

## 광주, 본촌지역의 지하수의 수화학적 특성과 오염

양 해 근\* · 김 인 수 · 최 희 철 · 김 정 우

\* 일본 입정대학교 지구환경과학부, 광주과학기술원 환경공학과

### Chemical Characteristics and Pollution of Groundwater in the Ponchon Area, Kwangju

Heakun YANG · In S. KIM · and Heechul CHOI · Jeungwoo KIM

*\*Faculty of Geo-Environment Science, Rissho Univ., Japan  
Dept. of Environmental Science and Engineering, K-JIST*

## ABSTRACT

In this study, the contaminated status of groundwater under Ponchon Basin, Kwangju-city was analyzed by hydrogeological survey. Though the distribution of groundwater hydraulic head was similar with the ground elevation, the flow system of groundwater was changed due to overpumping in the industrial area. Paddy field and residential area which were located in the north part of the basin had relatively high concentrations of  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$  and  $\text{NO}_3^-$  in the groundwater. Southern part of the basin which most industrial area occupied had relatively high concentrations of  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  and Zn. Groundwater was contaminated by  $\text{Cl}^-$  and  $\text{NO}_3^-$  due to the infiltration of domestic sewage and factory wastewater. In the  $\text{Cl}^-$  case,  $\text{Cl}^-$  had a tendency of distribution over the water shed along with the contaminated source. The drawdown of groundwater due to overpumping caused more vertical movement of contaminant than lateral movement.

If the overpumping continues in the industrial area, the groundwater flow system will be more affected and the groundwater will be lowered in the north part of basin. It is clear that contamination by  $\text{Cl}^-$  and  $\text{NO}_3^-$  due to domestic sewage and factory wastewater will spread through the whole basin area.

**Keywords :** Groundwater, Groundwater use, Distribution of contamination, Water table, Chemical composition

## 요약문

본 연구에서는 광주 분촌분지를 대상으로 지하수의 오염현황을 분석하고, 수문지질구조와 수두의 분포 그리고 지하수의 수화학적 조성으로부터 오염기구를 검토하였다. 그 결과는 다음과 같다.

분지의 수두분포는 대체적으로 지형면을 반영하고 있으나, 과잉양수에 의한 지하수 유동계의 변형이 나타나고 있다. 농경지와 주거지가 혼재된 분지 북부에서는 Cl와 EC, Na, NO<sub>3</sub> 농도가 비교적 높았으며, 공업단지가 입지한 분지 남쪽에서는 HCO<sub>3</sub>과 Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Zn이 상대적으로 높은 농도를 나타냈다.

Cl과 NO<sub>3</sub> 농도에 의한 오염은 생활·공장폐수에 의한 것으로 추정된다. 그리고, Cl의 경우에는 특정 오염원을 기점으로 하천수계를 따라 오염물질이 확산되는 양상을 보이고 있으며, 오염원의 분포와 농도분포를 고려할 때 오염물질의 수평 분산보다는 공단지역의 과잉양수에 의한 지하수위의 저하로 수직이동이 더 크게 작용하고 있다고 볼 수 있다.

이상으로부터 공단지역에서의 지하수 과잉양수가 지속될 경우, 지형면을 따라 형성된 유동계가 더욱 왜곡되고, 지하수위의 급격한 저하는 분지 북부지역에 까지 미치게 될 것이다. 더욱이 분지 북부의 생활·공장폐수에 의한 염수화 현상 또는 질소오염은 분지 전역으로 확산될 것은 자명하다.

**주제어 :** 지하수, 지하수 이용, 오염물질 분포, 지하수면, 수화학적 조성

## 1. 머리말

지하수 오염의 발생요인은 산업구조와 그 발전 양상에 따라 다양하게 나타난다. 우리 나라의 하수 처리시설과 폐기물 처리능력을 고려할 때, 도시지역을 중심으로 유기염소화합물질(TCE, OCE, BHC 등)과 중금속, 염소이온 등에 의한 지하수의 오염이 우려되고, 과도한 화학비료의 사용으로 농촌지역의 지하수는 질산성질소(NO<sub>3</sub>-N) 등에 오염되었을 가능성이 클 것으로 생각된다. 특히, 질산성질소는 장기 내에서 아질산성 질소(NO<sub>2</sub>-N)로 환원되어, 발암 가능성이 있는 질소화합물을 생성하는 물질로 알려져 있으며, WHO에서는 질산성질소가 50mg/L이상인 경우에 중독의 가능성을 지적하고 있다(Tsurumaki, 1992). 일본과 우리 나라에서 질산성질소에 대한 먹는 물의 수질기준 농도는 10mg/L이하로 규정하고 있다.

서구에서는, 화학비료를 다량으로 사용하기 시작한 1960년대 말부터 질산성질소의 오염이 문제화되고 있

다. 일본의 경우에도 1982년 일본 환경청의 「지하수의 오염실태 조사」에서 천층 지하수의 11%가 질산성질소에 대한 음용수의 수질기준을 초과 하였으며, 일부 공업지역의 지하수에서는 트리클로로에틸렌(TCE)이 수질기준인 0.03mg/L을 초과함으로써 지하수 오염에 대한 사회적 관심을 불러 일으키는 계기가 되었다(Tase, 1988, Tsurumaki, 1992).

최근 우리 나라에서도 환경부(1999)의 지하수관리와 오염 등에 관한 조사가 실시됨으로서, 무분별한 지하수 개발에 의한 지하수오염에 대한 우려의 목소리가 제기되고 있다. 그리고 Moritani(1973)와 이길철 외(1985), Hahn et al.(1990), Choi et al.(1991), 윤정수·박상운(1994), 박관석·오윤근(1996), 나춘기·장원익(1996), 이종훈 외(1997), 김형돈 외(1998) 등에 의해 지하수 수질특성 또는 오염현황에 관한 연구가 이루어지고 있으나, 전국적 오염현황 및 지하수 지역별 오염현황은 물론 오염기구를 파악하기에는 아직 양적 질적으로 미비한 실정이다. 그 이유로서는 수문지질 차

료와 장기간에 걸친 수위·수질자료의 결여 등과 같은 기초자료의 절대부족을 들 수 있다.

이길철 외(1985)와 지하수보존연구회(1997)가 실시한 광주지역의 지하수 수질조사 결과에 따르면, 일부 지하수에서 질산성질소와 아연농도가 먹는 물의 수질 기준을 초과 했으며, 특히 광주 본촌 지역의 일부 지하수에서는 트리클로로에틸렌이 수질기준농도를 초과한 것으로 나타났다. 여기서 수질오염이 보고되고 있는 광주 본촌 지역을 대상으로 오염원과 오염기구를 파악하기 위하여, 이화학적 수질조사를 실시함과 동시에 지하수 이용행태와 토지이용 조사를 실시하였다. 그리고 수문지질구조와 수두의 분포, 지하수의 수화학적 조성으로부터 지하수 유동을 추정하였으며, 그 결과와 오염물질의 공간적 분포로부터 오염기구를 검토하였다.

## 2. 연구지역의 개요

### 2.1 지형지질

본촌 지역은 광주광역시 북구 양산동과 일곡동 일부 지역에 속하는 지역으로서 80~150m 낮은 산지에 둘러 쌓여 있는 반 폐쇄적인 소규모 분지형태(이하 본촌 분지라 칭함)를 이루고 있다. 하천발달이 미비한 본촌 분지는 생활·공업폐수 그리고 지하수의 용출에 기인한 소지류의 수계가 형성되어 있으며, 하류에 농업용 수용 저수지인 양산제가 축조되어 있다. 분지의 규모는 동서로 약1.6km, 남북으로 약2.5km에 달하며, 유역면적은 약 3.87km<sup>2</sup>이다(Fig. 1).

본촌 분지를 중심으로 한 광주 북부지역은 선캄브리아기의 화강편마암과 쥬라기에 관입한 흑운모화강암이 분지의 기저기반을 이루고 있으며, 화강암의 풍화산물과 소규모의 퇴적물이 그 위를 덮고 있다(김용준 외, 1993). 본촌 분지의 지질은 크게 화강암질 편마암과 흑운모화강암 그리고 층적층으로 구분되고, 양산제를 기점으로 분지의 북부는 북동에서 남서방향으로, 남부는 동쪽에서 서쪽방향으로 골짜기가 형성되어 있으며, 이는 화강암질 편마암과 흑운모화강암의 경계면 과도 일치한다. 층적층은 골짜기를 따라 저지에 분포하고

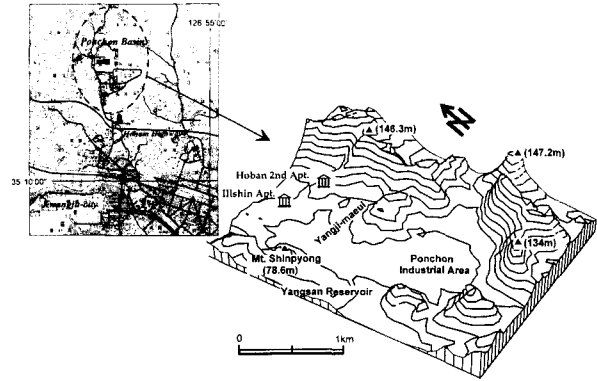


Fig. 1. 3D surface and situation of survey area.

있으며, 현재 그 대부분이 논과 공업지역으로 이용되고 있다.

화강편마암 지역인 C(C-1, 2, 3)지점에서는 매립토 및 점토가 지표로부터 약 0.4~0.8m, 풍화토가 11.1~12.1m, 풍화암이 1.1~3.1m사이 에 각각 층을 이루고 있으며, 기반암은 13.9~15.8m부터 나타난다. 일신아파트와 호반아파트 2차 공사현장 부근에는 석영반암 암맥이 NE-SW방향으로 뻗어 있고, 암맥은 풍화작용으로 암편의 절반이상이 분해 또는 붕괴되었고, 신성한 암편은 불연속적으로 존재하고 있다. B(B-1, 2, 3, 4)지점에서는 기반암이 C지점보다 약간 깊은 약 20~35m사이에 나타난다(Fig. 2, 3). 이상의 주상도로부터 본촌 지역의 지층은 크게 표토, 풍화토, 풍화암을 포함하는 풍화층과 비교적 풍화를 적게

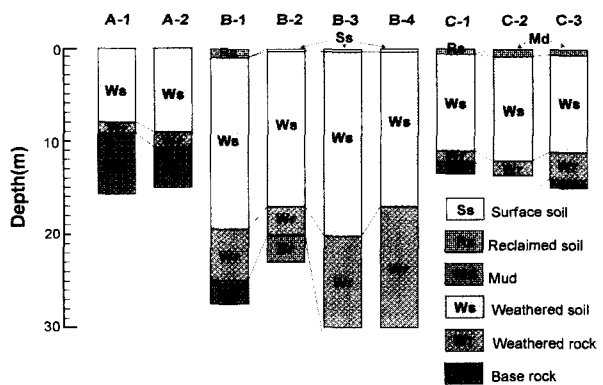


Fig. 2. Geologic columns section.

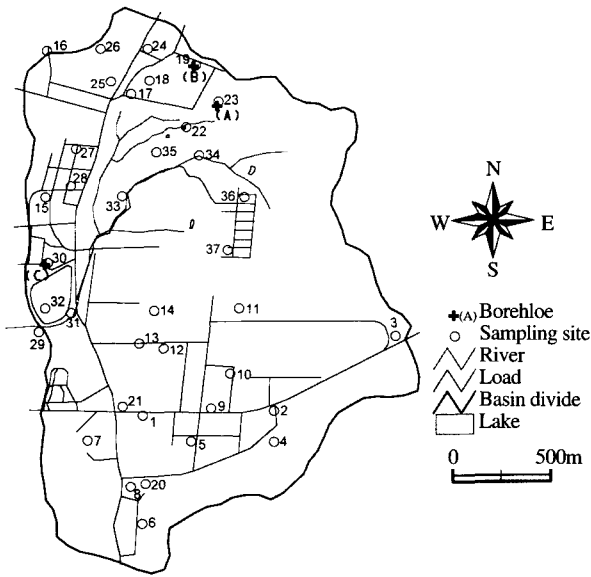


Fig. 3. Location of samplings and boreholes.

받은 암반층으로 구분할 수 있다. 그리고, 단층과 같은 지질구조가 존재하지 않는 것으로 추정되며, 하천 퇴적물이 미약하고, 석영반암의 암맥 역시 중간정도의 풍화를 받아 불연속적으로 존재한 것으로 보아 이렇다 할 피압지하수층은 존재하지 않는 것으로 추측된다. 따라서, 대수층은 수문지형·수리지질적 특성에 따라 풍화층을 미고결대수층, 그리고 암반층을 고결대수층으로 크게 구분할 수 있다.

2.2 기 후

양해근(1998)에 의하면, 지난 30년간(1963-1994)의 광주지역의 연평균 강수량은 전국 연평균 강수량을 상회하는 1,301mm이었으며, 그 기간 중 최고 다우년은 1989년으로 2020.4mm이었으나, 최저 소우년은 1994년으로 776.4mm이었다. 그리고 실제 연평균 증발산량은 772.9mm이고, 연평균 유출량은 528.1mm이며, 연평균 유출율은 0.4로 간주된다. 월평균 유출고에 의한 풍수기와 갈수기는 5월과 10월을 기준으로 구분되고, 6월과 9월 사이에 발생한 지하수의 저유가 갈수기의 하천유출에 기여한다고 말할 수 있다.

한편, 1997년도 광주지방기상대의 자료를 이용한 기후학적 물수지(Thorntwaite, 1948, Penman, 1948)의 계산결과를 보자면, Thorntwaite법과 Penman법에 의한 실제 연증발산량은 각각 805.2mm, 984.1mm이었다. Thorntwaite법에서는 9-10월, Penman방법에서는 4-5월과 9-10월에 각각 (-)의 토양수분변화를 나타낸다. 수분과잉에 의한 유출은 Thorntwaite법에서 1-8월, 11-12월, Penman법에서 1-3월, 7-8월, 11-12월 사이에 출연하였으며, 100mm이상의 유출은 7-8월과 11월에 일어났다(Table 1). 따라서, 지하수 함양은 토양수분의 변화가 적고, 상대적으로 수분과잉에 의한 유출이 많은 시기에 일어남을 감안 하다면, 1997년의 경우에는 11-12월 사이에 내린 강수량이 상대적으로 지하수 저유에 크게 기여한 것으로 사료된다.

Table 1. Monthly mean water balance by climatic water balance method in Kwangju area(1997).

Month	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	June	July	Aug.	Sept.	Oct.	Nov.	Dec.	
Air Temp.	-3.0	2.7	7.9	13.3	18.3	23.3	25.8	26.5	21.4	15.0	10.8	4.1	13.8
Precip.	19.3	43.6	68.3	101.6	101.6	177.2	358.3	381.9	22.8	14.0	136.4	73.7	1479.2
$E_o^{1)}$	0.0	3.3	21.3	91.9	91.9	133.6	159.1	156.4	99.7	54.2	28.9	6.4	805.2
$E_o^{2)}$	13.3	29.5	55.6	112.8	112.8	128.0	129.9	132.6	99.7	59.3	31.4	18.0	984.1
$R(P - E_o^{1)})$	19.3	40.3	47.0	9.7	9.7	43.6	199.2	225.5	76.9	-40.2	107.5	67.3	674.0
$R(P - E_o^{2)})$	6.0	14.1	12.7	-1.8	-11.2	49.2	228.4	249.3	-76.9	-45.3	105.0	55.7	585.1

Air Temp. air temperature, Precip. : precipitation,  $E_o$  : evapotranspiration, R; runoff

1) Potential evapotranspiration by Thornthwaite method, 2) Potential evapotranspiration by Penman method

2.3 지하수 이용

본촌 분지는 광주 시가지보다 뒤늦은 1989년부터 상수도의 보급이 시작되었다. 그 영향으로 일부 민가에서는 아직도 음용수로서 이용하고 있으며, 대부분의 가정에서는 생활용수로서 지하수의 이용이 비교적 많은 지역이다. 지하수 관정은 분지 전역에 걸쳐 분포하고 있으며, 천층 지하수 관정은 자연취락과 일부 신주거지역 그리고 공단 서부에 분포하고 있다. 50m이상의 심층지하수의 관정은 대부분 음용·식품회사와 섬유 전자회사 등의 취수 관정으로 분지 남부에 주로 분포하고, 분지 북부에 위치한 아파트 단지 내에도 일부 분포한다.

지하수법에 의해 신고된 「지하수개발·이용시설 관리대장(광주광역시, 1999)」과 설문조사 등을 토대로 조사한 본촌 지역의 지하수 이용현황은 Table 2와 같다. 본촌 분지의 지하수의 총 양수량은 908,950m<sup>3</sup>/년 이고, 그 중 생활용수로 이용되는 지하수량은 511,050m<sup>3</sup>/년으로서 총 양수량의 약 56%를 차지한다. 그리고, 공업용수로 357,350m<sup>3</sup>/년(39%), 음용수로 33,200m<sup>3</sup>/년(4%), 농업용수로 7,350m<sup>3</sup>/년(1%)의 지하수가 이용되고 있는 것으로 추정된다. 이처럼 지하수가 음용 또는 잡용수로서 상당량이 이용되고 있으며, 공업지역에서도 잡용 또는 세척용수로서 이용되고 있다. 그러나 최근 수질악화와 지하수위의 저하로 폐쇄 또는 방치되는 관정이 급증하고 있는 실정이다.

Table 2. The amount of groundwater use in Ponchon basin.

Groundwater use		Cubic meter/year	Relative rate(%)
Industrial use		375,350	39
Agricultural use		7,350	1
Domestic use	Drinking water	33,200	4
	Non-drinking water	511,050	56
Total		908,950	100

2.4 토지이용 및 오염원 분포

본촌 분지는 1975년 공업지역으로 고시된 후 음식

료와 조립금속, 전자공업 등을 중심으로 형성된 광주 지역 최초의 공업단지이다. 1998년 12월 현재 86개 업체가 입지하고 있다(광주본촌공단관리사무소, 1998). 최근 광주시 시가지의 외연적 확대와 오룡동지역에 첨단연구단지가 조성됨으로서 도로정비, 택지개발, 대규모 공동주택단지의 건설 등과 같은 자연변형이 급속하게 이루어지고 있는 지역중의 하나이다.

Mesh sample point 방법에 의한 본촌 분지의 토지이용 분석결과는 Table 3과 같다. 즉, 산림지역이 전체 면적의 약 26.26%로 가장 넓고, 공업지역이 22.13%, 밭과 초지가 12.26%, 일반 주거지역이 11.26%, 도로가 9.74%, 논과 저수지가 8.26%, 나지가 6.0%, 공동거주지역이 4.06%를 차지한 것으로 나타났다.

Table 3. Classification of land use in Ponchon basin.

Land use type	Area(km <sup>2</sup> )	Relative rate(%)
Industrial area	0.86	22.1
Residential area	0.44	11.3
Apartment block	0.16	4.1
Forest	1.02	26.3
Paddy field and lake	0.32	8.2
Open space	0.23	6.0
Field and grassland	0.48	12.3
Road	0.38	9.7
Total	3.87	100

본촌 지역의 토지이용은 다음과 같이 기술할 수 있다. 분지 북부의 경우, 지하수면이 높고, 용수가 분포한 지역을 중심으로 자연촌락(양지마을)이 형성되어 있으며, 그 주변 구릉지역에 주택단지와 대규모 아파트 단지가 조성되고 있다. 분지의 남부에는 공업단지가 입지하고 있으며, 음용·식품회사의 대부분이 저지 중앙부에 위치하고, 그 주변에 섬유·화학, 전기·전자, 금속공업 등이 분포하고 있다. 본촌공단에 입지한 공장들의 규모는 일부 대규모 음용회사와 전자회사를 제외하고, 그 대부분은 종업원 100이내의 영세 소규모이다(광주본촌공단관리사무소, 1998). 분지의 북

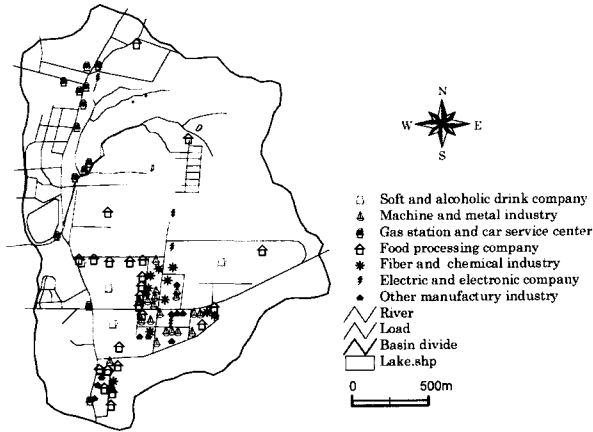


Fig. 4. Distribution of pollution source.

부 완사면에 분포한 밭과 초지는 대규모 아파트 단지 또는 택지 등으로 전환이 뚜렷한 곳이다.

지하수의 주요 오염원으로 생각될 수 있는 대규모의 축산 또는 원예농가는 현재 분포하고 있지 않으나, 잠재적 오염원인 주유소와 자동차 정비공장 등은 간선도로 주변에 입지하고 있다(Fig. 4). 그리고 공단지역은 합류식 차집관로에 의한 하수처리가 이루어지고 있지만, 그 이외 지역에서는 대부분의 생활하수가 직접 지류에 방류되고 있어, 지하수의 오염을 일으키는 주요 요인으로 작용할 것으로 간주된다.

### 3. 연구 및 분석방법

수위조사는 기존자료(「지하수 개발·이용시설 관리대장(광주광역시, 1999)」)와 현지 측정, 그리고 용천수의 분포와 수계망을 고려하여 수두의 공간적 분포를 분석하였으며, 한국지질자원 연구원이 발행한 지질도(1/25,000)와 문헌조사(Moritani, 1982, 김정삼, 1983, 강승삼, 1991, 김용준 외2, 1993), 시추 및 전기탐사 자료 등을 참고로 현지조사를 실시하여 수문지질구조를 파악하였다.

시료채취는 일반 우물과 호소, 하천수와 공업용 관정을 대상으로 1999년 3월 12~13일 사이에 지하수 34지점과 하천수 1지점, 호소 2지점, 즉 총 37지점에서 실시하였다(Fig. 3). 분석항목은 수온, 경도, EC,

pH, Cl, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Al, Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Zn이다. 수온, EC, pH는 취수 직후 현장에서 측정하고, 나머지 항목은 냉암소에 운반하여 실험실에서 분석했다. 수온 및 EC는 EC Meter, pH는 pH Meter, Cl과 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>은 IC(Ion Chromatography)분석법, Ca<sup>2+</sup>과 Mg<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>은 AAS(Atomic Absorption Spectrophometry)분석법, 그리고 중금속(Al, Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Zn)은 ICP(ICP-AES) 분석법으로 분석을 하였으며, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>는 pH 4.8 알칼리도, 경도는 전경도로서 적정법에 의해 측정하였다.

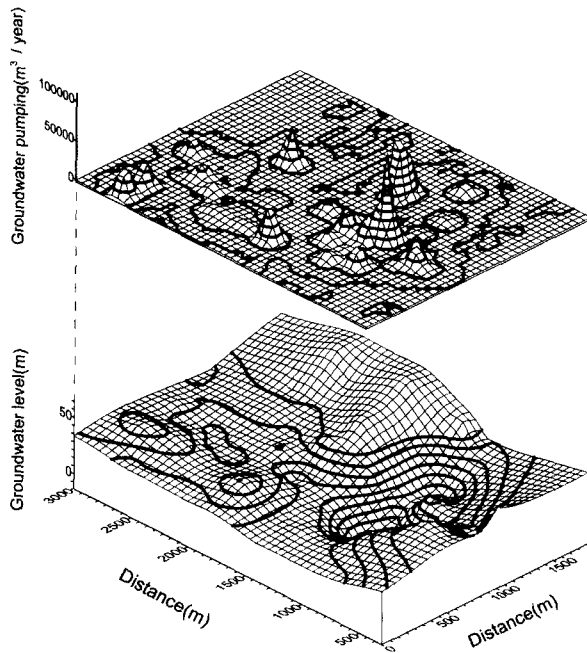
## 4. 결과 및 고찰

### 4.1 지하수위의 분포

지하수면의 계절적·공간적 분포는 지하수의 유동기구를 고찰하는 유용한 수단으로 이용되고 있다(양해근, 1999). 그러나, 현지 측수가 불가능한 밀폐형 관정이 대부분을 차지하고 있기 때문에 본 연구에서는 「지하수 개발·이용시설 관리대장(광주광역시, 1999)」 등에 나타난 정수위를 자연수위로 간주하였다. 그리고, 관정개발시의 자연수위에 대한 인터뷰조사와 현지조사를 통한 용수분포와 수계의 분포로부터 지하수면도를 작성하였다.

Fig. 5는 본촌 분지에 있어서 지하수 양수량의 공간적 분포와 정수위를 나타낸 수면도이다. 대체적으로 분지의 수두분포는 분지의 남부와 북부에 형성된 골짜기의 방향과 일치하고 있다. 즉, 분지 북부에서는 북동쪽에서 남서쪽 그리고 북쪽에서 남쪽, 분지 남부에서는 동쪽에서 서쪽으로 향하는 지하수면의 골짜기를 형성한다는 것을 확인할 수 있다. 이는 지표면의 수계와도 일치한 것으로서 풍화침식에 의한 지형 형성과정 이 지하수의 유동계에도 영향을 미치고 있음을 반영한 것으로 간주된다.

그러나, 지하수의 양수량이 많은 공업단지의 중앙부를 기점으로 지하수위의 저하가 뚜렷하게 나타나고 있으며, 특히 No. 13, 1, 21, 12 지점을 중심으로 지하수면은 해발 -17~5m에 분포한 것으로 보인다. 그 영



**Fig. 5. The amount of groundwater pumping and spatial distribution of stable groundwater level.**

향으로 지형면과 다르게 분지 북부의 중앙부에서 분지 남부로 향하는 작은 골짜기는 지하수 유동계의 변형을 의미한 것으로 볼 수 있다. 따라서 공단지역의 지하수 과잉양수가 지속될 경우, 분지 전체의 지하수위의 저하는 물론이고 지하수 유동계의 왜곡이 심화될 것이며, 나아가 생활하수 침투 등에 의한 지하수 오염과 지하수의 고갈과 같은 2차적인 지하수 장애를 심화시키는 중요한 요인이 될 것으로 사료된다.

#### 4.2 지하수의 수질

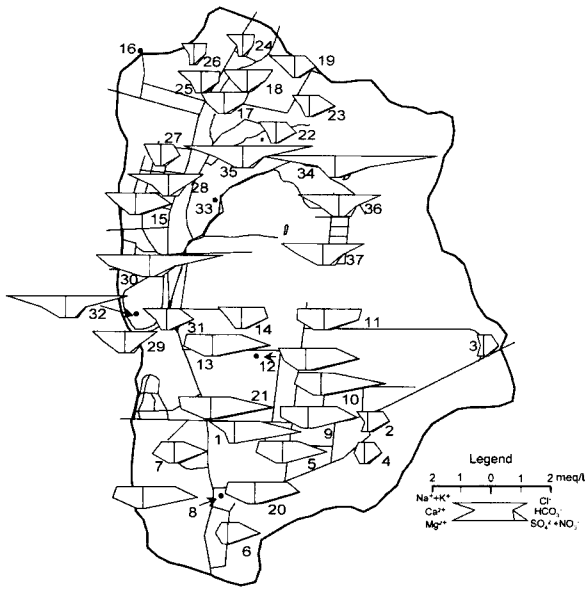
##### 4.2.1 수화학적 조성

지하수의 수질은 지하수의 기원이 되는 강수와 하천수질, 대수층의 종류, 주변환경 등에 의해서 좌우되지만, 일반적으로 지하수가 통과하는 암석과 토양층간의 접촉시간과 접촉면적에 따라 수화학적 조성이 결정된다(Shindo, 1986). 따라서, 지하수의 수화학적 조성은 그 공간적 분포를 통해 지하수질의 진화를 파악할

수 있으며, 지하수의 유동을 추정하는 하나의 지표로서 널리 이용되고 있다(Garrels and Mackenzie, 1967, Yoshioka, 1976, Nagae, 1996, Hirohata et al., 1999).

조사 기간중의 지하수 이온농도와 수질은 수소이온농도(pH)가 5.6~7.9로 약산성 혹은 중성에 속하고, 경도는 7~76mg/L로 연수에 속한다. EC는 127.1~681.0 $\mu$ S/cm, Cl과 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>은 각각 7.0~109.3mg/L, 2.85~16.04mg/L, ND~13.41mg/L, 2.85~16.04mg/L, 1.67~20.1mg/L, 0.85~2.9mg/L, 0.7~165.8mg/L, ND~4.41mg/L이었다. 분석결과와 신뢰성을 검증하기 위해 이온 균형비를 계산하였다. 일반적으로 이온 균형의 경우에는 양이온과 음이온의 총 당량비가 1에 가깝지만, 계절 또는 장소에 따라서 불균형을 이루는 경우가 있다(The Japan Society for Analytical Chemistry, Hokkaido Branch, 1994). 본촌 지역의 37지점에 대한 음이온(Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>)과 양이온(Cl<sup>-</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>)간의 총 당량비는  $\pm 14\%$ 로서 오차 허용기준인  $\pm 15\%$ 를 수용한 자료로 간주된다. No. 2와 3, 4, 6, 16, 33지점을 제외한 나머지 지점에서는 양이온보다 음이온이 많은 것으로 나타났다.

상기의 주요 이온성분을 총 고형물질(TDS)의 총합으로 간주할 경우, Fig. 6의 핵산 다이어그램으로부터 35지점 중 14지점이 Na<sup>+</sup>-Cl 형이고, 12개 지점이 Na<sup>+</sup>-HCO<sub>3</sub> 형, 8개 지점이 Ca<sup>2+</sup>-HCO<sub>3</sub> 형, 그리고 나머지 지점에서 Mg<sup>2+</sup>-HCO<sub>3</sub> 형을 나타낸다. 단, 분석오차 또는 취수과정에서 오류가 인정되는 No. 16과 33지점의 시료는 분석대상에서 제외하였다. 일반적으로 염수화의 영향을 적게 받은 지하수는 Na<sup>+</sup>-HCO<sub>3</sub> 형 또는 Ca<sup>2+</sup>-HCO<sub>3</sub> 형을 나타내지만, 음이온 중 Cl<sup>-</sup>의 비율이 높은 지하수가 상당수 존재하고, 특히 이들 지하수들은 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 또한 상대적으로 높은 것이 특징이다. 다시 말해서, 분지 남부에 위치하는 공단지역의 지하수는 대체적으로 탄산칼슘형(Ca(HCO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>) 과 탄산나트륨형(NaHCO<sub>3</sub>)에 속하고, 분지 북부의 지하수는 탄산나트륨형(NaHCO<sub>3</sub>)과 비탄산나트륨형(Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> · NaCl)을



**Fig. 6. Hexa-diagram of spring water(No. 22), lake water(No. 32), river water(No.34) and groundwater(others). The upper part of hexa-diagram indicates the NO<sub>3</sub>-N concentration.**

나타내고 있다. 후자의 경우에는 생활하수 또는 토지 이용에 따른 영향으로 탄산나트륨형에서 비탄산나트륨형으로 전이되는 경향을 보인다.

**4.2.2 중금속과 그 외 수질항목**

본촌 분지의 지하수 수질조사는, 앞에서 언급한 바와 같이 이길철 외(1985)와 지하수보존연구회(1997)의 보고가 있다. 지하수보존연구회(1997)는 공단지역에서 트리클로로에틸렌 등의 유기염소물질에 의한 오염, 이길철 외(1985)에서는 질산성 질소와 아연 등과 같은 중금속 오염을 제기했다. Table 4은 본촌 지역에 대한 중금속 성분의 분석결과이다. Zn의 경우에는 0.007~5.431mg/L이고, Al은 ND~0.008mg/L, 그리고 Fe과 Mn, Ni, Pb, Cu는 각각 ND~0.012mg/L, ND~0.002mg/L, ND~0.035mg/L, ND~0.086mg/L, ND~0.028mg/L이었으며, Cr과 Cd은 측정한계 이하로 나타났다.

본 조사에서도 일부 공단지역내의 지하수(No. 6, 10, 12, 14)에서는 Zn의 먹는 물 수질기준인 1.0mg/L을 초과 하였다. 그러나, 이것은 이종훈 외(1997)가 조사한 화강암지역에서의 평균농도보다 그리고 우남철 외(1998)가 수도권 일원에서 조사한 결과보다도 높은 것이며, No. 10지점에서는 이길철 외(1985)가 조사한 최대 농도의 2배 이상을 초과한 것이다. 한편, 이번 조사에서는 트리클로로에틸렌의 특성을 고려한 면밀한 취수가 사실상 불가능하였다.

**4.3 오염물질의 분포와 오염기구의 추정**

**4.3.1 이온성분간의 상관관계**

화학비료(특히, (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) 등에 의한 질산성질소 오염의 경우에는 NO<sub>3</sub>와 Ca<sup>2+</sup> 혹은 Mg<sup>2+</sup>, NO<sub>3</sub>와 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 그리고 NO<sub>3</sub>와 Ca<sup>2+</sup>또는 Mg<sup>2+</sup>의 상관관계가 높게 나타난다(Hirata, 1996). 수질조사 전 지점 중 35 지점의 각 이온 성분간의 상관관계는 Table 5에 나타났다. 먼저, NO<sub>3</sub>와 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>의 농도 유의한 상관(r=0.09, p<0.05, n=35)을 나타내지 않았다. Ca<sup>2+</sup> 또는 Mg<sup>2+</sup>에 대해서도 Cl 또는 HCO<sub>3</sub>은 0.22~0.5의 정(+)관계를 나타낸 것에 지나지 않았으며, 또한 NO<sub>3</sub>는 Ca<sup>2+</sup>와 Mg<sup>2+</sup>에서 각각 0.27, 0.3의 상관을 보였다. 그러나 이번 조사에서는, 결과적으로 화학비료의 주요 성분 중의 하나인 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>의 침투 또는 토양의 중화제로 사용되는 석회 등에 의한 영향은 나타나지 않았다. 그리고, 생활하수 또는 축산폐수 등에 기인한 오염의 경우에는 NO<sub>3</sub>와 Na<sup>+</sup> 또는 Cl간의 상관관계가 높은 것으로 알려져 있으나(Hirohata et al., 1999), 본촌 분지의 전 조사지점(n=35)을 대상으로 볼때, 유의한 상관관계는 볼 수 없었다. 따라서, 지하수 수질형성 또는 오염물질의 분포는 비점원에 의한 것보다 점오염원에 의해 결정되고 있음을 간접적으로 시사하고 있다고 볼 수 있다.

**4.3.2 오염물질의 공간적 분포**

공간적 농도분포가 뚜렷하고, 오염지표로 사용되는 Cl과 NO<sub>3</sub>, HCO<sub>3</sub> 농도분포(Stigter et al., 1998,



**Table 4. Heavy metal concentration in Ponchon basin.**

No.	Cu	Pb	Zn	Al	Fe	Mn	Ni
	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)
1	ND	0.022	0.169	ND	ND	0.001	ND
2	0.002	ND	0.334	ND	D	0.001	ND
3	0.003	ND	0.006	0.008	ND	0.001	0.002
4	0.003	ND	0.186	ND	ND	0.001	0.008
5	ND	ND	0.087	ND	ND	0.001	0.011
6	0.011	0.016	2.766	0.002	ND	0.001	0.023
7	ND	ND	0.040	0.001	ND	0.001	0.021
8	ND	ND	0.566	0.002	ND	0.002	0.033
9	ND	0.086	0.103	ND	ND	0.001	0.033
10	0.003	ND	5.431	0.001	ND	0.012	0.035
11	ND	ND	0.077	0.001	ND	0.001	0.031
12	ND	ND	1.621	0.001	ND	0.002	0.027
13	ND	ND	0.085	ND	ND	0.002	0.029
14	0.016	ND	3.587	ND	ND	0.002	0.024
15	0.001	ND	0.030	0.007	ND	0.001	0.021
17	ND	ND	0.107	ND	ND	0.001	0.008
18	0.001	ND	0.025	ND	ND	0.001	0.001
19	0.001	ND	0.107	ND	ND	0.001	ND
20	ND	ND	0.020	0.001	ND	0.001	ND
21	ND	ND	0.052	ND	ND	0.001	ND
22	0.002	ND	0.007	ND	0.012	ND	ND
23	0.001	ND	0.008	ND	ND	0.001	ND
24	0.001	ND	0.569	0.001	ND	0.001	ND
25	0.001	0.002	0.067	ND	0.011	0.001	ND
26	0.002	ND	0.046	ND	ND	0.001	ND
27	0.006	ND	0.058	ND	ND	0.002	ND
28	0.002	ND	0.034	ND	ND	0.001	ND
29	0.002	ND	0.013	ND	ND	0.001	ND
30	0.001	ND	0.013	ND	0.006	0.001	ND
31	0.001	ND	0.007	ND	ND	0.001	ND
32	0.003	ND	0.006	ND	0.089	0.460	0.299
34	0.005	ND	0.005	ND	ND	0.001	ND
35	0.002	ND	0.110	ND	ND	0.002	ND
36	0.002	ND	0.021	0.001	ND	0.001	ND
37	0.003	ND	0.310	ND	ND	0.002	ND
Lee <sup>1)</sup>	ND- 0.028	ND- 0.10	ND- 2.66		ND- 0.027	ND- 0.42	
Sg <sup>2)</sup>	0- 0.163	0- 0.006	0.001- 0.193	1.589- 13.438	0.001- 8.687	0.001- 2.886	
Dg <sup>3)</sup>		0.001- 0.018	0.001- 1.28	0.001- 0.284	0.02- 3.4	0.003- 1.76	
WQS <sup>4)</sup>	1.0이하	0.05이하	1.0이하	0.2이하	0.3이하	0.3이하	-

ND : not determined.

Lee <sup>1)</sup> : Lee et al.(1985)

SeG <sup>2)</sup>, DeG<sup>3)</sup> : Inorganic contaminants in shallow and deep groundwater by Woo et al.(1998) and Lee et al.(1997).

WQS <sup>4)</sup> : Drinking Water Quality Standards, Korea

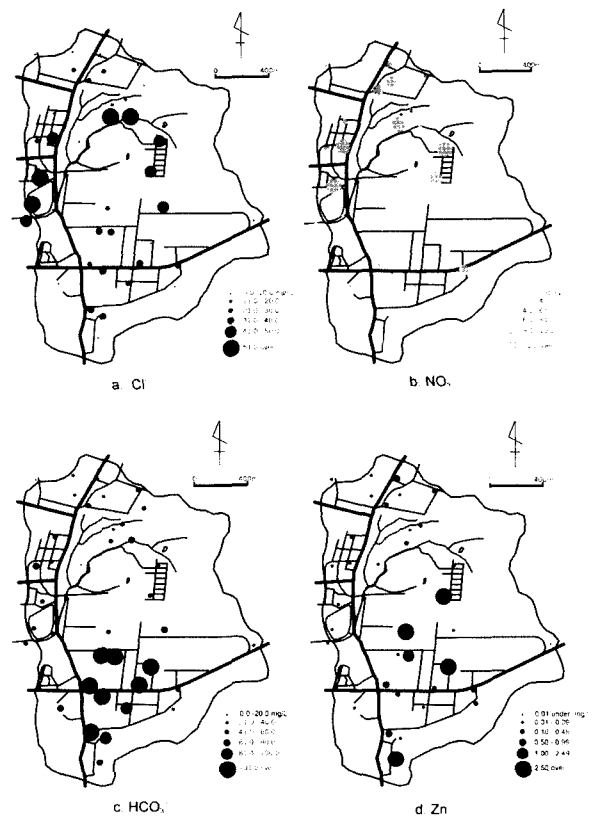
**Table 5. Correlation coefficient of each item(n=35, r=0.435(p<0.01), 0.337(p<0.05)).**

	pH	EC	Cl <sup>-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>
pH	-									
EC	0.09	-								
Cl <sup>-</sup>	0.02	0.89	-							
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0.56	0.56	0.06	-						
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-0.71	-0.03	0.04	-0.38	-					
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	0.28	0.36	0.19	0.42	-0.09	-				
Ca <sup>2+</sup>	0.04	0.31	0.22	0.50	0.27	0.47	-			
Mg <sup>2+</sup>	-0.10	0.23	0.27	0.45	0.30	0.44	0.56	-		
Na <sup>+</sup>	0.04	0.87	0.97	0.09	0.10	0.29	0.32	0.31	-	
K <sup>+</sup>	0.15	0.68	0.67	-0.05	-0.02	0.45	0.32	0.26	0.75	-

차종문 외, 1999), 그리고 Zn 농도분포에 관하여 기술하고자 한다(Fig. 7).

먼저 분지북부에서 고농도 분포를 나타낸 Cl을 보자면, 북동에서 남서쪽으로 흘러가는 하천수계를 따라 상류지점인 No. 34에서 가장 높은 520.46mg/L를 나타내고, No. 35와 28, 30 지점에서 각각 109.29mg/L, 41.42mg/L, 90.30mg/L이었으며, 지류의 하류인 양산재(No. 32)에서 76.32mg/L이었다. 다시 말해서, 식품회사(김치 제조업)의 폐수가 유입하는 하천상류(No. 34)에서 최고의 농도를 나타내고, 그 식품회사의 부근에 위치한 지하수의 Cl농도(No. 36, 37)가 높은 것으로 보아 식품회사의 폐수가 지하수의 염수화를 유발하고 있는 것으로 간주된다(Fig. 3, 4참조). 이러한 현상은 Cl농도와 높은 상관관계를 나타내는 EC와 Na에서도 같은 분포양상을 나타낸다(Table 4). 한편, No. 36지점(48.05mg/L)을 기점으로 남쪽 사면을 따라 Cl농도는 No. 37지점에서 45.25mg/L, No. 11지점에서 49.65mg/L를 나타내고 있다.

NO<sub>3</sub>의 경우에서도, 하수처리시설이 보급되지 않고, 경작지와 주거지역이 혼재된 분지 북부에서 높게 나타나고 있다. 농도분포는 분지 남부에서 2.85~9.23mg/L, 분지북부에서 3.10~16.04mg/L로서 공단지역보다 편차가 크게 나타난 것이 특징이다. 특히, No. 28, 30, 35, 36, 37지점에서 10mg/L 이상의 NO<sub>3</sub>-N농도가 검출되었으며, NO<sub>3</sub>-N의 공간



**Fig. 7. Distribution of Cl<sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> and Zn concentration(mg/L).**

적 분포 역시 Cl와 유사하다고 볼 수 있다.

일반적으로 지하수의 탄산수소이온은 음이온 중에서

가장 많은 비중을 차지하고 있으며, 이러한 용존탄산 ( $H_2CO_3$ ,  $HCO_3^-$ ,  $CO_3^{2-}$ )의 농도는 수질을 결정하는 중요한 인자 중의 하나이다. 지하수중의 용존탄소의 주요한 공급원은 지하수의 함양원인 지표수중의 용존탄소와 불포화대 또는 대수층에서의 유기물분해에 유래하는  $CO_2$ 의 용해, 그리고, 대수층에서의 탄산염광물의 용해에 기인한다(Mizutani and Yamamoto, 1993). 따라서, 분지 남부지역이 수계의 발달이 미약하고, 화강암지역임을 감안할 때, 음식료 공장이 집중해 있는 공단 중앙부에서 매우 높게 나타나는  $HCO_3^-$  농도분포는 유기물에 의한 토양오염으로 인한 미생물의 분해활동의 결과로 사료된다. 특히, 공단의 말단부에 속하는 No. 1과 21지점에서 각각 141.8mg/L, 138.1mg/L로 비교적 높고, No. 13지점에서 123.2mg/L, No. 8지점에서 115.7mg/L, No. 9와 12지점에서 112.0mg/L로 나타났다.

그리고, 1.0mg/L을 이상의 Zn농도는  $HCO_3^-$ 의 농도분포와는 달리 섬유·화학, 전기·전자, 금속공업 등이 분포한 공단 외곽지역에 분산되어 나타난다. 특히, 2.0mg/L을 초과하는 지점으로는 No. 6과 10, 14지점이다. 그 원인은 점오염원에 기인한 것으로 간주할 수 있지만, 현재 인과관계에 관하여 설명할 수 있는 충분한 자료가 확보되지 않았으므로, 본 고에서는 언급을 배제하고자 한다.

#### 4.3.3 오염기구

오염기구의 규명에는 대수층별 지하수 유동계를 밝힘과 동시에 지하수의 오염분포를 파악하는 것이 필요하다. 그리고 오염분포를 정확히 파악하는 것이 지하수 오염기구를 바르게 규명하고, 오염원을 찾는 실마리가 된다. 또한 오염물질은 지하수 유동의 추적자로서 사용됨을 감안할 때 다음과 같이 기술할 수 있다.

Table 4에 나타난 바와 같이 오염요인별 상관관계는 인정되지 않았으나, 오염물질의 공간적 분포는 하천수계에 따라 선상으로 분포한다. 특히, Cl와 EC, Na,  $NO_3^-$ 의 경우에는 특정 오염원을 기점으로 하천수계를 따라 오염물질이 확산되는 양상을 보이고 있으며, 분지 북부에서 지하수위의 저하에 따라 방류된 생

활 또는 공장폐수가 하천수와 함께 복류함에 따라 일어난 현상으로 간주된다(Fig. 5, 6 참조). Zn의 경우에는 지형면을 반영하는 분포양상은 다소 인정되지만, 오염원의 분포와 농도분포 그리고 대상관정의 심도가 50m 이상인 점을 고려할 때, 오염물질의 수평적 분산보다는 공단지역의 과잉양수에 의한 지하수위의 저하로 수직이동이 더 크게 작용한 결과로 생각할 수 있다.

그리고, 본 연구지역의 지하수 오염물질은 대체적으로 오염원의 분포 및 토지이용형태를 반영한 것으로 공단지역에서  $Ca^{2+}$ 와  $Mg^{2+}$ , Zn이 높고, 주거 또는 농경지에서는 Cl과  $NO_3^-$  등의 농도가 상대적으로 높게 나타나고 있다(Fig. 4, 7 참조). 이와 같은 오염물질의 유동 및 확산기구에 대해서는 앞으로 보다 상세한 수문지질 자료가 보완되고, 장기간에 걸친 지하수의 관측자료가 축적된다면 보다 명확히 밝힐 수 있으리라 본다.

### 5. 결 론

광주 본촌분지를 대상으로 지하수의 오염현황을 분석하고, 수문지질구조와 수두의 분포 그리고 지하수의 수화학적 조성으로부터 오염기구를 검토하였다. 그 결과는 다음과 같다.

먼저 본촌분지의 수문지질은 표토, 풍화토, 풍화암을 포함하는 미고결대수층과 비교적 신선한 암반으로 이루어진 고결대수층으로 구분된다. 대체적으로 분지의 수두분포는 지형면을 반영하고 있으나, 과잉양수에 의한 지하수 유동계의 변형이 나타나고 있다.

분지 남부에 위치하는 공단지역의 지하수는 탄산칼슘형( $Ca(HCO_3)_2$ ) 과 탄산나트륨형( $NaHCO_3$ )에 속하고, 분지 북부의 지하수는 탄산나트륨형( $NaHCO_3$ )과 비탄산나트륨형( $Na_2SO_4 \cdot NaCl$ )에 속한다. 특히, 분지 북부에 속하는 탄산나트륨형 지하수는 생활하수의 침투와 같은 인위적인 영향으로 비탄산나트륨형으로 점이 되는 경향을 보이고 있다. 그리고, 농경지와 주거지가 혼재된 분지 북부에서는 Cl와 Na,  $NO_3^-$  농도가 비교적 높았으며, 공업단지가 입지한 분지 남쪽에

서는  $\text{HCO}_3^-$ 과  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ 이 상대적으로 높은 농도를 나타냈다.

오염지표로 사용되는 이온성분간의 상관관계는 인정되지 않았다. 그리고, Cl<sup>-</sup>의 경우에는 특정 오염원을 기점으로 하천수계를 따라 오염물질이 확산되는 양상을 보이고 있다.

이상으로부터 공단지역에서의 지하수 과잉양수가 지속될 경우, 지형면을 따라 형성된 유동계가 더욱 왜곡되고, 지하수위의 급격한 저하는 분부 북부지역에 까지 미치게 될 것이다. 더욱이 분지 북부의 생활·공장 폐수에 의한 염수화 현상 또는 질소오염은 분지 전역으로 확산 될 것은 자명하다. 따라서, 분지의 지하수 자원을 보호와 효율적인 이용을 위해서는 지하수의 물수지를 산정 함으로서 적정이용을 피하고, 오염원의 지속적인 관리와 모니터링 그리고 하수처리시설의 보급이 시급히 필요하리라 사료된다.

## 사 사

본 연구는 1998년 한국학술진흥재단의 박사후 연수과정(Post-doc.) 지원에 의하여 실시되었으며, 이에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

- 강승삼, 1991, 전남·북 지형연구의 성과 및 지형적 특징, 지리학 연구, 101-124.
- 광주광역시, 1998, 지하수개발·이용시설 관리대장
- 광주본촌공단관리사무소, 1998, 본촌공단 현황, p.16.
- 김용준, 오민수, 박재봉, 1993, 광주화강암체에 대한 암석학적 연구, 광산지질, 26, 83-96.
- 김정삼, 1983, 광주 북동부에 분포하는 소위 편상 화강암에 관한 암석학적 연구, 전남대학교 대학원 석사논문, 1-26.
- 김형돈·우남철·최미정, 1998, 충북 괴산군 덕평리 일대의 지하수 수질과 오염, 지하수환경, 5, 141-147.
- 나춘기·장원익, 1996, 전주 죽림지역의 강수, 하천수, 지하수 및 온천수의 동위원소조성과 그 수리학적 의미, 목포대학교 논문집, 17, 483-496.
- 박관석·오윤근, 1996, 제주도 해안에서의 지하해수에 대한 화학적 특성에 관한 연구, 대한환경공학회지, 18, 301-315.
- 우남철, 한소라, 박은규, 최미정 (1998) 수도/경기권 지하수오염 취약지역에서의 오염체 거동특성 연구(보고서). 한국자원연구소, 30 p.
- 양해근, 1998, 광주지역의 지하수 이용과 보존 대책, 광주·전남 비전21, 16, 47-60.
- 양해근, 1999, 진야분지 지하수의 수문환경, 대한지리학회지, 34, 1-16.
- 윤정수·박상운, 1994, 제주도 지하수의 지역별 수질특성과 수위변화, 제주대학교 해양연구보고서, 18, 59-84.
- 이길철·김종택·이연선·신상철·최영숙·최진영·허성남·홍미연, 1985, 지하수 수질현황에 관한 조사연구, 국립환경연구소보, 7, 253-265.
- 이종훈·전효택·전용권, 1997, 국내 화강암질내 심부지하수의 지화학적 특성, 지하수환경, 4, 199-211.
- 지하수보존연구회, 1997, 지하수의 효율적 관리방안, 광주광역시 시정연구, 17, 203-251.
- 환경부, 1999, 「지하수 관리현황」.
- Choi, S. H., Y. K. Kim and D. Y. Lee, 1991, Sea water intrusion in the coastal area of Cheju Volcanic Island, Korea, Jour. Korean Inst. Mining Geol., 24, 319-327.
- Garrels, R. M. and F. T. Mackenzie, 1967, Origin of chemical compositions of some springs and lakes. In : Equilibrium Concepts in Natural Water System., Adv. Chem. Ser., 67, 222-242.
- Hahn, J. S., K. S. Han, Y. D. Lee and D. H. Yoo, 1990, An assessment of groundwater pollution potential of a proposed petrochemical plant site in Ulsan, South Korea, Jour. Korean Inst. Mining Geol., 23, 425-452.
- Hirata, T., 1996, Preventive measure of soil and groundwater contamination, Jap. Envir. on Chem.

- Anal. Assoc., p.181-182(in Japanese).
- Hirohata M, Y. Ozasa, T. Matsuzaki, I. Fujita, R. Matsuoka and S. Watanabe, 1999, The mechanism of groundwater pollution by nitrate-nitrogen at U-town in Kumamoto Prefecture, *Jap. Assoc. Groundwater Hydrol.*, 41, 291-306(in Japanese with English abstract).
- Mizutani, Y. and K. Yamamoto, 1993, Sources of dissolved carbonates in the shallow groundwater of the Tonami Plain, Toyama, *Jap. Assoc. Groundwater Hydrol.*, 35, 77-86(in Japanese with English abstract).
- Moritani, T., 1982, Groundwater in bed rock in Korea, *Jap. Soc. Engineering Geol.*, 13, 161-179(in Japanese with English abstract).
- Nagae, R., 1996, Study on groundwater flow and chemical quality change during water circulation in hard rock body such as the Nohi rhyolitic and the Abukuma granodioritic rock body by water quality analysis, stable isotope and tritium analysis and gas analysis., *Jap. Assoc. Groundwater Hydrol.*, 38, 51-79(in Japanese with English abstract).
- Penman, K.L., 1948, Natural evaporation from open water, bare soil and grass, *Proc. Roy. Soc., London*, 193(Ser. A),120-145.
- Shindo, S., 1986, The effect of geological and topographical factors on the behavior of pollutants in groundwater flow systems, *Jap. Soc. Engineering Geol.*, 27, 28-39.
- Stigter, T.Y., S.P.J. van Ooilen, V.E.A. Post, C.A.K. Appelo and A.M.M. Carvalho Dill, 1998, A hydrogeological and hydrochemical explanation of the groundwater composition under irrigated land in a Mediterranean environment, Algarve, Portugal, *Journal of Hydrology*, 208, 262-279.
  - The Japan Society for Analytical Chemistry, Hokkaido Branch, 1994, 1995, *Water analysis*, Kagakudouzin, Tokyo, 439-444(in Japanese).
  - Tase, N., 1988, Groundwater contamination in Japan, *Jour. Jap. Assoc. Hydrol. Sci.*, 18, 1-13(in Japanese with English abstract).
  - Thornthwaite, C. W., 1948, An approach toward a rational classification of climate, *The Geographical Review*, 38, 55-95.
  - Tsurumaki, M., 1992, Nitrate nitrogen in shallow groundwater, *Jap. Assoc. Groundwater Hydrol.*, 34, 153-162(in Japanese with English abstract).
  - Yoshioka, Y., 1976, Chemical composition of natural water in landslide area, *Engineering Geology*, 17, 187-196.

〈원고접수일 : 2001. 1. 2〉