

## 토지이용도별 울산지역 지하수의 수질특성

임현철

한국지질자원연구원 지하수지열연구부

### Relation of Groundwater Quality to Land Use on Ulsan Urban area

Hyun Chul Im

Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 305-350 Korea

**요 약** : 울산 도시지역 지하수의 수질 특성을 파악하기 위하여 216개의 일반 수질분석과 168개의 VOCs 분석이 이루어졌으며, 이를 주거·상업지역, 공업지역, 농업지역, 산림지역으로 구분하여 토지이용과 지하수 수질과의 관계를 분석하였다. 전반적으로 보아서 남구 태화강 저지대 일대 주거·상업지역 지하수에서 과거 해수의 영향에 의해서 Na와 Cl의 함량이 높다. NO<sub>3</sub>는 농업지역, VOCs는 공업지역 지하수에서 높은 함량을 보이기도 하지만, 토지이용도별 지하수의 수질오염 특성 구분은 어렵다. 아직까지 연구지역 지하수의 오염은 우려할만한 수준은 아니나, 도시화가 계속 진행되고 있기 때문에 지속적인 관찰이 요구된다.

**주요어** : 지하수, 함량, 토지이용도, 휘발성유기화합물

**ABSTRACT** : 216 groundwater samples for inorganic constituents and 168 samples for VOCs in the Ulsan urban areas and analyzed to relate groundwater chemistry to four land use zones, residence·commercial, industrial, agricultural, and forestry. In general, Na and Cl concentrations in groundwater were high in residence·commercial zone near Taehwa river due to residual saline. Although NO<sub>3</sub> contents is high in agricultural zone and VOCs content is high in industrial zone, it seems difficult to relate groundwater pollution to land use zone. Even though groundwater pollution of the area is still low, continuous monitoring is necessary because the city is expanding.

**Key words** : groundwater, concentration, land use, VOCs

#### 1. 서 언

최근 지표수의 오염증가에 따라 음용수로서의 지하수에 대한 관심이 커지고 있다. 지하수의 수질은 1차적으로 지하수공이 관통한 지질에 영향을 받는다. 그러나 도시지역과 같이 인구와 산업시설이 밀집된 지역에서는 지질뿐만 아니라 잠재오염원도 도시지역 지하수의 수질에 영향을 미칠 수 있다(Grischek *et al.*, 1996). 이러한 도시지역 지하수의 오염에 대해서는 이미 여러 나라에서 관찰된 바 있으며(Lerner and Tellam, 1992), 유럽지역 지하수에서는 휘발성유기화합물(VOCs), 방향족 탄화수소, 황화물, 염소, 질산염, 중금속 등이 주 오염원이 되고 있다고 보고되고 있다. 이러한 도시지역 지하수 오염 사례 수는 점점 증가하고 있으며, 이를 치유하기

위한 다양한 방법이 제시되고 있으나, 시간적, 경제적 비용이 너무 크다고 알려지고 있다.

외국에서는 토지이용과 관련된 도시지역 지하수의 수질 오염에 대해서 80년대 말부터 여러 논문이 출간되고 있으나(Cane *et al.*, 1989; Eckhardt and Stackelberg, 1995; Graniel *et al.*, 1999), 국내에는 아직 초보적인 연구단계에 머물러 있다. 즉, 정찬호와 김은지(2001)는 대전지역 지하수의 수질 오염을 구도심권, 신도심권, 녹지지역으로 구분하여 설명하였으며, 김무진 외(2002) 등은 창원지역 지하수의 오염을 주거·상업지역과 공업지역으로만 구분하여 설명하였다. 윤옥과 조병욱(2004)에 연구지역인 울산지역에 대해서 주거·상업지역, 공업지역, 농업지역, 산림지역으로 구분하여 지하수의 VOCs 함량 특성을 설명하였다.

Corresponding Author : 임현철(ihc@kigam.re.kr)

원고접수일 : 2005년 8월 3일 게재승인일 : 2005년 8월 26일

본 연구는 도시지역 지하수의 수질은 지표의 토지이용에 영향을 받는다는 가정하에서 출발하였다. 도시화에 따른 울산지역 지하수의 수질 특성을 파악하기 위하여 울산광역시 중에서 중구, 동구, 남구, 북구의 4개구를 대상으로 하여, 총 216개의 지하수 시료를 채취하여 일반 성분을 분석하였으며, 또한 168개 지하수공에서 61개 항목의 VOCs를 분석하였다. 분석된 결과는 주거·상업지역, 공업지역, 농업지역, 산림지역의 4개의 토지이용으로 구분하고, 토지 이용에 따른 지하수의 수질 특성을 파악하고, 오염의 여부를 파악하는데 그 목적이 있다.

## 2. 수문지질

도시지역에서는 강우에 의한 유효침투량 뿐만 아니라 상·하수도의 누수도 지하수 충전에 영향을 주며 (Lerner, 1990), 따라서 지하수의 수질에도 영향을 미치게 된다. 연구지역은 울산광역시 중구, 동구, 남구, 북구의 4개구로서, 면적은 약 301km<sup>2</sup>, 2002년 당시 인구는 약 800,000명 정도이다. 연구지역에서 주 지하수 유입은 강우에 의한 유효침투량과 상·하수도로부터의 누수이다. 연구지역에서 최근 30년간의 연평균강수량은 1,275 mm/y(성익환 외, 2003)이고, 2002년 상수도의 생산량은 286,830m<sup>3</sup>/d(울산광역시 상수도사업본부, 2002), 누수율은 12%로 알려져 있다(환경부, 2001). 연구지역에서의 지하수 배출은 대부분 지하수공에서의 양수이다. 연구지역의 지하수공 수와 사용량은 2000년 12월 현재 각각 1,991개와 31,752m<sup>3</sup>/d(건설교통부, 2001)에 불과하여 타 대도시에 비해서 적은 편이다.

연구지역의 토지이용은 대부분이 산림지역에 해당되나, 태화강 주변과 이남 지역, 동구의 방어동 부근은 주거·상업지역으로 이용되고 있다. 남구의 동측과 북구 효문동 일대, 동구 미포동 일대는 공업지역으로 이용되고 있다(성익환 외, 2003). 특히, 태화강과 동천이 합류되는 저지대는 도심이 개발되기 전에는 과거 습지, 염전 등으로 이루어진 곳이었으나, 현재는 성토되어 도심지를 이루고 있다(조병욱 외, 2003).

연구지역의 지질은 경상누층군 하양층군에 속하는 백악기 울산층과 이를 관입 또는 분출한 백악기 유천층군의 안산암, 그리고 백악기 말 내지 제 3기초의 불국사 화강암류인 흑운모화강암, 각섬석화강암, 규장반암, 화

강반암, 규장암, 산성 및 염기성 암맥으로 구성되어 있으며, 이를 제3기의 당사 안산암과 정자역암이 관입 피복하고 있다. 울산단층을 따라서 북에서 남으로 흐르는 동천과 태화강이 만나는 지역에는 하상 퇴적층이 발달하여 있다. 이들은 주로 점토사와 역으로 구성되는데 두께는 최대 53.2 m에 이르는 것으로 알려져 있다(성익환 외, 2003).

## 3. 시료채취 및 분석

연구지역에 굴착된 지하수공들에 대해 정확한 제원(심도, 케이싱 심도 등)을 파악하기는 어려우나, VOCs 분석용 시료가 채취된 168개 지하수공 중에서 굴착심도가 알려진 147개 지하수공의 심도는 최저 2 m에서 최고 360 m이고 평균 심도는 130.2 m인 것으로 조사되었다. 이들 지하수공의 표고는 대부분이 50 m 이하로, 지하수공들의 공저는 해수준면 하에 위치하고 있다.

일반 수질분석용 시료가 채취된 지하수공의 수는 총 216개로서(Fig. 1), 이들은 강우량이 적어 지하수질이 상대적으로 안정한 갈수기인 2002년 4월부터 6월 사이에 이루어졌다. 지하수 시료는 10~20분간의 양수를 통해 지하수공 체적의 약 3~5배를 배출시킨 다음, 수질이 안정을 이루었을 때 현장에서 pH, EC, 온도, 알카리도

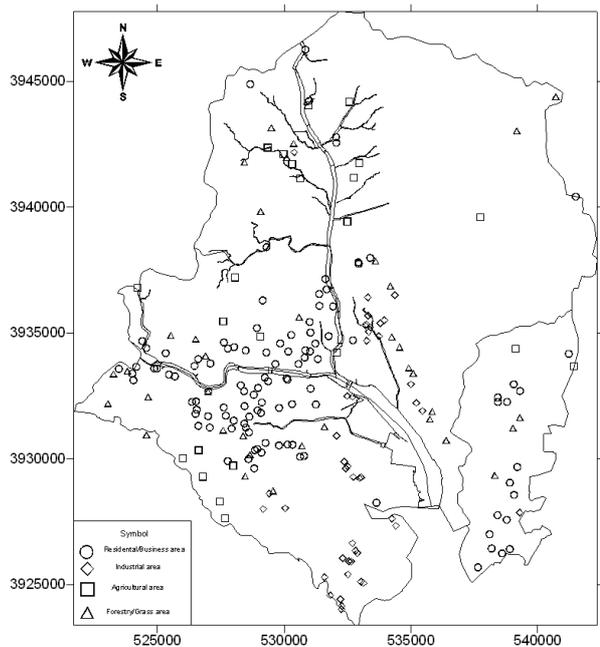


Fig. 1 Map showing groundwater sampling sites.

(TOA pH meter (HM-12P), TOA EC meter (CM-14P), SK1250MC) 등을 측정하였고, 분석용 시료는 0.45  $\mu\text{m}$  멤브레인 필터로 여과하여 채취하였다. 채취한 시료 중에서 음이온 분석용 시료는 4°C 이하로 냉장 보관하였고, 양이온 분석용 시료는 현장에서 pH 2 이하로 산 처리하였다. 분석된 수질 항목은 K, Na, Ca, Mg, SiO<sub>2</sub>, Cl, SO<sub>4</sub>, F, NO<sub>3</sub>, Br 등이었고, 이들 성분에 대한 화학분석은 한국지질자원연구원 분석부에서 이루어졌으며, 원자흡광분석기(Perkin Elmer 5100), 유도결합플라즈마(Jobin Yvon 38) 및 이온크로마토그래피(Dionex 300)를 이용하였다. Cl과 Br의 검출한계는 각각 0.1 mg/L와 0.08 mg/L이다(Table 1).

연구지역 지하수의 VOCs 함량을 파악하기 위해서는 일반 수질분석용 시료가 채취된 216개 중에서 168 곳을 선정하였다. VOCs 성분 분석은 미국지질조사소(USGS)의 NAWQA 프로그램에서 선정한 60개 VOCs 항목(방향족 탄화수소 25종과 할로겐지방족탄화수소

35종)과 MTBE 1종을 대상으로 하였다. VOCs의 분석은 한국지질자원연구원에서 수행하였으며, 분석방법은 퍼지엔트랩(purge and trap)과 기체크로마토그래피/질량분석법(GC/MS)을 이용하여 물의 VOCs를 동시에 분석할 수 있는 미국 EPA 524.2 방법에 따랐다(US EPA, 1992).

## 4. 연구결과 및 토의

### 4.1 토지이용 구분

도시화에 따른 토지이용의 변화는 기존 지하수의 충전 기작과 함께 지하수의 수질에도 영향을 미친다. 지하수의 오염은 지표 오염원이 지하로 이동하여 일어나기 때문에, 지하수 오염 연구에 있어서 잠재 오염원의 파악, 즉 토지 이용의 구분은 중요하다. 물론 지하 지질의 물리화학적, 미생물학적 등 여러 요인에 의해서 지하수

**Table 1** Mean, median, and range of physicochemical data by land use.

	Residential / Business					Industrial					
	Unit	Min.	Max.	Mean	Median	Unit	Min.	Max.	Mean	Median	
<b>pH</b>		4.6	8.44	6.92	7.03	<b>pH</b>	5.87	8.57	7.09	7.04	
<b>EC</b>	$\mu\text{s}/\text{cm}$	116	31360	1781	656	<b>EC</b>	$\mu\text{s}/\text{cm}$	109	21200	1218	428
<b>Eh</b>	mV	-192	589	138	149.5	<b>Eh</b>	mV	-115	516	113.6	132
<b>DO</b>	mg/l	0	8.7	2.92	2.82	<b>DO</b>	mg/l	0.5	10.1	5.60	5.8
<b>T</b>	°C	13.6	24.4	18.0	17.5	<b>T</b>	°C	15.9	23.8	17.82	17.3
<b>K</b>	mg/l	0.48	164	9.12	2.45	<b>K</b>	mg/l	0.29	9.41	2.7	2.08
<b>Na</b>	mg/l	9.02	5900	240.3	41.5	<b>Na</b>	mg/l	5.23	705	64.72	29.3
<b>Ca</b>	mg/l	3.47	1650	71.69	44.85	<b>Ca</b>	mg/l	0.48	157	33.59	29.9
<b>Mg</b>	mg/l	1.19	1010	50.74	18.0	<b>Mg</b>	mg/l	0.41	43.3	10.35	6.38
<b>SiO<sub>2</sub></b>	mg/l	6.42	89.2	31.75	28.2	<b>SiO<sub>2</sub></b>	mg/l	3.4	81.5	25.62	22.7
<b>Al</b>	mg/l	0	0.09	0.001	0	<b>Al</b>	mg/l	0	0.03	0.003	0
<b>F</b>	mg/l	0	3.88	0.250	0.09	<b>F</b>	mg/l	0	1.4	0.179	0.08
<b>Cl</b>	mg/l	5.05	11300	479.7	50.2	<b>Cl</b>	mg/l	4.99	524	56.69	36.2
<b>Br</b>	mg/l	0	48	1.8	0.055	<b>Br</b>	mg/l	0	2.61	0.283	0.12
<b>NO<sub>3</sub></b>	mg/l	0	101	13.48	5.12	<b>NO<sub>3</sub></b>	mg/l	0	48.9	6.43	2.2
<b>SO<sub>4</sub></b>	mg/l	0.05	765	52.59	28.4	<b>SO<sub>4</sub></b>	mg/l	0.41	221	34.63	23.6
<b>TDS</b>	mg/l	96	21970	1213.8	394	<b>TDS</b>	mg/l	77	1940	360.1	262
<b>HCO<sub>3</sub></b>	mg/l	21.6	1310	260.7	211	<b>HCO<sub>3</sub></b>	mg/l	35.08	902.8	192.8	139
<b>Li</b>	mg/l	0	10	0.222	0.06	<b>Li</b>	mg/l	0	0.24	0.049	0.04
<b>Sr</b>	mg/l	0	163	2.881	0.42	<b>Sr</b>	mg/l	0	1.38	0.279	0.17
<b>Fe</b>	mg/l	0	24.8	1.288	0.03	<b>Fe</b>	mg/l	0	4.57	0.443	0.02
<b>Mn</b>	mg/l	0	9.6	0.353	0.01	<b>Mn</b>	mg/l	0	0.54	0.06	0.01
<b>Cu</b>	mg/l	0	0.04	0.003	0	<b>Cu</b>	mg/l	0	0.05	0.004	0
<b>Pb</b>	mg/l	0	0.25	0.009	0	<b>Pb</b>	mg/l	0	0.26	0.013	0
<b>Zn</b>	mg/l	0	7.5	0.287	0.04	<b>Zn</b>	mg/l	0	4.25	0.689	0.07
<b>As</b>	mg/l	0	0.056	0.012	0.007	<b>As</b>	mg/l	0	0.019	0.004	0.002

Table 1 Continued.

Agriculture					Forestry						
	Unit	Min.	Max.	Mean	Median		Unit	Min.	Max.	Mean	Median
pH		5.82	7.95	7.00	7.23	pH		5.45	8.19	7.09	7.15
EC	$\mu\text{s}/\text{cm}$	100	884	414.9	432.5	EC	$\mu\text{s}/\text{cm}$	137.2	957	369.0	323
Eh	mV	47	516	197.6	196	Eh	mV	-55	690	158.1	175
DO	mg/l	0.16	13.6	4.19	3.09	DO	mg/l	0.08	8.23	3.46	3.32
T	$^{\circ}\text{C}$	9.4	20	16.04	16.2	T	$^{\circ}\text{C}$	14.4	22.2	17.3	17
K	mg/l	0.36	33.7	4.11	1.46	K	mg/l	0.48	6.36	1.72	1.35
Na	mg/l	8.42	78.7	27.99	21.8	Na	mg/l	6.68	82.7	24.1	19.5
Ca	mg/l	4.11	71	32.17	25.75	Ca	mg/l	4.18	98.6	33.73	26.1
Mg	mg/l	1.81	64.3	14.8	9.92	Mg	mg/l	1.28	38.3	11.48	6.85
SiO <sub>2</sub>	mg/l	13.9	65.2	30.27	26.2	SiO <sub>2</sub>	mg/l	1.91	64.6	30.79	30
Al	mg/l	0	0.03	0.004	0	Al	mg/l	0	0	0	0
F	mg/l	0.01	1.72	0.202	0.075	F	mg/l	0.03	2.66	0.220	0.080
Cl	mg/l	5.89	86.5	25.12	18.0	Cl	mg/l	7.33	140	25.81	18.2
Br	mg/l	0	0.25	0.019	0	Br	mg/l	0	0.12	0.01	0
NO <sub>3</sub>	mg/l	0	98.5	26.21	12.35	NO <sub>3</sub>	mg/l	0	82	9.89	2.76
SO <sub>4</sub>	mg/l	0.97	201	35.19	17.55	SO <sub>4</sub>	mg/l	3.52	153	25.7	19.1
TDS	mg/l	74	614	286.4	270	TDS	mg/l	120	836	258.3	224
HCO <sub>3</sub>	mg/l	21.6	282.1	148.5	159.1	HCO <sub>3</sub>	mg/l	27.8	411	150.6	117
Li	mg/l	0	0.29	0.045	0.025	Li	mg/l	0	0.27	0.047	0.03
Sr	mg/l	0	1.35	0.267	0.07	Sr	mg/l	0	3.8	0.430	0.14
Fe	mg/l	0	0.56	0.043	0.017	Fe	mg/l	0	3.01	0.162	0.02
Mn	mg/l	0	0.18	0.018	0	Mn	mg/l	0	0.33	0.028	0
Cu	mg/l	0	0.03	0.005	0	Cu	mg/l	0	0.02	0.003	0
Pb	mg/l	0	0	0	0	Pb	mg/l	0	0	0	0
Zn	mg/l	0	1	0.087	0.02	Zn	mg/l	0	2.5	0.262	0.05
As	mg/l	0	0.063	0.012	0.004	As	mg/l	0	0.072	0.020	0.004

의 오염은 영향을 받지만, 가장 중요한 요인은 지표 오염원의 종류, 농도, 크기 등일 것이다(Eckhardt *et al.*, 1995).

연구지역의 토지이용도는 국립지리원의 자료를 이용하였다. 당초 토지이용도에는 복잡한 여러 형태의 토지이용의 구분이 있었으나, 본 연구에서는 유사한 토지이용끼리는 통합시켜서 최종적으로는 주거·상업, 공업, 농업, 산림지역의 4개 등급으로 단순화시켰다(Fig. 2). 물론 토지이용을 단순, 그룹화하기는 쉽지 않다. 이는 토지이용이 일정하지 않고, 하나의 토지이용 지역내에 소규모의 다른 토지 이용이 존재하는 경우가 많기 때문에 원래 의도한 토지이용의 수질을 대변하지 못하는 경우도 있다. 본 연구에서 주거·상업지역은 상, 하수도가 설치되어 있고 인구가 밀집된 지역이다. 공업지역은 준공업지역을 포함하는 지역으로, 주거·상업지역처럼 상, 하수도가 설치되어 있으나, 설치연도가 주거·상업지역보다 짧다. 농업지역은 논, 밭, 과수원 등을 포함하며, 산림지역은 초지, 공유수면, 미개발지구 등을 포함하는 지역이다.

#### 4.2 토지이용별 지하수의 물리화학적 특성

연구지역의 토지이용과 지하수 수질특성을 고찰하기 위하여 수질분석이 이루어진 216개소의 지하수를 4개의 토지 용도별로 구분하였는 바, 주거·상업지역에 해당하는 지하수 시료는 111개소이며, 공업지역은 45개소, 농업지역은 24개소, 산림지역에 해당하는 지점은 36개소이다(Fig. 1). 이들 시료에 대해서는 pH, 전기전도도 등의 현장 수질측정과 함께 K, Na, Ca, Mg, SiO<sub>2</sub>, Al, F, Cl, Br, NO<sub>3</sub>, SO<sub>4</sub>, TDS, Li, Sr, Fe, Mn, Cu, Pb, Zn, As 등의 수질분석이 이루어졌다. Table 1은 토지이용별 각 성분의 함량에 대한 통계분석 결과이다.

먼저 토지이용별 해수의 영향을 파악하기 위하여 전기전도도에 영향을 미치는 주성분 이온들 중에서 해수와 관계가 있는 이온들과 그 외 이온들을 분리하여 각각의 영향력을 살펴보았다(Fig. 3). 그 결과 주거·상업지역과 공업지역에서는 전기전도도가 높아질수록 Na와 Cl의 영향력 또한 상대적으로 커지는 반면, 농업과 산림

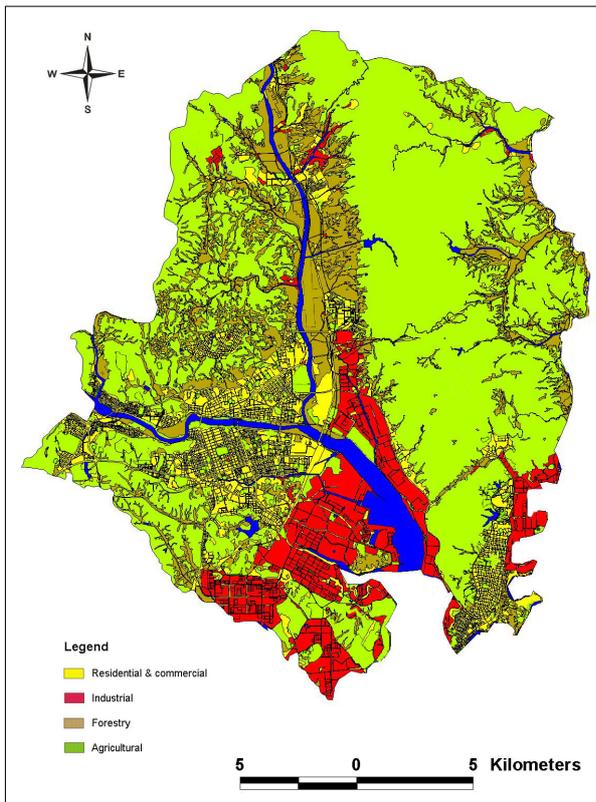


Fig. 2 Land use map of the study area.

지역에서는 주거·상업지역, 공업지역과는 반대로 전기 전도도가 높아질수록 Na와 Cl의 영향력이 감소하는 것으로 나타났다. 이는 주거·상업지역과 공업지역이 동해로 유입되는 태화강변과 해안에 형성되어 있어 해수 침입의 개연성이 있으며, 또한 과거 태화강 주변 저지대는 염전과 나대지로서, 도시화 이전에 축적되어 있던 염분이 현재 고립되어 나타나는 현상이라고 연구된바 있어(조병욱 외, 2003), Na와 Cl의 영향력이 매우 높은 것으로 판단된다. 한편 농업지역은 해수 침입이 있을 시에는 농작물에 피해가 우려되어, 해수의 영향력이 상대적으로 약한 곳에 형성되었을 가능성이 크며, 산림지역의 지하수는 해발고도로 인하여 해수의 영향이 적어 Na와 Cl이 전기전도도에 별 영향을 미치지 못하는 것으로 판단된다.

토지용도에 따른 지하수의 수질특성의 비교를 위해 각각의 수질성분을 Box-Whisker Plot에 도시하였다(Fig. 4). 이 도시법은 각 성분들의 최대값, 최소값, 중앙값, 1사 분위값, 3사 분위값을 도시한 것으로, 제일 위와 아래는 각각 최대값과 최소값이고, 사각형의 윗변과 아랫변은 각각 3사 분위값과 1사 분위값을 나타낸다. 그리고, 사각형의 내부에 있는 선은 중앙값을 표시하고 있다.

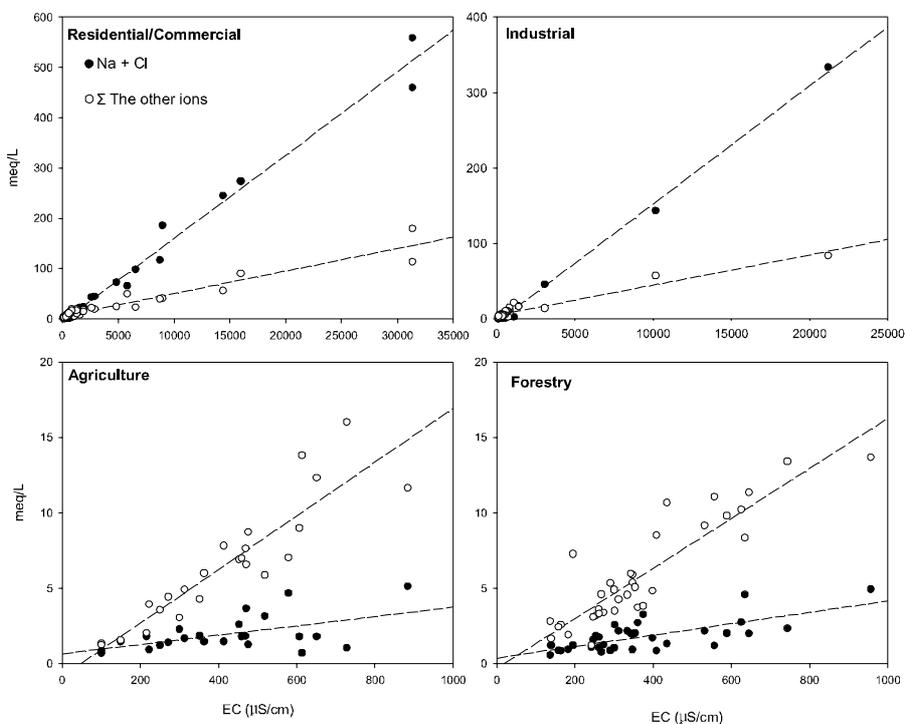


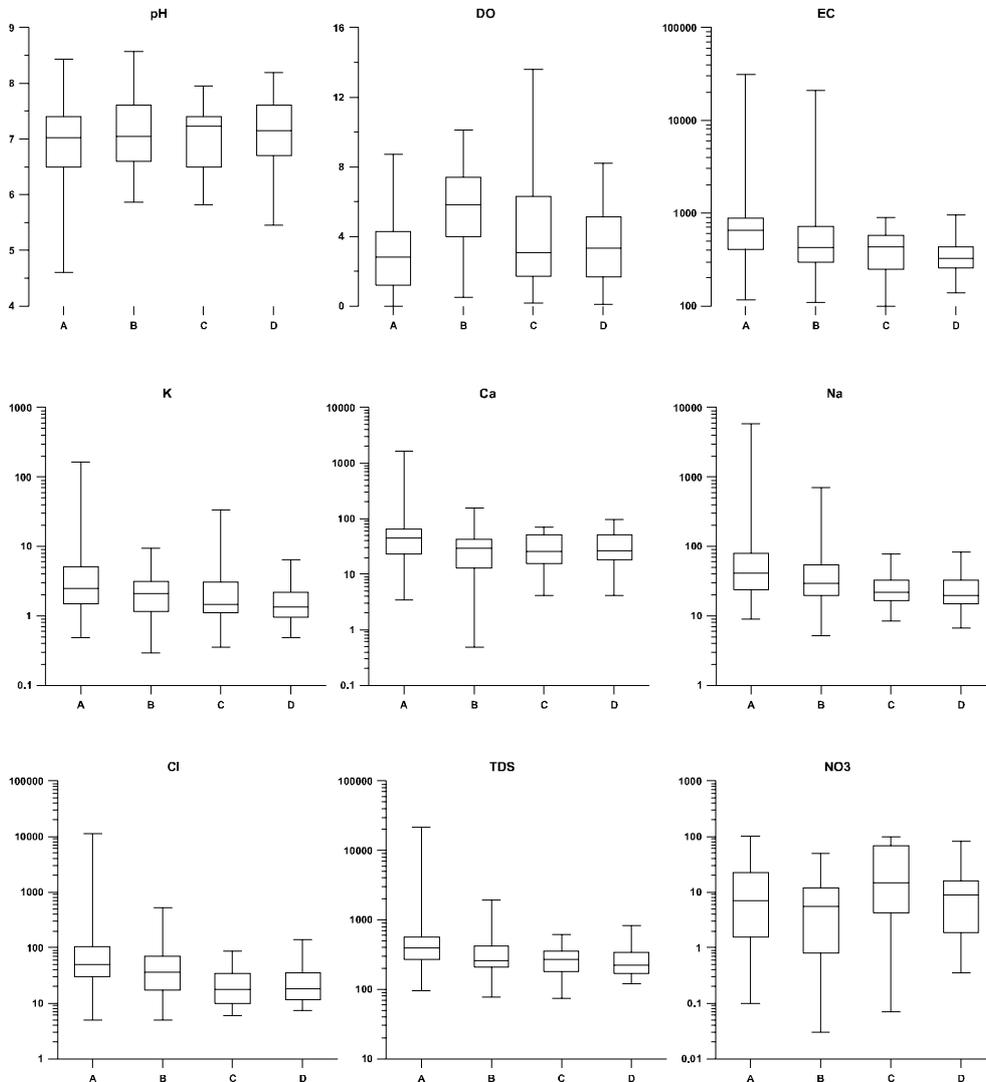
Fig. 3 Relation in EC vs. ion contents of groundwater of each land use zones.

먼저 토지용도별 현장수질을 보면, 전기전도도를 제외한 pH, Eh, DO, T 등은 각 토지용도 사이에 큰 차이가 없다. 주거·상업지역의 전기전도도 중간값은 656  $\mu\text{S}/\text{cm}$ 로, 공업지역의 428  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , 농업지역의 433  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , 산림지역의 323  $\mu\text{S}/\text{cm}$ 보다 높다. 이는 주거·상업지역의 해발고도가 낮기 때문인데, 태화강과 동천이 만나는 지역은 과거 해수의 영향에 의해서 전기전도도가 높다(조병욱 외, 2003). 해수의 영향과 직접적인 관계가 있는 Na, Cl, Br 등의 함량도 역시 해발고도가 낮은 주거·상업지역에서 가장 높게 검출된다.

Mg, Ca, K,  $\text{SO}_4$ ,  $\text{HCO}_3$ , Sr 등의 함량도 주거·상업

지역 지하수에서 가장 높게 검출된다. 이는 주거·상업지역의 다양한 오염원과 함께 하수도의 누수에 의한 것으로 판단된다. 한편 지하수 오염의 주요 지시자의 하나인  $\text{NO}_3$  함량은, 농업지역에서의 평균값이 26.2 mg/l로서, 주거·상업지역의 13.5 mg/l, 공업지역의 6.4 mg/l, 산림지역의 9.9 mg/l에 비해서 높게 검출되는데, 이는 농업지역에서의 축산 폐수, 비료 살포 등의 농업 활동에 기인하리라 판단된다.

토지이용에 따른 지하수의 수질유형도 큰 차이를 보이지는 않는다. Piper diagram 도시에 의하면, 주거·상업지역 지하수는 (Na, Ca)-( $\text{HCO}_3$ , Cl), 공업지역은



**Fig. 4** Box-Whisker Plots of inorganic constituent concentration in four land use zones. (A:Residence/Commercial; B: Industrial; C: Agricultural; D: Forestry)

(Ca, Na)-HCO<sub>3</sub>, 농업과 산림지역은 Ca-HCO<sub>3</sub>형이 우세하게 나타나나, 큰 차이는 없다(성익환 외, 2003). 주거·상업지역의 지하수 수질 형태가 해수와 담수가 혼합될 때의 지하수 유형인 Ca-Cl형에 가까운 형태를 보이는 것은, 과거의 잔류염분의 영향으로 판단된다(조병욱 외, 2003).

전반적으로 보아서 연구지역 지하수의 수질은 저지대에서 과거 해수에 의해 영향을 받았으며, 토지이용도별 지하수내 무기물 함량 간에는 큰 차이가 없음을 보인다. 따라서 아직까지 연구지역 지하수의 수질은 도시화에 따른 오염이 심하게 진행되지 않았음을 지시한다.

### 4.3 토지이용도별 지하수의 VOCs 함량

휘발성유기화합물(Volatile organic compounds; VOCs)은 자연 환경하에서는 지하수에서 검출될 수 없다. 따라서 지하수에서 VOCs가 검출되면 오염에 의한 것으로 볼 수 있다(Trojan *et al.*, 2003). 연구지역내에서 VOCs가 분석된 지하수 시료는 일반 수질이 분석된 216개 시료 중에서 총 168개 지점을 선택하였으며 분석된 VOCs 성분수는 61개이다. 분석된 지하수 시료 중에서 1개 성분 이상의 VOCs가 검출된 시료수는 78개로서,

전체 시료의 46.4%에 해당된다. 검출된 VOCs는 42개 성분으로서, 방향족탄화수소가 분석대상 25개 성분 중 14개, 염소계지방족탄화수소가 35개 성분 중 27개, 그리고 에테르에 속하는 MTBE이다(조병욱 외, 2005).

전반적으로 보아서 연구지역 지하수에서 검출된 VOCs 성분들의 함량은 상당히 낮은 값을 보인다. 즉, VOCs가 검출된 78개 시료의 총 VOCs 농도는 0.1 µg/L에서 387.1 µg/L의 범위를 보이나, 78개 전체 시료의 84.6%에 해당하는 66개 시료의 총 VOCs의 함량이 10 µg/L 이하로 나타나고 있으며, 50 µg/L을 넘는 시료는 전체의 3.8%인 3개 시료에 불과하다.

토지이용도별 VOCs 검출 성분수는 공업지역에서 26개(할로겐지방족탄화수소 18, 방향족탄화수소 7, 에테르)로 가장 많다. 다음으로는 주거·상업지역에서 22성분, 산림지역에서 14성분, 농업지역에서 2성분의 순서이다(Table 2). 분석된 지하수 시료가 공업지역이 42개로 주거·상업지역의 85개보다 작은데도 불구하고 검출된 VOCs 성분수가 더 많은 것은 특기할 만하다. Table 3은 토지이용도별로 VOCs가 검출된 지하수 시료수, 평균 검출 성분수, 음용수 기준을 상회율을 나타낸 것이다. Table 3에서 보는 바와 같이 토지이용도별 지하수의 VOCs 검출률과 평균 VOCs 성분수 등은 큰 차이를 보이지는

**Table 2** Summary of detections for VOCs, by land use.

Land use	Samples	Detections	Chemicals detected
Residence/ Commercial	85	22	16 Halogenated aliphatic hydrocarbons 5 Aromatic hydrocarbons 1 MTBE
Industrial	42	26	16 Halogenated aliphatic hydrocarbons 7 Aromatic hydrocarbons 1 MTBE
Agricultural	18	2	2 Halogenated aliphatic Hydrocarbons
Forestry	23	4	11 Halogenated aliphatic hydrocarbons 2 Aromatic hydrocarbons 1 MTBE

**Table 3** Detection and excess rate of VOCs in the 168 groundwater according to land use zones.

Land use	No.	No. of detection (%)	Average no. of detected VOCs	No. of excess (%)
Residence/Commercial	85	37 (42.4)	1.47	1 (1.2)
Industrial	42	25 (59.5)	3.19	4 (9.5)
Agricultural	18	7 (38.9)	0.89	0 (0.0)
Forestry	23	9 (39.1)	1.22	1 (4.4)
Total	168	78 (46.4)	1.80	6 (3.6)

않으나, 공업지역에서 검출률 59.5%, 평균 검출 수 3.19 개로 가장 높게 나타나고 있다. 216개 지하수에 대한 일반 수질분석 결과와 토지이용 간에는 뚜렷한 관계를 보여주지 못한 반면에, 168개 지하수의 VOCs 분석결과에서는 토지이용에 따른 VOCs 오염을 잘 보여주고 있다. 토지 이용에 따른 지하수의 무기물질 함량 차이는 경미하나, VOCs의 검출률과 함량에는 큰 차이가 있는 것은 창원지역 지하수 조사에서도 알려진 바 있다(김무진 외, 2002). 음용수 기준치로 보면 분석된 168개 시료의 3.6%에 해당하는 6개 시료의 VOCs 함량이 음용기준치를 상회하고 있는데, 6개 중 4개가 공업지역에 속한다. 음용 기준치를 상회하는 VOCs 성분들은 사염화탄소가 5개, TCE, 1,1-DCE, Chloroform이 각각 1개이고, 1개 시료에서는 사염화탄소, TCE, 1,1-DCE가 모두 기준치를 상회하였다.

연구지역 전체를 놓고 보면, 아직까지 VOCs에 의한 지하수 오염은 우려할 만한 수준은 아니라고 볼 수 있으나, 연구지역은 도시화가 계속 진행되고 있기 때문에 계속적이 관찰이 요구된다. 토지이용별로 보면 공업지역에서 VOCs의 검출 성분수가 가장 많고, 검출률과 음용수 기준을 상회률이 가장 높게 나타나고 있다.

## 5. 결론

울산지역 지하수의 수질 특성을 파악하기 위하여 중구, 동구, 남구, 북구 4개구에서 216개의 일반 수질분석과 168개의 VOCs 분석이 이루어졌으며, 이를 주거·상업지역, 공업지역, 농업지역, 상업지역으로 구분하여 토지이용별 지하수의 수질 특성을 분석하였다.

1. 전반적으로 보아서 연구지역은 과거 해수의 영향에 의하여 남구 태화강 저지대 일대의 주거·상업지역 지하수에서 Na와 Cl의 함량이 높다.
2. NO<sub>3</sub>는 농업지역, VOCs는 공업지역 지하수에서 가장 높은 함량을 보이지만 그 차이가 크지 않고, 주요 성분의 함량과 수질형태에도 큰 차이가 없어서, 토지용도별 지하수의 수질오염 특성 구분은 어려웠다.
3. 지하수의 VOCs의 함량범위와 검출 성분수, 검출빈도 등을 고려할 때 연구지역 지하수의 오염은 미약한데, 이는 아직 도시화가 진행되고 있으며, 지하수 이용량이 적기 때문으로 판단된다.
4. 지하수내 일반 오염지시 성분과 VOCs의 함량범위를

볼 때, 일부 점 오염원을 제외하고는 아직까지 연구지역 지하수의 오염은 우려할만한 수준은 아니나, 연구지역은 도시화가 진행되고 있기 때문에 지속적인 관찰이 요구된다.

## 참고문헌

- 건설교통부, 2001, 지하수조사 연보.
- 김무진, 함세영, 류상민, 정재열, 2002, 창원지역 토지이용에 따른 지하수 수질특성, 한국지구과학 춘계학술발표회, 77
- 성익환, 조병욱, 김석중, 김형찬, 성기성, 윤욱, 이병대, 이봉주, 이춘오, 전치완, 지세정, 김상연, 김통권, 류충렬, 송경선, 음철현, 이병대, 이종철, 임현철, 이정화, 최병인, 2003, 도시지역 지하수오염 저감기술 연구, 한국지질자원연구원 KR-03-07.
- 울산광역시 상수도사업본부, 2002, 급수현황
- 윤욱, 조병욱, 2004, 토지이용에 따른 울산지역 지하수의 VOCs 함량특성, 자원환경지질, V.37, N. 6, 613-629
- 정찬호, 김은지, 2001, 대전광역시 지하수의 수리화학 특성 및 오염에 대한 토지이용 형태 및 도시화의 영향, 지하수토양추계학술발표회, 35-37
- 조병욱, 윤욱, 임현철, 성익환, 장우석, 2005, 울산지역 지하수, 하수, 하천수의 VOCs 오염특성, 자원환경지질, V 38, N.1, 57-65
- 조병욱, 이병대, 윤욱, 임현철, 지하수의 Br:Cl 함량비를 이용한 울산지역 해수침입 연구, 2003, 자원환경지질, v36 n.5, 339-347
- 환경부, 2002, 2001 상수도 통계.
- CaneD., Helsel DR, Ragone SE, 1989, Preliminary evaluation of regional groundwater quality in relation to land use, Groundwater, v27, 230-244
- Eckhardt A. V and Stackelberg P. E, 1995, Relation of groundwater quality to landuse on Long Island, New York, Groundwater, V. 33, N. 6, 1019-1033
- Granier C. E., Morris L. B., and Carrillo-Rivera, 1999, Effects of urbanization on groundwater resources of Merida, Yucatan, Mexico, Environmental Geology, v. 37, N.4, 303-312
- Grisczek T., Nestler W., Pienchniczek D. Fischer T., 1996, Urban groundwater in Dresden, Germany, Hydrogeology Journal, v.4, N.1, 48-63
- Lerner D. N. and Tellam J. H., 1992, The protection of urban groundwater from pollution, Jpurnal of the Institution of Water and Environmental Management, v. 6, no.2, 28-37
- Lerner D. N., 1990, Recharge due to urbanization, Hydrology J. 8, 201-214
- Trojan M.D., Maloney J. S., Stockinger J. M., E. P., and Lahtinen M. J., 2003, Effects pf land use on groundwater quality in the Anoka sand plain aquifer of Minnesota, Groundwater, V41, N 4, 482-492
- US EPA, 1992, 40 CFR 51.100, Federal Register: Control of air pollution.