

## 충북 괴산군 덕평리 일대의 지하수 수질과 오염

# Groundwater Quality and Contamination in Dukpyung area

김형돈(Hyoung - D. Kim)\* · 우남철(Nam - C. Woo)\* · 최미정(Mi - J. Choi)\*

**요 약** : 본 연구는 괴산군 덕평리 지역의 지하수 수질과, 본 지역에 분포하는 흑색 셰일층과 탄층에 기인한 토양과 암석의 중금속 부화현상이 이 지역 지하수의 수질오염에 미치는 영향을 규명하고자 수행되었다. 본 지역의 지하수질은 지하수환경에서 일어나는 지질매체의 반응이 주로 규산염광물의 풍화인 경우와 탄산염광물의 풍화인 경우로 크게 구분된다. 규산염광물의 풍화가 주된 반응인 시료들은 음이온의 주성분이  $SO_4^{2-}$ 인 시료들과  $Cl^-$ 인 시료들로 세분가능하며, 이러한 수질특성은 지하수와 접하는 암석의 풍화특성에 관계되는 것으로 사료된다. 암석과 토양내 부화된 중금속에 의한 천부 지하수의 오염현상은 국내외의 먹는 물 수질기준에 비교하였을 때 발견되지 않았으나, 국지적으로는 산성폐수의 생성과 지하수환경으로의 유입이 발견되었다. 또한 질산성-질소에 의하여 수질기준의 2~3배에 달하는 오염이 밝혀졌으며, 오염원은 생활하수 내지 비료성분의 지하수내 유입으로 사료된다.

**Abstract** : This study was initiated to identify the general groundwater quality and the effects of heavy-metal enrichments in the black shales and coal materials in Dukpyung area. Groundwater quality could be divided into three groups based on the major weathering processes in the groundwater system; Group I of carbonate weathering, Group II of silicate weathering with the probable effects of acidic mine drainage, and Group III of silicate weathering with relatively high concentrations of chloride components in anions. Metal contamination of groundwater was not observed. Locally, however, acidic mine drainage appeared to be produced and recharged into the groundwater system. In addition, contamination by  $NO_3-N$  ranged 2 to 3 times higher than the drinking water standards, probably due to infiltration of domestic sewage and/or fertilizers into the shallow aquifer.

### 서 론

충북 괴산군 일대의 옥천계에 포함된 흑색 셰일층은 그 탄질물과 함께 우라늄을 함유하고 있다는 점에서 많은 관심의 대상이 되어 왔으며, 이에 대한 지질학적, 광물학적 및 지구화학적 연구 결과가 김종환 등(1974), 소철섭, 강정극(1978), 김옥배, 전용원(1980), 김문영, 이동진(1984), 이대성 등(1986), Kim(1989) 등에 의하여 연구, 발표된 바 있다. 이들 흑색 셰일층은 옥천계 북부지역의 구룡산층과 남부지역의 창리층에 넓은 지역으로 나타남이 밝혀졌다.

나아가 옥천계에 분포하는 흑색 셰일과 하상퇴적물 및 토양에 관한 환경지질학적 연구는 전효택, 정명채(1991), Chon *et al.*(1996), Kim(1993), Kim and Thornton(1993), 김경웅(1994), 이진수 등(1996), 김종신, 전효택(1997) 등에 의하여 수행된 바 있다. 덕평리에 분포하는 함우라늄 흑색 셰일에는 지각의 평균함량보다 수 십배에서 수 백배까지의 유독성 중금속 원소들이 부화되어 있음이 보고된 바 있으며(한국자원연구소, 1993), 탄질 퇴적암내 미량원소의 평균함량이 지각 구성물질의 수백

배 이상 농집되어 있음이 Vine and Tourtelot(1970), McLennan *et al.*(1980), Gromet *et al.*(1984) 등에 의하여 보고되었다. Turekian and Wedepohl(1961)은 흑색 셰일에 잠재적 독성 원소(U, V, Cd, As, Se, Mo 등)가 부화되어 있음을 보고한 바 있다.

이현구, 이찬희(1997)는 이 지역에 분포하는 저품위 탄층을 대상으로 한 탄광들이 현재는 모두 폐광되었으나, 탄질 및 흑색점판암에서 중금속원소(As, Ba, Cu, Mo, Pb, U, V 및 Zn)들이 특히 높은 함량을 가지며, 이들은 환경오염원(환경오염물질을 제공하는 근원암)으로 작용하고 있다고 보고하였다. 이들은 덕평 지역 광산수계의 백화현상이나 황화광물의 산화에 의한 직접적인 영향은 관찰되지 않으며, 이는 중금속 원소들이 미립 또는 극미립의 광물입자 내에 구성 및 치환원소 또는 흡착되어 존재하기 때문으로 추정하였으며, 이들과 갭내수의 유출이 장기간 방치된다면 계속되는 풍화와 침전에 의하여 광산의 하류지역과 덕평 지역의 폐탄광에서 수계를 따라 유입되는 하천은 심각한 수준의 중금속 오염이 있을 것으로 예측하였다.

전철민 외(1997)에 의하면, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn 등 중금속의 평균함량은 암석 내보다 토양 내에서 상대적으로 더 높게 나타나며, 과거 우라늄 탐사시 갯도굴진, 사면절단 지역, 탄층 분포

\*연세대학교 이과대학 지구시스템과학과 (Department of Earth System Sciences, Yonsei University, 134 Shinchon-Dong, Seodaemoon-Gu, Seoul 120-749, Korea)

연구방법

지역, 흑색 점판암 분포지역 토양과 광미 더미 인근토양에서 이들 중금속들이 다른 지역에 비하여 높은 이상치를 보이고 있다. 이는 인위적으로 지질매체가 지표에 노출됨으로 인하여 중금속 원소가 지표환경으로 분산되기 때문으로 해석하였다.

이진수 외(1996)는 중금속 원소들의 식물 흡수도와 이동성에 관한 연구 결과, 구룡산층과 창리층을 위주로 하는 보은지역의 옥천대 흑색 셰일이 분포하는 지역에서 채취된 토양 시료에서는 Cu, Pb, Zn는 잔류상 형태로 존재하는 비율이 가장 많은 부분을 차지하며, Cd는 비잔류상 형태 중 교환성-수용성 형태가 11~31% 범위로 우세하게 나타남을 보고하였다.

상기한 바와 같은 기존의 연구들은 전반적으로 이 지역내의 암석과 토양 중에 유해한 중금속 원소들이 다른 지역에 비하여 부화되어 있음을 보고하였다. 따라서, 본 연구는 이러한 지표환경에 대한 환경지구화학적 연구를 지하수환경으로 확장하여 연구지역 내 천부 지하수의 수질과, 기존에 밝혀진 암석과 토양 중에 부화된 중금속 원소에 의한 지하수질 오염에 대한 영향을 규명하고자 수행되었다.

지질환경

충북 괴산군에 위치한 연구지역은, 국립지질조사소(이종혁, 김정환, 1972)의 괴산도폭을 인용하면, 덕평리를 중심으로 서쪽으로 변성퇴적암류인 구룡산층(OcG), 화전리층(OcH), 미동산층(Cjg)이 분포하고, 동편으로 다시 구룡산층(OcG), 이원리층(OcE), 문주리층(OcM) 등이 발달하고 있다(Figure 1). 특히, 구룡산층은 탄질 흑색 셰일을 포함하는 저변성암으로, 지층 내에는 일련의 탄맥이 발달하여 이들을 따라서 부분적으로 과거 탄광의 흔적들이 남아있다.

시료 채취

본 연구에서는 수질분석을 위하여 지하수는 20개 지점에서, 지표수는 11개 지점에서 물 시료를 채취하였다. 시료채취 지점은 가능한 구룡산층 내 또는 이 층에 인접한 주변지역에서 채취토록 하였으며(Figure 1), 지하수의 경우 별도의 관측정을 설치할 수 없어서 가정용 천부 관정으로부터 약 5~10분 정도 양수 후 수온이 일정해진 후에 시료를 채취하였다.

수질 분석

채취된 시료는 현장에서 Multi-parameter probes를 장착한 Hydrolab을 사용하여 수온, pH, EC, 용존산소량을 측정하였고, 알칼리도는 0.01 N-HCl을 이용한 적정법으로 측정하였다. 실내 화학분석을 위한 시료는 0.45 μm membrane filter로 여과한 후 polyethylene bottle에 채취하였다. 채취된 시료 중 양이온 분석을 위한 시료는 농축질산을 첨가하여 pH 2 이하로 보존하였고, 음이온 분석을 위한 시료는 4°C 이하로 냉장보관 하였다. 주 음이온(F, Cl, SO<sub>4</sub>, NO<sub>3</sub>)은 시료채취 후 일주일 내에 IC(Ion Chromatography)를 이용하여 분석하였고, 주 양이온(Na, Ca, Mg, Si, K) 및 미량 중금속(Cr, Cu, Zn, Cd, Pb, Ni, V, Mn, Fe, Mo, Ba)은 ICP-AES(Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometry)를 이용하여 분석하였으며, 휘발성성분(As, Hg)은 대전에 위치한 기초과학연구원 연구소에 Hydridegeneration 과정을 거쳐 ICP-AES를 사용하여 분석토록 의뢰하였다. 실내 분석결과는 지하수의 배경수질을 해석하기 위하여 Piper Diagram과 Stiff Diagrams으로 도시하여 해석하였고, 수중 이온종(speciation)의 분포와 각 광물종의 포화도를 확

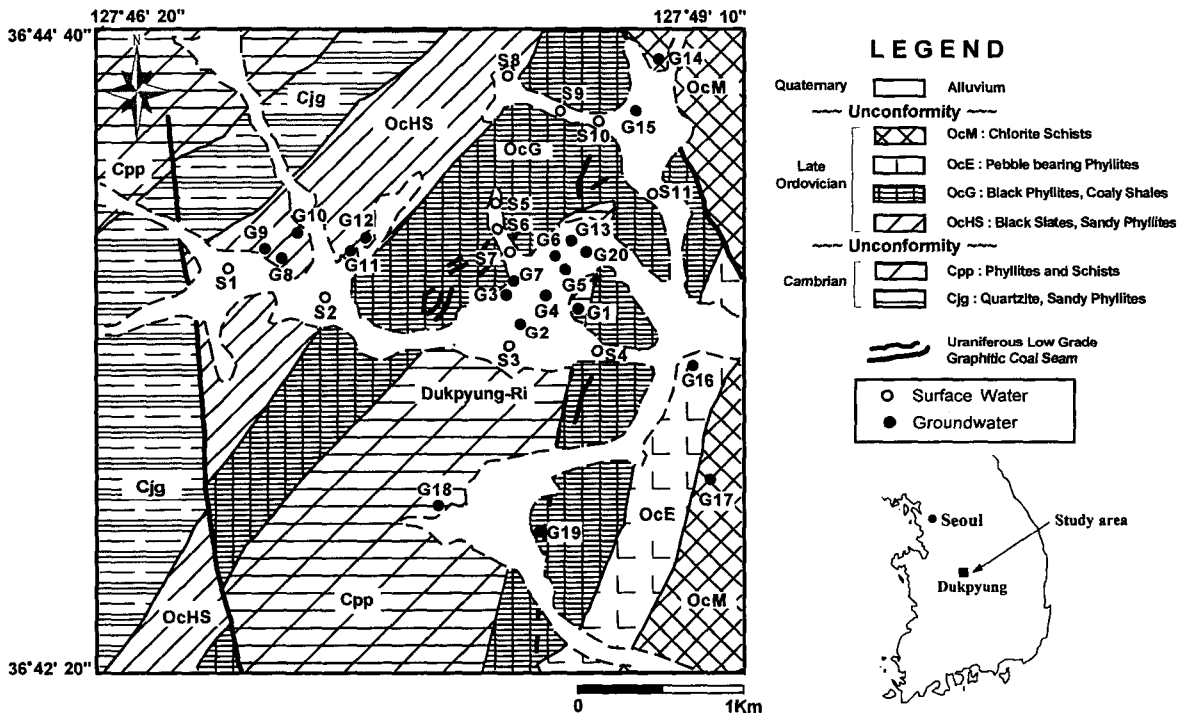


Figure 1. Geologic map and sampling locations of the study area.

인하기 위하여 WATEQ4F 프로그램을 사용하였다.

결과 및 토의

배경 수질

전반적인 지표수와 지하수의 현장 수질요소들은 Table 1과 같다(Appendix I). 연구 지역 지하수의 pH는 최소 5.4에서 최고 8.9까지의 범위로 나타나며 평균치는 7.4이고, 전기전도도(EC) 값은 79  $\mu\text{S}/\text{cm}$ 부터 434  $\mu\text{S}/\text{cm}$  범위로 평균 265  $\mu\text{S}/\text{cm}$  정도이며, 총 용존 이온함량(TDS)은 84 mg/L부터 313 mg/L 범위로 평균 187 mg/L 이다. 반면에, 지표수의 전반적인 수질은 pH가 최소 6.9에서 최고 8.0까지로 평균값이 7.5이고, EC 값은 79  $\mu\text{S}/\text{cm}$ 부터 224  $\mu\text{S}/\text{cm}$  범위로 평균 118  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , TDS는 64 mg/L부터 313 mg/L 범위로 평균 162 mg/L 이다. 지하수 시료에서 지표수보다 EC 값과 TDS 값 등이 크게 나타나는 것은 지하수의 유동 경로상에서 발생하는 물과 지질 매체와의 지하학적 반응에 의한 용존 이온의 증가 때문이며, 지하수에서의 pH 변화폭이 지표수보다 크게 나타나는 것은 이와 같은 반응 중에 발생하는 용존 광물에 의한 수중 pH의 변화 등이 주 원인으로 사료된다. 이는 지하수환경이 지표수환경에 비하여 주변 환경의 변화에 더욱 민감함을 의미한다.

실내에서 분석된 수질자료를 Piper diagram(Figure 2)과 Stiff diagram(Figure 3)에 도시한 결과, 양이온으로는  $\text{Ca}^{2+}$ 와 음이온으로는  $\text{HCO}_3^-$  이온들이 주성분인 G2, 3, 4, 6, 8, 9, 10, 11, 12, 14, 15, 18, 19 지점들(그룹 I)과, 양이온으로  $\text{Mg}^{2+}$ 와 음이온으로  $\text{SO}_4^{2-}$  이온이 주성분인 G13과 G20 지점(그룹 II), 그리고 음이온의 조성에서  $\text{Cl}^-$  이 우세하게 나타나는 G1, 5, 7, 16, 17(그룹 III) 등 세 그룹의 수질특성이 보인다.

지하수의 수질은 근본적으로 지하수가 유동 경로상에서 접촉하게 되는 지질매체의 화학적 조성에 주로 영향을 받는다. 각 그룹에 속하는 시료채취 위치와 연구지역의 지질도(Figure 1)를 비교하여 볼 때, 정확한 대비는 불가능하지만, 전반적으로 그룹 I에 속하는 관정들은 대부분 흑색 점판암과 탄질 셰일층이 주로 나타나는 화전리층과 구룡산층 지역에 분포하고 있으며, 그룹 II와 III는 천매암과 편암이 주를 이루는 이원리층, 문주리층, 운교리층 지역에 분포된다. 따라서, 상기한 바와 같이 본 지역에 나타나는 지하수 수질의 대체적인 특성변화는 지역적인 기반암의 영향을 보이는 것으로 사료된다. 특히 그룹 II에 속하

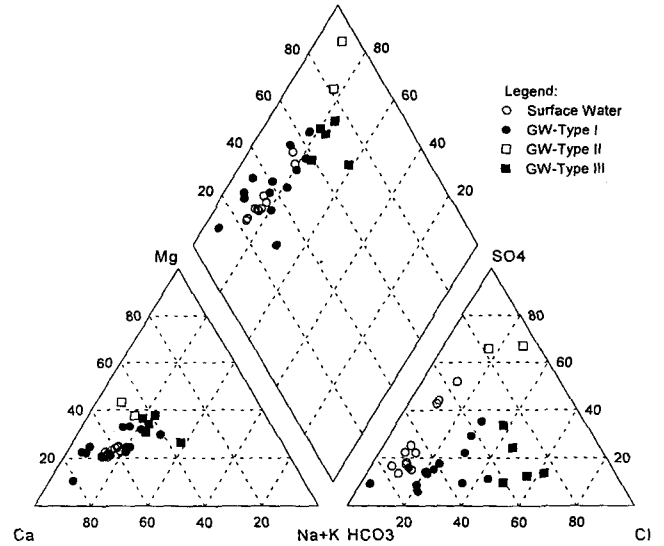


Figure 2. Groundwater-quality plots on the Piper diagram.

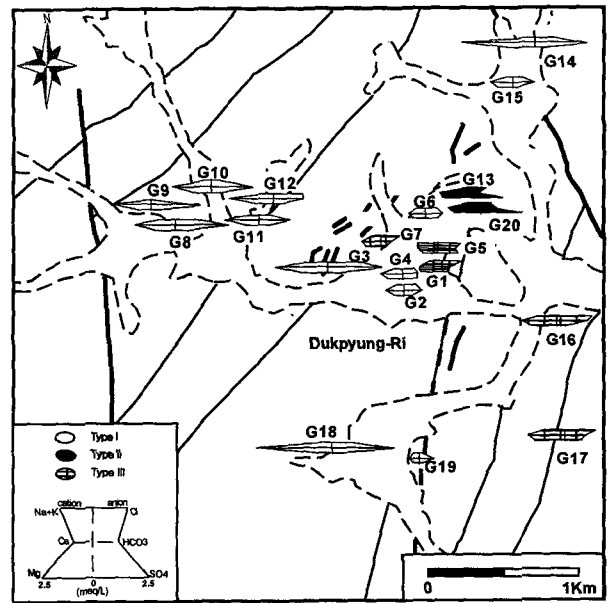


Figure 3. Major cations and anions in groundwater on the Stiff Diagram.

Table 1. In-situ water quality parameters of the surface- and groundwater samples

	T (°C)	pH	EC (uS/cm)	DO (mg/L)	TDS (mg/L)	
Groundwater	Min.	13.8	5.4	79	1.7	84.0
	Max.	17.8	8.9	434	9.6	313.0
	Avg.	15.5	7.4	264	6.6	187.0
	Std.	1.3	0.8	101	1.9	64.3
Surface Water	Min.	19.0	6.9	79	6.4	58.0
	Max.	27.5	8.0	224	10.2	98.0
	Avg.	22.9	7.5	118	7.9	80.9
	Std.	2.7	0.3	39	1.2	14.4

는 시료들에서  $\text{SO}_4^{2-}$  이온의 증가는 지층 내에 부분적으로 협재하는 탄층 내에 존재하는 황화광물의 산화과정에서 생성된 것으로 사료되며, 이러한 현상은 국지적인 산성 광산폐수의 생성 및 유동 가능성을 지시하는 것으로 이해된다.

지하수의 반응

용존이온 중의 중탄산 이온( $\text{HCO}_3^-$ )과 규산( $\text{SiO}_2$ )의 함량비로부터 지하수에서 일어나는 대체적인 반응을 추정하였다. Hounslow(1995)에 의하면, 이들의 비가 10 이상일 때에는 주로 탄산염암의 풍화가 주된 반응이고, 5 이하인 경우에는 규산염광물의 풍화가 주된 반응으로 설정되어 있다(Figure 4). 본 연

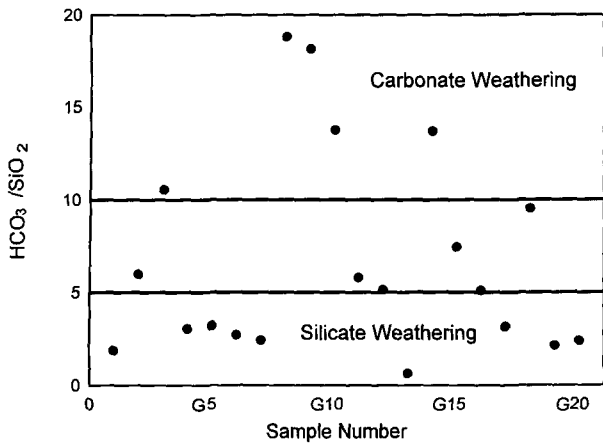


Figure 4. The ratios between bicarbonate and silica concentrations in groundwater.

구에서의 분석결과, 그룹 I에 속하는 G3, G8, G9, G10, G14의 5개 지점 시료에서는 이들의 비가 10 이상으로 탄산염의 용해가 지하수 수질에 주로 영향을 미치고 있음이 분명히 나타나고 있다. 그룹 II에 속하는 시료들(G13, G20)과 그룹 III에 속하는 시료들(G1, G5, G7, G16, G17)은 모두 규산염광물의 풍화가 주 반응인 영역에 속하고 있으며, 이에 그룹 I의 3개 시료(G4, G6, G19)도 포함된다. 그룹 I의 나머지 시료들(G2, G11, G12, G15, G18)은 중탄산 이온과 규산의 함량비가 5에서 10 사이에 놓여, 탄산염광물과 규산염광물의 풍화가 모두 영향을 미치고 있는 것으로 보인다.

그룹 II에 속하는 G13과 G20 시료의 pH가 각각 5.4와 6.8로써, 조사지역 전체시료의 평균인 pH 7.4에 비교하여 낮게 나타난다. 이것은 지표에 노출된 인근의 광미 또는 탄층으로부터 생성된 산성수가 지하로 유입되었으나, 지하수의 유동경로 중

에 접하게 되는 암석과의 반응에서 탄산염 광물의 풍화보다는 규산염 광물의 풍화가 우세하게 나타나는 지질매체의 특성으로 인하여 관정을 통하여 배출되기까지 지하수가 pH 완충효과를 나타내기에는 충분하지 않았던 것으로 해석된다.

지하수 내의 용존 이온들과 이들의 지질매체와의 반응은 WATEQ4F를 사용한 지화학적 모델링 결과 도출된 광물상의 포화지수(log IAP/Ksp)로부터 유추하였다(Table 2). Table 2에서는 대표적인 용존 광물상들의 포화도에 대하여 표시하였는데, 전반적으로 시료들은 황산염 광물들과 탄산염 광물들, 그리고 암염에 대하여 불포화상태로 나타나고 있다. 단 시료 G9과 G18에서는 탄산염광물들에 대한 과포화 현상이 보이며, 이는 지하수가 지층을 통하여 유동하는 경로 자체에 CaCO<sub>3</sub>가 맥상으로 발달되어 있어 이와 지속적으로 반응함으로써 나타난 것으로 사료된다.

지하수 오염

본 연구지역의 토양환경에서 검출되고 부화된 것으로 알려진 중금속 이온들(Cr, Cu, Zn, Cd, Pb, As 등)을 중심으로, 이들에 의한 지하수 오염여부를 규명키 위하여 실내분석을 실시한 결과는 다음의 Table 3과 같다(Appendix II 참조). 실험실에서의 분석결과는 이 지역의 지하수가 음용수 및 생활용수, 농업용수 등으로 직접 사용되고 있으므로, 현행 국내의 먹는물 수질기준과 함께 미국 환경청(US EPA)의 음용수 수질기준에 대하여 비교하였다. Table 3에서 보이는 바와 같이 용존상태로 이동하는 중금속 이온들은 모두가 소량 또는 검출한계 이하로 검출되어, 상기한 수질 기준들을 초과하는 원소는 없었다.

이현구, 이찬희(1997)에 의하면 이 지역의 탄질 및 흑색 점판암에서 Cr, Cu, Zn, Cd, Pb, As 등을 포함하는 잠재적 독성원소들은 미국 표준세일(Haskin *et al.*, 1968)의 값에 비교하여 평균 부화지수 46.10의 대단히 높은 이상치를 보인다. 그러나 이

Table 2. Saturation indices of the groundwater samples for the mineral phases

Sample number	Anhydrite	Aragonite	Brite	Calcite	Chalcedony	Crstobalite	Dolomite	Gypsum	Halite	Magnesite	Quartz
G1	-3.460	-2.700	-0.238	-2.548	0.027	0.085	-5.135	-3.209	-8.134	-3.130	0.492
G2	-3.200	-2.356	0.149	-2.207	-0.135	-0.083	-4.793	-2.954	-8.666	-3.142	0.320
G3	-2.792	-0.421	-0.113	-0.270	0.134	0.188	-0.886	-2.544	-7.669	-1.166	0.593
G4	-2.917	-1.929	-0.171	-1.779	0.007	0.123	-3.731	-2.670	-8.591	-2.594	0.528
G5	-2.847	-1.864	0.166	-1.720	0.015	0.051	-3.439	-2.627	-7.931	-2.300	0.444
G6	-3.090	-1.466	-0.616	-1.315	0.205	0.260	-2.801	-2.842	-8.572	-2.035	0.666
G7	-3.494	-2.308	-0.497	-2.158	0.055	0.109	-4.386	-3.247	-8.325	-2.780	0.513
G8	-2.792	-0.173	-0.250	-0.024	-0.157	-0.106	-0.379	-2.547	-8.165	-0.911	0.297
G9	-3.111	0.379	-0.991	0.530	-0.153	-0.099	0.554	-2.863	-9.768	-0.526	0.306
G10	-3.110	-0.431	-1.265	-0.279	-0.072	-0.014	-1.028	-2.859	-8.837	-1.292	0.393
G11	-2.973	-0.611	-0.647	-0.461	0.154	0.209	-1.396	-2.725	-8.494	-1.485	0.614
G12	-2.931	-0.442	-0.575	-0.290	0.169	0.225	-1.097	-2.681	-8.118	-1.352	0.632
G13	-2.491	-4.179	0.258	-4.029	-0.024	0.030	-8.092	-2.244	-8.676	-4.616	0.434
G14	-2.613	-0.242	-0.830	-0.093	-0.030	0.021	-0.662	-2.369	-8.441	-1.127	0.242
G15	-3.220	-1.766	-0.429	-1.671	-0.140	-0.089	-3.410	-2.976	-8.790	-2.351	0.314
G16	-3.073	-0.336	-0.878	-0.184	0.174	0.232	-0.568	-2.821	-7.724	-0.926	0.640
G17	-2.724	-1.623	-0.326	-1.474	-0.146	-0.096	-3.013	-2.481	-7.799	-2.098	0.307
G18	-2.893	0.993	-1.042	1.145	0.212	0.269	1.395	-2.643	-8.356	-0.294	0.676
G19	-3.846	-1.178	-1.350	-1.026	0.274	0.331	-2.215	-3.595	-9.239	-1.732	0.738
G20	-2.366	-2.177		-2.025	0.107	0.164	-4.156	-2.116	-8.489	-2.676	0.571

**Table 3.** Concentrations of metal ions compared with the drinking water standards

Element	Drinking Water Standards (mg/L)	Dissolved Concentrations (mg/L)
Cr	0.5	BDL**
Cu	1	0.001~0.100
Zn	1	0.002~1.065
Cd	0.01	0.001~0.007
Pb	0.05	0.016~0.061
Mn	0.3	0.007~0.051
Fe	0.3	0.018~0.095
As	0.05	BDL~0.001
Hg	not detectble	BDL
Ba*	5	0.009~0.167
Ni		BDL~0.022
V		0.003~0.012
Mo		BDL~0.003
Sb		BDL~0.001

\*U.S EPA Drinking Water Standards.

\*\*BDL denotes Below Detection Limit.

러한 암석 중의 원소들이 지하수내로 용탈되기 위해서는 적절한 pH-Eh 환경이 유지되어야 한다. 본 연구 조사결과 이 지역의 천부 지하수 환경에서는 비교적 높은 pH(평균 7.4)가 유지되며, 이는 지층내에 협재하는 탄산염광물의 풍화로 인하여 조절되는 것으로 사료된다. 따라서 상기한 잠재적 독성원소들이 기반암으로부터 용탈되기 위한 낮은 pH 값이 조성되지 않으며, 결과적으로 비록 암석에는 독성원소들의 부화도가 높게 나타나지만 이들이 암석과 토양매질 등에 고착되어 지하수환경으로 용탈될 가능성이 적은 것으로 생각된다. 결국 이들의 수환경에서의 이동성이 제한되기 때문에 지하수에서는 수질 기준 이하의 낮은 농도로 나타나는 것으로 사료된다. 그러나, 지표수와

지하수의 pH가 낮은 일부 지역에서는 중금속의 용탈과 지표수 및 지하수 환경에서의 이동이 충분히 가능할 것이며, 더구나 용탈된 중금속이 지하수와 함께 유동하는 과정에서 접하게 되는 지질매체(기반암)의 특성으로 인하여 지하수의 pH 완충작용이 일어나지 않는 환경에서는 이들의 지하수내에서의 유동성이 유지될 것이며, 양수에 의하여 지하수의 유동이 가속화되는 지역에서는 이들 잠재적 오염물질의 확산범위가 더욱 증가될 수 있을 것이다.

조사지역 내 지하수의 오염은 중금속이 아닌, 지상의 축산폐수와 생활하수 등의 유입으로 인한 질산성 질소의 과다가 문제인 것으로 나타났다. 조사 지점들에서 산출된 질산성 질소(NO<sub>3</sub>-N)의 함량은 0.6~31.5 mg/L 범위로, G1, G13, G14, G17의 총 4개 지점에서 먹는물 수질기준인 10 mg/L을 초과하여 13.8~31.5 mg/L의 농도범위로 검출되었으며, G5, G12, G16, G18 시료들에서는 우려할 정도의 농도가 검출되었다(Figure 5). 질산성 질소의 검출지점들은 Figure 5에서도 보이듯이 일정한 지역적 특성이 없이 전 지점들에 무작위하게 산재된다. 조사지점들 인근에서 축사는 발견되지 않았으므로, 이러한 오염현상은 주로 농가에서 주변환경으로 대책없이 배출되는 생활하수나 인접한 전답으로부터의 비료성분이 충전수를 따라 지하로 유입된 결과라고 사료된다.

### 결론

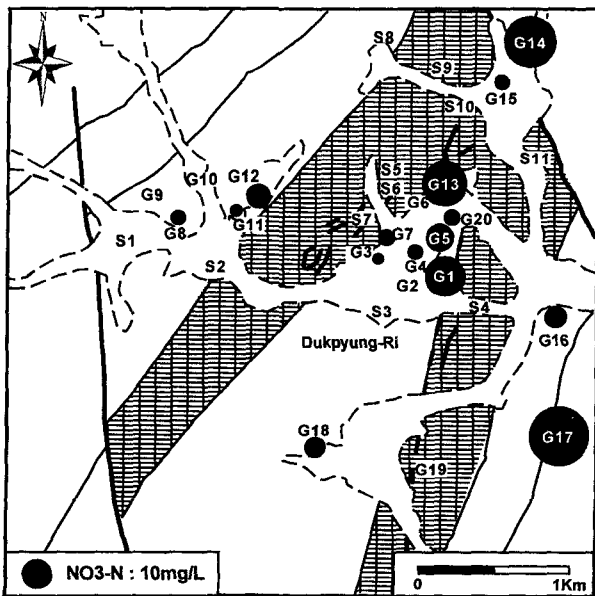
본 연구의 결과, 연구지역의 지하수질의 특성은 지하수환경에서 진행되는 지질매체의 반응이 주로 탄산염 광물의 풍화인 경우와 규산염 광물의 풍화인 경우로 크게 나눌 수 있다. 나아가 규산염광물의 풍화가 주된 반응인 시료들은 음이온의 주성분이 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>인 시료들과 Cl<sup>-</sup>인 시료들로 세분이 가능하다.

SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>가 주음이온 성분을 이루는 시료들은 양이온으로 Mg가 주를 이루며, 이들은 국지적으로 탄질 세일층 내에 포함된 황화광물의 산화로부터 산성수가 생성되어 지하로 유입된 결과로 해석된다. 따라서, 산성폐수에 의한 중금속 이동이 지표수 환경에만 국한되는 것이 아니라, 발생하는 산성폐수의 양과 지역적인 지질환경 및 지하수 이용 조건 등에 의하여 지하수환경에 확산되고, 나아가 충분히 음용수 및 생활용 지하수에도 유입될 가능성이 있으며, 이에 대한 방지대책 등이 필요하다고 사료된다.

암석과 토양내 부화된 중금속에 의한 천부 지하수의 오염현상은 국내외의 먹는물 수질기준에 비교하였을 때 발견되지 않았다. 그러나, 토양과 암석 내 부화된 중금속의 국부적 용탈현상은 지표수와 지하수의 pH가 낮은 지점에서는 그 가능성을 간과할 수는 없다. 본 지역의 천부 지하수는 총 8개 지점에서 질산성-질소에 의한 우려할 정도의 오염이 밝혀졌으며, 오염원은 생활하수 내지 비료성분의 지하수내 유입으로 사료된다.

### 사사

본 연구는 1997년도 교육부 학술연구조성비(기초과학 BSRI-97-5415)에 의하여 연구되었으며, 익명의 논문 심사위원들께도 감사드립니다.



**Figure 5.** Groundwater contaminations by NO<sub>3</sub>-N in the study area.

참고문헌

김경웅, 1994. 국내 흑색셰일 분포지역 농작물내 미량원소 함량을 지배하는 토양 및 식물인자들. 한국자원공학회지, 31, p. 124-130.

김문영, 이동진, 1984. 옥천층군내 우라늄 광물에 대한 광물학적 연구. 한국동력자원연구소 조사보고서, 83-광물자본-4-12, p. 129-155.

김옥배, 전용원, 1980. 옥천계 함우라늄 탄층중에 존재하는 우라늄의 성인에 관한 실험적인 연구. 대한광산학회지, 17, p. 57-66.

김종신, 전효택, 1997. 추부지역 흑색셰일 및 점판암 분포지역에서의 잠재적 독성원소들의 분산과 부화. 자원환경지질 30(2), p. 89-103.

김중환, 조규장, 김선익, 정현욱, 조진동, 1974. 괴산지역 우라늄 탐사 종합 보고. 지질광물연구소 지질광상조사보고 2호, p. 1-122.

소철섭, 강정규, 1978. 옥천계 함우라늄 변성지질과 광물학적 지구화학적 연구. 지질학회지, 14, p. 93-102.

이대성, 윤석규, 이종혁, 김정택, 1986. 옥천대 우라늄지층의 구조규제 및 지구화학적 특성연구. 광산지질, 19, 특별호, p. 19-41.

이진수, 전효택, 김경웅, 1996. 충주지역 흑색셰일 분포지역에서의 잠재적 독성원소들의 분산과 부화. 자원환경지질, 29, p. 495-508.

이종혁, 김중환, 1972. 한국지질도 괴산도폭(1:50,000) 및 설명서. 국립지질조사소.

이현구, 이찬희, 1997. 덕평지역의 탄질 변성니질암에 관한 환경적 독성원소의 지구화학적 기원, 거동 및 부화. 자원환경지질. 30(6) p. 553-566.

전철민, 문희수, 최선경, 우남철, 1997. 충북 괴산 덕평리 일대 흑색셰일 및 흑색점판암기원토양의 점토광물 조성 및 중금속원소의 분산. 자원환경지질. 30(6), p. 567-586.

전효택, 정명채, 1991. 함우라늄 흑색셰일 분포지역에서의 유독성원소들의 분산에 관한 지구화학적 연구. 광산지질, 24, p. 245-260.

한국자원연구소, 1993. 지질환경에서 유독원소들의 지구화학적 분산연구(I). 과학기술처, p. 230-391.

Chon, H. T., Cho, C. H., Kim, K. W. and Moon, H. S. 1996. The occurrence and dispersion of potentially toxic elements in areas covered with black shales and slates in Korea. Applied Geochemistry, 11, p. 69-76.

Gromet, L. P., Dymek, R. F., Haskin, L. A. and Korotev, R. L., 1984. The "North American shale composite": its compilation, major and trace element characteristics. Geochim. Cosmochim. Acta, 48, p. 2462-2482.

Haskin, L. A., Haskin, M. A., Frey, F. A. and Wildman, T. T., 1968. Tentative and absolute terrestrial abundances of the rare earths. In; Ahrens, L.H. (ed.), Origin and distribution of the elements. 1. Pergamon, Oxford, p. 889-911.

Hounslow, A. W., 1995. Water Quality Data - Analysis and Interpretation. Lewis Publishers, New York, 397p.

Kim, J. H., 1989. Geochemistry and genesis of the Guryongsan (Ogcheon) uraniferous black slate. J. Korean Inst. Mining

Geol. 22, p. 35-63.

Kim, K. W., 1993. Influence of uraniferous black shales on trace elements in soils and crops in Korea. Ph.D thesis, University of London.

Kim, K. W. and Thornton, I., 1993. Influence of Ordovician uraniferous black shales on the trace element composition of soils and food crops in Korea. Appl. Geochem., Suppl. Issue No.2, p. 249-255.

McLennan, S. M., Nance, W. B. and Taylor, S. R., 1980. Rare earth elements-thorium correlations in sedimentary rocks, and the composition of the continental crust. Geochim. Cosmochim. Acta, 44, p. 1833-1839.

Vine, J. D. and Tourtelot, E. B., 1970. Geochemistry of black shale deposits, a summary report. Econ. Geol., 65, p. 253-272.

Turekian, K. K. and Wedepohl, K. H. 1961. Distribution of the elements in some major units of the earth's crust, Geological society of America bulletin, 72, p. 175-192.

Appendix I. In-situ water-quality parameters of water samples in the study area

	T (°C)	pH	EC (uS/cm)	DO (mg/L)	TDS (mg/L)
G1	13.9	6.6	249	8.5	155
G2	16.9	6.6	147	7.3	111
G3	15.5	7.6	412	7.1	278
G4	15.9	7.1	185	6.5	133
G5	15.2	7.1	324	8.6	190
G6	15.3	7.6	147	5.9	122
G7	16.1	6.9	175	5.5	118
G8	17.0	8.0	336	6.7	233
G9	15.5	8.6	203	3.1	169
G10	13.9	7.9	230	1.7	172
G11	15.6	7.8	224	4.6	171
G12	14.4	8.0	255	6.9	209
G13	16.2	5.4	304	7.1	189
G14	17.3	7.7	434	8.2	313
G15	17.4	7.0	174	8.9	128
G16	13.8	8.2	321	9.6	217
G17	17.8	7.0	432	7.4	273
G18	14.3	8.9	372	6.5	287
G19	14.1	8.2	79	5.8	84
G20	14.3	6.8	283	6.1	188
S1	24.5	7.6	128	7.2	98
S2	23.3	7.6	116	8.9	92
S3	24.3	7.4	117	8.1	82
S4	23.6	7.9	121	6.5	93
S5	19.0	6.9	96	6.9	58
S6	20.1	7.3	224	7.2	67
S7	22.2	7.3	79	6.4	60
S8	19.6	8.0	115	9.0	95
S9	21.9	7.5	92	8.7	78
S10	26.0	7.6	89	8.4	75
S11	27.5	7.7	124	10.2	92

Appendix II. Chemical analyses of water samples in the study area

Sample number	Na	K	Ca	Mg	Si	NO <sub>3</sub>	Cl	SO <sub>4</sub>	F	HCO <sub>3</sub>	Cr	Cu	Zn	Cd	Pb	Ni	V	Mn	Fe	Mo	Sb	BA	AS	Hg	
G1	10.35	0.10	15.13	8.94	6.17	61.0	23.30	7.00	BDL*	16.00	BDL	BDL	0.074	0.002	0.017	BDL	0.009	BDL	0.031	BDL	BDL	0.135	0.000	BDL	
G2	5.13	0.33	12.74	3.08	4.65	14.50	13.80	13.80	BDL	37.93	BDL	0.005	0.073	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	0.000	0.167	0.000	BDL
G3	16.48	0.39	37.56	10.28	8.28	15.60	44.70	16.10	0.00	119.00	BDL	BDL	0.027	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	0.105	BDL	BDL
G4	5.88	0.07	15.41	6.20	7.22	22.00	14.40	23.60	BDL	30.00	BDL	0.006	0.016	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	0.052	0.000	BDL
G5	15.15	1.44	13.04	5.90	8.17	41.10	27.20	33.10	0.00	35.80	BDL	0.006	0.029	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	0.000	0.118	0.001	BDL
G6	6.21	0.06	11.92	4.93	9.73	8.70	14.10	19.60	0.00	36.06	BDL	BDL	1.065	BDL	0.061	BDL	0.008	BDL	BDL	BDL	BDL	0.000	0.022	0.001	BDL
G7	6.38	0.07	12.39	6.29	7.01	22.85	24.35	7.40	0.00	23.15	BDL	0.004	0.076	BDL	BDL	BDL	0.007	BDL	0.028	BDL	BDL	0.065	BDL	BDL	
G8	11.42	0.78	28.73	7.71	4.45	21.05	20.45	19.55	0.00	114.00	BDL	0.008	0.004	BDL	BDL	BDL	0.006	BDL	0.018	BDL	0.000	0.062	BDL	BDL	
G9	2.31	0.07	27.86	5.24	4.45	2.76	2.46	9.03	0.15	109.78	BDL	0.003	0.050	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	0.018	BDL	BDL	0.021	BDL	BDL	
G10	3.20	0.08	27.86	6.09	5.95	7.90	15.05	9.00	0.00	92.60	BDL	0.002	0.045	BDL	BDL	BDL	0.007	BDL	0.20	BDL	0.000	0.014	BDL	BDL	
G11	7.31	0.16	25.25	5.13	8.74	17.50	14.60	13.35	0.00	69.05	BDL	0.006	0.033	BDL	BDL	BDL	0.008	BDL	0.20	BDL	BDL	0.026	0.000	BDL	
G12	7.47	0.16	33.24	6.41	8.76	35.55	34.20	12.00	0.00	61.18	BDL	0.002	0.578	BDL	BDL	BDL	0.007	BDL	0.038	BDL	0.001	0.035	BDL	BDL	
G13	4.86	0.15	23.34	12.80	5.86	67.20	14.75	48.60	0.00	5.10	BDL	0.007	0.109	0.007	BDL	0.022	0.008	0.028	0.20	BDL	BDL	0.081	BDL	BDL	
G14	5.99	0.23	54.20	10.29	5.99	78.60	21.20	17.95	0.00	111.65	BDL	0.007	0.065	BDL	BDL	BDL	0.005	BDL	0.018	BDL	BDL	0.018	BDL	BDL	
G15	4.97	0.15	15.94	6.04	4.65	21.65	10.85	11.10	0.00	46.20	BDL	0.100	0.040	BDL	BDL	BDL	0.003	BDL	0.038	BDL	BDL	0.065	BDL	BDL	
G16	14.71	0.18	24.92	10.19	8.76	32.75	42.95	11.60	0.00	60.87	BDL	BDL	0.008	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	0.021	BDL	BDL	0.019	BDL	BDL	
G17	14.79	1.27	25.24	12.20	9.90	91.05	37.25	26.90	0.00	42.70	BDL	0.002	0.025	BDL	BDL	BDL	0.005	0.051	0.036	BDL	BDL	0.040	0.001	BDL	
G18	6.41	0.19	55.90	4.44	10.41	29.70	23.45	9.00	0.00	135.29	BDL	BDL	0.015	BDL	BDL	BDL	0.012	BDL	0.038	BDL	BDL	0.022	BDL	BDL	
G19	5.03	0.14	6.18	2.73	11.12	3.68	3.62	5.79	0.00	32.70	BDL	0.001	0.396	BDL	BDL	BDL	0.010	BDL	BDL	BDL	BDL	0.009	BDL	BDL	
G20	8.59	0.27	21.75	10.82	7.51	22.75	12.70	70.15	0.00	24.60	BDL	BDL	0.022	BDL	BDL	BDL	0.008	BDL	0.036	BDL	BDL	0.070	BDL	BDL	
S1	3.75	0.17	13.66	2.65	5.28	6.96	5.65	7.74	0.05	45.90	BDL	BDL	0.004	BDL	BDL	BDL	BDL	0.006	BDL	BDL	0.000	0.012	0.001	BDL	
S2	3.02	0.14	13.31	2.52	4.57	4.05	4.12	6.77	0.00	48.37	BDL	BDL	0.002	BDL	BDL	BDL	BDL	0.007	0.095	BDL	0.000	0.018	0.001	BDL	
S3	3.19	0.14	13.19	2.57	4.55	3.16	4.40	8.68	0.00	45.42	BDL	BDL	0.006	BDL	0.017	BDL	BDL	0.012	0.036	BDL	0.000	0.018	0.001	BDL	
S4	3.50	0.15	13.32	2.66	4.54	4.08	4.43	9.20	0.05	45.49	BDL	BDL	0.005	BDL	0.029	BDL	BDL	0.006	0.021	BDL	BDL	0.026	0.001	BDL	
S5	2.49	0.06	6.87	1.63	5.20	0.00	2.37	13.87	0.00	19.47	BDL	BDL	0.014	BDL	BDL	BDL	BDL	0.011	0.034	BDL	0.000	0.058	0.000	BDL	
S6	2.46	0.06	8.75	1.96	5.25	0.70	2.84	16.89	0.00	22.29	BDL	BDL	0.008	BDL	0.021	BDL	BDL	0.005	0.032	BDL	BDL	0.052	0.001	BDL	
S7	2.36	0.07	7.32	1.83	5.16	1.97	3.03	17.32	0.00	15.16	BDL	BDL	0.014	0.002	BDL	BDL	BDL	0.020	0.020	BDL	BDL	0.077	BDL	BDL	
S8	3.10	0.05	13.01	2.79	5.63	1.69	2.72	8.69	0.00	50.50	BDL	BDL	0.003	BDL	0.019	BDL	0.010	BDL	0.021	0.003	BDL	0.025	BDL	BDL	
S9	3.11	0.05	10.12	2.45	4.96	0.90	2.89	9.66	0.00	37.93	BDL	BDL	0.004	0.001	0.016	BDL	BDL	0.023	0.023	BDL	BDL	0.030	BDL	BDL	
S10	3.09	0.06	9.38	2.42	4.81	1.71	2.93	10.38	0.00	34.27	BDL	BDL	0.003	0.001	0.023	BDL	BDL	0.023	0.023	BDL	BDL	0.026	BDL	BDL	
S11	3.41	0.13	13.15	2.74	4.03	4.66	4.93	11.56	0.00	43.00	BDL	BDL	0.005	BDL	BDL	BDL	BDL	0.025	0.025	BDL	BDL	0.024	BDL	BDL	

\*BDL denotes Below Detection Limit