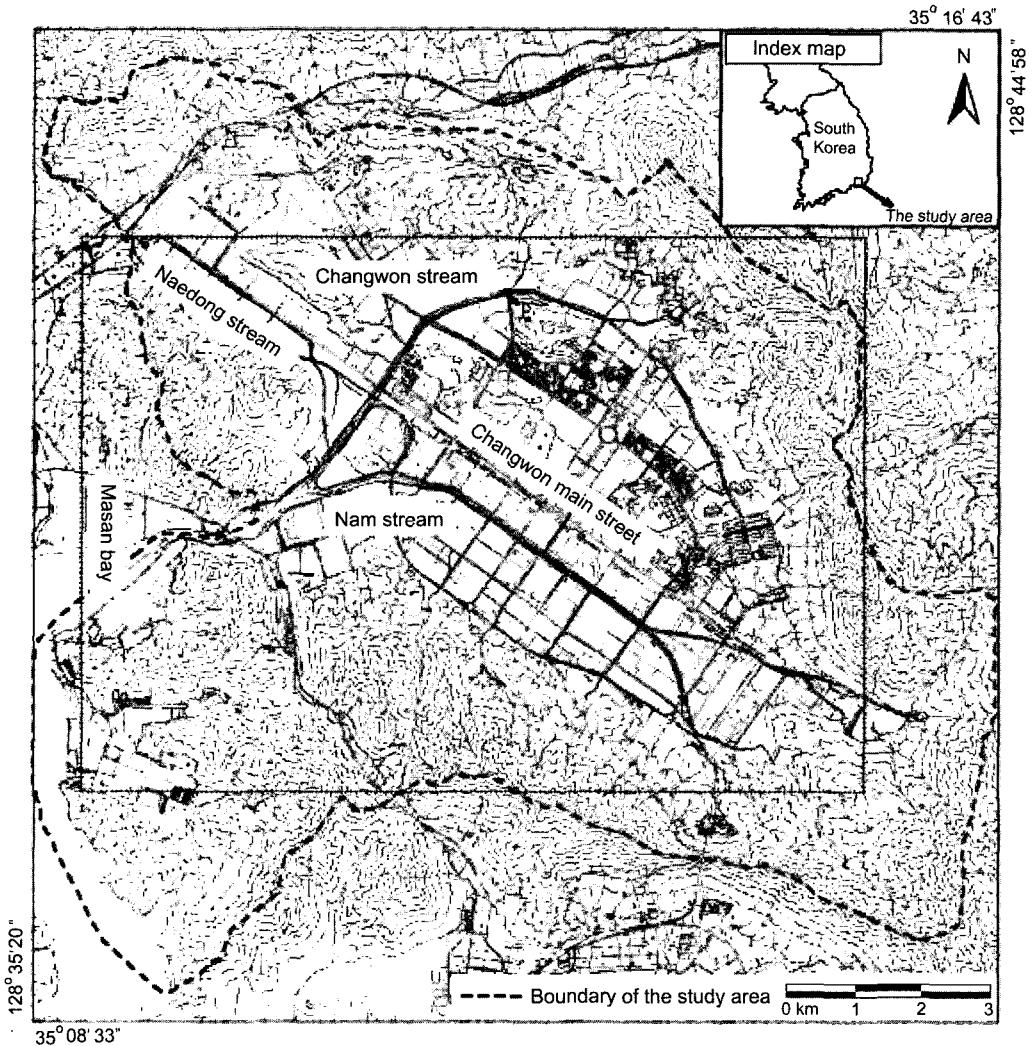


Fig. 1. Geography of the study area.

가 지역적으로 발생하는 경우도 있다. 지하수는 지하 매질을 통한 자연정화의 단계를 거치므로 수질 측면에서 지표수 보다 안전하지만 대수층이 한번 오염되고 난 후에는 원래 상태로 복원이 어려운 단점도 가지고 있다. 따라서 대수층이 안전하게 보존될 때에만 지하수가 지표수보다 양호한 수자원으로서의 가치를 유지할 수 있다. 지하수오염을 사전에 방지하기 위해서는 심각한 오염상태에 도달하기 전에 지하수의 오염 취약성을 평가하여 지하수 환경 보존대책을 수립하는 것이 중요한 관건이 된다.

지하수 오염 취약성을 간접적, 경험적으로 평가하는 기법 중 대표적인 것으로는 1987년 미국 환경보전청(EPA)과 미국지하수학회(NGWA)가 개발한 DRASTIC 평가가 있다. DRASTIC 평가는 외국에서 뿐만 아니라 (Al-Adamat 등, 2003; Kalinski 등, 1994; Melloul과 Collin, 1998; Rosen, 1994; Secunda 등, 1998), 국내에서도 활용도가 비교적 높은 평가방법 중 하나이다 (Kim과 Hamm, 1999; 민경덕 등, 1996; 김윤종 등, 1995, 1993; 이사로와 김윤종, 1995). Kim과 Hamm (1999)은 DRASTIC과 SCS방법을 이용하여 충주지역의 지하수오염을 평가하였다. 민경덕 등(1996)은 기존 DRASTIC에 선구조의 분포밀도를 더하여서 DRASTIC 지수를 구하였다. 이는 우리나라에서 많이 개발되고 있는 암반지하수가 단층, 균열 등의 구조대에서 산출하는 점에 착안한 것이다.

본 연구는 인구밀도가 높고, 지하수 이용시설이 밀집한 국내 도시지역 중 창원시 지역을 대상으로 DRASTIC 평가와 지하수 수질 자료를 바탕으로 지하수 오염을 평가하였으며, DRASTIC 평가의 문제점을 검토하였다. 또한 이로부터 도시지역에 보다 적절한 지하수오염 취약성 평가방법을 모색하였다.

## 2. 지형 및 지질

연구지역은 해발고도 801.7m의 불모산을 최고봉으로 주변은 300~700m의 산계로 경계되어지는 분지를 형성하고 있다(Fig. 1). 수계는 주변 산계에서 발원한 소지류들이 창원시 중앙을 북서-남동방향의 남천과 북동-남서방향의 창원천에 합류하여 남서방향으로 흐르는 마산만으로 유입된다. 본 역의 수계는 유로의 방향으로 보면 전반적으로 지표면의 경사 방향에 따라 흐르는 필중하천(consequent stream)의 형태를 보여준다. 수계의 형태는 이수지상 내지 아각력상을 나타내고 있다. 이러한 수계 형태는 창원시 수계들이 2차적으로 일부 단층

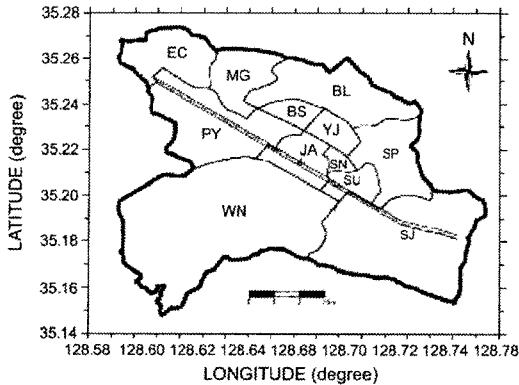
운동과 같은 지질구조적인 규제를 받아 형성되었음을 시사하고 있다.

지질은 중생대 백악기 경상누층군 하양층군에 대비되는 퇴적암류(진동층, 정병산층)를 최하위층으로 하고, 이를 부정합으로 피복하고 있는 유천층군의 화산암류(팔용산용회암, 주산안산암질암) 그리고 이를 관입하고 있는 불국사관입암군(섬록암, 석영섬록암, 화강섬록암, 아다멜라이트, 장석반암, 암맥류) 그리고 이들 모든 지층을 부정합으로 피복하고 있는 제4기 충적층과 봉적층으로 구성되어 있다(김중환, 김정택, 1963; 황한석 등, 1998). 진동층은 창원시의 동쪽 경계인 대암산, 비음산 일원에 북서 방향의 긴 대상으로 분포하고 있다. 본 층은 층리의 발달이 현저하고, 주로 암회색 혹은 회색 셰일, 회색 알코즈사암으로 구성되고, 약간의 역암을 협재하고 있다. 진동층의 층리의 주향, 경사는 각각 N30°E, 10~20°NW를 나타낸다. 정병산층은 창원시 북동쪽에 위치하는 정병산과 남쪽의 장벽산 산정 부근에 소규모로 분포하고 있으며, 호은펠스, 안산암질암류, 응회질셰일 및 응회암의 호층으로 구성된다. 층리의 주향, 경사는 각각 N40°E, 15~30°NW이다.

봉적층은 창원시 북부와 서부지역의 산록완사면에 주로 분포하고 있다. 산릉부에 발달하고 있는 기반암으로부터 산사태에 의해 형성된 돌서렁(talus) 퇴적물로 각력, 모래 그리고 점토로 구성되어 있다. 충적층은 창원시 중앙부 즉, 창원시가지를 형성하며 특히 창원천과 남천 주변에 넓은 충적평야를 형성하고 있다. 대부분 하성퇴적물로서 점토, 모래, 자갈로 구성되며 그 두께는 대략 10m 정도이다.

## 3. 연구방법

단위면적당 지하수 이용률이 높은 경상남도 창원시 일원(읍면지역 제외)에 대해서 DRASTIC 평가와 지하수 수질자료를 바탕으로 지하수오염 취약성을 평가하였다. 창원시는 경남의 도청소재지로서 인구 약 50만의 공업도시이며 계획도시이다. 연구지역은 창원시 지역 중 12개 동(의창동(EC), 명곡동(MG), 봉림동(BL), 반송동(BS), 용지동(YJ), 중앙동(JA), 사파동(SP), 상남동(SN), 가음정동(GU), 팔룡동(PY), 웅남동(WN), 성주동(SJ) 지역)으로 되어 있다. 창원시는 북서-남동 방향의 일직선의 창원대로를 중심으로 북동쪽은 주거상업 중심의 신도시(의창동, 명곡동, 봉림동, 반송동, 용지동, 중앙동, 사파동, 상남동, 가음정동), 남서쪽은 공단지역(팔룡동, 웅남동, 성주동)으로 나누어진다(Fig. 2).



**Fig. 2.** Administrative districts of the study area. EC: Euichang-Dong; MG: Mycongog-Dong; BL: Bonglim-Dong; BS: Bansong-Dong; YJ: Yongji-Dong; JA: Jungang-Dong; SP: Sapa-Dong; SN: Sangnam-Dong; GU: Gaumjeong-Dong; PY: Palyong-Dong; WN: Wungnam-Dong; SJ: Seongju-Dong.

지하수오염가능성을 평가하기 위하여 연구지역의 12개 동에 대하여 DRASTIC 평가를 실시하였다. 그리고 DRASTIC 평가 결과와 1996년 창원 전역에서 수집된 551개의 지하수 수질검사 자료를 비교하고 상관성을 분석하였다. 지하수오염은 지층의 수리지질학적 성질에 크게 좌우된다. 한편, 행정적인 지하수오염 관리를 위해서는 행정단위별로 지하수오염을 평가하는 것이 요구된다. 따라서 본 연구에서는 수리지질학적 성질로부터 얻어진 지하수오염 자료를 행정단위별 및 토지용도별로 평가하는데 중점을 두었다.

#### 4. 지하수 수질 특성

연구지역에 대하여 1996년도 551개 지하수 수질분석 자료의 각 동별 최대값, 최소값, 평균값을 구하였다 (Table 1, Table 2). 1995년 지하수법 제정 이후 1997년부터는 수질부적합 등의 사유로 인하여 인위적인 폐공처리가 많았으므로 오염가능성 평가방법의 적정성을 연구하는데 있어서 실제 지하수 오염 상태를 파악하기가 용이하지 않아서 1996년의 지하수 수질분석 자료를 이용하였다(황한석 등, 1998). 수질분석 자료는 음용수 281개, 생활용수 225개, 공업용수 44개, 기타 1개이다. 음용수 수질분석항목 중 수은, 시안, 페놀, 다이아지논, 파라티온, 말라티온, 페니트로티온, 카바릴, 에틸벤젠은 검출되지 않았다. 납, 세레늄, 음이온계면활성제는 몇 개 시료에서만 미량으로 검출되었다. 6가크롬은 공단지역인 성주동에서, 카드뮴은 팔룡동에서 그리고 디칼로

로메탄은 웅남동에서만 검출되었다.

주거상업 지역의 경우, 가음정동(GU)은 과망간산칼륨소비량이 평균 1.4 mg/l, 화학적 산소소비량이 평균 1.4 mg/l, 경도는 평균 170 mg/l이다(Table 1). 명곡동(MG)에서는 아연이 평균 0.28 mg/l, 사파동(SP)에서는 톨루엔이 평균 0.0004 mg/l 검출되었다. 상남동(SN)에서는 일반세균이 평균 1500 CFU/ml, 황산이온이 평균 60 mg/l 검출되었다. 용지동(YJ)에서는 크실렌이 평균 0.00011 mg/l, 의창동(EC)에서는 질산성 질소가 평균 6.4 mg/l, 구리는 평균 0.0078 mg/l이다. 중앙동(JA)에서는 대장균군이 평균 450 mg/l, 1,1,1-트리클로로에탄이 평균 0.0018 mg/l이고, 총고용물질은 평균 290 mg/l로서 가장 높은 농도를 보인다.

공업지역의 경우, 성주동(SJ)에서는 비소가 평균 0.00071 mg/l, 6가크롬이 평균 0.00071 mg/l, 벤젠이 평균 0.0016 mg/l, 알루미늄이 평균 0.087 mg/l 검출되었다. 웅남동(WN)에서는 불소가 평균 0.21 mg/l, 디칼로메탄이 평균 0.0026 mg/l, 철은 평균 0.09 mg/l, 망간은 평균 0.037 mg/l 검출되었다(Table 2). 팔룡동(PY)에서는 암모니아성 질소가 평균 0.075 mg/l, 카드뮴이 평균 0.001 mg/l, 테트라클로로에틸렌(PCE)이 평균 0.0044 mg/l, 트리클로로에틸렌(TCE)이 평균 0.092 mg/l, 염소이온은 평균 430 mg/l로 가장 높은 농도를 보인다.

주거상업지역과 공업지역의 먹는물 수질기준을 초과하는 특징적인 지하수 오염 물질을 보면, 주거상업 지역에서는 질산성 질소가 특징적이며, 공업지역에서는 TCE와 PCE가 특징적이다(Fig. 3). 그 외에도 지하수 공 자체의 청결성 유지 미비나 시료 채취시에 오염에서 유래되는 것으로 보이는 일반세균과 대장균이 검출된다.

동별 먹는물 수질 적합, 부적합율을 보면, 551개 자료 중 466개가 수질기준에 적합하며, 85개가 부적합한(전체 부적합율 15.4%) 것으로 나타났다(Table 3). 공업지역인 성주동(SJ), 웅남동(WN) 구역의 수질부적합율은 11.9, 13.0%로서 전체 부적합율보다 낮다. 분석평가 대상 자료 수가 작고, 1개 아파트단지에 10개의 자료 중 4개의 자료가 집중된 상남동(SN) 구역을 제외하면, 신도시 주거상업지역에서는 지하수공의 분포밀도가 높은 반송동(BS), 명곡동(MG), 중앙동(JA), 용지동(YJ), 사파동(SP) 구역이 전체평균보다 높은 부적합율을 나타낸다. 야외에서 지하수공 시설을 확인한 결과 대규모 공장은 잠재오염원을 가지고 있어 지하수의 염가능성이 주거상업지역보다 높지만 지하수공 자체 청결상태는 주거상업지역보다 대체로 양호하다. 막

Table 1. Groundwater contaminants in residential/commercial area.

District name	Statistics	General bacteria	Total coliforms	pH	F (mg/l)	NH <sub>4</sub> -N (mg/l)	NO <sub>3</sub> -N (mg/l)	TCA (mg/l)	PCE (mg/l)	TCE (mg/l)	Benzene (mg/l)	Toluene (mg/l)	Xylene (mg/l)
GU	Max.	1.9E+2	8.0E+0	8.1	5.0E-1	5.0E-2	7.6E+0	9.0E-3	1.0E-3	3.7E-2	2.0E-3	5.0E-3	0.0E+0
	Min.	0.0E+0	2.0E+0	6.6	0.0E+0	0.0E+0	2.0E-1	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0
	Mean	3.0E+1	4.0E+0	7.1	1.9E-2	1.1E-2	3.0E+0	3.2E-4	1.5E-5	2.3E-3	1.6E-4	4.2E-4	0.0E+0
MG	Max.	3.3E+3	5.0E+1	8.5	1.0E+0	5.0E-2	1.6E+1	0.0E+0	8.0E-3	9.0E-3	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0
	Min.	0.0E+0	4.0E+0	5.8	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0
	Mean	4.6E+2	2.3E+1	7.4	1.8E-1	1.1E-2	2.9E+0	0.0E+0	2.9E-4	2.9E-4	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0
BS	Max.	1.5E+3	8.0E+1	7.4	4.0E-1	3.0E-2	3.9E+0	0.0E+0	0.0E+0	3.0E-3	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0
	Min.	5.9E+1	5.0E+0	6.4	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0
	Mean	7.8E+2	4.3E+1	6.9	1.5E-1	1.8E-2	1.8E+0	0.0E+0	0.0E+0	1.9E-4	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0
BL	Max.	2.4E+2	1.6E+3	7.8	2.0E-1	3.0E-2	1.0E+1	2.0E-3	0.0E+0	4.0E-3	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0
	Min.	1.6E+1	2.0E+0	6.3	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0
	Mean	1.1E+2	4.2E+2	7.0	1.3E-1	1.0E-2	2.0E+0	6.7E-4	0.0E+0	6.0E-4	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0
SP	Max.	2.2E+3	0.0E+0	8.3	1.3E+0	1.9E-1	5.2E+0	6.0E-3	1.0E-3	5.0E-3	2.0E-3	8.0E-3	0.0E+0
	Min.	0.0E+0	0.0E+0	6.6	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0
	Mean	1.4E+2	0.0E+0	7.4	4.4E-2	3.9E-2	1.7E+0	1.8E-4	4.8E-5	4.8E-4	8.8E-5	5.0E-4	0.0E+0
SN	Max.	6.0E+3	0.0E+0	7.9	0.0E+0	2.0E-2	4.6E+0	0.0E+0	0.0E+0	5.0E-3	4.0E-3	1.0E-3	0.0E+0
	Min.	8.0E+0	0.0E+0	6.6	0.0E+0	0.0E+0	1.1E+0	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0
	Mean	1.5E+3	0.0E+0	7.3	0.0E+0	5.7E-3	3.1E+0	0.0E+0	0.0E+0	6.3E-4	5.7E-4	1.4E-4	0.0E+0
YJ	Max.	1.5E+3	1.6E+3	9.1	1.2E+0	8.0E-2	4.3E+1	1.0E-3	0.0E+0	5.0E-3	7.0E-3	6.0E-3	5.0E-3
	Min.	0.0E+0	4.0E+0	6.9	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0
	Mean	8.4E+1	3.2E+2	7.7	7.2E-2	7.2E-3	2.0E+0	2.2E-5	0.0E+0	2.1E-4	5.9E-4	1.3E-4	1.1E-4
EC	Max.	1.1E+3	2.3E+1	8.0	3.0E-1	3.0E-2	1.9E+1	0.0E+0	1.0E-2	1.4E-1	4.0E-3	0.0E+0	0.0E+0
	Min.	8.0E+0	2.0E+0	6.7	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0
	Mean	2.3E+2	1.1E+1	7.3	1.4E-1	1.3E-2	6.4E+0	0.0E+0	4.3E-4	6.3E-3	1.0E-3	0.0E+0	0.0E+0
JA	Max.	1.3E+3	1.6E+3	8.3	7.0E-1	7.0E-2	1.4E+1	2.6E-2	1.0E-3	9.0E-3	5.0E-3	0.0E+0	0.0E+0
	Min.	0.0E+0	2.0E+0	5.9	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0
	Mean	2.2E+2	4.5E+2	6.9	6.7E-2	1.2E-2	4.4E+0	1.8E-3	2.2E-5	6.4E-4	2.5E-4	0.0E+0	0.0E+0

Table 1. Continued.

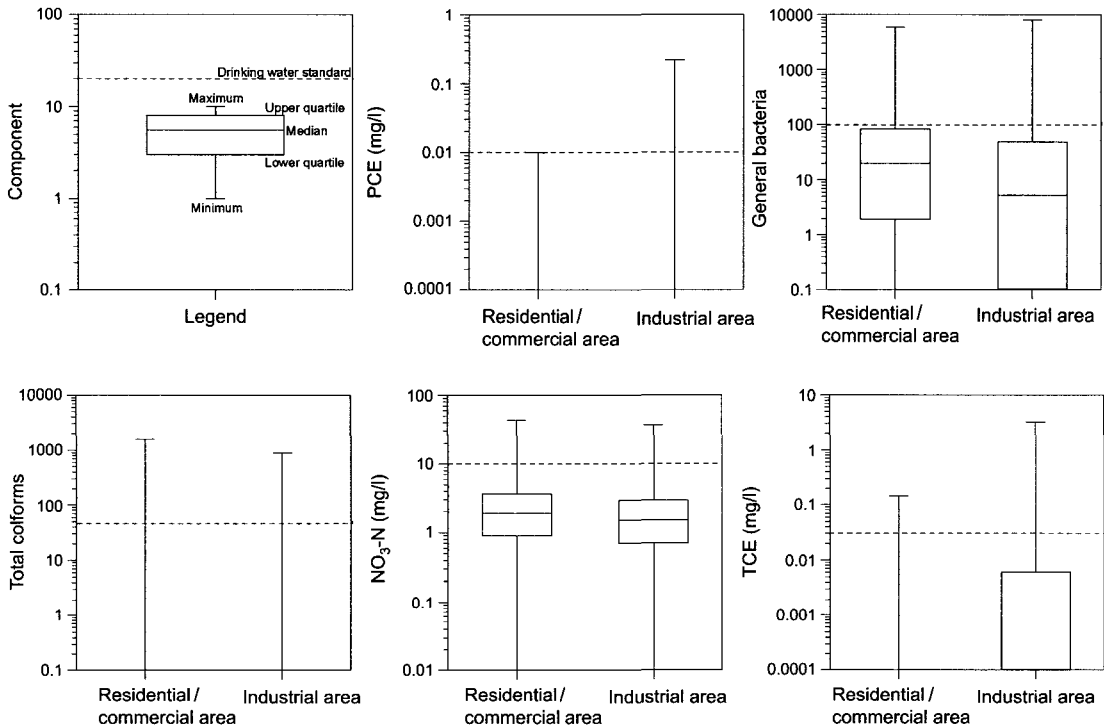
District name	Statistics	Total solids (mg/l)	Hardness	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/l)	Cl <sup>-</sup> (mg/l)	Consump. of KMnO <sub>4</sub>	COD (mg/l)	Cu (mg/l)	Zn (mg/l)	Fe (mg/l)	Mn (mg/l)	Al (mg/l)	As (mg/l)	Color
GU	Max.	4.2E+2	2.7E+2	1.1E+2	1.5E+2	5.0E+0	1.7E+1	1.8E-2	1.9E-1	6.0E-2	2.4E-1	2.0E-1	2.6E-2	1.0E+0
	Min.	1.2E+2	5.3E+1	1.0E+0	7.0E+0	3.0E-1	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0
	Mean	2.6E+2	1.7E+2	4.2E+1	4.0E+1	1.4E+0	1.4E+0	1.5E-3	2.5E-2	1.6E-3	8.6E-3	5.9E-2	3.9E-4	6.2E-1
MG	Max.	7.6E+2	3.8E+2	5.2E+1	5.4E+2	1.9E+0	3.4E+0	1.5E-2	1.0E+0	3.0E-2	1.6E-2	2.4E-1	0.0E+0	3.0E+0
	Min.	7.8E+1	4.1E+1	0.0E+0	3.0E+0	3.0E-1	2.0E-1	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0
	Mean	2.4E+2	1.4E+2	1.6E+1	5.9E+1	1.0E+0	1.2E+0	1.4E-3	2.8E-1	2.7E-3	3.0E-3	5.8E-2	0.0E+0	8.2E-1
BS	Max.	2.4E+2	1.4E+2	6.1E+1	3.7E+2	9.0E-1	2.6E+0	0.0E+0	5.4E-2	0.0E+0	1.5E-2	2.3E-1	0.0E+0	1.0E+0
	Min.	1.4E+2	9.7E+1	6.0E+0	9.0E+0	3.0E-1	3.0E-1	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0
	Mean	1.9E+2	1.2E+2	2.7E+1	5.9E+1	6.3E-1	1.3E+0	0.0E+0	2.6E-2	0.0E+0	3.8E-3	7.0E-2	0.0E+0	7.5E-1
BL	Max.	2.9E+2	1.5E+2	2.7E+1	1.1E+2	9.0E-1	2.0E+0	0.0E+0	2.1E-1	0.0E+0	0.0E+0	1.1E-1	0.0E+0	1.0E+0
	Min.	1.1E+2	6.0E+1	4.0E+0	3.0E+0	4.0E-1	1.0E-1	0.0E+0	4.3E-2	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0	1.0E+0
	Mean	1.8E+2	9.4E+1	1.2E+1	3.1E+1	6.0E-1	9.6E-1	0.0E+0	1.1E-1	0.0E+0	0.0E+0	6.0E-2	0.0E+0	1.0E+0
SP	Max.	5.3E+2	2.4E+2	6.1E+1	2.7E+2	3.1E+0	2.0E+0	2.8E-2	5.4E-1	0.0E+0	2.1E-2	2.0E-1	1.6E-2	4.0E+0
	Min.	7.0E+1	2.0E+1	0.0E+0	3.0E+0	3.0E-1	5.0E-1	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0
	Mean	1.7E+2	8.9E+1	1.2E+1	3.0E+1	1.0E+0	1.0E+0	1.9E-3	9.2E-2	0.0E+0	8.8E-4	4.8E-2	6.7E-4	1.0E+0
SN	Max.	4.4E+2	2.1E+2	9.7E+1	9.7E+1	2.7E+0	7.0E-1	0.0E+0	4.8E-1	0.0E+0	0.0E+0	1.2E-1	0.0E+0	1.0E+0
	Min.	1.5E+2	6.9E+1	2.1E+1	1.5E+1	3.0E-1	7.0E-1	0.0E+0	5.7E-2	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0	1.0E+0
	Mean	2.7E+2	1.4E+2	6.0E+1	4.0E+1	1.2E+0	7.0E-1	0.0E+0	2.2E-1	0.0E+0	0.0E+0	2.9E-2	0.0E+0	1.0E+0
YJ	Max.	4.8E+2	2.9E+2	1.1E+2	2.0E+2	2.5E+0	2.0E+0	5.0E-2	1.2E+0	6.0E-2	6.4E-2	2.0E-1	0.0E+0	2.0E+0
	Min.	4.6E+1	3.1E+1	0.0E+0	2.0E+0	3.0E-1	1.0E-1	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0
	Mean	1.9E+2	9.8E+1	1.7E+1	2.8E+1	9.2E-1	5.6E-1	4.6E-3	9.4E-2	2.4E-3	2.3E-3	3.8E-2	0.0E+0	6.4E-1
EC	Max.	3.0E+2	1.8E+2	8.4E+1	5.0E+1	1.9E+0	2.1E+0	2.1E-2	2.6E-1	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0
	Min.	1.1E+2	7.4E+1	9.0E+0	0.0E+0	6.0E-1	2.0E-1	0.0E+0	2.3E-2	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0
	Mean	2.1E+2	1.3E+2	3.7E+1	2.6E+1	1.2E+0	9.0E-1	7.8E-3	1.0E-1	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0
JA	Max.	8.1E+2	2.9E+2	4.8E+1	3.6E+2	2.8E+1	2.0E+0	3.3E-2	2.1E+0	9.0E-2	8.0E-2	2.9E-1	0.0E+0	1.0E+0
	Min.	6.7E+1	2.7E+1	2.0E+0	1.0E+0	4.0E-1	2.0E-1	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0
	Mean	2.9E+2	1.4E+2	2.1E+1	4.2E+1	2.4E+0	1.1E+0	2.5E-3	2.1E-1	4.3E-3	1.0E-2	8.1E-2	0.0E+0	7.6E-1

Table 2. Groundwater contaminants in industrial area.

District name	General Statistics	bacteria	Total Coliforms	pH	F (mg/l)	NH <sub>4</sub> -N (mg/l)	NO <sub>3</sub> -N (mg/l)	TCA (mg/l)	PCE (mg/l)	TCE (mg/l)	Dichloro-methane (mg/l)	Benzene (mg/l)	Toluene (mg/l)	Xylene (mg/l)	Color
PY	Max.	4.2E+2	9.0E+2	8.5E+0	1.0E+0	1.4E+0	3.7E+1	2.0E-3	2.2E-1	3.2E+0	0.0E+0	0.0E+0	5.0E-3	0.0E+0	2.0E+0
	Min.	0.0E+0	2.0E+0	5.9E+0	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0
	Mean	3.7E+1	1.7E+2	7.1E+0	1.3E-1	7.5E-2	3.2E+0	4.5E-4	4.4E-3	9.2E-2	0.0E+0	0.0E+0	2.3E-4	0.0E+0	8.2E-1
WN	Max.	8.0E+3	5.0E+2	8.3E+0	1.4E+0	8.0E-2	4.0E+0	0.0E+0	0.0E+0	2.6E-2	2.3E-2	0.0E+0	1.0E-3	0.0E+0	7.0E+0
	Min.	0.0E+0	0.0E+0	6.4E+0	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0
	Mean	9.5E+2	8.3E+1	7.1E+0	2.1E-1	1.1E-2	1.5E+0	0.0E+0	0.0E+0	2.7E-3	2.6E-3	0.0E+0	1.1E-4	0.0E+0	1.1E+0
SJ	Max.	5.6E+3	3.0E+1	8.3E+0	1.0E-1	4.0E-2	1.6E+1	2.0E-3	1.4E-2	5.6E-1	0.0E+0	4.0E-2	4.0E-3	2.0E-3	1.0E+0
	Min.	0.0E+0	0.0E+0	6.2E+0	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0
	Mean	3.2E+2	6.0E+0	7.1E+0	4.2E-3	6.1E-3	1.6E+0	8.0E-5	2.7E-4	1.3E-2	0.0E+0	1.6E-3	1.6E-4	8.0E-5	4.8E-1
District name	Statistics	Total solids	Hardness	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/l)	Cl <sup>-</sup> (mg/l)	Consump. of KMnO <sub>4</sub>	COD	Cr <sup>6+</sup> (mg/l)	Cd (mg/l)	Cu (mg/l)	Zn (mg/l)	Fe (mg/l)	Mn (mg/l)	Al (mg/l)	As (mg/l)
PY	Max.	4.3E+2	2.7E+2	1.3E+2	1.4E+4	4.1E+0	7.0E+0	0.0E+0	4.1E-2	8.0E-3	3.8E-1	1.4E-1	5.0E-1	1.6E-1	5.0E-3
	Min.	1.3E+2	5.5E+1	4.0E+0	4.0E+0	3.0E-1	3.0E-1	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0
	Mean	2.4E+2	1.4E+2	3.1E+1	4.3E+2	1.3E+0	1.3E+0	1.3E+0	1.0E-3	3.6E-4	6.8E-2	1.6E-2	3.6E-2	4.7E-2	6.8E-5
WN	Max.	3.1E+2	1.7E+2	8.5E+1	2.1E+2	3.4E+0	1.6E+0	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0	6.6E-1	8.1E-1	2.2E-1	1.8E-1	9.0E-3
	Min.	1.3E+2	6.5E+1	4.0E+0	5.0E+0	5.0E-1	4.0E-1	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0	2.4E-2	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0
	Mean	2.1E+2	1.1E+2	2.5E+1	3.0E+1	1.4E+0	9.5E-1	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0	1.4E-1	9.0E-2	3.7E-2	4.4E-2	4.5E-4
SJ	Max.	3.0E+2	2.1E+2	7.3E+1	1.9E+2	2.5E+0	4.2E+0	6.0E-2	0.0E+0	0.0E+0	1.3E+1	8.0E-2	1.2E-1	2.2E-1	3.0E-2
	Min.	6.0E+1	3.2E+1	0.0E+0	2.8E-1	1.0E-1	1.0E-1	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0
	Mean	1.8E+2	1.1E+2	1.6E+1	2.0E+1	7.7E-1	8.6E-1	7.1E-4	0.0E+0	0.0E+0	1.1E+0	1.6E-2	1.0E-2	8.7E-2	7.1E-4

**Table 3.** Groundwater quality to the drinking water standard.

Classification	Use				Degree of good quality		Degree of poor quality	
	Drinking	Domestic	Industrial	Total nos.	Nos.	%	Nos.	%
GU	38	28	4	70	70	100	0	0
MG	17	19	2	38	31	81.6	7	18.4
BS	4	11	2	17	13	76.5	4	23.5
BL	5	10	-	15	13	86.7	2	13.3
SP	52	7	-	59	49	83.1	10	16.9
SN	9	1	-	10	3	30.0	7	70.0
YJ	52	29	-	81	67	82.7	14	17.3
EC	6	18	-	24	21	87.5	3	12.5
JA	25	26	1	52	43	82.7	9	17.3
PY	34	38	6	78	62	79.5	16	10.5
WN	11	7	5	23	20	87.0	3	13.0
SJ	28	31	25	84	74	88.1	10	11.9
Total	281	225	45	551	466	84.6	85	15.4



**Fig. 3.** Box-Whisker diagram of groundwater contaminants in the study area.

수질 부적합요인은 일반세균, 대장균군 등 미생물에 의한 요인이 가장 우세하며, 질산성질소, TCE, 염소 이온, 중금속류로 나타났다.

**5. DRASTIC 평가**

DRASTIC은 지하수오염과 관련되는 각각의 요인들

의 영향을 수치적으로 평가하고 각각의 인자들의 영향을 합산하여 대상지역의 지하수오염 취약성을 평가하는 기법이다(Aller 등, 1987). 기본 가정으로는 오염물질이 지표면에서 유입된다고 보며, 오염물질은 강수에 의해 지하수로 유입된다. 또한 오염물질은 지하수와 같은 유동성을 갖는다. DRASTIC의 평가 면적은 100 acre (약 404,690 m<sup>2</sup>) 이상이다.



DRASTIC은 가중치(weight), 범위(range) 및 등급(rating)의 3가지 주요 요소를 포함하고 있다. DRASTIC 지수는 각각의 DRASTIC 인자(지하수위 심도, 지하수 함양량, 대수층 매질, 토양의 구성물질, 지형구배, 비포화대 구성물질, 대수층의 수리전도도)의 등급에 가중치를 곱하고 이들을 합산하여 구한다. 즉,  $DRASTIC\ Index = DrDw + RrRw + ArAw + SrSw + TrTw + IrIw + CrCw$  이다.

여기서, r: 등급

w: 가중치

D: 지하수위 심도(depth of water)

R: 지하수 함양량(net recharge)

A: 대수층 매질(aquifer media)

S: 토양의 구성물질(soil media)

T: 지형구배(topography)

I: 비포화대 구성물질(impact of vadose zone)

C: 대수층의 수리전도도(hydraulic conductivity of the aquifer)

DRASTIC의 구성인자 중에서 지하수위 심도와 비포화대의 구성물질이 가장 중요한 인자이며 따라서 가중치가 5로서 가장 높다(Rosen, 1994). 반면에 지형구배

는 가장 낮은 가중치 1을 가진다. 각 구성인자는 1~10의 등급을 가진다. DRASTIC 지수가 높은 지역은 DRASTIC 지수가 낮은 지역에 비해 오염취약성이 높다. DRASTIC 지수가 141~160인 경우를 중간정도의 오염가능성 구역으로 평가하며, 20씩 구간 값을 설정하여 분류한다.

### 5.1. 지하수 심도

지하수위 심도는 지표면에서 지하수면까지의 깊이로서 지하수위 심도가 깊을수록 지표오염물질의 지하 유입의 가능성이 낮다고 본다. 지하수위는 대수층이 피압대수층인지 자유면대수층인지를 판단하는데 도움을 준다. 자유면대수층은 대기압 상태에 있고 가압층의 압력을 받지 않고 있다. 피압대수층은 그 상부에 가압층이 놓여 있으므로 자유면대수층에 비해서 지표의 오염원에 노출될 가능성이 상대적으로 낮다. 그러나 피압대수층에 굴착된 지하수공이라고 하더라도 지하수공 시설의 상태가 불량하면, 지하수공을 통해서 오염물질이 직접 유입될 수 있다. 따라서, 지하수공 시설을 완벽하게 시공하여 지표 오염물질 침투를 방지하는 것이 매우 중요하다.

1996년에는 연구지역에 분포하는 898개소의 지하수

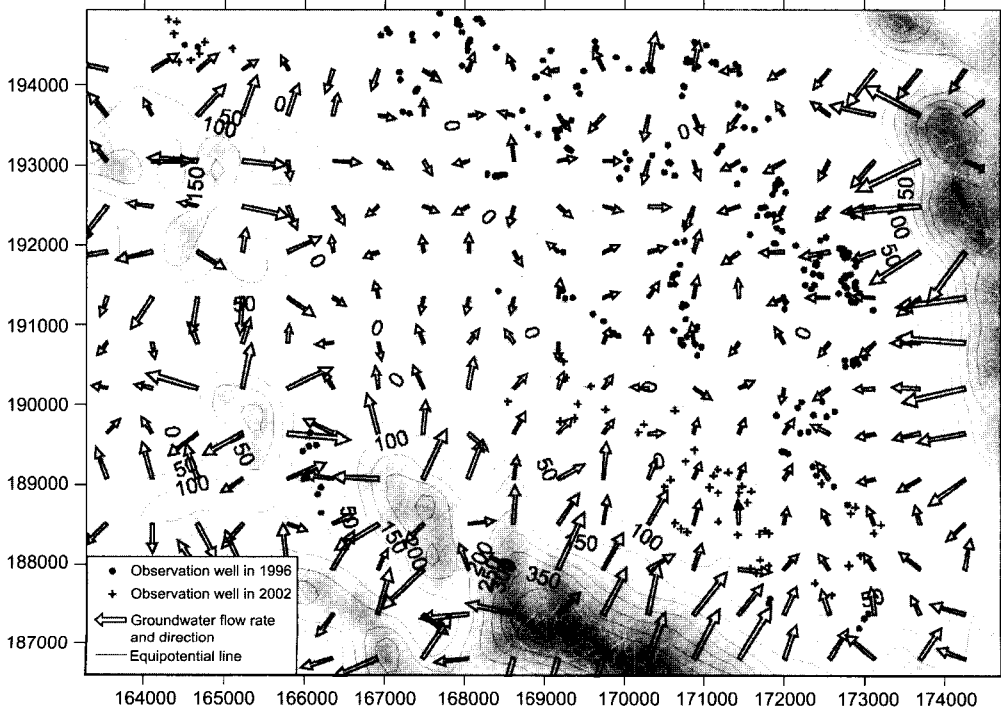


Fig. 4. Groundwater level distribution in 1996.

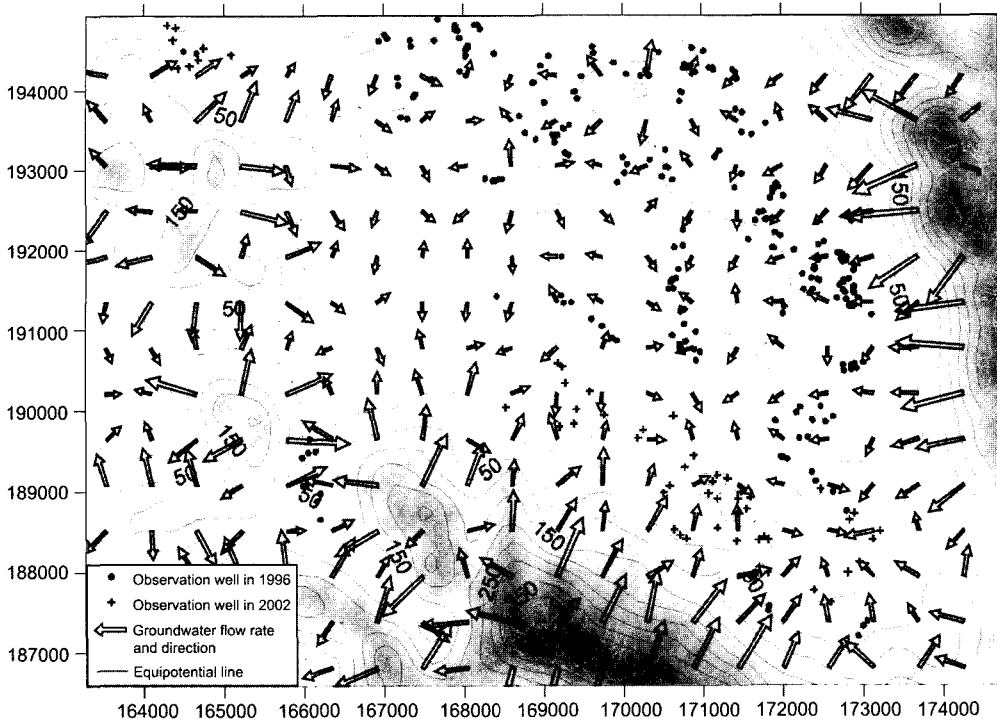


Fig. 5. Groundwater level distribution in 2002.

공 자료 중 324개의 지하수위 자료를 이용하여 지하수위 분포도를 작성하였다(Fig. 4, Fig. 4의 범위는 Fig. 1 내의 작은 사각형의 범위와 일치함). 1996년에 측정된 지하수위는 공단지역에서는 지표면하 2.50~34.10 m(평균 12.77 m) 그리고 주거/상업지역에는 지표면하 1.10~78.60 m(평균 19.48 m) 범위에 있다. 이는 주거/상업지역의 지하수 사용량이 공단지역보다 상대적으로 많다는 것을 지시한다. 2002년에는 주로 공단지역인 창원대로 남측 지역에 대해서 58개소의 지하수공 중에서 수위측정시설이 없거나 양수 중 또는 양수의 영향이 확인된 자료를 제외한 29개 지하수공의 지하수위를 측정하고 이를 근거로 지하수위분포도를 작성하였다(Fig. 5, Fig. 5의 범위는 Fig. 1내의 작은 사각형의 범위와 일치함). 2002년에 측정된 공단지역의 지하수위를 보면 지표면하 5.30~66.60 m(평균 20.36m) 범위에 있다. 특히 2002년 1월부터 2003년 1월까지 공단지역인 성주동의 4개 지하수 관측공에서 측정된 지하수위 심도는 25~45 m사이이므로 1996년의 지하수위 심도(6~20 m)에 비해서 지하수위가 최대 39 m까지 낮아진 것을 확인할 수 있다. 따라서, 창원시지역 특히 공단지역에서는 지속적인 지하수 개발로 인하여 평균 1 m/년 이상씩 지하수위가 하강하고 있다.

## 5.2. 지하수 함양량

지하수 함양량은 수문순환의 과정에서 단위 지표면적당 지하로 침투한 물이 포화대에 도달한 양으로서 단위는 mm/년으로 나타낸다. 지하수 함양량에 의해서 대수층내 지하수 저장량이 변화된다. 만약 지표에 오염물질이 존재할 때는, 이 오염물질이 지하수 함양에 따라 대수층으로 유입될 수 있다. 또한 지하수 함양량은 오염물질의 확산과 회석에도 영향을 미친다. 그러나, 오염물질을 충분히 회석시킬 수 있을 정도로 지하수 함양량이 커질 때까지는 지하수 함양량이 증가할수록 지하수오염 잠재성도 높아진다.

지하수 함양량은 강수량에서 지표유출량(강우에 의한 직접유출량), 기저유출량, 그리고 증발산량을 뺀 양이다. 강수량은 기상관측소에서 측정된 강수량 자료로부터 알 수 있으나, 지표유출량, 기저유출량, 증발산량 자료는 알기가 용이하지 않다. 지금까지 알려져 있는 지하수 함양량 산정방법에는 물수지분석에 의한 방법, 장기적인 지하수위 변화에 근거한 방법, 무강우 지속일 수 동안 지하수위 감수곡선을 이용하는 방법(최병수, 안중기, 1998), 기저유출 분리법에 의한 지하수 함양을 산정방법 등이 있다. 본 연구에서는 직접유출량을 SCS 방법(Morel-Seytoux 등, 1981)으로 구하고, 기저유출을

**Table 4.** Groundwater recharge rate.

Year	Rainfall (mm)	Direct runoff (mm)	Direct runoff (%)	Evapotrans. (mm)	Groundwater recharge rate (mm)
1993	1640.6	675.47	41.17	265.99	699.14
1994	814.2	199.19	24.46	479.2	135.81
1995	956.2	223.13	23.34	411.94	321.13
1996	1113.2	296.27	26.61	378.14	438.79
1997	1549.8	771.69	49.79	382.38	395.73
1998	1821.3	701.08	38.49	320.07	800.15
1999	2897.4	1713.27	59.13	346.72	837.41
2000	1407.7	527.14	37.59	359.23	519.33
2001	1071.9	310.23	28.94	379.84	381.83
2002	1873.2	818.25	43.68	337.64	717.31
Ave.	1514.6	623.77	41.19	366.12	524.67

은 낙동강 유역의 평균값(박창근 등, 1996)을 이용하고, 증발산량은 Thornthwaite 방법(1944)으로 구하였다.

SCS방법으로 직접유출량을 구하기 위해서는 유출곡선지수(CN)값을 구하여야 한다. 1993년부터 2002년까지 10년간 일별강수량을 성수기(6월~8월)과 비성수기(1월~5월과 9월~12월)로 나누어 1일 강수량과 5일 선행강수량을 산정하였다. 그리고 선행 강우조건(AMC)에 따라 CN지수값과 S값을 산정하고 이로부터 직접지표유출량을 결정하였다. 남천유역의 유출곡선지수는 수문학적 토양피복군에 따른 토지이용 상태별 유출곡선지수를 결정한 후에 전체면적에 대한 면적비율을 산정한 값(황한석 등, 1998)을 이용하였다. 유출곡선지수(CN)는 AMC II 조건하에서 89, AMC I에서 76, AMC III에서 96 으로 나타났다. 이와 같이, 강수량, 지표유출량, 증발산량으로부터 1993년부터 2001년까지의 지하수 함양량을 산출하였다(Table 4). 지하수 함양량은 강수량의 증가에 따라 증가하고 있으나 그 증가 폭은 직접유출량에 비해서 작다. 그 이유는 강우가 내리면 직접유출량은 강우에 크게 영향을 받으나 지하수 함양량은 강우의 영향을 상대적으로 작게 받기 때문이다. 1993년부터 2001년 사이에 최소 지하수 함양량은 135.81 mm이고 최대량은 837.41 mm 그리고 평균값은 524.67 mm이다.

**5.3. 대수층 매질**

대수층 매질은 고결암과 미고결물질로 나누어진다. 지하수오염 취약성은 대수층의 암종에 따라서 달라진다. 암석이 신선하고 괴상일수록 오염 취약성이 낮다. 반면, 공극률이 높은 모래, 자갈이나 현무암, 용식 응회암 등은 오염취약성이 높다.

본 연구지역의 지질은 앞에서 언급한대로 지표의 층

적층을 제외하고는 결정질암(퇴적암, 화산암, 화강암류)으로 되어 있다. 퇴적암류는 주로 세일과 사암으로 되어 있으며, 중생대 백악기 지층이므로 암석이 치밀하고, 투수성이 낮다. 다만 층리와 구조대를 따라서 지하수 유동이 주로 일어나는 것으로 판단된다.

**5.4. 토양의 구성물질**

토양의 구성물질은 토양층이 얇거나, 자갈층으로 이루어진 경우에 오염 취약성이 높다. 연구지역의 토양층은 주로 점토, 실트, 모래, 자갈로 구성된 하성퇴적물로서 공간적으로 투수성이 불균질하므로 토양층의 3차원적인 분포를 정확하게 파악하는 것이 중요하다. 또한 도시지역은 지표면의 대부분이 아스팔트나 시멘트로 포장되어 있고 건물들이 밀집하여 있어서 지표의 오염물질이 지하로 침투하는 것을 방지한다.

**5.5. 지형구배**

지형구배는 직접유출량을 증가시켜 지표의 오염물질이 흘러가게 하거나 지하수 함양량을 증가시켜 오염물질의 지하 침투를 용이하게 한다. 지형구배가 0~2%일 때는 강우나 지표오염물질이 흘러가지 못하기 때문에 지하로 침투하기에 가장 좋은 조건이다. 반대로 지형구배가 18% 이상일 때는 지표유출량이 크고 따라서 지표오염물질이 지하로 침투할 가능성이 낮아지고 지하수오염 취약성도 낮아진다. 그러나, 지형구배가 급하면 침식속도가 빨라지고 지표수 오염 가능성이 높아진다.

본 연구지역은 지형구배가 낮은 지역이므로 자연상태에서는 오염물질의 지하 침투가 용이하고 따라서 지하수오염 취약성이 큰 지역이다. 그러나, 앞에서 언급한대로 본 연구지역이 도심지역이므로 대부분의 지표면이 불투수성 물질로 덮여 있으므로 지표오염물질이

지하로 침투하기는 어렵다.

### 5.6. 비포화대 구성물질

비포화대는 지하수면의 위에 놓여 있는 지층으로서 불포화 또는 부분적으로 포화되어 있다. 비포화대에서는 생분해, 중화, 여과, 화학반응, 휘발, 분산 등이 일어난다(Aller 등, 1987). 생분해와 휘발은 심도에 따라 감소한다. 비포화대가 불투수성 기압층으로 이루어져 있으면, 지하수오염 가능성이 가장 낮다. 다음으로, 실트/점토층, 변성암/화성암, 셰일, 괴상의 석회암, 사암, 층상의 석회암/사암/셰일, 상당량의 실트와 점토를 함유하는 모래/자갈층, 모래/자갈층, 절리를 포함하는 다공성 현무암, 용식 석회암의 순으로 지하수오염 가능성이 높아진다.

연구지역의 비포화대는 점토, 실트, 모래, 자갈 등 다양한 입자의 층적층으로 이루어져 있다. 따라서, 위치에 따라 지하수오염 취약성이 다르다. 그러나, 지표면은 인위적인 불투수 내지는 저투수층인 시멘트와 아스팔트로 이루어져 있어서 지표면의 오염물질이 지하로 침투할 가능성은 낮다. 또한 지표면이 시멘트와 아스팔트로 덮여있으므로 호기성 박테리아에 의한 생분해가 원활하게 일어나지 못한다.

### 5.7. 대수층의 수리전도도

대수층의 수리전도도는 투수성을 지시하는 인자로서

유효공극율, 균열, 단층, 층리 등에 좌우된다. 수리전도도가 높을수록 지하수 유동성이 커짐과 동시에 오염물질의 이동성도 커진다.

본 연구에서는 현장수리시험(양수시험과 순간충격시험)으로부터 수리전도도를 구하였다. 양수시험시에는 양수정이 도심에 위치하고 있어서 관측정의 설치가 불가능하여, 양수정에서 양수시와 회복시의 지하수위를 관측하였다. 양수시험분석은 수위관측곡선이 피압대수층의 곡선에 적합한 것은 Papadopulos-Cooper 식을 적용하였으며, 누수피압대수층에 적합한 것은 Hantush-Jacob 식을 적용하였다. 그리고 순간충격시험분석은 Cooper-Bredehoeft-Papadopulos 식을 적용하였다. 공단지역에서는 팔용동, 성주동, 웅남동에서 그리고 주거/상업지역에서는 봉림동, 중앙동, 가음정동, 사과동에서 현장수리시험을 실시하였다(Table 5). 공단지역의 투수량계수는  $7.202 \times 10^{-10} \sim 1.025 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$  범위로써 굉장히 넓은 범위의 값을 가진다. 한편 주거/상업지역의 투수량계수는  $3.82 \times 10^{-6} \sim 3.29 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ 로서 공단지역의 투수량계수보다 대체로 높은 값을 보인다. 이와 같은 차이는 상대적으로 북쪽에 위치하는 주거/상업지역이 남쪽에 위치하는 공단지역보다 높은 투수량계수를 가짐을 암시한다. 그러나 지질과 관련하여 투수량계수를 평가하기 위해서는 보다 상세한 현장수리시험 자료가 요구된다. 본 연구에서 저류계수는 양수정의 지하수위 관측자료를 이용하여 구하였다. 그러나, 양수정의

**Table 5.** Hydraulic parameters in industrial and residential/commercial areas.

Well no.	Transmissivity (m <sup>2</sup> /sec)	Storage coeff.	Test methods
BL - jugu	$2.17 \times 10^{-4}$	$1.43 \times 10^{-3}$	pumping
BL - jugu	$6.78 \times 10^{-4}$	$1.0 \times 10^{-4}$	slug (injection)
JA - oedong	$4.00 \times 10^{-6}$	$5.202 \times 10^{-2}$	pumping
JA - oedong	$3.82 \times 10^{-6}$	$1.0 \times 10^{-4}$	slug (injection)
JA	$2.361 \times 10^{-5}$	$8.748 \times 10^{-1}$	pumping & recovery
JA - bokji	$1.20 \times 10^{-4}$	$1.0 \times 10^{-4}$	slug (injection)
GU - gaum	$1.25 \times 10^{-4}$	$1.121 \times 10^{-3}$	pumping
SP - buigok	$3.29 \times 10^{-3}$	$7.506 \times 10^{-5}$	slug (injection)
PY - jj	$1.025 \times 10^{-3}$	$3.891 \times 10^{-8}$	pumping & recovery
PY - qa	$5.23 \times 10^{-9}$	$1.0 \times 10^{-4}$	slug (injection)
PY - qa	$5.23 \times 10^{-9}$	$1.0 \times 10^{-4}$	slug (withdrawal)
PY - fr	$7.202 \times 10^{-10}$	$2.25 \times 10^{-4}$	slug (injection)
PY - fr	$7.202 \times 10^{-9}$	$1.115 \times 10^{-5}$	slug (withdrawal)
PY - migan	$1.29 \times 10^{-5}$	$7.08 \times 10^{-2}$	pumping
PY - migan	$2.95 \times 10^{-5}$	$6.486 \times 10^{-5}$	slug (injection)
SJ - 1	$7.071 \times 10^{-5}$	$6.985 \times 10^{-1}$	pumping & recovery
SJ - 2	$8.207 \times 10^{-5}$	$3.717 \times 10^{-1}$	pumping & recovery
WN - 1	$7.96 \times 10^{-5}$	$3.984 \times 10^{-2}$	pumping & recovery
WN - 2	$1.746 \times 10^{-5}$	$7.907 \times 10^{-2}$	pumping & recovery

**Table 6.** DRASTIC analysis.

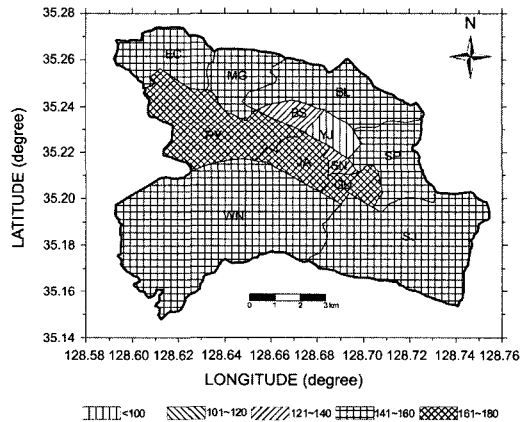
District name	D		R		A		S		T		I		C		Drastic index
	rating	index	rating	index	rating	index	rating	index	rating	index	rating	index	rating	index	
GU	1-7	5-35	3-8	12-32	4-8	12-24	4-10	8-20	5-9	5-9	8	40	1	3	85-163
JA	1-7	5-35	3-8	12-32	4-8	12-24	4-10	8-20	5-9	5-9	8	40	1	3	85-163
EC	3-7	15-35	3-8	12-32	3-8	9-24	4-6	8-12	1-5	3	8	40	1	3	92-156
MG	3-7	15-35	3-8	12-32	3-8	9-24	4-6	8-12	3	3	8	40	1-4	3-12	94-154
BL	5-7	25-35	3-8	12-32	3-8	9-24	4-6	8-12	1-9	1-9	8	40	1-4	3-12	110-152
SP	5-7	25-35	3-8	12-32	3-8	9-24	4-6	8-12	1-5	1-5	8	40	1	3	110-148
SN	3	15	3-8	12-32	4	12	10	20	9	9	8	40	1	3	111-131
BS	5-7	25-35	3	12	3-8	9-24	4-6	8-12	5	5	8	40	1	3	106-127
YJ	1	5	3	12	3	9	10	20	5	5	4	20	1	3	74
PY	1-7	5-35	3-8	12-32	4-8	12-24	4-10	8-20	5-9	1-9	8	40	1	3	81-163
WN	3-7	15-35	3-8	12-32	6-8	18-24	2-4	4-8	1-10	1-10	3-6	15-30	1	3	68-142
SJ	3-7	15-35	3-8	12-32	3-8	9-24	4-6	8-12	1-5	1-5	6-8	30-40	1	3	82-147

D; depth of water, R; net recharge, A; aquifer media, S; soil media, T; topography, I; impact of vadose zone media, C; hydraulic conductivity

지하수위 자료로부터 구한 저류계수는 유효반경의 불확실성 때문에 정확한 값으로 보기 어렵다(Table 5).

**5.8. 연구지역의 오염취약성 평가 분석**

DRASTIC 평가 결과, 창원대로를 중심으로 남서쪽의 공단지역 및 그에 인접한 지역인 주거상업지역인 가음정동(GU)과 중앙동(JA) 그리고 공단지역인 팔용동(PY)구역에서는 DRASTIC 평가지수의 최대값이 163으로 높게 나온다(Table 6). 한편 공단지역인 웅남동(WN)과 성주동(SJ)은 각각 68~142, 82~147을 보인다(Table 6, Fig. 6). 그리고 대부분의 주거/상업지역에서는 DRASTIC 평가지수 최대값이 150 정도의 오염취약성을 보이며, 용지동(YJ), 반송동(BS), 상남동(SN) 구역은 74~131 정도의 낮은 평가지수를 보인다. 특히 상업시설이 밀집되고 지하수위가 낮은 용지동(YJ) 구역에서는 DRASTIC 평가지수가 74로서 가장 낮다. 그러나, 실제로는 지하수 사용량이 상대적으로 많은 용지동의 먹는물 수질 부적합율이 상대적으로 높다. 따라서, 오염 취약성과 실제 오염도 사이에 상반된 결과를 나타내고 있다. 앞에서 살펴본 바와 같이, 공단지역의 지하수 심도가 얇기 때문에 주거상업지역보다 대체로 높은 오염 취약성을 나타내고 있으나, 이는 정확한 오염취약성을 반영하지 않는다. 왜냐하면 지하수 심도가 상대적으로 깊은 주거상업지역인 용지동의 오염 취약성은 전체 연구지역 중 가장 낮으나 실제로 먹는물 수질 부적합율은 높기 때문이다. 따라서 도시지역의 지하수 오염 취약성과 실제 지하수 오염상태는 지하수 관리나 지하수 사용량(뒤에서 언급됨) 등의 인위적인

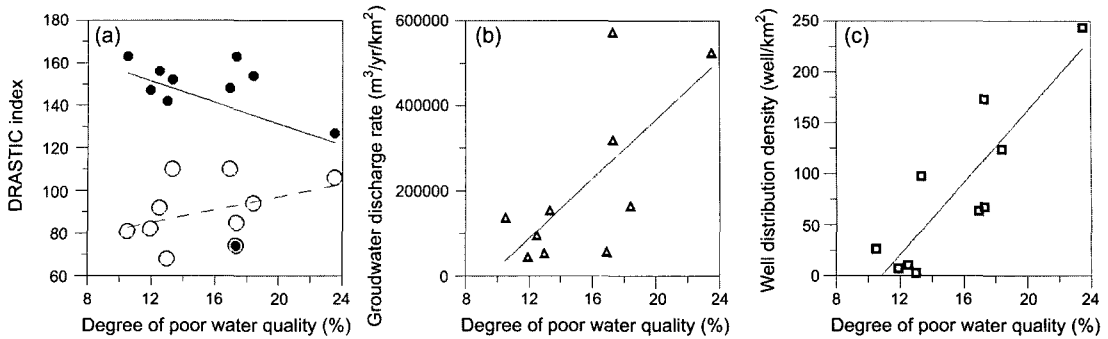


**Fig. 6.** DRASTIC map.

요인에 더 크게 좌우됨을 알 수 있다.

12개 동 중 가음정동 구역(먹는물 수질 부적합율 0%)과 성남동 구역(면적이 0.97 km<sup>2</sup>으로 DRASTIC 평가를 위한 부지면적이 너무 작고, 자료가 집중적으로 분포함)을 제외한 10개 동에 대하여 DRASTIC 평가지수의 최소값과 먹는물 수질 부적합율 그리고 DRASTIC 평가지수의 최대값과 먹는물 수질 부적합율 간의 상관성 분석을 실시하였다(Fig. 7a). 최대 평가지수와 부적합율 간에는 음의 상관성(상관계수 -0.37)을 보이고 있으나, 최소 평가지수와 부적합율 간에는 양의 상관성(상관계수 0.40)을 보인다. 따라서, 수질의 부적합율은 최대 평가지수보다는 최소 평가지수와 상대적으로 더 높은 관련성을 가지는 것으로 사료된다.

먹는물 수질 부적합율과 단위면적당 지하수 사용량



**Fig. 7.** Correlation between the degree of poor water quality and DRASTIC index (a), correlation between the degree of poor water quality and groundwater discharge rate (b), and correlation between the degree of poor water quality and well distribution density (c). In Fig. 7(a), dashed line and open circles indicate minimum DRASTIC index; solid line and solid circles indicate maximum DRASTIC index.

간의 상관계수는 0.70로서 DRASTIC 평가지수와와의 상관성보다 훨씬 높게 나타났다(Fig. 7b). 이는 도시지역에서 지하수 사용량이 지하수 오염에 미치는 영향이 매우 크다는 것을 의미한다. 따라서 지하수 오염 취약성을 제대로 반영하기 위해서는 지하수 사용량도 고려하여야 할 것이다.

먹는물 수질 부적합율과 단위면적당 지하수공 수간의 상관계수도 0.87로서 높게 나타났다(Fig. 7c). 지하수공 수가 많다는 것은 지하수 사용량이 많다는 것을 의미하므로, Fig. 7b의 결과와도 연관된다. 이는 어떤 지역의 지하수 사용량과 이에 따른 지하수위 하강이 수질 저하에 큰 영향을 미친다는 것을 의미한다. 따라서 특히 지하수 사용량이 많은 도시지역에서 지하수 오염 취약성을 정확하게 평가하고 앞으로의 지하수 수질을 예측하기 위해서는 지하수 사용량과 지하수위 하강이 매우 중요한 변수임을 알 수 있다. 원래 DRASTIC 평가 요소에서는 지하수 심도가 깊을수록 오염취약성이 더 높은 것으로 평가하고 있으나, 도시지역에서는 이와 정반대로 지하수 심도가 깊을수록 지하수오염 취약성이 더 커진다는 것을 암시한다. 이러한 현상은 지하수 사용량 증대로 인한 지하수위 하강과 함께 주 대수층의 지하수 부존량이 감소하게 되고 이에 따라 천부지층내에 오염된 지하수가 유입하기 때문으로 해석된다. 실제로 도시지역에는 지표 오염원 뿐만 아니라, 지하의 유류저장탱크, 정화조, 하수관거, 쓰레기 매립장, 기타 지하 오염물질 저장탱크 등으로부터 유래하는 각종 오염물질이 존재한다. 도시지역에서는 지표가 시멘트, 아스팔트, 건물 등의 불투수성 물질로 덮여 있어서 지표 오염물질이 지하로 침투하여 대수층을 오염시키기가 지하의 오염물질보다 오히려 어렵다.

## 6. 결론 및 토의

지하수는 자연상태에서는 양호한 수질을 가지므로 기존의 지표수 위주의 용수공급을 보완할 수 있는 하나의 중요한 대체수자원이다. 그러나 산업화와 인구증가에서 유래하는 사용량 증대와 오염물질의 증가로 인해서 지하수는 양적, 질적 저하의 위험성에 직면하고 있다. 본 연구에서는 지하수의 오염취약성을 평가하는 방법인 DRASTIC 평가를 도시지역에 적용하였으며 DRASTIC 평가의 문제점 파악과 함께 보완적인 지하수 오염취약성 평가를 검토하였다. 이를 위하여 창원시의 창원대로를 중심으로 북측의 주거/상업지역과 남측의 공단지역의 12개동에 대해서 지하수 오염취약성을 연구하였다. 오염취약성을 파악하기 위해서는 수리 지질학적 공간적인 특성들을 평가하여야 하며, 이들 요인은 행정구역과 일치하지는 않는다. 그러나, 현실적으로는 행정구역별로 오염취약성을 평가하는 것이 지하수 관리나 오염방지 등에 있어서 효율적이므로, 본 연구에서는 최종적으로는 행정단위인 동 별로 지하수 오염취약성을 평가하였다.

주거상업지역과 공단지역의 먹는물 수질기준을 초과하는 특징적인 지하수 오염물질을 보면, 주거상업지역에서는 질산성 질소가 특징적으로 검출되며, 공단지역에서는 TCE와 PCE가 특징적이다. 그 외에도 지하수공 자체나 시료 채취시에 오염물질에서 유래되는 것으로 보이는 일반세균과 대장균이 검출된다.

먹는물 수질 부적합율과 각 동별 DRASTIC 평가지수 최소값의 상관계수는 0.40로서 낮게 나타났다. 이는 연구지역의 경우에 DRASTIC 평가지수가 실제 지하수 오염상태를 잘 반영하지 못하고 있음을 나타낸다. 한

편 먹는물 수질 부적합율과 단위면적당 지하수 사용량 간의 상관계수는 0.70이며, 먹는물 수질 부적합율과 단위면적당 지하수공 수간의 상관계수는 0.87로서 훨씬 높게 나타났다. 이것은 지하수 사용량이 지하수 오염에 미치는 영향이 매우 큼을 의미한다. 따라서 지하수 오염취약성을 정확하게 반영하기 위해서는 지하수 사용량도 고려하여야 할 것이다. DRASTIC 평가에서는 지하수 심도가 깊을수록 지하수 오염 취약성이 낮은 점수로 평가되지만, 도시지역과 같이 지하수 사용량이 많고 지하수 심도가 깊은 지역에서는 오히려 지하수 오염도가 높은 경우가 많으므로 정확한 지하수 오염 취약성 평가가 이루어질 수 없다. 이는 지하수의 사용량이 상대적으로 과다하여 수위강하가 큰 도시지역에서는 지하 유류 탱크, 지하 매설 하수도관 등의 지하 오염원으로부터 유래하는 오염물질이 쉽게 대수층으로 유입할 가능성이 높기 때문이다.

따라서 도시지역에서는 기존의 DRASTIC 평가 방법을 적용하기 보다는 단위면적당 지하수 사용량과 지하수위 하강 등의 인위적인 요인을 함께 고려하여야 정확한 지하수 오염 취약성 평가가 이루어질 수 있을 것이다.

## 사 사

본 연구는 부산대학교 학술연구조성비(4년과제: 2000.10.1~2004.9.30) 지원으로 수행되었으며, 연구를 지원해주신 학교 당국에 감사드립니다. 그리고 지하수 수질분석자료는 창원시청에서 제공받았으며, 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

건설교통부, 한국수자원공사 (2003) 지하수조사연보. 850p.  
 김윤중, 성익환, 김원영, 유일현, 박준동 (1993) 수자원 관리와 보호를 위한 GIS 활용연구. 지질공학, 제3권, p. 253-266.  
 김윤중, 유일현, 김원영, 류주형, 이영훈, 민경덕 (1995) GIS를 이용한 충주호 주변의 비점원 오염 분석연구. 한국 GIS 학회지, 제3권, p. 1-18.  
 김중환, 김정택 (1963) 한국지질도 마산도폭 및 설명서(마산, 1:50,000). 국립지질조사소, 45p.  
 민경덕, 이영훈, 이사로, 김윤중, 한정상 (1996) DRASTIC을 이용한 지하수 오염 가능성 분석 및 그래픽 사용자 인터페이스 개발연구. 지하수환경, 제3권, p. 101-109.  
 박찬근, 신현민, 김성택, 김남중 (1996) 우리나라 5대강 유역 지하수 함양량 추정. 대한지하수환경학회 1996년도 정기총회 및 학술발표회, p. 54-63.  
 이사로, 김윤중 (1995) DRASTIC SYSTEM을 이용한 지

하수 오염 가능성 및 위험 분석 연구. 한국 GIS 학회지, 제4권, p. 1-11.  
 최병수, 안중기 (1998) 지역단위 지하수 자연함양을 산정 방법 연구. 지하수환경, 제5권, p. 57-65.  
 황한석, 김종열, 이형수, 문태식, 이준호, 이상진, 채영란, 김인빈, 김인범, 김현동, 원형, 김철수, 김무곤, 이수곤, 고영현, 오인석, 이상민, 권찬기, 김부진, 안우중, 권오성, 김연길, 구진아, 김수미, 김철원, 이창식, 김근수, 방승규, 최승호, 이덕영, 주영창, 이재원 (1998) 지하수부존량조사. 창원시, 821p.  
 Al-Adamat, R.A.N., Foster, I.D.L., and Baban, S.M.J. (2003) Groundwater vulnerability and risk mapping for the basaltic aquifer of the Azraq basin of Jordan using GIS, remote sensing and DRASTIC. Applied Geography, v. 23, p. 303-324.  
 Aller, L., Bennett, T., Lehr, J.H., Petty, R.J., and Hackett, G. (1987) DRASTIC: A Standard System for Evaluating Ground Water Pollution Potential Using Hydrogeologic Settings. U.S. Environmental Protection Agency/600/2-87/035, Washington, DC, 455p.  
 Barber, C., Bates, L.E., Barron, R., and Allison, H. (1993) Assessment of the relative vulnerability of groundwater to pollution: a review and background paper for the conference workshop on vulnerability assessment. AGSO Jour. Aust. Geol. & Geophys., v. 14, p. 147-154.  
 Kalinski, R.J., Kelly, W.E., Bogardi, I., Ehrman, R.L., and Yamamoto, P.D. (1994) Correlation between DRASTIC of VOC contamination of municipal wells in Nebraska. Ground Water, v. 32, p. 31-34.  
 Kim, Y.J. and Hamm, S.-Y. (1999) Assessment of potential for groundwater contamination using the DRASTIC/EGIS technique, Cheongju area, South Korea. Hydrogeology Journal, v. 7, p. 227-235.  
 Maxe, L. and Johansson, P.-O. (1998) Assessing groundwater vulnerability using travel time and specific surface area as indicators. Hydrogeology Journal, v. 6, p. 441-449.  
 Melloul, A.J. and Collin, M. (1998) A proposed index of water quality assessment: the case of Israel's Sharon region. Journal of Environmental Management, v. 54, p. 131-142.  
 Morel-Seytoux, H.J. and Verdin J.P. (1981) Extension of the Soil Conservation Service rainfall-runoff methodology for ungauged watersheds. Report FHWA/RD-81/060, Offices of Research & Development, Environmental Division, US Federal Highway Administration, 75p.  
 Rosen, L. (1994) A study of the DRASTIC methodology with emphasis on Swedish conditions. Ground Water, v. 32, p. 278-285.  
 Secunda, S., Collin, M.L., and Melloul, A.J. (1998) Groundwater vulnerability assessment using a composite model combining DRASTIC with extensive agricultural land use in Israel's Sharon region. Journal of Environmental Management, v. 54, p. 39-57.  
 Thornthwaite, C.W. (1944) Report of the Committee on Transpiration and Evaporation. 1943-1944, Transactions, American Geophysical Union, 25, 687p.  
 Vrba, J. and Zaporozec, A., eds., (1994) Guidebook on mapping groundwater vulnerability. International Contributions to Hydrogeology, Verlag Heinz Heise GmbH & Co KG, v. 16, 131p.