

## 공주시 유구읍 명곡리지역 천부 및 심부지하수의 지화학적 수질특성과 오염

정찬호\* · 황 정\* · 박충화\*

### Geochemical Water Quality and Contamination of Shallow and Deep Groundwaters in Myunggok-ri, Kongju

Chan-Ho Jeong\*, Jeong Hwang\* and Chung-Hwa Park\*

**ABSTRACT :** The water-rock interaction and anthropogenic contamination affecting to geochemical composition of shallow and deep groundwaters were investigated in the agricultural area of Myunggok-ri, Kongju. The shallow groundwater is classified into the chemical types of Ca-HCO<sub>3</sub> and Ca-Cl (SO<sub>4</sub>), and shows weak acid having an average pH 6.2. Deep groundwater shows the uncontaminated composition of the chemical types of Na-HCO<sub>3</sub> and Na (Ca)-HCO<sub>3</sub> with pH of 8.4~8.8. The grouping approach of chemical data of waters shows the distinguished trend between water composition influenced anthropogenic input and water composition mainly determined by natural process such as water-rock interaction. The main anthropogenic inputs affecting chemical composition of shallow groundwater are the contaminants such as K<sup>+</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Cl<sup>-</sup> having average values of 4.4 mg/l, 22 mg/l, 13.7 mg/l, respectively. The contaminants were probably derived from fertilizer, sweage, septic tank, and stable, etc. The hydrogen and oxygen isotopic compositions indicate that five deep groundwaters were recharged from different altitudes, and that shallow and deep groundwaters were originated from meteoric water. Tritium contents of waters suggest that deep groundwater was recharged before or just after 1950s, and that shallow groundwater is much younger than deep groundwater. The results of this study may serve as a basic data for the future study of shallow groundwater as a drinking water in agricultural area, in Korea.

## 서 론

먹는물에 대한 관심이 높아짐에 따라 음용수로서 지하수에 대한 의존성이 점차 높아지고 있는 실정이다. 지하수의 수질특성은 여러 가지 요인에 의해 영향을 받는다: 유입되는 강수의 성분, 토양-물 상호반응, 물-암석 상호반응 등의 자연적 인 과정과 인간활동과 관련한 인위적 오염물질의 유입에 의한 영향 (Pacheco and Weijden, 1996).

물-암석 상호반응에 의한 지하수 지화학적 진화과정은 지하수의 수질을 결정하는 가장 중요한 요소가 된다. 지하수의 화학성분과 물-암석 상호반응과의 관계에 대해 많은 연구가 진행되어왔다 (Tardy, 1971; Paces, 1972;

1973, Drever, 1988; Velbel., 1985, 1989; 1992). 국내에서는 편마암지역을 대상으로 물-암석 상호반응에 의한 지하수의 지화학적 진화에 대한 연구가 Jeong *et al.* (1994; 1995), 정찬호 외 (1997)에 의해 수행된 바 있다.

인간활동에 기인한 지하수 수질오염은 지하수 보존측면에서 매우 중요한 환경적 문제가 되고 있다. 최근 대도시 지하수의 수질오염문제가 심각해짐에 따라 몇 개 대도시를 대상으로 지하수의 수질오염에 대한 종합적인 연구가 진행되고 있거나, 1차적인 조사가 완료되기도 하였다 (한국자원연구소, 1995; 1997). 그러나 농촌지역에서는 농약, 퇴비, 화학비료, 재래식화장실, 가축 축사, 생활하수 등 지하수의 수질을 저하시킬 수 있는 다양한 오염원이 존재함에도 불구하고, 생활용수 및 음용수로 사용하는 지하수의 수질오염 문제는 거의 관심의 대상이 되지 못하였다. 특히 농촌지역에서는 대부분이 심도가 3~30 m 정도의 충적층 내지 풍화대층에 부존되어 있는 천부지하수

\*대전대학교 지질공학과 (Department of Engineering Geology, Taejon University, Taejon, 305-716, Korea), E-mail: chjeong@dragon.taejon.ac.kr

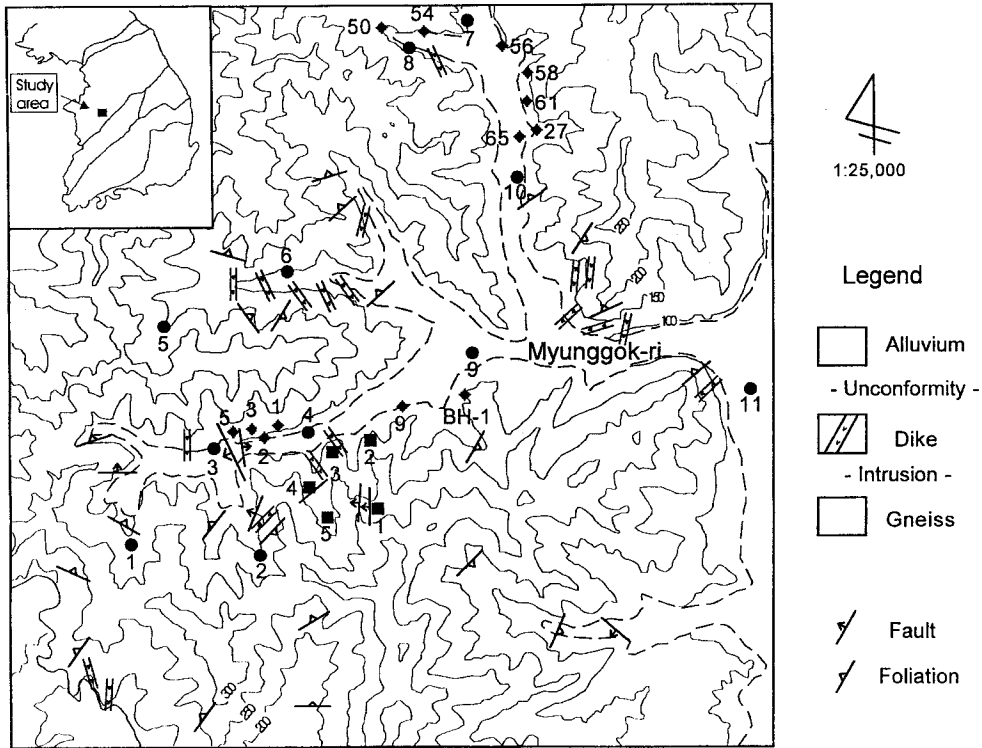


Fig. 1. Geological map of the study area including sampling points of waters : deep groundwater (solid circles), shallow groundwater (solid stars), surface water (solid rectangles).

를 식수 또는 생활용수로 사용하는 것을 고려하면, 수질 오염의 가능성은 충분히 예상된다. 그리고 천부대수층의 오염은 곧바로 지하심부로 오염물질이 이동 및 확산되어 심부대수층까지 오염시킬 가능성이 매우 높다.

본 연구는 농촌지역인 충남 공주시 유구읍 명곡리 일대의 가구별 생활용수와 식수로 사용하는 우물형 천부지하수와 연구지역내 개발한 먹는샘물 취수정 심부지하수를 대상으로 지하수의 지화학적 수질특성과 오염상태를 밝히고, 지하수의 지화학적 특성을 결정할 물-암석 상호반응과 오염물질 유입관계를 알아 보기 위하여 수행되었다. 아울러 물시료의 환경동위원소 ( $^2\text{H}/^1\text{H}$ ,  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ,  $^3\text{H}/^1\text{H}$ ) 분석을 통하여 지하수의 함양지역 및 대재시간에 대해서도 조사하였다. 이 연구는 농촌지역의 지하수 오염에 대한 하나의 사례연구가 될 것이며, 향후 농어촌지역 지하수 수질오염 연구에 기본자료로 가치가 있을 것이다.

### 지 질

연구지역은 행정구역상 공주시 유구읍 명곡리 일대로 지질은 주로 선캄브리아기의 경기편마암 복합체로 되어

있으며, 이를 관입한 백악기의 염기성 내지 중성 암맥, 석영맥이 소규모 분포한다 (Fig. 1).

경기편마암 복합체는 1:50,000 대홍 지질도폭 (엄상호 등, 1963) 에서는 상부 주라기의 유구 화강편마암으로, 1:250,000 서산 지질도 (국립지질광물연구소, 1973)와 1:50,000 광정 지질도폭 (강필종 등, 1974) 에서는 선캄브리아기의 경기편마암류로 기재되었던 것이다. 유구편마암은 그 절대연령이  $2150 \pm 20$  Ma로 보고된바 있으며 (Lee *et al.*, 1973), 본역 우측에 분포하는 변성퇴적암류가 이를 부정함으로 피복하고 있어 선캄브리아기 경기 편마암류에 해당되는 것으로 보고된 바 있다 (우영균 등, 1991).

유구편마암은 중립 내지 조립질의 흑운모 화강암질 편마암으로서 편마상 구조를 보이는 편마암, 편마상 구조의 발달이 미미한 괴상의 화강암질 편마암, 안구상 편마암 등으로 구성되어 있다. 이들 암상간의 경계는 점이적이다. 유색광물의 양은 비교적 불균질하여 우백질 편마암과 우흑질 편마암이 이웃하기도 하며, 변정을 포함하기도 한다.

주구성광물은 석영, 사장석, 미사장석, 흑운모, 백운모 등이며, 소량의 저어콘, 인회석, 녹염석, 녹니석 및 불투명 광물로 되어 있다. 사장석은 알바이트 쌍정을 보이며 건

온도화 되어 있다. 흑운모는 벽개방향을 따라 녹니석화 되어 있으며 일부는 견운모화 되었고 소량의 백운모를 수반하기도 한다.

연구지역의 곳곳에 관입한 암맥류는 염기성 내지 중성의 암맥들이다. 염기성 암맥은 휘석 반정과 세립의 사장석 석기로 구성된 현무암질 안산암으로서 암회색을 띤다. 암맥내 발달한 기공을 이차광물인 녹니석과 방해석이 채우고 있는 행인구조가 발달하고 있다. 중성질 암맥은 회녹색의 반상조직을 갖는 안산반암으로서 사장석 반정을 가지며, 사장석은 주로 방해석과 소량의 녹염석으로 변질되어 있다. 심부지하수의 취수정 주변지역에 분포하는 암맥들은 녹색의 각섬석과 흑운모 그리고 사장석 결정들로 구성된 lamprophyre 류이다.

편마암과 이를 관입한 맥암류 연변에는 석영세맥이 곳곳에 발달한다. 이들 석영세맥 주변부는 규화작용으로 석영이 재결정화되었으며 일부는 견운모화 되었고, 석영맥 내에는 황화광물로 구성된 광석광물이 발달하기도 한다.

### 연구방법

#### 물시료 채취 및 현장측정

명곡리일대의 수계별 지표수, 마을 부락에서 이용하는 우물등 천부 지하수, 먹는샘물공장에서 취수정으로 개발한 심부지하수등에 대해 이화학적 현장측정, 화학조성 및 환경동위원소 조성을 분석하였다. 물시료에 대한 pH, Eh, 전기전도도, 용존산소, 온도등의 현장측정은 2차례 (97년 12월, 98년 1월)에 걸쳐 실시하였고, 화학분석 및 환경동위원소 분석을 위한 물시료 채취는 1차례 (98년 1월) 실시되었다. 채취된 물시료는 수계별 하천수와 저수지등 지표수 11점 (S1, S2, ..., S11), 마을 우물등 천부지하수 17점 (W1, W2, ..., W65), 농업용 관정지하수 1점 (BH1), 먹는샘물 취수정 심부지하수 5점 (PW1, PW2, ..., PW5) 등 총 34점이다. 천부형 지하수공의 심도는 대략 3~40 m 정도이고, 농업용 관정의 심도는 약 100 m 이다. 심부지하수공의 심도는 250~350 m 정도이다. 각 물시료의 채취지점은 Fig. 1에 점시되어 있다. 마을의 천부지하수는 수도꼭지나 두레박을 이용하여 채취하였고, 심부지하수는 수증모터펌프로 약 24시간 이상 배출한 후 채취되었다. 채취된 물시료는 현장에서 핸드형 진공펌프를 이용하여 0.45 μm 공극을 갖는 셀룰로즈 멤브레인 필터에 의해 물속에 존재하는 부유물질을 제거하였다. 물시료는 현장에서 수소이온농도 (pH), 산화환원전위 (Eh), 온도, 전기전도도, 중탄산이온농도, 용존산소량을 측정하였다. 심부지

하수와 일부 천부지하수에 대한 현장측정은 관정에서 흐르는 상태에서 대기와의 접촉이 최대한 억제된 조건에서 측정하였으나, 일부 천부지하수는 대기에 노출된 상태에서 현장측정이 이루어졌다. 중탄산이온 ( $\text{HCO}_3^-$ )은 메틸오렌지 지시약을 이용하여 염산으로 적정하였다.

pH, Eh는 이온전극 및 백금전극을 각각 이용하여 Ion meter (Orion 290A)로, 전기전도도는 Conductivity meter (Orion model 142)로, 용존산소 함량은 Dissolved oxygen meter (Orion model 835) 로 측정하였다. 시료채취는 분석용도에 따라, 양이온 분석용 (60 ml), 음이온 분석용 (60 ml), 안정동위원소 분석용 (60 ml), 삼중수소 분석용 (1,000 ml)으로 각각 별도로 채취하였다. 물시료채취용 용기는 폴리에틸렌 재질을 사용하였다. 양이온 분석용 물시료는 농질산을 가하여 pH 2 이하가 되도록 하여, 용존원소들이 시료용기벽에 흡착되거나 침전되는 것을 방지하고자 하였다. 채취된 시료는 이동형냉장고에 보관하여 실험실로 운반하였다. 시료채취과정, 현장분석방법, 전처리방법등은 Wood (1977)와 Greenberg *et al.* (1992)의 내용을 참조하였다.

#### 화학분석

물시료의 K 원소는 원자흡광분광분석기 (Unicam model 989 Flame AAS)로, Fe 원소는 동종의 Flameless AAS로 분석하였다. Na, Ca, Mg, Sr, Si 등의 원소는 유도결합쌍 프라즈마 원자방출분광분석기 (Shimadzu 모델 ICPS-1000 III, ICP-AES)로 분석하였다. 100 ppb 이하의 미량원소인 Mn, Al, Ba, Pb, Cu, Ni, Cr, Co, Zn, As, Cs, Ti, Ge, Se, Cd, Th, U 등은 유도결합쌍 프라즈마 질량분석기 (Fison model PQ III, ICP-mass)로 분석하였다. 이상의 양이온 분석은 기초과학 지원센터에서 이루어졌다.  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{F}^-$  등의 음이온은 이온크로마토그래피 (Dyonex 4500 i)로 분석하였다. 화학분석자료의 정확성은 분석된 총양이온과 총음이온값 (meq/l)의 전하균형을 계산하여 확인하였다. 분석된 자료중 전하균형의 오차가 ±5% 이내인 것들만 신뢰성 있는 자료로 활용하였다.

#### 환경동위원소 분석

수문순환의 관점에서 지하수의 함량 및 대재시간을 알아보기 위하여 물분자의 산소 및 수소동위원소인  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ,  $^2\text{H}/^1\text{H}$ ,  $^3\text{H}/^1\text{H}$ 를 분석하였다. 물시료에 대한  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  분석은 25°C (±0.1°C)에서 물시료와 동위원소 교환반응





Table 2. Continued.

Sample No.	W19	W27	W34	W50	W54	W56	W58	W61	W65
Well depth	18 m	41 m	15 m	?	10 m	5 m	21 m	18 m	32 m
pH	5.84	6.86	6.55	7.51	6.27	7.29	5.91	6.35	6.24
Eh(mV)	230	195	187	145	192	175	213	180	213
E.C.( $\mu$ S/cm)	221	132.8	98.5	110.5	223	133.8	188.7	146	160
Temp( $^{\circ}$ C)	9.7	10.8	12.9	9.3	7.4	10.5	13.8	12.2	8.8
Do(ppm)	3.9	8.2	5.2	8.2	9.7	8	6.9	6.4	4.6
Na <sup>+</sup>	9.67	6.67	6.78	6.45	15.2	11.3	6.91	5.52	6.41
K <sup>+</sup>	7.3	2.18	3.08	1.45	15.1	3.66	2.08	1.37	6.32
Ca <sup>2+</sup>	19.4	22.6	15.2	9.35	25.6	20.1	17.3	16.3	9.07
Mg <sup>2+</sup>	5.48	6.12	3.34	3.29	9.53	3.4	6.28	3.22	3.08
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	39.4	74.14	54.4	46.07	58	58.9	18	51	42.41
Cl <sup>-</sup>	18.95	11.9	7.37	4.65	30.33	17.08	11.19	5.68	6.25
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	15.27	9.79	8.25	5.54	19.3	15.23	19.44	6.25	8.93
F <sup>-</sup>	0.01	0.27	0.51	0.30	0.28	0.35	0.07	0.33	0.29
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	37.2	13.5	6.41	3.35	65.8	7.65	48.9	11.1	11
SiO <sub>2</sub>	13.88	15.02	16.65	21.12	19.58	14.23	16.93	14.37	16.32
									(Unit :ppb)
Fe	15.6	15.6	12.5	6.81	4.17	7.31	17	5.38	10.9
Mn	0.79	181	1.57	0.4	0.4	0.74	1.14	0.48	10
Al	2.48	3.36	4.39	3.35	2.47	8.34	1.7	1.96	4.71
Ba	593.7	99.7	127.8	149.9	160.8	125	14.4	119.6	124.1
Pb	3.7	0.53	0.35	<0.1	0.16	0.21	0.49	0.25	0.69
Cu	18.8	15.3	9.52	14.9	9.62	5.67	5.94	5.55	9.75
Ni	1.36	1.52	0.78	0.79	1.01	0.21	1.38	0.52	0.93
Cr	0.53	0.67	0.6	0.8	0.4	5.67	0.74	0.8	0.52
Co	<0.1	0.11	0.72	0.2	<0.1	1.02	<0.1	<0.1	3.34
Zn	56.3	1015	211	3.33	5.95	1.01	122	71.2	641
As	0.14	0.25	0.17	0.24	0.38	<0.1	<0.1	1.5	<0.1
Cs	<0.1	0.11	<0.1	<0.1	<0.1	11.1	<0.1	0.17	<0.1
Cd	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	1.98	<0.1	<0.1	<0.1
U	<0.1	0.89	0.15	0.11	<0.1	<0.1	<0.1	1.21	<0.1

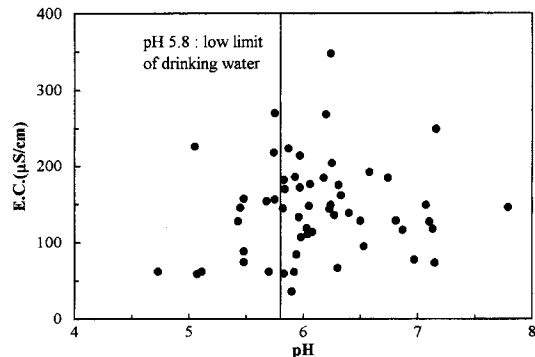


Fig. 2. Diagrams showing the relationship between pH and electrical conductance of 56 samples of shallow groundwater from Myungok-ri area.

농도가 상대적으로 높아 4~17 mg/l 정도를 보인다. K<sup>+</sup>은 0.49~15.1 mg/l의 함량을 보인다. 물의 경도 (Hardness)를 CaCO<sub>3</sub>로 환산하여 보면 대략 30~110 mg/l 범위로 단

물내지 약한 센물의 특성을 보인다. 물맛을 저하시키는 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>와 Cl<sup>-</sup>의 농도범위는 5~20 mg/l과 4~30 mg/l을 각각 보여 음용수의 기준치 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>의 200 mg/l 이하, Cl<sup>-</sup>의 150 mg/l 이하보다 훨씬 낮다. F<sup>-</sup> 농도는 0.5 mg/l 이하로 낮은 값을 보인다. NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 농도는 5~66 mg/l 범위로 평균 22 mg/l 값을 보인다, 천부지하수중 W-54 와 W-58 시료는 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>의 음용수의 수질기준치인 44 mg/l을 상회하는 65.8 mg/l과 48.9 mg/l을 각각 보여준다.

분석된 미량원소 Fe, Mn, Al, Ba, Pb, Cu, Ni, Cr, Co, Zn, As, Cs, Cd, U 원소중 Ba, Zn, Cu 가 일부 시료에서 약간 높은 수치를 보인다. BH1, W27 지하수 시료에서는 Zn 가 음용수의 수질기준치 1 ppm을 초과한다.

#### 심부지하수

먹는샘물 취수정 5개공에서 채취된 심부지하수에 대한 화학분석결과는 Table 3과 같다. 심부지하수의 pH는 8.4~8.8 범위의 알칼리성이며, 산화환원전위 (Eh)는 PW-1 취

**Table 3.** Chemical composition of deep groundwater in Myunggok-ri area. (Unit : mg/l)

Sample No.	PW-1	PW-2	PW-3	PW-4	PW-5
Well depth(m)	297	202	268	246	242
pH	8.81	8.47	8.63	8.49	8.44
Eh(mV)	-80	42	78	110	90
E.C.( $\mu$ S/cm)	186	187	237	220	199
Do(ppm)	1.5	1.1	1.8	4.3	2.6
Temp.( $^{\circ}$ C)	19	16.7	17.5	17.5	18.3
Na <sup>+</sup>	35.9	29.2	48.1	33.8	23.7
K <sup>+</sup>	0.73	1.03	1.06	0.99	1.18
Ca <sup>2+</sup>	7	9.43	7.37	11.8	14.9
Mg <sup>2+</sup>	1.47	3.07	2.76	4.18	5.04
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	112.3	121.1	172.7	133.7	124.5
Cl <sup>-</sup>	2.98	2.71	2.37	2.51	2.82
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	11.38	7.11	7.59	16.59	14.45
F <sup>-</sup>	1.27	1.01	1.62	1.54	1.03
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0	0	0.42	0	0
SiO <sub>2</sub>	17.28	15.39	14.99	14.18	14.95

	(Unit : ppb)				
Fe	16	13.7	11.1	25.3	11.2
Mn	3.7	4.3	5.4	6.4	0.8
Al	5.5	7.8	7.1	14.1	10.6
Ba	3.3	6.8	27.5	31.3	42.9
Pb	<0.1	0.2	<0.1	0.3	0.2
Cu	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
Ni	1.1	0.9	0.8	1.1	1.1
Cr	1	1.3	1.4	1.2	1.1
Co	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Zn	1.5	1.9	1.1	1.7	2.8
As	17.4	12.6	46.8	30.5	24.2
Cs	<0.1	0.2	0.2	0.2	0.4
Sr	0.59	1	0.75	1.37	1.02
Ti	0.2	0.2	0.1	0.5	0.2
Ge	0.2	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Se	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Cd	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Th	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
U	0.6	0.5	0.9	3.6	3.7

수정에서만 환원성 환경인 -80 mV를 보이고 나머지는 42 mV에서 110 mV까지 산화환경에서 놓여 있다. 지하수의 용존산소량은 약 1~4 mg/l 범위로 비교적 낮은 값을 보여, 측정당시 대기중 산소의 유입을 고려하면 심부지하수는 거의 지표의 산화환경과는 상당히 격리된 것으로 보인다. 전기전도도는 186~237  $\mu$ S/cm 범위를 보이며, 지하수의 온도는 대략 16~19 $^{\circ}$ C 정도이다.

지하수내 주요 용존이온은 23.7~48.1 mg/l 범위의 Na<sup>+</sup>, 1 mg/l 내외의 K<sup>+</sup>, 7~15 mg/l 범위의 Ca<sup>2+</sup>, 1.5~5 mg/l 범위의 Mg<sup>2+</sup> 등이다. 가장 풍부한 양이온은 Na<sup>+</sup>이다. 음이온으로 가장 우세한 성분은 112~173 mg/l 농도의 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 이고, Cl<sup>-</sup>은 약 3 mg/l 이하의 낮은 값을 갖는다.

다. SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>은 7~16 mg/l 농도범위를 보인다. F<sup>-</sup> 성분은 1.01~1.62 mg/l 범위를 보이는데 PW-3 호공과 PW-4 호공 지하수는 음용수의 수질 기준치인 1.5 mg/l 약간 초과하기도 한다. NO<sub>3</sub><sup>-</sup>는 거의 검출되지 않아 지표 오염원이나 주변의 오염된 천부 지하수가 심부 취수정까지는 확산되지 않은 것으로 판단된다.

미량원소로 Fe, Mn, Al, Ba, Pb, Cu, Ni, Cr, Co, Zn, As, Cs, Sr, Ti, Ge, Se, Cd, Th, U 등의 원소가 분석되었다. 분석결과 모든시료에서 중금속을 비롯한 미량원소의 농도가 음용수의 수질기준치 이하의 값을 보였다. PW-3, PW-4, PW-5 취수정에서 비소 (As)가 음용수의 수질기준치인 50 ppb 보다 약간 낮은 46.8~24.2 ppb 범위를 보이며, 바륨 (Ba)이 42.9~27.5 ppb 범위로 PW-1, PW-2 취수정 지하수의 7 ppb 이하보다 높은 값을 보인다.

**물의 화학적 유형**

지표수 및 지하수의 화학적 유형을 Piper 다이어그램 (Piper, 1944)상에 도시하였다 (Fig. 3). Piper 다이어그램상에서 지표수는 특정한 화학적 유형으로 분류되지 않고 중앙부에 넓게 산재된다. 우물지하수의 화학적 유형은 Ca-HCO<sub>3</sub> 형에서 Ca-Cl(SO<sub>4</sub>) 형까지 분포한다. 취수정 심부지하수는 Na-HCO<sub>3</sub> 형에서 Na(Ca)-HCO<sub>3</sub> 영역에 점사된다. 따라서 천부 지하수와 심부 지하수의 사이에 물의 화학적 유형은 뚜렷한 차이를 보인다. 이는 천부지하수와 심부지하수사이에 지화학적 진화 과정상의 차이나 천부지하수로 오염물질의 유입에 의한 것으로 볼 수 있다.

**물-암석 상호반응 및 인위적 오염**

지하수 성분을 물-암석 상호반응의 자연적 과정에 의한 기원과 인위적 오염기원을 정량적으로 구별하는 것은 매우 어려운 문제이다. Pacheco and Weijden (1996)는 대도시 지하수의 성분에 대해 군집엘고리즘 (algorithm)과 풍화엘고리즘을 결합하여 물-암석반응 기원과 오염기원을 해석하고자 하였다. 그들은 지하수의 성분중 물-암석 상호반응에 의해 기원될 수 있는 성분은 실리카 (Silica)와 중탄산이온 (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>)으로만 한정하였고, 연구지역내 황철석과 같은 유화광물의 존재는 무시하고 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Cl<sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 등의 용존 음이온은 대기나 오염기원으로 간주하였다.

연구지역에서 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 공급원은 편마암내 일부 석영세맥에 수반되는 황철석 (FeS<sub>2</sub>)등으로 보인다. SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 함량은 심부지하수와 천부지하수 사이에 큰 차이가 없이 6~20 mg/l의 범위를 보인다. 심부지하수가 오염되지 않은 물임을 고려할 때 천부지하수의 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 성분은 오염원으로부터

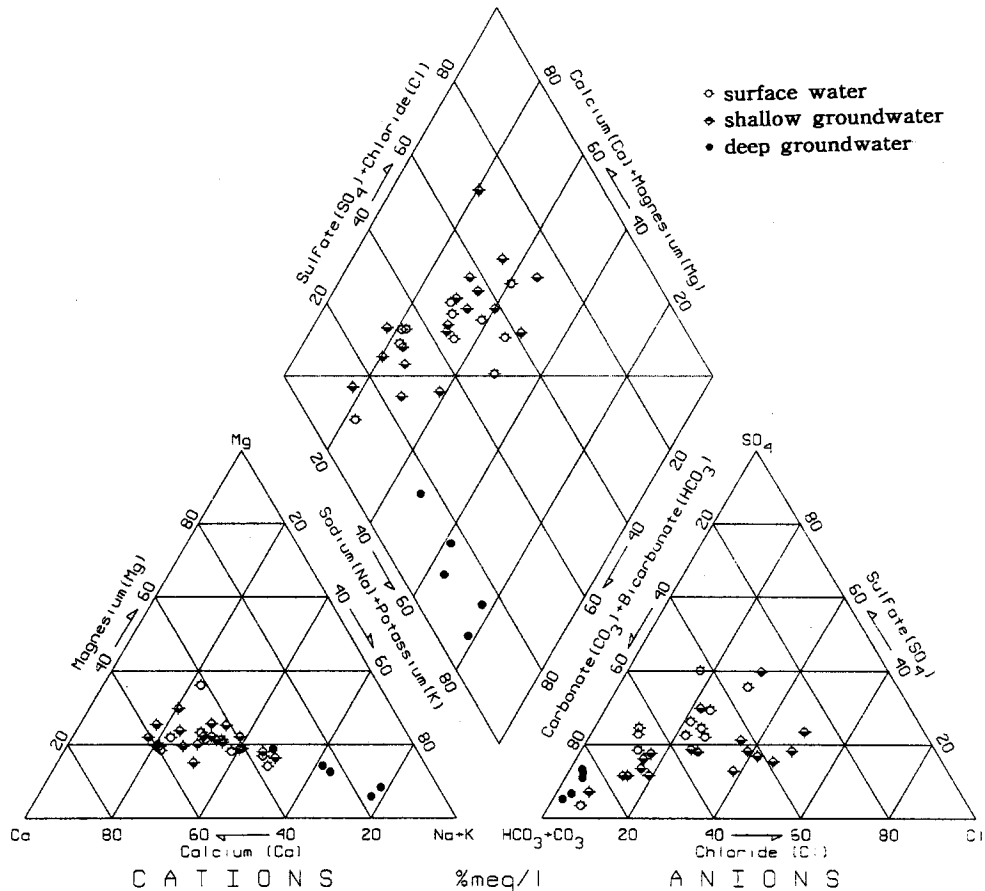


Fig. 3. Trilinear diagram of major ion composition of surface water, shallow and deep groundwaters from Myungok-ri area.

크게 공급되지는 않은 것으로 보인다.

암염층이나 해수의 침투가 없는 화강암 또는 화강편마암 지역의 지하수내  $Cl^-$ 의 공급은  $Cl^-$ 을 함유하는 광물이나, 과거 지질시대에 지질작용을 거치면서 암석공극등에 포획된 염수 (brine water), 또는 광물내 유체포유물 등으로 부터 공급될 수 있다 (Frape *et al.*, 1984). 그러나 국내 화강암 및 화강편마암 지역의 200~300 m 이내의 심도에서  $Cl^-$ 의 농도는 평균 10 mg/l 이하의 함량을 보인다 (이중운외, 1997; 한국자원연구소, 1993; 1996). 연구지역 심부지하수의  $Cl^-$  농도는 3 mg/l 이하로, 외부의 오염원으로 부터 공급은 거의 없는 거의 순수한 물-암석 반응에 의한 것으로 보인다. 반면 천부지하수의  $Cl^-$  함량은 평균 13.7 mg/l, 최고 30 mg/l로 연구지역 심부지하수와 국내 화강암이나 화강편마암지역 지하수의 평균값보다 높은 값을 보여준다. 이는  $Cl^-$ 이 비반응성 성분임을 고려할 때, 천부지하수의  $Cl^-$  함량중 상당한 부분이 외부 오염물질의 유입에 의한 것으로 판단된다.

지하수내  $NO_3^-$  성분은 동식물의 단백질이 분해되어 생성되는  $NH_3$ 의 가수분해작용과 산화반응을 거치면서 수소이온을 방출하고 생성된다 (최석원과 김억수, 1996).  $NO_3^-$ 는 거의 대부분 오염물질로부터 유입되므로 천부지하수의  $NO_3^-$  평균농도가 22 mg/l이며, 최고 65.8 mg/l의 높은 함량을 보여 천부 지하수는 축산폐수, 분뇨, 질소비료등에 의해 오염이 진행되고 있음을 알 수 있다. 아울러 천부지하수의 pH 평균 6.2로 약산성화 특성을 보이는 것은  $NO_3^-$ 의 유입과 상당히 관련된 것으로 해석된다.

물-암석 상호반응 과정에서 화강편마암내 사장석, K-장석, 흑운모, 백운모, 세리사이트, 녹리석등과 같은 규산염 광물은 부조화 용해반응 (incongruent dissolution)으로 수소이온을 소모하여 지하수를 알카리화하고, 지하수내  $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $SiO_2$ 를 공급하며, 캐오리나이트와 같은 이차광물을 생성시키는 것으로 알려져 있다 (Drever, 1988; 정찬호외, 1994; 1997). 아울러 편마암내 사장석의 엘바이트화 과정에 의해 생성된 방해석과 연구지역



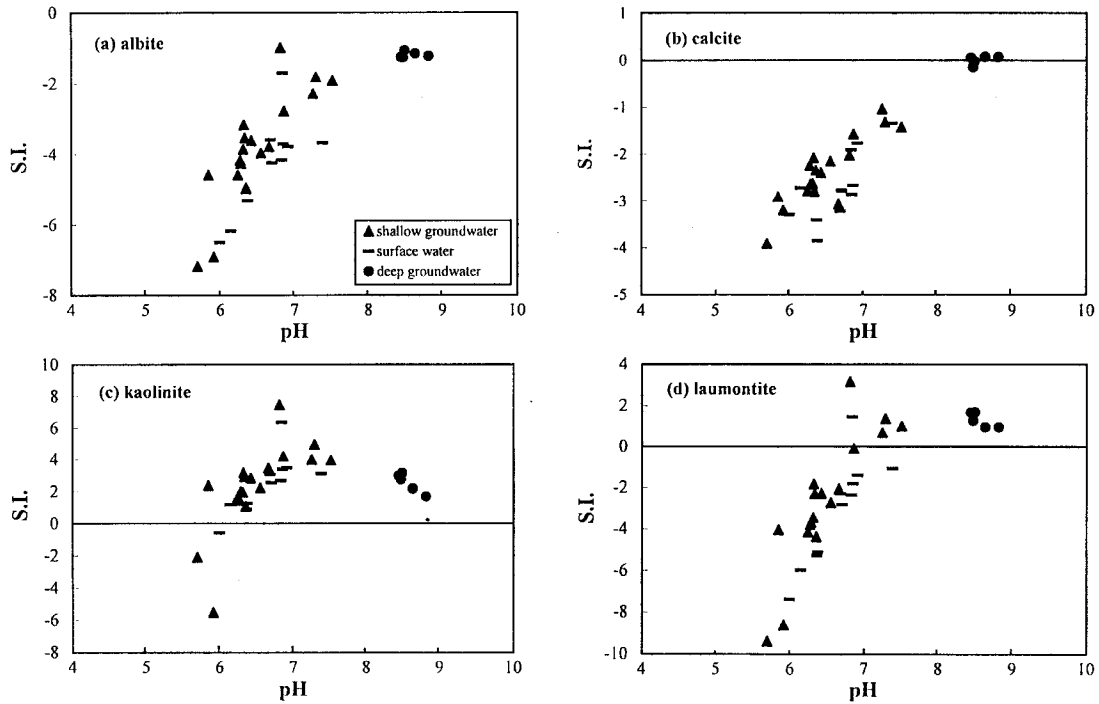


Fig. 4. Calculated saturation indices (S.I.) of albite, calcite, kaolinite and laumontite in terms of pH of surface water, shallow and deep groundwaters from Myungok-ri area.

내 분포하는 염기성 맥암류내 확인된 행인상 구조의 방해석 등의 용해반응으로도 지하수내  $Ca^{2+}$ 의 공급원이 될 수 있을 것으로 보인다. 그러나, 천부지하수내 평균 4.4 mg/l, 최고 15 mg/l의 높은 함량을 보이는  $K^+$ 은 심부지하수의  $K^+$  함량 1 mg/l 내외, 화강암지역 지하수의 평균 1.4 mg/l와 비교하면 상당히 높은 편이다 (이중운외, 1997). 따라서  $K^+$ 은 물-암석 상호반응에 의한 공급보다는 칼륨 비료 사용등에 의한 외부 오염원에 의한 공급이 훨씬 클 가능성이 높다.

물-광물의 열역학적 평형관계를 WATEQ4F (Ball and Nordstrom, 1992) 프로그램을 이용하여 계산해 본 결과 연구지역내 지하수의  $Na^+$ 의 주요 공급원인 엘바이트 (albite)는 지표수, 천부 및 심부 지하수 모두에 대해 용해성 조건에 있고,  $Ca^{2+}$ 의 주요 공급원인 방해석은 심부 지하수와는 평형상태에 있고, 천부 지하수 및 지표수에서는 용해성 환경에 있다 (Fig. 4a, b). 이차광물로 생성될 수 있는 캐오리나이트는 일부 지표수를 제외하고는 모든 물에서 침전조건을 보인다 (Fig. 4c). 로몬타이트 (laumontite)는 일부 지표수와 천부 지하수, 그리고 심부 지하수에서만 침전 환경에 있다 (Fig. 4d). 캐오리나이트와 로몬타이트는 화강암, 화강편마암내 단열을 충진한 이차광물로 보고된 바 있

다 (한국원자력연구소, 1994; 정찬호외 1994; 1995).

연구지역 지하수의 화학적 조성에 대해 인위적인 오염에 의한 영향을 알아보기 위해서 군집방법 (grouping approach)을 이용하여 보았다. 먼저, 지표수인 발원지 계곡수 (S-1, S-2)의 화학조성을 오염되지 않은 물-암석 상호반응의 초기단계의 성분으로, 심부지하수의 화학조성을 물-암석 상호반응의 후기단계의 성분으로 각각 설정하였다. pH를 물-암석 상호반응에 의한 지하수 진화과정에 대한 기준으로 설정하였다. 이와같은 설정은 정찬호등 (1997)에 의한 편마암-물 상호반응 경로 모델링의 결과에 의한 지하수의 지화학적 진화과정을 참고하였다. 그리고 물시료의 화학특성인 전기전도도,  $\Sigma(SO_4^{2-} + Cl^- + NO_3^-)$ ,  $HCO_3^-/\Sigma 음이온$ ,  $K^+$ ,  $Na^+$ ,  $Ca^{2+} + Mg^{2+}$  등과 pH와의 상관관계를 알아보았다 (Fig. 5).

Fig. 5에서 발원지계곡수-심부지하수를 사이의 진화경향을 자연적인 물-암석 상호반응에 의한 지하수의 지화학적 진화과정 (natural process)의 범주로 그룹화하고 그 경향에서 벗어나는 물시료는 인간기원의 오염물질 유입 (anthropogenic input)에 영향이 큰 그룹으로 구분하였다. Fig. 5a는 pH에 따른 전기전도도의 관계를 보여주는 데, pH 증가와 전기전도도의 증가가 정의 관계를 보이는

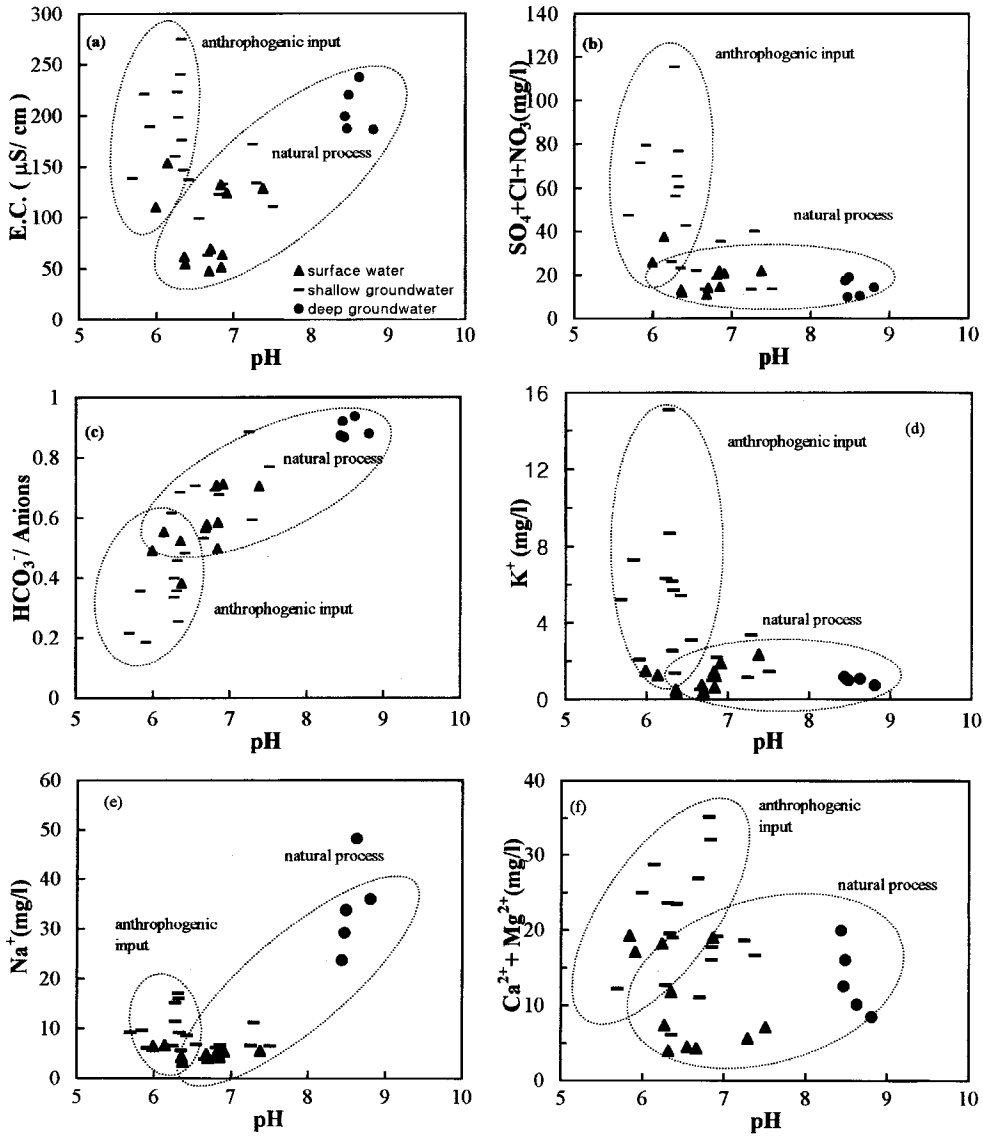


Fig. 5. Diagrams showing the relationships of electrical conductance,  $\Sigma(\text{SO}_4^{2-} + \text{Cl}^- + \text{NO}_3^-)$ ,  $\text{HCO}_3^-/\text{Anions}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ , and  $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$  as a function of pH of surface water, shallow and deep groundwaters from Myunggok-ri area.

그룹과 pH 큰 증가없이 전기전도도만 증가하는 경향을 보이는 두 그룹으로 구분된다. 전자에 속하는 물시료의 화학조성은 자연적인 물-암석 상호반응에 의한 영향에 의해 주로 결정되었고, 후자의 경우 물-암석 상호반응에 의한 정상적인 진화과정에서 벗어나므로 인간기원의 오염물질 유입에 영향이 큰 것으로 해석할 수 있다. Fig. 5b에서는 물의 수질특성을 저하시키는  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ 의 총 함량과 pH와의 상관관계를 도시하였다. 자연적 반응에 의한 물의 그룹은 pH 증가에도 일정하게 낮은  $\Sigma(\text{SO}_4^{2-} +$

$\text{Cl}^- + \text{NO}_3^-)$  값을 보이나, 오염물질 유입에 영향을 받은 물은 pH 증가없이  $\Sigma(\text{SO}_4^{2-} + \text{Cl}^- + \text{NO}_3^-)$ 만 증가하는 경향을 보인다. Fig. 5c에서는  $\text{HCO}_3^-$  함량을 총음이온중에서 차지하는 비율 pH와의 상관관계로 나타내었다.  $\text{HCO}_3^-$ 는 단순한 물-암석 상호반응에 의해서 기원되므로 pH 증가와 함께  $\text{HCO}_3^-/\Sigma$ 음이온 비가 높은 그룹은 자연적인 반응에 의한 것으로, 오염기원에 영향을 받은 물은 약산성의 pH 조건과  $\text{HCO}_3^-/\Sigma$ 음이온 비가 낮은 그룹에 속한다. Fig. 5d는 pH와  $\text{K}^+$  함량과의 관계를 보여주는데

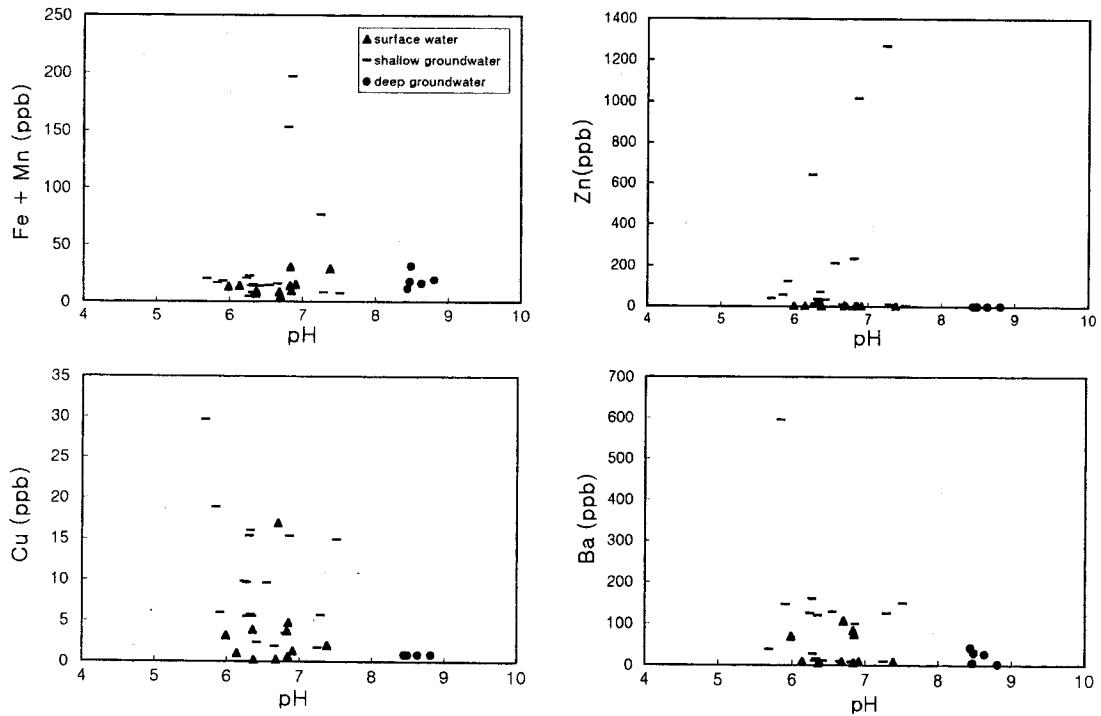


Fig. 6. Diagrams showing the relationships between pH and the contents of Fe+Mn, Cu, Zn and Ba of surface water, shallow and deep groundwaters from Myunggok-ri area.

오염물질의 유입에 영향을 받은 물은 pH 증가없이  $K^+$  함량만 증가하는 반면 자연적 반응에 의한 물의 그룹은 pH 증가에도  $K^+$  함량의 증가가 뚜렷하지 않다. Fig. 5e는 pH와  $Na^+$  함량의 관계를 보여준다. 편마암-물 반응계에서 지하수의 진화에 따라서  $Na^+$  함량이 지속적으로 증가하는 경향을 보여준다 (정찬호외, 1997). pH와  $Na^+$  함량 관계에서 자연적 반응에 의한 그룹은 pH의 증가에 따라  $Na^+$  함량이 증가하는 경향을 보이지만 오염물질의 유입이 있는 물은 pH의 큰 증가 없이  $Na^+$ 의 농도가 약간 증가하는 경향을 보인다. Fig. 5f에서는 pH와  $Ca^{2+}+Mg^{2+}$  함량관계를 보여준다. 자연적 반응에 의한 그룹은 pH 증가와 함께  $Ca^{2+}+Mg^{2+}$  함량이 완만한 증가를 보이나, 오염물질의 유입이 있는 물은 약간의 pH 증가에도  $Ca^{2+}+Mg^{2+}$  함량이 크게 증가하는 경향을 보여준다.

군집방법에 의하며, 자연적인 반응에 의해 진화된 물은 지표수 → 천부 지하수 → 심부 지하수로 일정한 경향의 지화학적 진화특성을 잘 보여준다. 오염물질의 유입에 영향을 받은 물의 화학조성중 음이온 성분은 주로  $NO_3^-$ 와  $Cl^-$ 이며  $SO_4^{2-}$ 은 크게 오염원으로 부터 유입되지 않는 것으로 보인다. 양이온의 경우  $K^+$ 이 뚜렷하며,  $Ca^{2+}+Mg^{2+}$  그리고  $Na^+$ 의 순으로 오염원으로 부터 유입의 영향을 받은

것으로 보인다.

Fig. 6은 pH 변화에 따른 미량원소 (Fe+Mn, Zn, Ba, Cu)의 분포 특성을 보여준다. 이들 미량원소는 지표수와 취수정 심부지하수에서는 매우 낮은 함량을 보이지만, 천부형 지하수의 경우에는 상대적으로 높은 농도를 보인다. 이는 천부형 지하수로 오염물질의 유입이나 혹은 낮은 pH 조건에서 토양층내 중금속 이온의 용해에 의한 것으로 보인다. 그러나 심부 지하수는 중금속 오염원에 노출되어 있지 않거나, 토양 및 암반에서 용출된 중금속이 지하수가 알칼리성 환경으로 진화하면서 상당히 침전되었을 가능성이 높다. 이를 확인하기 위하여 열역학적 Speciation 프로그램인 WATEQ4F (Ball and Nordstrom, 1992)로 계산된 Zn, Fe, Mn의 종분포 (species distribution) 특성을 보면 지표수 혹은 천부지하수에서는 자유 이온상태인  $Zn^{2+}$ ,  $Fe^{2+}$ ,  $Mn^{2+}$ 가 우세한 종 (species) 분포 특성을 보이나, 심부 지하수에서는 Zn의 경우  $ZnCO_3$ ,  $Zn(CO_3)_2^{2-}$ ,  $Zn(OH)_2$  등의 complex 형태가 우세하다. Fe는  $FeCO_3$ ,  $Fe(OH)_3$ ,  $Fe^{2+}$ 의 순으로 우세한 종분포 특성을 보인다. Mn의 경우에는  $MnCO_3$ ,  $Mn^{2+}$ 의 순으로 우세한 종분포를 보인다. 이와같이 중금속의 탄산 및 수산화물의 complex 형성은 지하수-암석 반응계에서 중금속의 침전과 흡착반

응에 유리하게 작용한 것으로 보인다.

### 환경동위원소 특성

물을 구성하는 산소와 수소의 동위원소 ( $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ , D/H,  $^3\text{H}/^1\text{H}$ )는 대기의 순환, 지하수의 이동을 포함한 수문순환 과정 그 자체를 잘 반영하는 특성으로, 지구환경과 관련된 연구분야에 좋은 연구 도구로 이용되고 있기 때문에 이들을 흔히 환경동위원소 (environmental isotope)라 한다. 산소와 수소 안정동위원소인  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ , D/H의 조성은 대기의 순환과 기후의 변화를 뚜렷히 반영한다 (Dansgaard, 1964; Lawrence *et al.*, 1982; Lawrence and White, 1991). 이러한 특성을 이용하여 지하수의 함양지역에 대한 정보, 물-암석 상호반응, 지하수로의 해수침투 등에 관한 정량적인 자료를 얻을 수 있다. 12.43년의 반감기를 갖는 Tritium은 약 70년 이하의 연령을 갖는 지하수의 대체시간 해석에 유용한 도구로 이용된다.

### 안정동위원소

해양으로부터 증발된 수증기가 대륙으로 이동됨에 따라 동위원소 분별작용이 일어나게 된다. 그결과 수증기내에는 해수에 비해 가벼운 동위원소조성을 갖게 되어 강수를 형성하고 이 과정이 계속 진행되면서 대륙의 지형 및 온도에 따라 지표수 및 지하수에 다양한 물분자의 동위원소조성이 분포된다. 이렇게 형성된 지표수와 지하수의 산소 및 수소 동위원소조성은

$$\delta\text{D} = 8\delta^{18}\text{O} + 10 \quad (1)$$

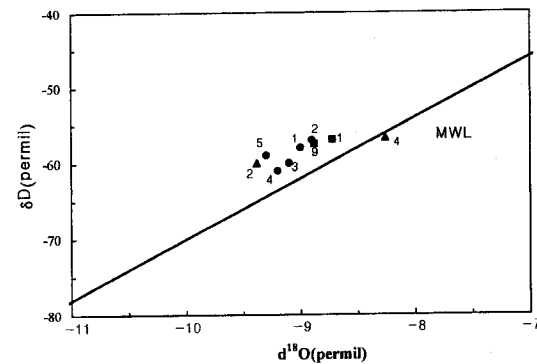
관계를 보이며  $\delta\text{D}$  vs  $\delta^{18}\text{O}$  diagram에 도시할 경우, 이 선을 meteoric water line이라 한다 (Craig, 1961; 1965). 이 관계식은 지역에 따라 다소 차이가 있으나 한반도의 강수, 지표수 및 지하수의 안정동위원소 조성은 이 관계를 잘 보여주고 있다 (한국원자력연구소, 1994).

명곡리 지표수의 산소동위원소 조성은 -9.4~-8.3‰을 보이고, 천부 지하수의 산소동위원소는 -9.0~-8.5‰을 보인다. 그리고 심부 지하수는 -8.9~-9.3‰의 비교적 좁은 범위를 보인다. 지표수의 경우 고도에 따른 동위원소비의 분명한 차이를 보인다. 수소동위원소의 조성은 지표수가 -60~-56‰, 천부 지하수가 -57‰, 심부 지하수가 -57~-61‰을 보여준다. 이상의 동위원소조성은 Table 4에서 정리되었다.

$\delta\text{D}$  vs  $\delta^{18}\text{O}$  다이어그램에 도시하면 지표수, 우물지하수, 심부취수정 지하수 모두 meteoric water line 주변을 따라서 도시된다(Fig. 7). 이광식, 장병욱 (1994)에 의한 서울

**Table 4.** Environmental isotopic composition of surface water, shallow and deep groundwaters in Myunggok-ri area.

Sample No.	$^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ (‰)	$^2\text{H}/^1\text{H}$ (‰)	$^3\text{H}/^1\text{H}$ (TU)
S-1	-9.3	-	-
S-2	-9.4	-60	-
S-4	-8.3	-56	15.9
S-9	-8.4	-	-
W1	-8.7	-57	11.5
W9	-8.9	-57	9.6
W19	-8.5	-	-
W58	-9.0	-	-
PW-1	-9.0	-58	0
PW-2	-8.9	-57	3.5
PW-3	-9.1	-60	1.8
PW-4	-9.2	-61	0.5
PW-5	-9.3	-59	0



**Fig. 7.** Plot of  $\delta^{18}\text{O}$  versus  $\delta\text{D}$  values for surface water (triangular solids), shallow groundwater (rectangular solids) and deep groundwater (circle solids) from Myunggok-ri area.

대전지역 강수에 대한 안정동위원소 분포도와 비교하면 그 일부에 속하므로 강수 기원임을 알 수 있다. 지표수는 발원지 계곡과 하류사이에는 산소 및 수소 동위원소조성 각각 -1.1%, -4% 정도의 고도효과 (altitude effect)를 보인다. 계곡수 (S-1, S-2)의 동위원소 조성이 심부취수정 PW-4, PW-5 호공 지하수의 동위원소 조성값과 유사함을 보여준다. 이는 PW-4, PW-5 호공 지하수의 함양지역은 NE 방향의 고지대인 것으로 판단되고, 산소 및 수소동위원소의 결핍이 가장 작은 PW-2 호공의 지하수는 저지대의 함양 영향이 큰 것으로 판단된다. 즉, 지질구조선으로 추정되는 PW-2 호공 앞 EW 방향의 계곡 (박충화외, 1998)의 영향을 받은 것으로 보인다. 이러한 동위원소 조성의 차이는 삼중수소 분석결과에서도 유사한 경향을 보여준다.

### 삼중수소

삼중수소(tritium)은 물분자 동위원소로서 지하수내 용

존하고 있는 화학성분처럼 화학적 반응을 하지 않으므로 물의 거동을 가장 잘 파악할 수 있는 추적자의 역할을 한다. 삼중수소의 반감기가 12.43년이고  $\beta$ 붕괴를 하는 수소의 방사성 동위원소로 자연수중의 삼중수소 함량은 TU (tritium unit)라는 단위를 사용한다 (Schell, 1974; IAEA, 1979; 1983). 1 TU는 수소원자  $10^{18}$ 개당 삼중수소 1개를 의미한다.

한반도의 경우 1963년에 강수의 삼중수소 함량이 1,384 TU까지 달했으나, 핵실험의 규제로 삼중수소의 함량이 계속 감소하여 현재 10 TU 내외의 값을 보여주고 있다 (한국원자력연구소, 1994; 정찬호외, 1995).

이와같이 시간에 따라 변화를 보이는 삼중수소가 지하로 유입되면 그 후의 함량변화는 반감기에 의한 자연적인 감소에 의해서만 영향을 받게된다. 따라서 지하수의 삼중수소의 함량 변화를 이용하여 지하수의 체재시간 (residence time) 및 유동해석이 좋은 도구로 활용된다.

Table 4에서와 같이 지표수의 삼중수소 함량은 15.9 TU이며, 천부 지하수는 이보다 약간 낮은 11.5~9.6 TU이다. 그리고 심부 지하수는 0~3.5 TU의 범위를 갖는다. 심부지하수중 PW-1, PW-4, PW-5 호공은 0~0.5 TU로 1950년대 핵실험이전에 함양된 물로 판단되며, PW-2, PW-3 호공의 삼중수소 함량은 3.5 TU, 1.8 TU를 각각 보여 다른 3개 심부지하수보다 체재시간이 상대적으로 짧은 것으로 보인다. 이는 지하수 함양과 유동이 비교적 빠른 지질구조의 영향 때문인 것으로 보인다. 천부지하수의 삼중수소 함량은 지표수보다는 약간 낮은 값을 보이나 심부지하수 보다는 훨씬 높은 값을 보여 강우나 지표수가 지하로 침투한 후 지하수로의 체재시간이 상당히 짧은 지하수로 판단된다.

### 요약 및 결론

농촌마을인 명곡리지역의 마을주민들이 생활용수 및 식수로 사용하는 천부 지하수의 화학적 유형은  $\text{Ca-HCO}_3$  형에서  $\text{Ca-Cl(SO}_4\text{)}$ 형에 속하며, pH 4.9~7.5 범위로 음용수 수질기준 pH 5.8 이하의 천부지하수가 약 30% 정도이다. pH의 평균은 6.2로 산성화의 경향을 보인다. 반면 심부지하수는 pH 8.4~8.8 정도의 알칼리성의 오염되지 않은 깨끗한 물로  $\text{Na-HCO}_3$  형에서  $\text{Na(Ca)-HCO}_3$  형의 화학적 유형을 보인다. 물의 화학성분에 영향을 미친 물-암석 상호반응과 인간활동에 의한 오염물질의 유입정도를 알아보기 위한 군집방법에 의하면 천부지하수의 음이온 중 오염기원의 영향은  $\text{NO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-}$  순서를 보이며, 양이온은  $\text{K}^+ > \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+$  순으로 오염물질의 유입

에 영향을 받은 것으로 보인다. 특히, 천부지하수의 화학 성분중  $\text{NO}_3^-$ 의 평균농도는 22 mg/l,  $\text{Cl}^-$ 는 평균 13.7 mg/l,  $\text{K}^+$ 는 평균 4.4 mg/l으로 국내 화강암 및 편마암지역 지하수의 평균값보다 높고 연구지역 심부지하수 화학 조성값보다 높아 오염원으로 부터의 유입가능성을 보인다. 특히, 일부지하수에서는  $\text{NO}_3^-$ 의 농도가 44 mg/l을 초과하여 음용수로 부적합하며, Zn가 음용수의 수질기준치를 초과하기도한다. 천부지하수의 주요 오염원은 재래식 화장식, 생활하수, 가축의 축사, 칼륨 및 질소비료 등으로 판단된다.

삼중수소의 분석결과 PW-1, 4, 5 호공의 심부 지하수는 0~0.5 TU의 삼중수소 함량을 보여 1950년대 이전에 함양된 비교적 오랜 물-암석 상호반응을 거친 지하수로 판단되며, PW-2, 3 호공의 지하수는 1.8~3.5 TU로 다른 3개 심부지하수보다 약간 젊은 연령의 지하수임을 알 수 있다. 아울러 천부지하수는 9.6~11.5 TU로 상당히 짧은 체재시간을 갖는 물임을 지시한다.  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ , D/H 환경동위원소 조성값으로 볼 때 PW-4, 5 호공 지하수의 함양지역은 NS 방향의 지형적 동수구배에 영향을 받는 고지대이며, PW-2 호공의 지하수는 EW방향의 저지대 함양의 영향을 받은 것으로 보인다.

### 사 사

이 연구는 공주시청의 “공주시 유구읍 명곡리 일대 지하수 자원현황에 관한 연구” 학술용역 연구비에 의해 수행되었다. 현장 물시료 채취 및 자료처리를 도와준 대전대학교 지질공학과 채수용, 이재희, 변지영, 조정숙 학부생들에게 감사의 뜻을 표한다. 원고를 읽고 건설적인 비평과 논문의 미비한 점을 지적하신 두분의 익명의 심사위원께 감사한다.

### 참고문헌

- 강필중, 임주환 (1974) 1:50,000 광정 지질도폭 및 설명서, 국립지질광물연구소.
- 국립지질광물연구소 (1973) 1:250,000 서산 및 대전지질도, 한림출판사.
- 박충화, 정찬호, 황정, 구민호, 이희순 (1998) 공주시 유구읍 명곡리일대 지하수 자원현황에 관한 연구, 공주시청, 400p.
- 엄상호, 이민성 (1963) 1:50,000 대흥 지질도폭 및 설명서, 국립지질광물연구소.
- 우영균, 최석원, 박기화 (1991) 충남 유구지역 활석광상의 성인에 관한 연구, 광산 지질, 24권, p. 363-378.
- 이광식, 장병우 (1994) 우리나라 대전과 서울지역 강수의 안정동위원소 성분, 대한지질학회지, 30권 p. 475-481.
- 이종운, 전효택, 전용원 (1997) 국내 화강암질암내 심부지하

- 수의 지구화학적 특성. 지하수환경학회지, 4권, p. 199-211.
- 정찬호, 김천수, 김통권, 김수진 (1997) 편마암-물 반응계에서 지하수의 지화학적 진화 및 이차광물생성에 관한 반응 경로 모델링, 한국광물학회지, 10권, p. 33-44.
- 최석원, 김억수 (1996) 의학환경 지구화학, 춘광, 434p.
- 한국원자력연구소 (1994) 자연방벽 안전성 평가-수문환경 평가 기술개발, KAERI-NEMAC/RR-125/94, 69p.
- 한국자원연구소 (1993) 지질환경에서 유해원소들의 지화학적 분산연구 (I), 과학기술처, 464p.
- 한국자원연구소 (1995) 대구지역 지하수 오염방지 및 음용화 기술연구, KR-95 (S)-2, 과학기술처, 459p.
- 한국자원연구소 (1996) 지구물리·지구화학적 오염영역 탐지 및 감시기술 개발 연구 (III), 과학기술처, 667p.
- 한국자원연구소 (1997) 지하수 오염방지 및 음용화 기술연구 (서울지역), KR-97 (S)-2, 과학기술처, 418p.
- Appelo, C.A.J. and Postma, D. (1994) *Geochemistry, Groundwater and Pollution*, Rotterdam, 536p.
- Ball, J.W. and Nordstrom, D.K. (1992) User's manual for WATEQ4F, with revised thermodynamic data base and test cases for calculating speciation of minor, tracer and redox elements in natural waters, U.S., Geol. Surv., Open File Rep. 91-183, 189p.
- Calf, G.E., Seatonberry, B.W. and Smith, L.W. (1976) The Measurement of Natural Levels of Tritium in Water, AAEC/E373.
- Coleman, M.L., Shepherd, T.J., Druham, J.J., Rouse, J.E., and Moore, G.R., (1982) Reduction of water with zinc for hydrogen isotope analysis, *Anal. Chem.*, v. 54, p. 993-995.
- Craig, H. (1961) Isotopic Variations in Meteoric Waters, *Sciences*, p. 702-703.
- Craig H. and Gordon, L.J. (1965) Deuterium and Oxygen-18 Variations in the Ocean and the Marine Atmosphere, *Stable Isotopes in Oceanographic Studies and Paleotemperatures* (Proc. Conf. Nuclear Geology Spoleto, 1965) CNR-Laboratorio di Geologia Nucleare, Pisa, p. 9.
- Dansgaard, W. (1964) Stable isotopes in precipitation, *Tellus*, 16, p. 436-468.
- Drever, J.I. (1988) *The geochemistry of natural waters*, Prentice-Hall Englewood Cliffs, N.J., 437p.
- Frape, S.K., Fritz, P. and McNutt, R.H. (1984) Water-rock Interaction and Chemistry of Groundwaters from the Canadian Shield, *Geochim. Cosmochim. Acta*, v. 48, p. 1617-1627.
- Greenberg, A.E., Clesceri, L.S. and Eaton, A.D. (1992) Standard methods for the examination of water and wastewater, 18th Ed., American Public Health Association, Washington DC, 1010p.
- IAEA (1983) Guidebook on nuclear techniques in hydrology, International Atomic Energy Agency, Vienna, Technical Rep. Series No. 91, 439p.
- IAEA (1979) Behavior of Tritium in the Environment, International Atomic Energy Agency, Tech. Rep. Series No. 91., Vienna, 686p.
- Jeong, C.H., Kim S.J. and Koh, Y.K. (1994) Foramation of Clay Minerals by Water-Rock Interaction in the Fracture of Gneiss, *Jour. of the Mineralogical Society of Korea*, v. 7, p. 49-61.
- Jeong, C.H., Koh, Y.K., Kim S.J. and Kim, C.S. (1995) Hydrogeochemistry and Water-Rock Interaction in the Gneiss of the Samkwang Area. *J. Geol. Soc. Korea*, v. 31, p. 91-105.
- Kendall, C. and Coplen, T.B. (1985) Multisample conversion of water to hydrogen by zinc for stable isotope determination, *Anal. Chem.*, v. 57, p. 1438-1440.
- Lawrence, J.R., Gedzelman, S.D., White, J.W.C., Smiley, D. and Lazov, P. (1982) Storm trajectories in eastern US D/H isotopic composition of precipitation, *Nature*, v. 296, p. 638-640.
- Lawrence, J.R. and White, J.W.C. (1991) The elusive climate signal in the isotopic composition of precipitation, In: Taylor, H.P. Jr., O'neil, J.R. and Kaplan, I.R. (eds), *Stable isotope geochemistry; A tribute to S. Epstein*, v. 16, p. 9-185.
- Lee, J.H., Gaudette, Hurley, P.M. (1973) U-Pb zircon age of the Precambrian basement gneisses of South Korea. *Geology and Ore Deposite*, no. 21, Geological and Mineral Institute of Korea., p. 5-7.
- Paces, T. (1972) Chemical characteristics and equilibration in natural water-felsic rock-CO<sub>2</sub> system, *Geochim. Cosmochim. Acta*, v. 36, p. 217-240.
- Paces, T. (1973) Steady-state kinetics and equilibrium between ground water and granitic rock, *Geochim. Cosmochim. Acta*, v. 37, p. 2641-2663.
- Pacheco, F. and Weijden, C.H. (1996) Contributions of water-rock interactions to the composition of groundwater in areas with a sizable anthropogenic input: A case study of the waters of the Fundao area, central Portugal, *Water Resources Research*, v. 32, p. 3553-3570.
- Piper, A.M. (1944) A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analyses, *Transactions of American Geophysical Union*, v. 25, p. 914-923.
- Schell, W.R., Sauzay G. and Payne, B.R. (1974) World Distribution of Environmental Tritium, *Proc. Symp. Vienna, IAEA*.
- Tardy, Y. (1971) Characterization of the principle weathering types by the geochemistry of waters from some European and African crystalline massifs, *Chem. Geol.*, v. 7, p. 253-271.
- Velbel, M.A. (1985) Geochemical mass balances and weathering rates in forested watersheds of the southern Blue Ridge, *Am. J. Sci.*, v. 285, p. 904-930, 1985.
- Velbel, M.A. (1989) Weathering of hornblende to ferruginous products by a dissolution-reprecipitation mechanism: Petrography and stoichiometry, *Clays Clay Miner.*, v. 37, p. 515-524.
- Velbel, M.A. (1992) Geochemical mass balances and weathering rates in forested watersheds of the southern Blue Ridge, III, Cation budgets and the weathering rate of amphibole, *Am. J. Sci.*, v. 292, p. 58-78.
- Wood, W.W. (1977) Guidelines for the collection and field analysis of groundwater samples for selected unstable constituents. USGS WRI Book 1, Chapter D2, p. 1-24.