

울산지역 토지이용도에 따른 지하수 수질 및 오염특성

이병대* · 윤 옥 · 성익환

한국지질자원연구원 지하수지열연구부

Groundwater Quality and Contamination Characteristics Associated with Land Use in Ulsan Area

Byeong Dae Lee* · Uk Yun · Ig Hwan Sung

Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM)

ABSTRACT

The groundwater chemistry is heavily influenced by land use. This study has investigated the groundwater quality and contamination characteristic associated with land use. Contamination index (C_d) was estimated for evaluating and areal distribution of groundwater contamination degree. Groundwater samples collected from 216 locations in the study area show great variability in chemical composition. Electrical conductance ranges from 100 to 31,360 $\mu\text{S}/\text{cm}$. The pH values are between 4.6 (acidic) and 8.57 (weak alkaline). The water types predominantly represent the Ca-HCO₃ and Ca-Na-HCO₃ types, whereas, in the residential and business areas, the water type is shifted to (Na, Ca)-Cl type with rich concentration of Cl. The C_d values of the study area range from 1.1 to 117.6 with a mean of 9.56.

Key words : Goundwater, Electrical conductance, Land use, Contamination index, Water type

요 약 문

금번 연구에서 울산지역의 토지이용도에 따른 지하수 수질 및 오염특성을 파악하고, 지하수의 오염 정도를 평가하고 도면으로 시각화하는 방법인 오염지수를 산출하였다. 연구지역내 216개 시료에 대한 지하수의 화학조성은 매우 다양하게 나타나며, 전기전도도의 경우, 100~31,360 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 로 매우 큰 변화를 보이고 있다. pH 값은 4.6~8.57의 범위로 산성 내지 약알칼리를 보이며 평균 값은 7.0이다. 연구지역 지하수의 화학조성은 토지용도에 따라 많은 영향을 받는 것으로 해석되었다. 수질유형은 Ca-HCO₃, Ca-Na-HCO₃ 유형이 우세하며, 주거/상업지역과 공업지역 지하수의 경우는 농업지역과 녹지지역 지하수에 비해 Cl이 풍부한 (Na, Ca)-Cl 유형으로 변하고 있다. 연구지역 오염지수의 범위는 1.1~117.6으로 평균은 9.56으로 산출되었다.

주제어 : 지하수, 전기전도도, 토지용도, 오염지수, 수질유형

1. 서 론

지표수 자원의 한계와 수질 악화로 인해서 지하수 자원의 중요성이 점점 증가하고 있다. 지하수 자원 중에서도 대도시 지역은 용수 수요의 증가, 다양한 잠재오염원의 증가, 인위적인 유출과 유입 등의 요인들에 의해 다른 지역

의 지하수 자원에 비해 중요성이 크면서도 양적 고갈과 오염 취약성에 노출되어 있다는 문제점이 있다. 우리나라의 지하수 자원은 지질학적 특성으로 인해 외국의 다른 국가들에 비하여 양적으로 빈약하며, 지하수 수질 또한 무절제한 지하수 개발과 관리 소홀로 점점 악화되어가고 있는 실정이다.

*Corresponding author : blee@kigam.re.kr

원고접수일 : 2007. 10. 25 게재승인일 : 2007. 12. 18

질의 및 토의 : 2008. 2. 29 까지

이 논문의 연구지역은 공업도시인 울산지역으로 연구지역의 지하수 환경 및 오염 양상은 국내의 다른 대도시와는 다른 환경에 놓여 있다. 연구지역은 해안에 위치해 있어 해수침입 또는 해수와 지하수의 혼합양상을 보여주는 곳이 있다. 연구지역의 구성암석은 중생대 백악기의 울산층으로 이루어져 있어 지하수 내의 총고용용존물질의 함량이 높고 수리전도도가 낮아 지하수 산출량이 다른 대도시에 비해 낮다. 또한 연구지역의 가장 큰 특징은 다른 대도시에 비해 공업지역의 면적이 넓어서 공업활동으로 인한 지하수 오염이 많이 되어 있다. 대도시 지역의 지하수 오염과 관련된 연구로는 조병욱 등(2005)은 울산지역의 지하수, 하수 및 하천수의 휘발성 유기화합물의 오염 특성에 대하여 연구하였고, 윤육과 조병욱(2004)은 울산지역의 토지이용에 따른 지하수의 휘발성 유기화합물의 농도 특성과 지하수중의 비소의 산출 및 존재 형태에 대하여 연구하였다. 이평구 등(2001)은 서울 도심지 27개 지하수 공에 대한 연구에서 17개 공에서 할로젠탄화수소가 검출되었고, 방향족탄화수소는 대부분 검출한계 이하로 나타나고 있음을 밝혔다. 이철효(1999)는 유류와 매립지에 의한 지하수 오염특성과 실제 오염지역의 사례분석을 통하여 지하수오염 처리방안에 대하여 보고하였다. 또한 이인호 등(2002; 2003), 함세영 등(2003), Jeong (2001)은 도시지역의 도시화와 토지이용도에 따른 지하수의 자연적 반응, 지하수 수질과 오염 특성에 대하여 연구하였다.

대도시 지역의 토지이용도는 여러 가지 오염원과 더불어 지하수의 수질과 오염 특성에 영향을 미치고 있다. 공업지역의 지하수는 산업활동에 따른 유탄제, 제거제, 액화제, 도료, 유류 등의 사용에 기인한 중금속이나 유기오염물질에 의해 수질이나 오염 특성이 결정된다. 주거지역, 상업지역 및 농업지역은 인간활동에 따른 처리되지 않은 유기물질이나 생활하수, 경작이나 농업활동에 따른 비료사용, 축산폐수에 의하여, 그리고 녹지지역은 지질에 따른 암석 내 광물질에 의해서 오염되거나 그 수질이 결정된다. 본 연구는 울산지역의 토지이용도에 따른 지하수 수질 및 오염 특성을 파악하고, 수질 분석 결과를 이용하여 지하수의 오염 정도를 평가하고 시각화하는 방법인 오염지수(contamination index)를 산출하고, 산출된 오염지수를 연구지역 내에 토지이용도별로 적용해 보는데 있다.

2. 연구지역

2.1. 개요

연구지역은 우리나라의 대표적 공업도시인 울산광역시

로, 면적 1,056 km², 34,852 세대수에 인구 1,069,025명 규모의 대도시이다. 이 논문에서는 토지면적(754.92 km²)에 비해 인구수(173,753명)가 적은 울주군을 제외한 울산광역시 중구, 동구, 서구, 남구를 대상으로 연구하였다. 울산광역시 도시계획에 의한 토지이용도별 지역 구분은 주거지역은 전체 면적의 7%를 차지하고, 상업지역은 0.8%, 공업지역은 8.1%, 녹지지역은 72.8%이며, 항만구역을 포함한 기타지역이 11.2%를 차지하고 있다. 연구지역은 한반도의 동남단 태화강 하류와 울산만 일대에 위치하고 있으며, 남쪽으로는 부산, 북쪽으로는 경주, 대구, 서쪽으로는 언양이 자리잡고 있다. 수계는 울산단층곡을 따라 북북서-남남동 내지 남-북 방향으로 북에서 남으로 흐르는 동천(성안천)과, 언양에서 시작하여 서에서 동으로 흐르는 태화강이 울산시 삼산동 부근에서 합류하여 울산만에 유입된다. 연구지역은 공업단지의 면적이 넓은 도시지역으로 연구지역 내에는 석유화학관련 제품의 생산증가와 유류저장 탱크시설의 증가로 지하수 및 토양오염 문제가 심화되고 있다. 지하수 함양과 밀접한 관계가 있는 연구지역의 강수량은 연평균 1,277 mm로 우리나라의 평균 강수량과 거의 비슷하다. 연중 최대 월 강수량은 8월의 233 mm이고 최소는 12월의 24 mm이며, 6월에서 9월까지 내린 강수량은 전체 강수량의 61%인 779 mm이다.

2.2. 지질 및 지질구조

연구지역의 지질은 경상누층군 하양층군에 속하는 백악기 울산층과 이를 관입 또는 분출한 백악기 유천층군의 유문암 및 백악기 말 내지 제3기초의 불국사 화강암류인 흑운모화강암, 각섬석화강암, 규장반암, 화강반암, 규장암, 산성 및 염기성 암맥으로 구성되어 있으며, 제3기의 단사리 안산암과 정자역암이 후기에 관입 피복하고 있다. 그 외에 캄브리아기의 결정질 석회암층이 연구지역 북부 달천리 일대에 소규모로 분포하며, 신생대 제4기 충적층이 태화강을 중심으로 넓게 분포하고 있다(Fig. 1). 결정질 석회암층 일부는 화강암의 관입으로 사문암화 되었으며, 접촉고대 작용에 의한 울산 자철광을 배태하고 있다. 울산층은 주로 셰일 및 사암으로 구성되어 있으며 태화강을 중심으로 울산시 남부 및 동부 내륙 일원에 광범위하게 분포하나, 동부는 호온펠스화 되어 있다. 불국사 화강암류는 태화강 서부와 연구지역 북단 및 동구 해안가 일원에 분포하며, 제3기층은 태화강 동부 일대와 동구 해안가에 분포하고 있다. 단사리 안산암은 암회색 내지 녹회색을 띠며 소립의 장석과 휘석 반정을 가지는 안산암과 회색 내지 녹회색을 띠는 화산재 및 각력들로 구성되어 있다. 정

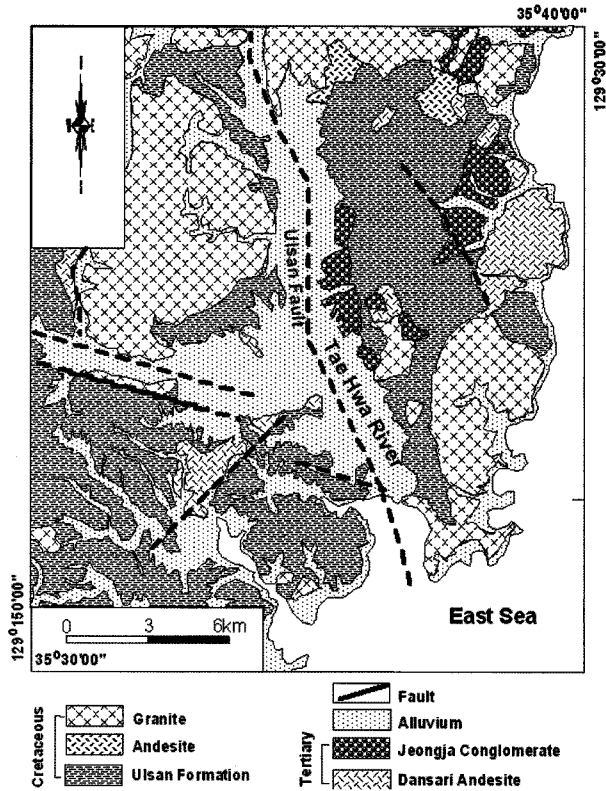


Fig. 1. Geological map of the study area.

지역암은 고결되지 않는 역암, 장석질 사암 및 셰일로 구성되어 이들이 호층으로 나타난다. 이들은 정자리 부근 및 효문리 일대에 분포하며, 하부 층준의 암회색 셰일 사이에 2-3조의 갈탄층 및 탄질 셰일층이 협재하고 있다(박양대와 윤희대, 1968).

연구지역의 주 지질구조는 태화강을 중심으로 북북동-남남서 방향의 울산단층대로 최대 폭 약 10 km에 달하는 단층대이다. 이 단층대는 우향의 전단운동을 주로 보이며 백악기 말 이후 최근에 이르기까지 활동이 있는 단층대로 연구지역의 지하수 발달과 유동에 상당한 영향을 미치는 지질구조대이다(Ryoo, 1997). 이 외에 연구지역의 지하수 유동과 관련된 지질구조 요소로는 울산층이나 제3기 분지를 형성하고 있는 퇴적층들의 층리면과 같은 일차적인 구조, 화강암의 관입과 관련된 판상절리와 같은 이차적인 취성변형구조들이 있다.

3. 연구지역

3.1. 시료채취 및 분석

본 연구를 위하여 연구지역내 216개소의 지하수공을 대상으로 현장수질 측정 및 실내분석용 시료를 채취하였다.

시료 채취는 연구지역을 토지이용도에 따라 4개 지역으로 구분하여 주거/상업지역에 해당하는 시료 111개소, 공업지역 45개소, 농업지역 24개소, 그리고 녹지지역에 해당하는 36개소에 대하여 채취하였다(Fig. 2). 시료는 수질의 안정을 위해 10~20분 동안 양수공 체적의 약 3~5배를 양수한 후 채취하였다(Barcelona et al., 1985).

온도, 전기전도도(EC), 수소이온농도(pH), 산화환원전위(Eh), 용존산소(DO) 값은 휴대용 측정기(SK-1250MC, TOA CM-21p, HM-20p, RM-20p, KRK)를 이용하여 현장에서 측정하였다. 알칼리도(Alkalinity)는 메틸오렌지와 메틸렌요오드 지시약을 이용하여 0.05 N의 염산으로 현장에서 측정하였다. 주요 양이온 및 음이온 분석용 시료들은 여과(0.45 μm)후 각 1 L씩 채취하였으며, 양이온 시료의 경우는 농질산(65%)을 1 mL 첨가하였다. 모든 시료는 분석 전까지 4°C로 보관하였다. 수질분석은 K, Na, Ca, Mg, SiO₂, Al, F, Cl, Br, NO₃, SO₄, TDS, Li, Sr, Fe, Mn, Cu, Pb, Zn, As 와 VOCs 등에 대하여 분석하였다. 양이온중 K, Na, Li, Fe, Mn, Cu, Pb, Zn 은 원자흡수분광광도계(AAS)을 이용하여 분석하였고, Ca, Mg, SiO₂, Al은 유도결합플라즈마 원자방출분광광도계(ICP-AES), 음이온의 경우 이온크로마토그래피(Dionex 300), 비소는 흑연고로 원자흡광분석기(AAS3100)를 이용하여 분석하였다.

현장 측정값과 실내 분석값들은 토지용도(주거/상업지역, 공업지역, 농업지역, 녹지지역)에 따라 구분하여 통계분석을 실시하여 수질특성을 파악하였고, Box-Whisker plot에 도시하여 토지용도별 오염성분에 대해서도 살펴보았다.

3.2. 오염지수 산출

오염지수(Contamination index; C_d)는 각각의 수질성분들의 위해성분에 대한 평가 및 시각화가 가능한 방법으로서 오염지수의 계산은 각각의 시료에 대해 분석된 수질자료들 중에서 수질기준치를 초과하는 성분들의 합으로서 표현된다(Backman et al., 1998). 이는 곧 지하수 수질 오염에 영향을 주는 여러 요인들의 영향을 집약한다고 볼 수 있다. 오염지수 산출 방법은 처음 슬로바키아의 지질조사소에서 개발되었고, 그 후 핀란드 지질조사소에서 수정, 개선되었다. Rapant et al.(1995)는 VOCs를 제외한 지하수 37개 성분에 대하여 현장 측정 및 실내 분석을 통해 산출된 농도를 바탕으로 아래와 같은 식을 이용하여 오염지수를 산출, 적용하여 지하수에 대한 자연적(지리적), 인위적 오염의 정도를 평가하고 시각화하였다.

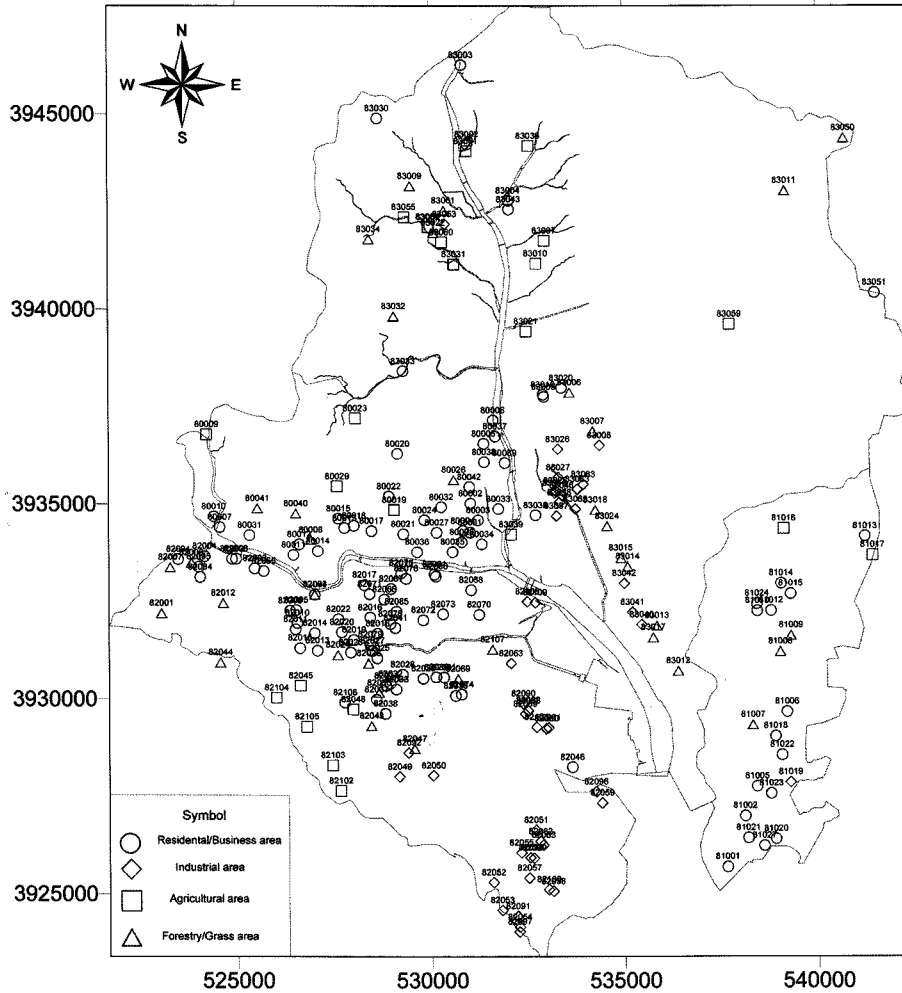


Fig. 2. The sampling sites associated with land use of the study area.

$$C_d = \sum_{i=1}^n C_{fi}$$

여기서, C_{fi} 는 다음과 같이 표현된다.

$$C_{fi} = \frac{C_{Ai}}{C_{Ni}} - 1$$

C_d : 오염지수, C_{fi} : i 번째 성분의 오염인자, C_{Ai} : i 번째 성분의 수질 분석치,
 C_{Ni} : i 번째 성분의 수질 기준치

이 논문에서도 위의 식을 이용하여 연구지역의 지하수 오염지수를 산출하여 오염의 정도를 정량화 및 시각화 하였다. 연구지역의 지하수 수질 분석치에 대해 토지이용도와 사용목적에 맞게 각각의 지하수 공에 대하여 먹는물, 생활용수, 공업용수, 농업용수의 용도별 수질기준치를 이용

하여 연구지역 지하수에 대한 오염지수를 산출하여 도시 하였다.

4. 분석결과 및 토의

4.1. 현장측정 자료

연구지역내 216개 시료에 대한 pH 값은 4.6~8.57의 범위로 산성 내지 약알칼리를 보이며 평균 값은 7.0이다 (Table 1). 주거/상업지역은 4.6~8.44의 범위를 나타내며 생활용수의 pH 수질기준인 5.8~8.5의 기준치를 초과하는 지점이 8개소로 점차 산성화되어 가고 있다(Fig. 3). 공업 지역의 경우는 평균값이 7.09로서 약산성 및 중성을 나타 내고 있으며, 공업용수의 pH 수질기준인 5.0~9.0을 초과 하는 지점은 없다. 농업지역은 5.82~7.95의 범위로 평균 값은 7.0이며, 녹지지역은 5.45~8.19의 범위로 평균 값은 7.09이다.

Table 1. Field measurement and laboratory analysis data

	Unit	Residential / Business				Industrial			
		Min.	Max.	Mean	Median	Min.	Max.	Mean	Median
pH		4.6	8.44	6.923	7.025	5.87	8.57	7.094	7.04
EC	μs/cm	116	31360	1780.5	656	109	21200	1217.6	428
Eh	mV	-192	589	138.1	149.5	-115	516	113.6	132
DO	ppm	0	8.7	2.919	2.815	0.5	10.1	5.596	5.8
T	°C	13.6	24.4	17.98	17.5	15.9	23.8	17.82	17.3
K	mg/L	0.48	164	9.123	2.45	0.29	9.41	2.7	2.08
Na	mg/L	9.02	5900	240.254	41.5	5.23	705	64.719	29.3
Ca	mg/L	3.47	1650	71.693	44.85	0.48	157	33.589	29.9
Mg	mg/L	1.19	1010	50.743	18	0.41	43.3	10.35	6.38
SiO ₂	mg/L	6.42	89.2	31.75	28.2	3.4	81.5	25.62	22.7
Al	mg/L	0	0.09	0.000833	0	0	0.03	0.003	0
F	mg/L	0	3.88	0.2501	0.09	0	1.4	0.179	0.08
Cl	mg/L	5.05	11300	479.737	50.2	4.99	524	56.69	36.2
Br	mg/L	0	48	1.8	0.055	0	2.61	0.283	0.12
NO ₃	mg/L	0	101	13.48	5.12	0	48.9	6.426	2.2
SO ₄	mg/L	0.05	765	52.586	28.4	0.41	221	34.631	23.6
TDS	mg/L	96	21970	1213.75	394	77	1940	360.07	262
HCO ₃	mg/L	21.6	1310	260.66	211	35.08	902.8	192.8	139
Li	mg/L	0	10	0.222	0.06	0	0.24	0.0488	0.04
Sr	mg/L	0	163	2.881	0.42	0	1.38	0.2793	0.17
Fe	mg/L	0	24.8	1.288	0.03	0	4.57	0.4426	0.02
Mn	mg/L	0	9.6	0.3526	0.01	0	0.54	0.06	0.01
Cu	mg/L	0	0.04	0.00314	0	0	0.05	0.0044	0
Pb	mg/L	0	0.25	0.00886	0	0	0.26	0.0128	0
Zn	mg/L	0	7.5	0.2866	0.04	0	4.25	0.6893	0.07
As	mg/L	0	0.056	0.01233	0.007	0	0.019	0.00365	0.002
		Agriculture				Forestry			
	Unit	Min.	Max.	Mean	Median	Min.	Max.	Mean	Median
pH		5.82	7.95	7.002	7.225	5.45	8.19	7.089	7.15
EC	μs/cm	100	884	414.9	432.5	137.2	957	368.98	323
Eh	mV	47	516	197.6	196	-55	690	158.1	175
DO	ppm	0.16	13.6	4.1908	3.09	0.08	8.23	3.457	3.32
T	°C	9.4	20	16.04	16.2	14.4	22.2	17.3	17
K	mg/L	0.36	33.7	4.11	1.455	0.48	6.36	1.722	1.35
Na	mg/L	8.42	78.7	27.99	21.8	6.68	82.7	24.1	19.5
Ca	mg/L	4.11	71	32.17	25.75	4.18	98.6	33.73	26.1
Mg	mg/L	1.81	64.3	14.8	9.915	1.28	38.3	11.48	6.85
SiO ₂	mg/L	13.9	65.2	30.27	26.2	1.91	64.6	30.79	30
Al	mg/L	0	0.03	0.0037	0	0	0	0	0
F	mg/L	0.01	1.72	0.2021	0.075	0.03	2.66	0.2186	0.08
Cl	mg/L	5.89	86.5	25.12	18	7.33	140	25.81	18.2
Br	mg/L	0	0.25	0.0187	0	0	0.12	0.01	0
NO ₃	mg/L	0	98.5	26.21	12.35	0	82	9.858	2.76
SO ₄	mg/L	0.97	201	35.185	17.55	3.52	153	25.7	19.1
TDS	mg/L	74	614	286.38	270	120	836	258.29	224
HCO ₃	mg/L	21.6	282.1	148.52	159.05	27.8	411	150.57	117
Li	mg/L	0	0.29	0.0446	0.025	0	0.27	0.0474	0.03
Sr	mg/L	0	1.35	0.2667	0.07	0	3.8	0.4303	0.14
Fe	mg/L	0	0.56	0.0431	0.017	0	3.01	0.1624	0.02
Mn	mg/L	0	0.18	0.0183	0	0	0.33	0.0276	0
Cu	mg/L	0	0.03	0.005	0	0	0.02	0.00273	0
Pb	mg/L	0	0	0	0	0	0	0	0
Zn	mg/L	0	1	0.0867	0.02	0	2.5	0.2621	0.05
As	mg/L	0	0.063	0.01222	0.004	0	0.072	0.0198	0.0035

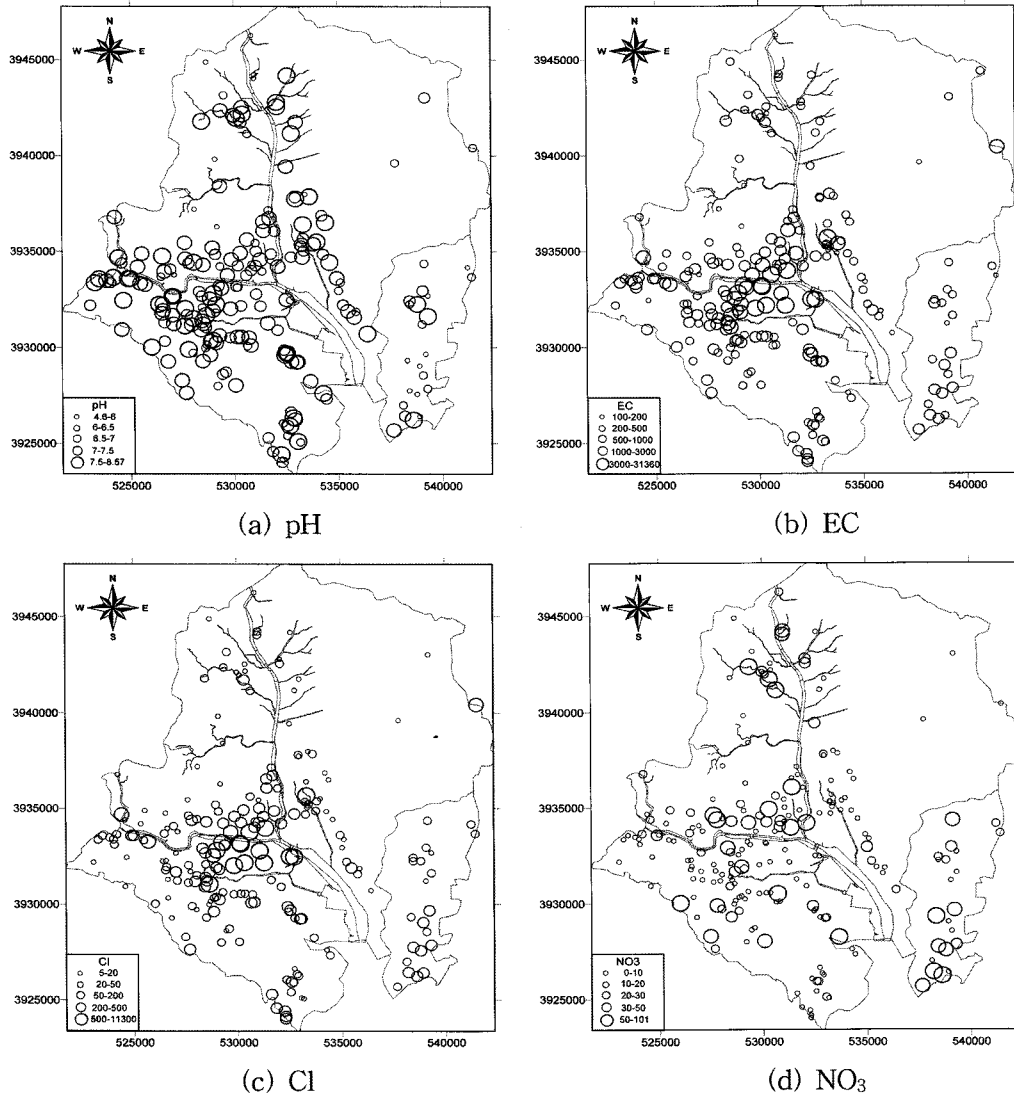


Fig. 3. Map showing the distribution of the (a) pH, (b) EC, (c) Cl, (d) NO₃.

전기전도도는 100~31,360 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (평균값: 1,2765 $\mu\text{S}/\text{cm}$)로 매우 큰 변화를 보이고 있다. 주거/상업지역의 전기전도도는 100~31,360 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 의 범위를 나타내며 평균값은 1,780 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 로서 높은 전기전도도 값을 보이고 있다. 이 중에서 23개소의 지점은 1,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 이상의 높은 값을 보이고 있는데 이들의 위치는 주로 연구지역의 인구밀집 지역인 중구와 남구일대로서(Fig. 3), 울산만과 접하고 있는 태화강을 통한 해수의 영향과 도시화에 따른 정화조 및 하수도의 누수, 생활하수에 따른 잠재오염원에 의한 영향을 받고 있기 때문으로 판단된다. 공업지역의 전기전도도는 109~21,200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (평균값: 1,217.6 $\mu\text{S}/\text{cm}$)의 범위를 보이고 있다. 대부분의 지점에서 낮은 값을 보이고 있으나, 1,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 이상의 높은 값을 보이는 지점이 5 지

점이 있으며, 특히 이중 태화강 최하류 울산만과 접하고 있는 지점에 위치한 쓰레기 매립장 두 곳에서의 전기전도도는 10,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 이상의 값을 나타내고 있다. 이는 매립장이 위치한 지리적 환경과 매립장의 침출수에 의한 영향으로 고려되며, 이로 인하여 공업지역의 전기전도도 평균값이 높은 것으로 판단된다. 농업지역과 녹지지역의 전기전도도는 각각 100~884 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (평균값: 414 $\mu\text{S}/\text{cm}$)과 137~957 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (평균값: 368 $\mu\text{S}/\text{cm}$)의 범위로 주거/상업지역과 공업지역에 비해 낮은 값을 나타낸다.

용존산소(DO)는 0~13.6 mg/L의 범위를 보이고 있다. 주거/상업지역은 0~8.7 mg/L의 범위로 평균값은 2.92 mg/L이고, 공업지역은 0.5~10.1 mg/L 범위를 나타내며 평균값은 5.60 mg/L로 대부분 지점에서 낮은 값을 보이고 있

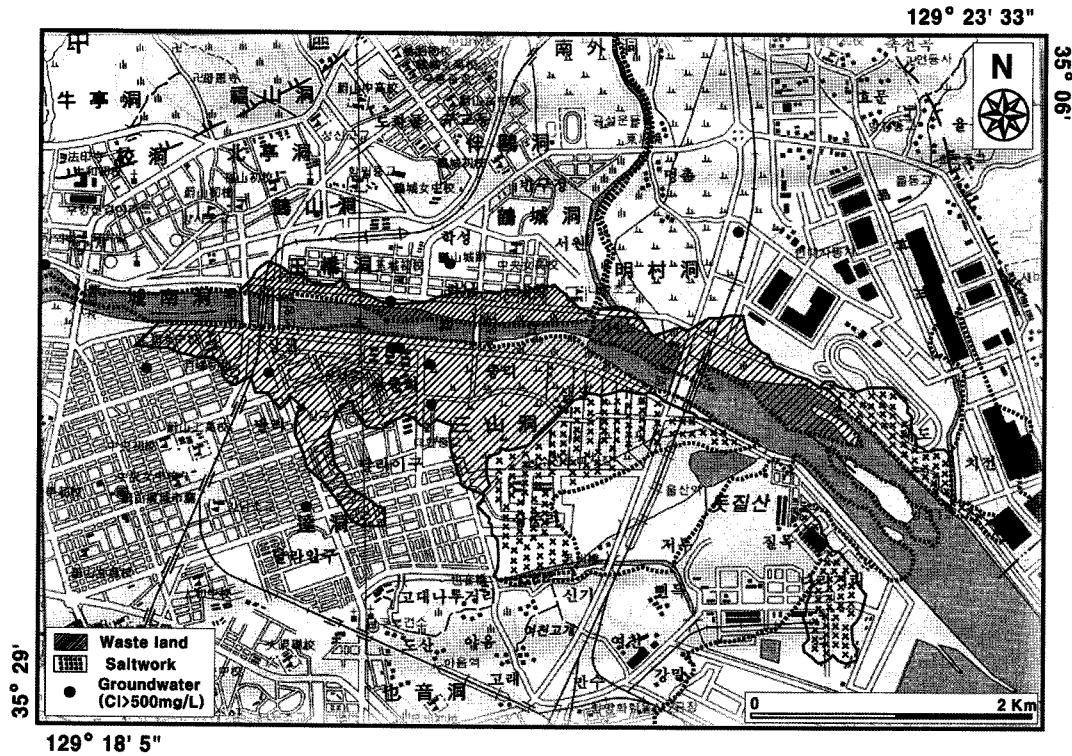
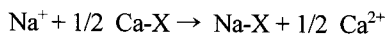


Fig. 4. Distribution of waste land and saltworks around the Taehwa river before urbanization.

는데, 이는 이 지역의 지하수 대수층 특성이 피압대수층의 특성을 반영한다기 보다는, 도시화에 따라 증가하고 있는 처리되지 않은 유기물(예수, 생활하수, 오물)과의 반응을 통하여 산화됨으로써 용존산소의 양이 감소한 것으로 판단된다.

4.2. 양이온 및 음이온

Ca 이온의 농도는 0.48~1650 mg/L(평균값: 57.2 mg/L)의 범위를 나타내고 있다. 주거/상업지역은 3.47~1,650 mg/L(평균값: 71.70 mg/L), 공업지역은 0.48~157 mg/L(평균값: 33.59 mg/L), 농업지역은 4.11~71(평균값: 32.17 mg/L), 그리고 녹지지역은 4.18~98.6 mg/L(평균값: 33.73 mg/L)의 범위로, 주거/상업지역이 다른 지역에 비하여 높은 농도를 보이고 있다. 담수와 해수가 혼합되면 Ca 이온과 Na 이온 사이에서는 다음과 같은 반응이 일어난다(Appelo, 1999).



여기서, X는 토양 이온교환체(Soil exchanger)이다. 이 반응에서 나트륨은 이온교환체에 의해서 흡수되고 Ca는 방출되고 해수와 담수 혼합지역의 수질유형은 Ca-Cl형으로 나타난다. 따라서 연구지역내 주거/상업지역에서의 Ca의 높은 농도는 물-암석 반응의 증가와 더불어 울산만과 접

하고 있는 태화강을 통한 해수와의 혼합, 그리고 기타 인위적인 오염으로부터 유래한다는 것을 암시한다. 일반적으로 Ca는 사장석의 용해와 방해석의 용해에 의해 유래된다. 연구지역내 주거/상업지역을 제외한 공업지역, 농업지역, 녹지지역은(평균값: 32.17~33.73 mg/L) 연구지역의 많은 부분을 차지하고 있는 화강암내 사장석중 Ca의 용해를 고려할 수 있고, 또한 울산층내 발달되어 있는 파쇄대의 충전광물인 방해석과의 반응으로도 고려할 수 있다. 이러한 관점에서 공업지역, 농업지역, 녹지지역은 주거/상업지역과는 달리 해수와의 혼합이나 오염에 의한 영향보다는 정상적인 물-암석 반응이 진행된 것으로 해석할 수 있다.

Na는 5.23~5,900 mg/L 범위로 높은 농도를 보이고 있다. 주거/상업지역은 9.02~5,900 mg/L(평균값: 240.25 mg/L)의 범위로 도시화 이전에 태화강을 중심으로 염전과 나대지로 이용된 관계로 해수의 직접적인 영향 하에 있었다고 판단된다(조병욱 등, 2003) (Fig. 4). 주거/상업지역의 Cl과 연관지어 해석해보면 Cl의 농도범위는 5.05~ 11,300 mg/L(평균값: 479.73 mg/L)이다. 두 성분이 물-암석 반응에서 공급되었다면 Na의 농도는 Cl의 약 2배 정도가 될 것이다. 모암내 함유된 Na-장석류(NaAlSi₃O₈)가 물에 의한 풍화작용으로 화학적으로 분해되면 Na 성분이 추가로 지하수에 공급되어 Cl/Na의 몰농도 비는 감소하게 된다.

해안지역에서 해수에 의한 염염(NaCl) 성분이 지하수에 공급되어 용해되는 경우는 Cl과 Na 성분은 같은 몰농도로 증가하게 된다. 세계 평균해수의 Cl/Na의 몰농도의 비는 1.8로서 해수침투에 의해 해수 성분이 직접 지하수에 혼합되는 경우는 Cl의 농도가 Na 보다 약 2배 정도 높게 공급되어 지하수의 Na 및 Cl의 농도에 대한 고찰을 통해 이들 성분의 기원을 유추할 수 있다. 주거/상업지역 내 Na와 Cl의 경우 Cl 평균 농도가 Na 평균 농도의 약 1.99배이고, Na와 Cl의 농도에 있어서 높은 지점들이 서로 일치하고 있는 양상으로 보아 이는 도시화 이전의 염전과 나대지의 영향으로 간주된다. 그리고 앞서 기술하였듯이 현재 계속적인 해수침투의 영향이 있었다면 Na는 이온교환체에 의해 흡수되어 그 값이 감소되어야 함에도 불구하고 오히려 Ca보다 큰 농도를 보이는 것은, 현재의 해수침투는 미미한 수준이고 과거의 염전이나 나대지에 있는 잔류염분으로 인한 영향으로 판단된다. 일반적인 지하수의 경우 Na의 농도는 10~100 mg/L로서(Davis and DeWiest, 1966), 공업지역, 농업지역과 녹지지역의 평균농도를 살펴보면 각각 64.72 mg/L, 27.99 mg/L, 24.10 mg/L로서 대부분의 시료가 일반적인 지하수 범위에 속한다.

K는 0.29~164 mg/L의 분포를 보이고 있다. K는 지표수 및 천부지하수에 대해서는 오염물질에 그 기원을 두고 중간 지하수 및 심부지하수 경우는 자연적 지질매체와의 반응으로 물속으로 공급되는 것으로 예상된다. 그리고 농업지역에서는 비료의 주 구성성분이므로 경작을 위한 비료사용의 영향으로 판단된다. 일반적으로 지하수에서의 K의 함량 범위는 0~10 mg/L로 보고되고 있다(Davis와 DeWiest, 1966). 연구지역내 주거/상업지역에서 K가 10 mg/L 이상인 지점은 거의 대부분이 목욕탕이나 사우나 시설이 위치한 지점에서 초과하고 있다. 이는 많은 비누의 사용과 목욕탕이나 사우나에서 흘리는 사람들의 땀과 같은 분비물에 의한 영향으로 판단된다. 공업지역과 녹지지역에서 K의 평균값은 각각 2.7 mg/L, 1.72 mg/L이고 농업지역에서의 평균값은 4.11 mg/L이다. 농업지역은 주거/상업지역보다는 낮지만 경작활동에 따른 비료사용의 영향으로 인해 공업지역과 녹지지역보다는 높은 값을 보이고 있다.

Fe는 0~24.8 mg/L의 범위를 보이며 지하수 수질기준인 0.3 mg/L보다 높은 농도를 보이고 있다. 화성암에서 기원한 철은 미량으로 존재하지만 철은 용수 사용에 심각한 영향을 미친다. 주거/상업지역에서 Fe는 0~24.8 mg/L(평균값: 1.29 mg/L)의 범위로 먹는물 수질기준을 초과하는 지점은 총 20개소로 Fe에 대한 오염이 우려할 수준임을 알 수 있다. 이는 부실한 공 설계에 따른 케이싱과 공기

의 접촉 및 관리소홀, 용존산소의 부족과 산성화된 수소이온 농도, 혐기성 상태 하에서의 환원된 무기물 물질인 철의 농도 증가 등의 요인으로 해석된다.

공업지역은 0~4.57 mg/L(평균값: 0.44 mg/L)의 범위를 나타내며 먹는물 수질기준을 초과하는 지점은 5개소로서 공업지역임을 고려하면 오히려 주거/상업지역보다는 덜 오염되어 있음을 알 수 있다.

인위적인 오염의 지시자인 NO₃의 범위는 0~101 mg/L이다. 주거/상업지역은 0~101 mg/L(평균값: 13.48 mg/L)의 범위를 나타내고 있으며, 먹는물 수질기준치인 45 mg/L을 초과하는 지점은 30개소로서 오염이 심한 편이다(Fig. 3). 지하수 중의 NO₃는 자연적 지질매체와의 반응에서 기원하기보다는 공장 배출수, 생활하수, 축산폐수, 질소질 비료 등에서 유래된다. 주거/상업지역에서의 오염지점들을 살펴보면 병원, 아파트단지, 목욕탕, 주유소, 학교, 민방위 급수시설, 개인 주택 등 연구지역 전반에 걸쳐 오염이 심각한 수준이다. 공업지역은 0~48.9 mg/L(평균값: 6.43 mg/L)의 범위를 보이며 수질기준치를 초과하는 지점은 2개소로서 공장 배출수 등과 같은 잠재오염원에 대한 처리가 잘 되고 있는 것으로 판단된다. 농업지역은 0~98.5 mg/L(평균값: 26.21 mg/L)의 범위로 주거/상업지역 다음으로 NO₃가 높은 값을 보이고 있는데 이는 토지이용도상 농업지역에서 배출되는 축산폐수나, 질소질 비료의 영향에 기인한 것으로 해석된다.

4.3. VOCs 함량

연구지역의 VOCs에 의한 오염과 관련된 연구는 조병욱 등(2005), 윤욱과 조병욱(2004)에 의해 보고된바 있으므로 이 논문에서는 연구지역내 토지이용도별로 VOCs 검출 결과에 대해서 기술하였다. 연구지역내 지하수 시료에서 적어도 1성분 이상의 VOC가 검출된 지점은 주거/상업지역은 33개 지점(30%)에서, 공업지역은 19개 지점(42%)에서 검출되어 주거/상업지역과 공업지역은 VOCs로 많이 오염되어 있다. 농업지역은 4개 지점(17%)에서, 녹지지역은 9개 지점(25%)에서 검출되었다. 검출된 성분은 VOCs 61개의 분석항목 중에서 총 35개 성분이 확인되었으며, 이중 할로겐지방족탄화수소(Halogenated Aliphatic Hydrocarbons)가 23개 성분, 석유탄화수소(Petroleum Hydrocarbon)가 12개 성분이 검출되었다.

주거/상업지역은 16 성분의 할로겐지방족탄화수소, 5성분의 방향족탄화수소 그리고 1 성분의 에테르 등 22성분의 다양한 성분이 검출되었다. 할로겐지방족탄화수소는 7성분의 메탄계열인 트리클로로플루오르메탄, 메틸렌크로

라이드, 카본테트라클로라이드, 크로로포름, 브로모디클로로메탄, 디브롬화클로로메탄, 브롬화포름 과 5성분의 에탄계열인 클로로에탄, 1,1-디클로로에탄, 1,2-디클로에탄, 1,1,1-트리클로로에탄, 1,1,2-트리클로로에탄 및 4개 성분의 에텐계열인 PCE, TCE, cis-1,2-DCE, 1,1-DCE 등이 검출된다. 방향족탄화수소는 5종류 BTEX에 속하는 톨루엔, m-자일렌, o-자일렌과 1,3,5-트리메틸벤젠, 1,2,4-트리메틸벤젠 성분이 검출되며, 0.1~0.9 µg/L 이하의 매우 낮은 농도를 보인다. MTBE는 6개의 지하수 시료에서 0.1~4.1 µg/L 농도로 검출된다.

공업지역은 18 성분의 할로젠지방족탄화수소에, 7 성분의 방향족탄화수소, 그리고 7종류의 성분과 에테르등 총 26개 성분이 검출되었다. 할로젠지방족탄화수소는 7 성분의 메탄계열인 클로로메탄, 메틸렌클로라이드, 카본테트라클로라이드, 크로로포름, 브로모디클로로메탄, 디브롬화클로로메탄, 브롬화포름과 5성분의 에탄계열인 클로로에탄, 1,1-디클로로에탄, 1,2-디클로에탄, 1,1,1-트리클로로에탄,

1,1,2-트리클로로에탄 및 6 성분의 에텐계열인 PCE, TCE, cis-1,2-DCE, trans-1,2-DCE 1,1-DCE, 비닐클로라이드 등이 검출된다. 방향족 탄화수소는 BTEX에 속하는 벤젠, 톨루엔, 에틸벤젠, m-자일렌과, 염소계 벤젠에 속하는 클로로벤젠, 1,3-디클로로벤젠, 1,4-디클로로벤젠의 성분이 검출되며, 0.1~1.5 µg/L 의 매우 낮은 농도를 보인다. MTBE는 5개의 지하수 시료에서 0.4~2.0 µg/L 농도로 검출된다.

농업지역에서 검출된 VOCs는 할로젠지방족탄화수소에 속하는 브롬화메탄 및 크로로포름이며, 0.2~1.1 µg/L 농도 범위가 확인 되었다. 녹지지역은 11성분의 할로젠지방족탄화수소와 4성분의 방향족 탄화수소가 검출되고 있다. 농업지역과 녹지지역의 경우 주유소의 지하수공에서 채취한 시료를 제외하면 모두가 기준치 이하인 낮은 농도를 보인다.

4.4. 토지용도별 수질 및 오염특성

연구지역의 수질유형을 파악하기 위하여 수질분석 값을

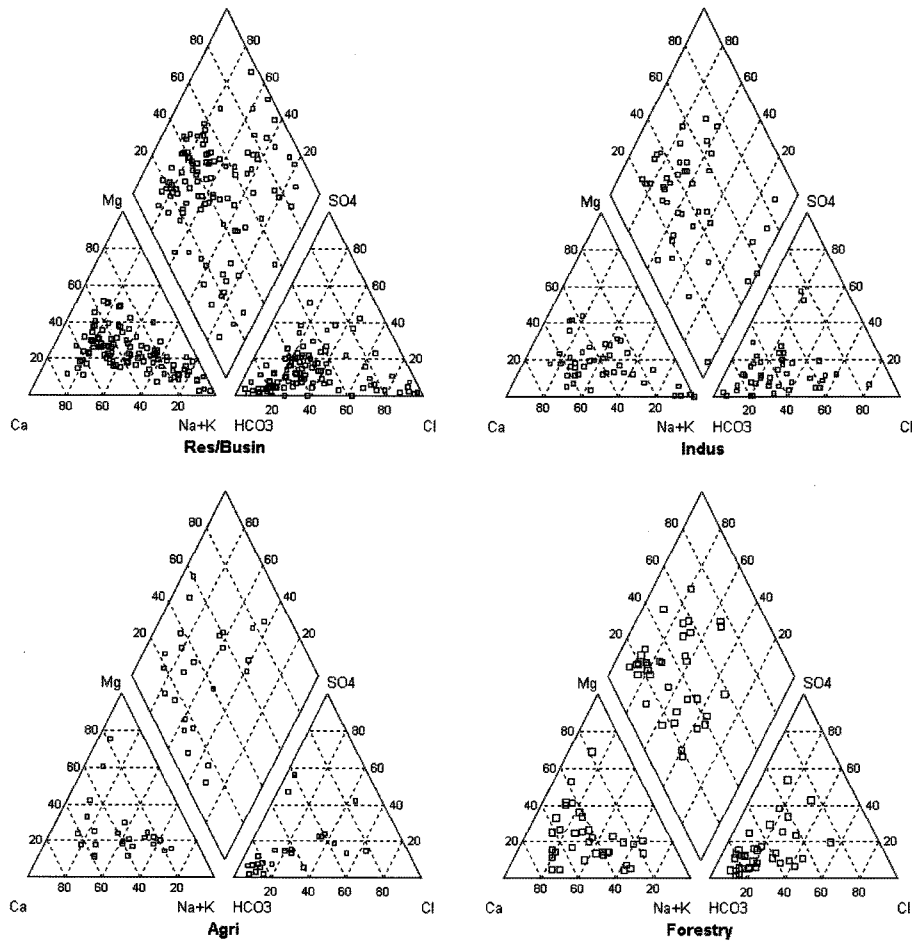


Fig. 5. Piper diagram of groundwater samples associated with land use.

Piper diagram에 도시하였다(Fig. 5). 농업지역 및 녹지지역은 Ca-HCO₃, Ca-Na-HCO₃ 유형이 우세하나 일부에서는 Ca-HCO₃-Cl, Ca-Na-HCO₃-Cl 유형도 보이고 있다. 반면 주거/상업지역과 공업지역의 경우는 Ca-HCO₃, Ca-Na-HCO₃ 유형에서부터 (Na, Ca)-HCO₃-Cl, Ca-Na-Cl 유형까지 다양한 수질특성을 보이며, 이 지역에서는 보다 Cl이 풍부한 (Na, Ca)-Cl 유형까지 변하고 있으며 주거/상업지역과 공업지역간에는 수질특성에서 뚜렷한 구별이 잘되지 않는다. 이를 지질에 따른 지하수 수질유형과 비교하면 농업지역과 녹지지역의 수질특성은 우리나라의 화강암과 퇴적암에 나타나는 수질유형인 Ca-HCO₃, Na-HCO₃ 형과 거의 비슷한 수질유형을 보이고 있다(김성이, 2002). 그러나 주거/상업지역과 공업지역은 해무로부터 공급된 암염(hallite)의 용해, 고염분 혹은 해수 기원의 성분이 다양한 경로를 통한 공급으로 인하여 Ca-HCO₃ → Ca,Na-HCO₃-Cl → Ca,Na-Cl의 순으로 진화된 양상을 나타내는데, 이는 과거의 토지사용 이력에 의한 잔류염분의 영향으로 판단된다.

연구지역내 TDS는 77~21,970 mg/L로 큰 변화를 보이고 있다. 주거/상업지역에서의 TDS는 96~21,670 mg/L(평

균값: 1,214 mg/L)의 범위로 이 지역에서의 전기전도도와 비례적으로 큰 변화를 보이고 있다. TDS가 높은 지점 역시 전기전도도와 마찬가지로 연구지역의 중구와 남부일대로 태화강을 통한 해수의 영향과 인위적인 오염에 의한 것으로 고려된다. 일반적으로 TDS는 폐수의 방류, 표층수의 유입, 하천 유역의 토지이용 변화에 의한 침식현상의 증가 등에 따른 요인들에 의해 증가한다(Appelle and Postma, 1999). 공업지역에서의 TDS의 범위는 77~1,940 mg/L이고 평균값은 360.1 mg/L이다. 농업지역과 녹지지역의 TDS는 각각 74~614 mg/L(평균값: 286 mg/L)과 120~836 mg/L(평균값: 258 mg/L)의 범위로 주거/상업지역과 공업지역에 비해 낮은 값을 나타낸다. 토지이용별 TDS 변화에 따른 주요 이온과의 상관관계(Fig. 6)를 이용하여 연구지역내 오염 및 해수혼합의 정도를 파악하였다. Na, K, Ca, Mg, Cl, HCO₃ 및 SO₄는 TDS증가에 따른 뚜렷한 양의 증가 관계를 보인다. 특히 주거/상업지역 및 공업지역은 가장 높고 좋은 상관관계를 보여 오염 및 해수혼합이 이 지역에서 가장 높고 일어나고 있는 것으로 해석된다. Na의 기원은 생활하수, 제빙염(road salt), 공업용폐수 및 해수에서에서 기인하고, K는 비료 및 폐수에서

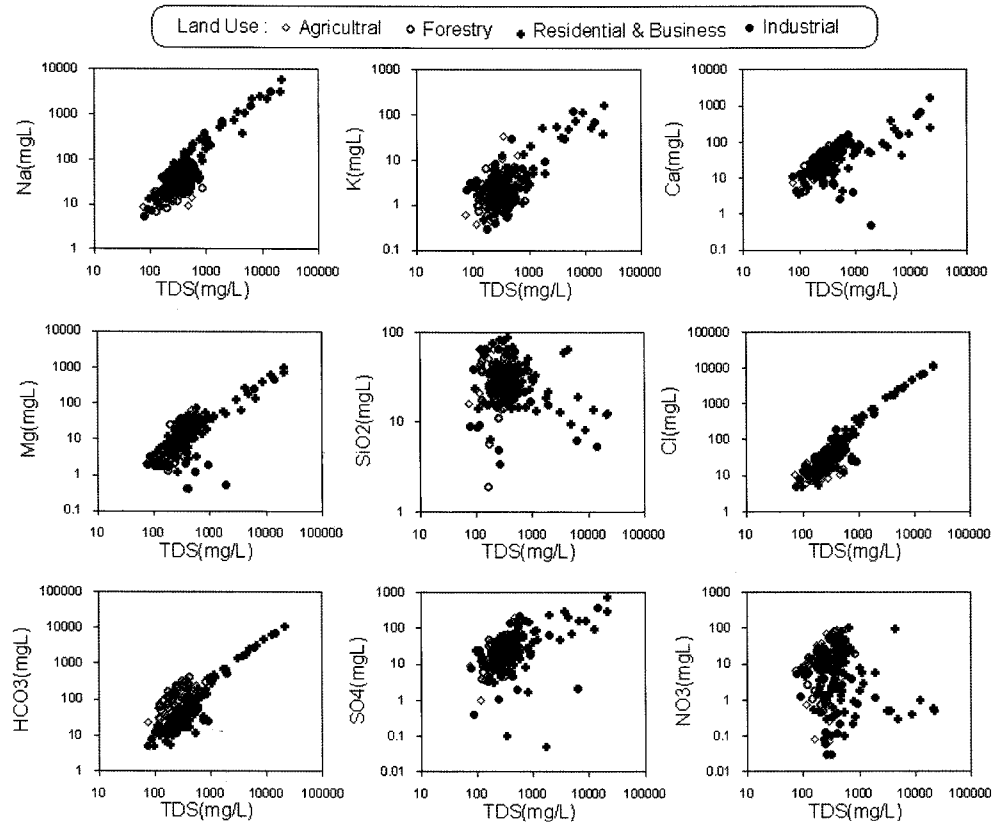


Fig. 6. Relationship between TDS and each composition of the groundwater associated with land use.

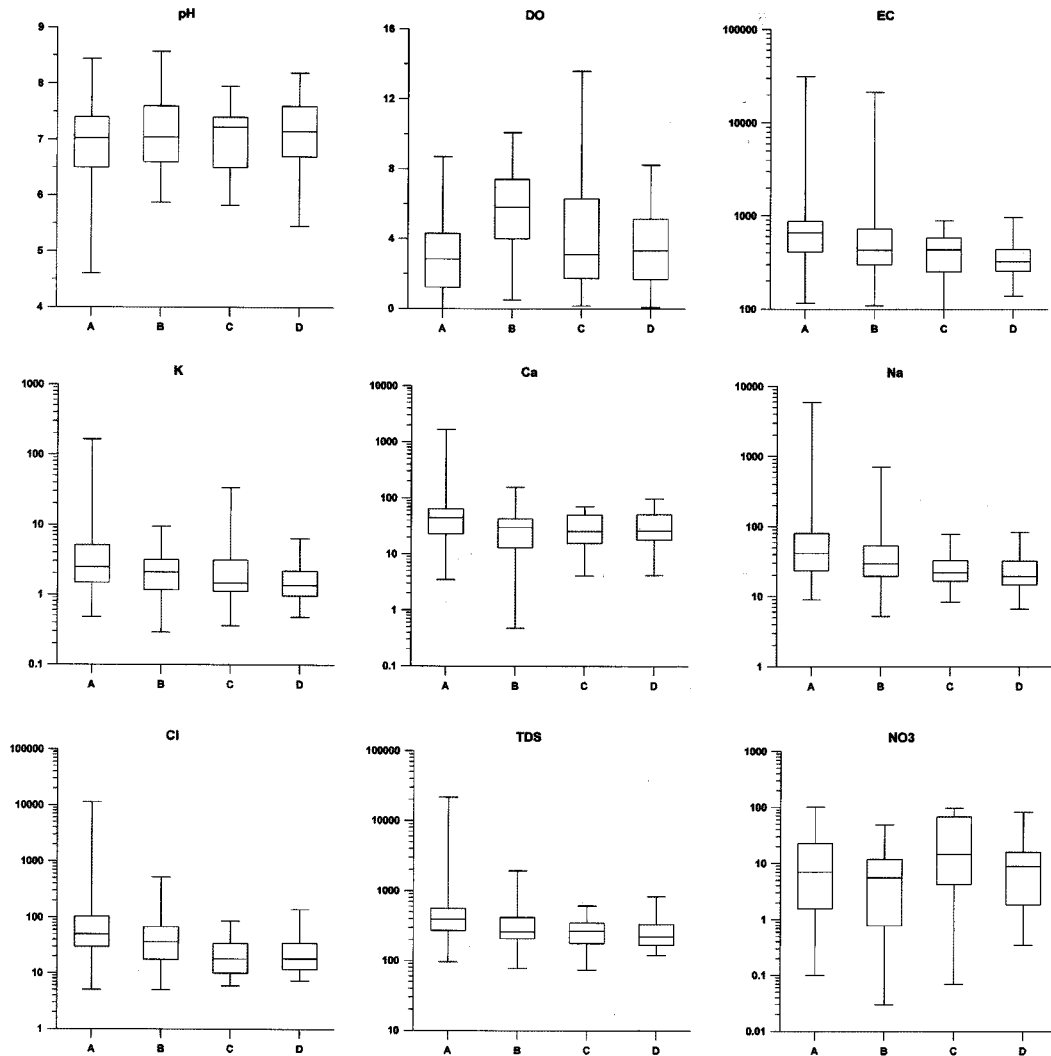


Fig. 7. Boxplots for the each component associated with land use (A: Residential/Commercial area; B: Industrial area; C: Agricultural area; D: Forestry area).

발생된다. Cl의 기원은 생활하수 비료, 제빙염(road salt), 공업용폐수 및 탄화수소의 탈염화작용, 해수에서 기인하며 SO₄는 산업용 폐수 및 황산비료에서 기인한다. 반면 SiO₂ 및 NO₃의 경우는 뚜렷한 증가를 보이지 않는다. 특히 NO₃는 TDS가 1,000 m/L까지는 NO₃와 양의 관계를 유지하다가 그이후로는 감소하는 양상을 보인다. 이는 도심지 생활하수 및 비료에 기인하는 NO₃는 오염이 증가함에 따라 즉 TDS의 함량이 증가함에 따라 증가하나 그 이후는 오히려 탈질화작용에 의해 감소되는 것으로 해석된다. TDS와 주요이온과의 상관관계에서 연구지역 지하수, 특히 주거/상업지역과 공업지역 지하수의 용존이온의 증가는 자연적인 물-암석 반응에 기인하기 보다는 인위적인 오염에 기인함을 보여 주고 있다.

토지용도에 따른 오염특성을 비교하기 위해 각각의 수

질성분을 Box-Whisker Plot에 도시하였다(Fig. 7). 이 도시는 각 성분들의 최대값, 최소값, 중앙값, 1사분위값, 3사분위값을 도시한 것으로, 제일 위와 아래는 각각 최대값과 최소값이고, 사각형의 윗변과 아랫변은 각각 3사분위값과 1사분위값을 나타낸다. 그리고, 사각형의 내부에 있는 선은 중앙값을 표시하고 있다. pH의 경우는 앞에서 살펴본 바와 같이 거의 비슷한 약산성 및 중성의 값을 보이고 있으나, 주거/상업지역의 경우는 최소값이 4.6으로 산성화되고 있음을 알 수 있다. EC, TDS, Ca, Na, Cl, Fe의 경우는 주거/상업지역 > 공업지역 > 농업/농지지역 순으로 높은 함량 및 농도를 보이고 있으며, 이는 토지사용이력과 인위적 오염에 의한 결과에 기인한다. NO₃와 K의 경우는 주거/상업지역과, 농업지역이 높은 함량 분포를 보인다. 이는 도시화에 따른 영향과 경작에 따른 비료의

Table 2. Contamination index in the study area

1 grade					
ID. NO.	C _d	ID. NO.	C _d	ID. NO.	C _d
80003	1.1	82024	1.7	82069	4.1
80004	1.2	82047	1.6	82022	5.5
80007	1.4	83009	1.8	80013	5.1
80036	1.2	83061	1.4	80015	5.2
82002	1.3	80026	2.0	80038	5.1
82017	1.5	80002	2.1	83001	5.6
82065	1.7	83004	2.2	80006	9.5
82066	1.4	80020	2.1	80035	6.7
82074	1.9	81001	2.1	83065	6.9
82078	1.6	81006	2.5	83041	8.6
82084	1.9	81014	2.6	83031	7.0
83016	1.0	81021	2.5		
82038	1.4	80032	2.9		
2 grade					
ID. NO.	C _d	ID. NO.	C _d	ID. NO.	C _d
80021	2.0	83027	2.1	80034	12.8
80024	1.4	82050	2.4	82067	13.8
80027	1.4	82103	2.3	82082	16.5
81002	1.1	80008	2.7	82043	11.0
81005	2.0	81007	2.8	80001	25.7
81012	1.6	82064	3.0	82080	27.1
81023	2.0	80028	3.8		
3 grade					
ID. NO.	C _d	ID. NO.	C _d	ID. NO.	C _d
81013	1.2	83002	3.1	82070	35.3
83003	1.4	83038	3.1	81018	45.6
81019	1.1	80017	3.6	81020	49.7
82053	1.3	83055	3.6		
82049	1.4	83060	3.4		
83057	1.0	80011	4.4		
4 grade					
ID. NO.	C _d	ID. NO.	C _d	ID. NO.	C _d
83021	1.3	82106	4.4	80033	96.5
82048	1.2	82036	4.2	82072	80.2
80009	1.5	81027	4.1	82075	52.1
81016	1.7	82083	4.1	82076	72.5
83054	1.3	82091	4.1	82081	117.6
80040	1.1	83039	4.9		
83018	1.1	82104	4.4		

사용에 의한 영향으로 기인된다. 앞에서 기술한바와 같이 울산만과 접하고 있는 자연적 요인과 도시화 이전 태화강 주변이 염전과 나대지로 사용된 것과 인간활동에 의한 처리되지 않은 유기물(생활하수, 폐수, 오물)의 증가, 부실한 공 관리상태 등으로 인해 오염되어 있다.

4.5. 오염지수 산출 및 적용

오염지수(Contamination index; C_d) 산출을 위해 먹는 물, 생활용수, 공업용수, 농업용수의 용도별 수질기준치와 수질분석 자료를 이용하였다. 먼저 수질분석항목 중에서 수질기준치에 명시되어 있는 수질성분은 Al, F, Cl, Br,

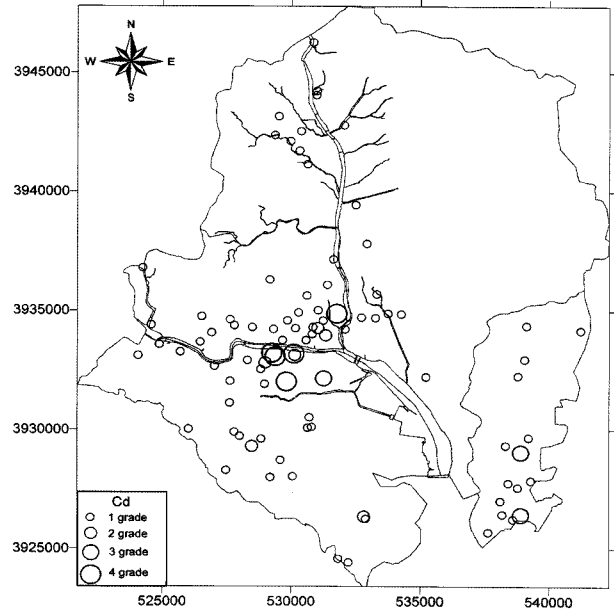


Fig. 8. Groundwater contamination index map in the study area.

NO₃, SO₄, Fe, Mn, Cu, Pb, Zn, As, TCE, TCA, PCE 등이다. 다른 성분들에 대해서는 확실한 기준치가 없기 때문에 현행 지하수 용도별 수질기준에 따른 성분들에 대해서만 오염지수를 산출하였다(Table 2).

주거/상업지역의 경우는 총 111개 지점에 대해 한 성분에서 네가지 성분까지 기준치를 초과하는 57개 지점에 대한 오염지수를 산출하였고, 공업지역은 총 45지점에 대해서 11개 지점, 농업지역은 24개 지점에 대해서 12개 지점, 녹지지역은 총 36개의 지점에 대해서 11개의 지점에 대해서 각각의 오염지수를 산출하였다. 각각의 토지용도별 시료에 대해 오염지수를 산출한 비율을 살펴보면 주거/상업지역이 0.51, 공업지역이 0.24, 농업지역이 0.50, 녹지지역이 0.31이었다. 앞에서 언급한 바와 같이 주거/상업지역과 농업지역은 NO₃, Fe 등에 의한 영향으로 인한 오염지수 산출비율이 제일 높게 나타났다. 산출된 오염지수의 범위는 1.1~117.6으로 평균은 9.56으로 산출되었다. 수질기준치와 분석치가 같은 농도일 때 즉 오염지수가 1을 기준으로 볼 때 자연적(지리적), 인위적 오염의 정도가 9배 이상 진행됐다고 해석할 수 있다.

Fig. 8은 산출된 오염지수를 4단계로 나누어서 도시한 그림이다. 1단계 오염지수는 1에서 10까지, 2단계는 10~30, 3단계는 30~50, 4단계는 50 이상으로 세분하였다. 1단계의 분포는 녹지지역을 제외한 연구지역 전역에 걸쳐서 분포한다. 이는 곧 자연적, 인위적 요인들에 의한 오염이 진행되고 있음을 알 수 있다. 그 외 2단계에서 4단계

의 오염지수를 보이는 곳은 주로 태화강을 중심으로 형성된 남구와 중구의 주거/상업지역이며, 동구의 방어진 일대 공업지역 등이다. 특히, 4단계에 해당하는 5지점 중에서 4지점이 남구에 속하는 곳으로, 이는 울산광역시 주거/상업지역의 오염이 다른 지역에 비해 심각한 수준에 있음을 재확인 할 수 있는 결과이다.

5. 결 론

울산지역의 토지용도에 따른 지하수 수질 및 오염특성을 파악하고, 지하수의 오염 정도를 평가하고 시각화하는 방법인 오염지수를 산출하였다. 연구지역 지하수의 화학 조성은 매우 다양하게 나타나며, 전기전도도의 경우, 100~31,360 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 로 매우 큰 변화를 보이고 있다. 연구지역 지하수의 화학조성은 토지용도에 따라 많은 영향을 받는 것으로 해석되었다. 농업지역과 녹지지역 지하수의 전기전도도는 주거/상업지역과 공업지역에 비해 비교적 낮은 값을 나타내고 수질유형은 Ca-HCO₃, Ca-Na-HCO₃ 유형이 우세하다. 주거/상업지역과 공업지역 지하수의 경우는 농업지역과 녹지지역 지하수에 비해 Cl이 풍부한 (Na, Ca)-Cl 유형으로 변하고 있으며, 전기전도도 또한 농업지역과 녹지지역 지하수에 비해 훨씬 더 높다. 용존이온 역시 태화강을 중심으로 형성된 울산지역 중구와 남구의 주거/상업지역에서는 TDS, Ca, Na, Cl, Fe, NO₃ 등이 높은 함량을 보이는데, 이는 도시화 이전에 형성되었던 염전과 나대지에 잔류한 염분 성분과 폐수의 방류, 표층수의 유입, 하천유역의 토지이용변화, 처리되지 않은 유기물(생활하수, 오물), 부실한 지하수공 관리상태 등의 여러 요인들에 의하여 오염이 진행되고 있음을 알 수 있다.

연구지역의 VOCs 검출 성분은 VOCs 61개의 분석항목 중에서 총 35개 성분이 확인되었으며, 이중 할로젠지방족탄화수소가 23개 성분, 석유탄화수소가 12개 성분이 검출되었다. 일부 공업지역에서 할로젠탄화수소의 높은 농도치(최고 231.2 $\mu\text{g}/\text{L}$)를 보이고 있으나, 나머지 지역은 대체로 낮은 농도를 보인다. 그러나 연구지역 지하수공의 심도는 대부분 100~150 m로 분석된 시료는 암반대수층의 지하수이다. 따라서 분석시 토양층이나 기반암과 토양경계부 등 지표면 근처의 오염된 지하수가 배제될 수 있어 오염지역에서의 VOCs의 검출이 실제 오염현황보다 낮게 평가될 가능성이 있다. 특히 무기물이나 중금속이 아닌 VOCs의 경우에는 지표에 한정되는 경우가 매우 많기 때문에 이 논문의 결과보다 천부지하수 오염 가능성이 높을 수도 있다. 또 한 가지 고려해야할 점은 연구지역의 유기

오염 물질들은 DNAPL(Dense non-aqueous phase liquid)이므로 높은 밀도로 인해 파쇄대나 사공극/절리(dead-end pores/fractures)등에 잘 스며든다. 그러므로 지하수 시료 채취시 충분한 양수를 하였다 하더라도 유기오염 물질들이 파쇄대나 절리에 잔류하여 검출되지 않은 점에 대해서도 고려해야 할 것이다.

농업지역은 질산성질소에 의한 오염이 진행됨을 알 수 있었는데, 이는 자연적인 물-암석 반응에 기인하기 보다는 인위적인 오염에 기인함을 보여 주고 있으며, 토지이용 형태상 배출되는 축산폐수나, 동물의 배설물, 비료의 영향에 기인한 결과라 판단된다.

지하수 용도별 수질기준치와 수질분석 자료를 이용하여 연구지역의 토지용도에 따른 오염지수를 산출하였다. 토지용도별 시료에 대한 오염지수 비율은 주거/상업지역이 0.51, 공업지역이 0.24, 농업지역이 0.50, 녹지지역이 0.31 이었다. 주거/상업지역과 농업지역에서의 높은 오염지수 비율은 NO₃, Fe, 등에 의한 영향인 것으로 고려된다. 산출된 오염지수의 범위는 1.1~117.6으로 평균은 9.56으로 산출되었다. 수질기준치와 분석치가 같은 농도일 때 즉 오염지수가 1을 기준으로 볼 때 자연적(지리적), 인위적 오염의 정도가 9배 이상 진행됐다고 간주할 수 있을 것이다. 이에 울산지역 주거/상업지역을 중심으로 한 지하수 오염에 대한 더욱 세밀한 조사 및 관리가 필요하다. 오염지수 산출에 있어 향후 필요한 과제는 수질 기준치에 명시되어 있지 않은 수질성분들에 대한 기준치를 확립해야 한다. 이를 통하여 종합적 수질성분에 대한 오염지수 산출이 필요하며 위해성 평가와 병행한 오염평가가 필요하다. 또한 오염지수 산출을 통해 연구지역의 효율적인 수질보전 및 지하수오염 대책 수립이 필요하다.

사 사

이 연구는 한국지질자원연구원 기본연구사업인 청정 대용량 지하수자원 확보 기술개발(07-3211-7)의 일환으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- 김성이, 2002, 금정산과 백양산 일대에 분포하는 약수의 지구화학 및 지구통계학적 연구, 부산대학교 대학원 이학석사 학위논문, p. 147.
- 박양대, 윤형대, 1968, 한국지질도(1 : 50,000) 울산도폭 및 설명서, 국립지질조사소, p. 45.

- 윤옥, 조병욱, 2004, 토지이용에 따른 울산지역 지하수의 VOCs 함량 특성, *자원환경지질*, **37**(6), 613-629.
- 윤옥, 조병욱, 성규열, 2004, 울산지역 지하수중 비소의 산출 및 존재형태, *자원환경지질*, **37**(6), 657-667.
- 이인호, 조병욱, 이병대, 성익환, 임용수, 2002, 광주광역시 지하수의 수리지화학적 특성 연구, *지하수토양환경*, **3**(7), 115-132.
- 이인호, 조병욱, 이병대, 2003, 대구시 퇴적암 분포 지역의 지하수에 대한 환경지화학적 특성, *지질공학*, **13**(1), 1-16.
- 이평구, 박성원, 전치완, 신성천, 2001, 서울시 도로변 빗물과 지하수의 VOCs 오염, *지하수토양환경*, **6**(3), 73-91.
- 이철호, 1999, 유류 및 침출수에 의한 지하수오염과 처리방안, *지하수환경학회 심포지움*, 139-167.
- 조병욱, 이병대, 윤옥, 임현철, 2003, 지하수의 Br : Cl 함량비를 이용한 울산지역 해수침입 연구, *자원환경지질*, **36**(5), 339-347.
- 조병욱, 윤옥, 임현철, 성익환, 장우석, 2005, 울산지역 지하수, 하수 및 하천수의 VOCs 오염특성, *자원환경지질*, **38**(1), 57-65.
- 함세영, 정재열, 류상민, 우윤정, 2003, 부산지역의 수리지질층서에 따른 지하수오염 특성(II), *한국과학재단*, R02-2001-00249, p. 100.
- Appelle, C.A.J. and Postma, D., 1999, *Geochemistry, groundwater and pollution*, Rotterdam, p. 535.
- Backman, B., Bodis, D., Lahermo, P., Rapant, S., and Tarvainen, T., 1998, Application of a groundwater contamination index in Finland and Slovakia, *Environmental Geology*, **36**(1-2), 55-64.
- Barcelona, M.J., Gibb, J.P., Helfrich, J.A., and Garske, E.E., 1985, Practical guide for groundwater sampling, SWS Contract Report 374, p. 94.
- Davis, S.N. and DeWiest, R.J.M., 1966, *Hydrogeology*. John Wiley and Sons, Inc., New York, NY, p. 463.
- Jeong, C.H., 2001, Effect of land use and urbanization on hydrochemistry and contamination of groundwater from Taejon area, Korea, *Journal of Hydrology*, **253**(1-4), 194-210.
- Rapant, S., Vrana, K., and Bodis D., 1995, Geochemical atlas of the Slovak Republic. Part I, groundwater (in Slovak) Geofond, Bratislava.
- Ryoo, C.R., 1997, Fault system in the southeastern Korea: 'Kyongju' horsetail structure as a new synthetic interpretation, *ccop Technical Bulletin*, **29**, 5-28.
- Lee, Y.I. and Kim, J.H., 1997, Tectonic Evolution of Eastern Asian Continent, *Geol. Soc. Korea 50th Anniv. International Sym.*, p. 22-27.