

<Short Note>  
동토지역의 지하수연구 고찰

박영윤<sup>1,\*</sup> · 이진용<sup>2</sup> · 최현미<sup>2</sup> · 임현수<sup>3</sup>

<sup>1</sup>강원대학교 지구자원연구소

<sup>2</sup>강원대학교 지질학과

<sup>3</sup>극지연구소

Youngyun Park, Jin-Yong Lee, Hyun-Mi Choi and Hyoun Soo Lim, 2010, A review of researches on ground-water in permafrost regions. *Journal of the Geological Society of Korea*. v. 46, no. 4, p. 429-437

(Youngyun Park, Research Institute for Earth Resources, Kangwon National University, Chuncheon 200-701, Korea; Jin-Yong Lee and Hyun-Mi Choi, Department of Geology, Kangwon National University, Chuncheon 200-701, Korea; Hyoun Soo Lim, Korea Polar Research Institute, Incheon 406-840, Korea)

## 1. 서론

최근까지 동토지역은 추운 기후로 인해 접근하기가 어려워 매우 제한적인 분야의 연구들만이 수행되어 왔다. 그러나 장비의 개발과 기술력의 향상으로 동토지역에 대한 연구가 다양한 분야에서 활발히 이루어지고 있다. 동토지역 지하수 또한 최근에 활발히 연구되고 있는 분야로서 많은 연구자들에 의해 현재 활발한 연구들이 이루어지고 있다. 그 동안 연구된 내용을 큰 분야로 분류하면 1) 지하수의 유동 기작(Quinton and Marsh, 1998; Quinton *et al.*, 2000), 2) 지하수의 화학 및 동위원소 조성(Darmody *et al.*, 2000; Johannesson and Hendry, 2000; Stotler *et al.*, 2009), 3) 용존성분 모니터링(Kashulina *et al.*, 1998), 4) 지하수의 혼합작용(Douglas *et al.*, 2000), 5) 지하수의 진화(Raidla *et al.*, 2009), 6) 지하수의 오염(Caritat *et al.*, 1998; Moldovan *et al.*, 2008)과 7) 지하수의 정화(Braddock and McCarthy, 1996)로 정리할 수 있다. 그러나 지금까지 수행된 연구들이 비교적 접근이 용이하고 필요에 의해 개발되었거나 개발이 예정된 지역에서 주로 수행되었기 때문에 아직까지 동토지역 지하수의 시스템을 충분히 이해하지 못하고 있는 것으로 사료된다.

우리나라도 최근에 북극 및 남극에 기지를 설치·운영하며 동토지역에 관한 연구들을 활발히 진행하

고 있으나(이재일 외, 2003; 한옥 외, 2005; 남승일 외, 2008), 동토지역 지하수와 관련된 연구는 거의 이루어지지 않고 있다. 이 논문은 최근까지 수행된 동토지역 지하수와 관련된 연구들을 소개하고 체계적으로 정리하기 위해 수행되었으며 이 연구의 결과는 동토지역 지하수 수질특성의 폭넓은 이해와 함께 향후 동토지역 지하수에 관한 연구 수행 시에 기초 자료로서 사용될 수 있을 것으로 기대한다.

## 2. 자연환경

동토지역은 땅의 온도가 0°C보다 낮고 이러한 온도가 지속적으로 유지되는 지역으로서 극지방과 툰드라지역이 대표적이다(White *et al.*, 2008). 극지방은 66° 32'보다 높은 고위도 지방을 말하고, 툰드라는 주로 북극지방 내 나무가 없고 다량의 유기물이 토양을 덮고 있는 지역을 말한다(NRC, 1988). 특히 툰드라 지역은 기온이 매우 낮기 때문에 대부분의 유기물이 분해되지 않고 토양에 쌓인다. 이렇게 쌓인 유기물은 얇은 토탄층(peat layer)을 형성한다. 이러한 토탄층은 투수성이 매우 좋기 때문에 유체의 주요 이동 통로가 된다(NWWG, 1988). 그러나 토탄층의 하부로 갈수록 유기물의 성숙도가 증가하여 밀도가 높아지기 때문에 투수성이 급격히 감소한다. 이러한 토탄층의 특징들로 인해 녹은 눈, 강수 및 용빙수가 토탄

\* Corresponding author: +82-33-250-8550, E-mail: young-yun@nate.com

**Table 1.** Meteorological data of the permafrost regions.

Location	Latitude	Annual temperature (°C)	Precipitation	
			Annual value (mm)	Ratio of snow (%)
Cornwallis Island, Canada <sup>a</sup>	75°02'N	-16.6 <sup>a</sup>	131	60
Northwest Territories, Canada <sup>b</sup>	61°18'N	-3.2	369	46
Kärkevagge, Sweden <sup>c</sup>	68°25'N	-1.5	1140	50
Kongsfjorden, Svalbard Island <sup>d</sup>	78°54'N	-	412	-
Riksgränsen, Sweden <sup>e</sup>	68°25'N	-1.4	1001	-
Katterjåkk, Sweden <sup>e</sup>	68°25'N	-1.7	848	-
Torneträsk, Sweden <sup>e</sup>	68°13'N	-1.0	472	-

<sup>a</sup>Phillips, 1990; Semkin *et al.*, 2005

<sup>b</sup>MSC, 2002

<sup>c</sup>Ångström, 1974; Strömquist and Rehn, 1981

<sup>d</sup>Tye and Heaton, 2007

<sup>e</sup>Jonsson *et al.*, 2009

층의 하부로 이동하지 못하고 주로 토탄층의 상부를 통해 측방으로만 이동한다(Quinton *et al.*, 2000).

동토지역은 겨울이 길고 여름이 짧은 것이 특징이며 연평균 기온은 영하이다. 여름의 기온은 주로 0~10°C 범위를 보이고 겨울의 기온은 주로 영하 20~30°C 범위를 보인다(<http://ko.wikipedia.org>). 연평균 강수량은 131~1140 mm로 저위도 지방에 비해 현저히 적은 편이다. 또한 연강수량의 46% 이상이 눈의 형태로 내린다(표 1).

### 3. 지하수의 유동

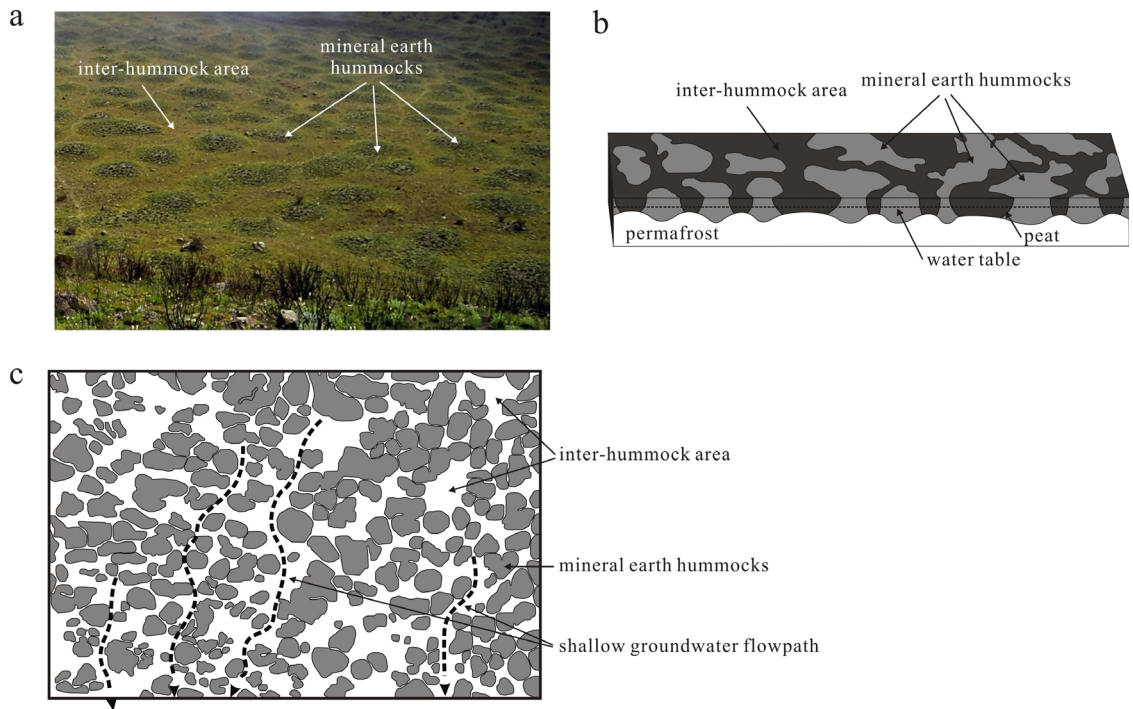
그림 1에 동토지역의 hummock 및 inter-hummock area의 분포양상 및 단면 그리고 천부지하수의 유동 패턴을 나타내었다. 그림 1a에서 보는 것처럼 동토지역의 지표면은 hummock 및 inter-hummock area로 구분할 수 있다. hummock은 작은 언덕의 형태를 이루고 있으며 주로 점토광물과 시멘트로 구성되어 있어 투수율이 매우 낮고 inter-hummock area는 hummock 사이의 공간으로서 주로 토탄 및 공극으로 구성되어 있어 투수율이 매우 높다(그림 1b). Inter-hummock area는 연결성이 좋고 투수율이 매우 높기 때문에 대부분의 천부지하수가 inter-hummock area를 통해서 이동한다(그림 1c). 그러나 inter-hummock area 내 토탄의 공극의 크기, 공극률 및 밀도가 하부로 갈수록 공극의 크기는 작아지고, 공극률은 줄어

들고 밀도는 치밀해지기 때문에 주로 inter-hummock area 내 토탄층의 상부를 통해 천부지하수가 측방이동을 한다(Quinton *et al.*, 2000). Inter-hummock area 내 천부지하수의 이동통로를 활성층(active layer)이라고 하며 이들의 두께는 약 0.4~0.8 m이다(Quinton and Marsh, 1999). 이러한 inter-hummock area의 특징으로 인해 대부분의 유체들이 하부로 침투되지 못하고 주로 측방으로 이동을 한다.

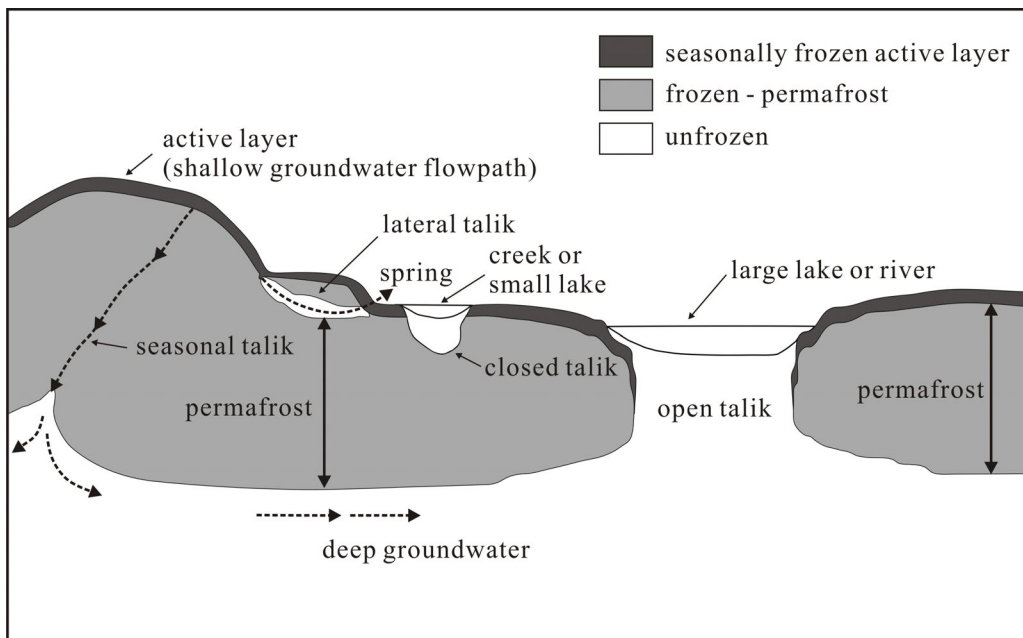
Van Stempvoort and Biggar (2008)는 동토지역 천부 및 심부 지하수의 관계를 설명해주는 모델을 제시하였다(그림 2). 여름철에 천부지하수가 활성층을 따라 이동하다가 단열대를 만나면 이 단열대를 통해 심부로 유입된다. 이러한 과정은 연중 계속해서 이루어지는 것이 아니라 여름철에 국한되며 모든 단열대가 심부지하수 시스템까지 연결되지 않았기 때문에 실제로 천부지하수가 심부지하수 시스템으로 유입되는 것은 매우 드문 경우이다. 그러나 과거 광산지역에서는 광산개발을 위해서 만들어진 수직적인 갱도를 따라 다량의 천부지하수가 심부지하수 시스템으로 유입되기도 한다(Stotler *et al.*, 2009). 이러한 지역에서는 광산개발에 의한 지하수의 오염이 매우 심각하다. 지하수 오염에 대해서는 나중에 자세히 설명하였다.

### 4. 지하수의 화학조성

동토지역의 천부지하수는 대부분 강수 또는 용빙



**Fig. 1.** Images showing (a) the surface of a hummock covered region, taken from <http://en.wikipedia.org>, (b) schematic section of various mineral earth hummocks and inter-hummock area, which is modified from Quinton *et al.* (2000), and (c) schematic distribution of hummocks and inter-hummock areas, modified from Quinton and Marsh (1998).

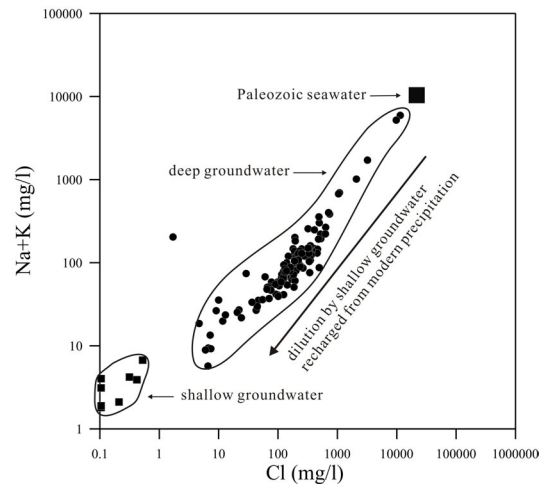


**Fig. 2.** Conceptual model for groundwater system in a permafrost region, redrawn from Van Stempvoort and Biggar (2008). Dashed arrows indicate groundwater flow.

수로부터 공급되어 inter-hummock area를 짧은 시간 동안 통과하여 하천에 유입되기 때문에 물-암석 반응이 충분히 일어나지 않는 것으로 알려져 있다. Pokrovsky *et al.* (2005)은 중부 시베리아 지역 현무암을 기반암으로 하는 지역에서 토양수, 지하수 및 하천수의 화학조성을 비교하였다. 이들은 토양수, 지하수 및 하천수의 화학조성이 서로 비슷한 것을 확인하였다. 그러나 빙하의 앞부분에 발달하는 proglacial zone이 잘 발달된 지역에서는 물-암석반응이 비교적 활발히 일어나는 것으로 보고되었다(Cooper *et al.*, 2002). 이들 지역에는 빙퇴석이 잘 발달되어 있으며 빙퇴석은 물과 쉽게 반응하는 탄산염 및 황산염 광물들을 포함한다(Anderson *et al.*, 1997). 또한 빙퇴석은 입자가 매우 작아 물과 빠르게 반응한다(Petrovic *et al.*, 1976). 그런 까닭에 천부지하수가 활성층을 통과하면서 천부지하수 내 Ca, Mg, SO<sub>4</sub> 및 HCO<sub>3</sub>의 농도가 크게 증가하는 특징을 보이기도 한다.

심부지하수는 천부지하수보다 체류시간이 길기 때문에 물-암석반응에 의한 영향을 더 많이 받는 것으로 알려져 있다(Gislason *et al.*, 1996; Stefansson and Gislason, 2001). 동토지역을 연구하던 초기 학자들은 동토지역에서 물리적인 풍화가 주로 이루어지고 화학적인 풍화는 거의 일어나지 않는 것으로 생각하였으나 여러 연구자들에 의해서 화학적인 풍화가 동토지역에서 중요하게 작용하는 것을 확인하였다(Hutton, 1975; Caine and Thurman, 1990; Dixon *et al.*, 1995). 그러나 심부지하수가 천부지하수와 격리되어 있어 화학적인 풍화에 필요한 O<sub>2</sub> 및 CO<sub>2</sub>가 심부지하수로 원활하게 공급되지 않기 때문에 동토지역의 물-암석반응이 저위도지방(비동토지역)보다 활발히 일어나지는 않으며 일부 지역에서는 산화/환원의 조건이 변화되어 CaSO<sub>4</sub> 등이 침전하기도 한다(Darmody *et al.*, 2000).

지하수의 화학조성은 지하수의 진화를 설명하는 데도 유용하게 사용될 수 있다. Raidla *et al.* (2009)은 발트해 분지에 있는 Cambrian-Vendian 대수층 내 매몰된 고생대 해수와 현생 강수에 의해 충전되는 지하수의 화학조성을 이용하여 Cambrian-Vendian 대수층의 진화과정을 설명하였다(그림 3). 그림 3에서 보면 과거에 매몰된 해수의 영향을 받은 심부지하수가 현생 강수로 충전되는 천부지하수의 영향으



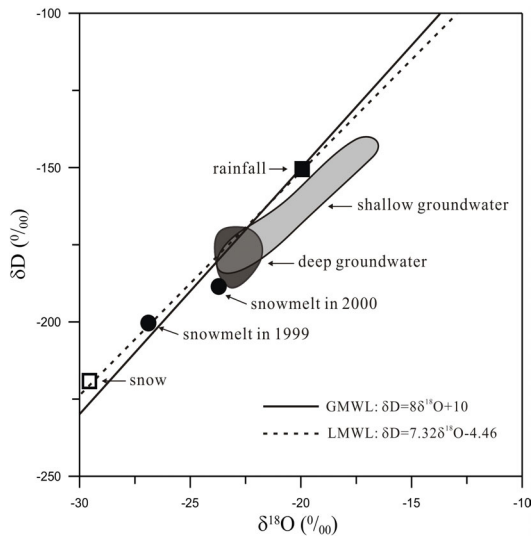
**Fig. 3.** Na+K and Cl relationships between shallow and deep groundwater in permafrost regions. Shallow groundwater data are from Pokrovsky *et al.* (2005), deep groundwater data are from Raidla *et al.* (2009) and Paleozoic seawater data are from Lowenstein *et al.* (2003).

로 인해 심부지하수의 화학조성이 점차 천부지하수의 화학조성 쪽으로 이동하는 경향이 관찰된다.

## 5. 지하수의 동위원소 조성

동토지역의 지하수는 대부분 강수 및 용빙수에 공급되고 있기 때문에 강수의 동위원소 영향을 많이 받는다. 동토지역에 내리는 강수의 산소와 수소 동위원소 조성은 저위도 지방에 비해서 매우 결핍된 것으로 알려져 있다(Gonfiantini, 1978). Hayashi *et al.* (2004)은 캐나다의 Scotty Creek 지역 개별 강수의 지역순환수선(local meteoric water line; LMWL,  $\delta D=7.6\delta^{18}O-2.0$ )을 보고하였는데 이들이 보고한 LMWL과 세계순환수선(global meteoric water line; GMWL, Craig, 1961)을 비교해 보면 기울기는 각각 7.6과 8로 조금 차이를 보이지만 Y절편은 -2와 10으로 큰 차이를 보인다. 그러나 Hayashi *et al.* (2004)의 LMWL은 Gibson *et al.* (1993)과 Gibson (1996)이 보고한 LMWL과는 매우 비슷하였다. 이러한 연구들은 동토지역에 내리는 강수의 동위원소 조성이 비동토지역과 상당히 다르다는 것을 의미하여 이러한 동위원소 조성은 그대로 지하수에 영향을 준다.

그림 4에 캐나다 Nunavut지역 지하수와 Scotty



**Fig. 4.** Oxygen and hydrogen isotopic compositions of shallow and deep groundwater reported from Stotler *et al.* (2009). Global meteoric water line (GMWL) after Craig (1961). Local meteoric water line (LMWL) from Gibson (1996). The volume-weighted average value of isotopic compositions for precipitation, snow and snowmelt data from Hayashi *et al.* (2004).

Creek지역 강수의 산소와 수소 동위원소 조성을 표시하여 지하수와 강수의 동위원소 사이에 갖는 상관관계를 나타내었다. 그림 4에서 보면 비의 동위원소 조성은 눈보다 무거운 동위원소 조성을 보이며 눈이 녹는 과정에서 동위원소 조성이 점차 부하되는 경향을 보인다. 이러한 동위원소 특징이 지하수에 그대로 반영되어 비의 영향을 많이 받는 천부지하수의 동위원소 조성은 넓은 범위를 보이며 비의 평균값 근처에 도시된다. 심부지하수의 동위원소 조성은 천부지하수와 뚜렷이 구분되며 녹은 눈의 동위원소 조성 근처에 도시된다. 이것은 이 지역의 천부지하수와 심부지하수가 서로 연결되어 있으며 주로 여름철에 녹은 눈이 심부지하수로 유입되고 있음을 나타내는 것이다. 이러한 동위원소 특징은 모든 동토지역에서 관찰되는 일반적인 특징은 아니다. 그러나 동토지역 천부지하수와 심부지하수의 연결성을 확인하는데 동위원소 조성이 훌륭한 도구로서 이용될 수 있음을 의미한다.

이 밖에도 지하수 내 용존 성분들의 기원을 밝히기 위해서 염소, 질소 및 황 동위원소( $\delta^{36}\text{Cl}$ ,  $\delta^{15}\text{N}$ ,  $\delta^{34}\text{S}$  및  $\delta^{81}\text{Br}$ ) 등이 이용되기도 한다(Shouakar-Stash *et*

*al.*, 2007; Stotler *et al.*, 2009).

## 6. 지하수 오염

### 6.1 무기오염

동토지역 지하수의 무기 오염은 주로 광산개발 및 제련과정에서 일어나고 있으며(Caritat *et al.*, 1998), 특히 광산개발이 완료된 지역에서는 광산시설을 그대로 방치하여 광산개발 시 굴착된 관정을 통해 다량의 오염물질이 심부지하수로 유입되고 있다(Stotler *et al.*, 2009). 과거에는 주로 주요 양이온(Na 및 Ca) 및 음이온(Cl, NO<sub>3</sub> 및 SO<sub>4</sub>)에 의한 지하수 오염에 관심이 주목되었으나 최근에는 이들 성분들뿐만 아니라 중금속에 의한 지하수 오염도 사회적으로 중요한 관심을 받고 있다. 이러한 중금속들 중에서 최근 비소에 의한 지하수 오염에 관한 연구들이 활발히 진행되고 있다. 비소는 동토지역에서 이루어지는 광산개발에 의해 지하수의 산화/환원 환경이 변화될 때 비소를 포함한 광물로부터 다량 용출된다(Smedley and Kinniburgh, 2002; Moldovan *et al.*, 2008). 위와 같은 반응은 특히 박테리아에 의한 황화광물의 산화와 매우 밀접한 관련이 있는 것으로 알려져 있다(Nordstrom and Southam, 1997).

### 6.2 유기오염

여러 동토지역에서 지하에 매설된 유류의 운송설비 및 저장고로부터 유출된 유류에 의한 지하수의 오염이 여러 동토지역에서 보고되고 있다(Wilson *et al.*, 1986; Chiang *et al.*, 1989; Braddock and McCarthy, 1996; Richmond *et al.*, 2001; Van Stempvoort and Talbot, 2006). 1996년부터 1999년까지 알래스카에서는 연평균 약 407건의 유류오염이 발생하였다(Poland *et al.*, 2003). 최근까지 동토지역에서 발생한 유류오염은 러시아, 캐나다 및 알래스카 등 여러 지역에서 심각한 환경문제가 되고 있다(Collins *et al.*, 1993; Chuvilin *et al.*, 2000).

Van Stempvoort and Biggar (2008)은 동토지역에서 발생된 유류오염 사례를 원인물질에 따라 분류하였다. 이들은 디젤류 및 항공연료에 의한 지하수 오염이 가장 많이 일어나고 있음을 알 수 있으며 이들에 의한 오염은 전체 유류오염의 약 47%를 차지한다고 보고하였다. 이들 오염물질들은 동토지역 토

양 및 동토층에 흡착되어 지속적으로 지하수에 영향을 주고 있다. 동토지역 기후환경에서 유기오염물질의 이동기작에 대한 연구가 진행되기는 하였지만 아직까지 명확하게 이해하지 못하고 있다(Iwakun *et al.*, 2010).

## 7. 지하수오염 정화

유류에 의해 오염된 지하수를 미생물로 정화하는 방법은 1980년대에 소개되어 현재 여러 나라에서 유기오염된 지하수를 정화하는데 일반적으로 사용되고 있으며 Suarez and Rifai (1999)에 의해서 정리되기도 하였다. 그러나 동토지역은 비동토지역에 비해 온도가 매우 낮고 지하수 내 영양염류가 적기 때문에 미생물의 정화능력이 상당히 떨어지는 것으로 알려져 왔다(Spormann and Widdel, 2000; Børresen *et al.*, 2003; Chakraborty and Coates, 2004). 그럼에도 불구하고 동토지역에서 미생물에 의한 유류오염물질의 정화는 지속적으로 보고되고 있으며(Braddock and McCarthy, 1996), 최근에는 낮은 온도범위에서 활동하는 미생물에 의한 유기오염물질의 정화가 보고되고 있다(Whyte *et al.*, 1996, 1997; Aislabie *et al.*, 2000; Bej *et al.*, 2000).

동토지역에서 미생물에 의한 생분해작용은 너무 느려 정화작용 정도를 확인하는 것이 매우 어려운 것으로 알려져 있다(Braddock and McCarthy, 1996). 그래서 이것을 해결하기 위한 연구들이 활발히 이루어지고 있다. McKelvie *et al.* (2005)은 탄소와 수소 동위원소 조성( $\delta^{13}\text{C}$ 와  $\delta^2\text{H}$ )을 이용하여 미생물에 의한 벤젠, 톨루엔 및 자일렌의 생분해 정도를 정량적으로 확인하였으며, 이러한 방법은 동토지역에서 유류오염물질의 정화정도를 확인하는 훌륭한 도구로서 사용될 수 있을 것으로 사료된다.

## 8. 결론

최근 동토지역 국가들을 중심으로 발달된 기술과 장비를 이용한 동토지역 지하수에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 현재까지 이루어진 동토지역 지하수의 이동특성 및 수질특성 연구 결과를 포괄적으로 정리한 내용은 다음과 같다. 동토지역 천부지하수는 대부분 inter-hummock area를 통해 측방이동

을 하여 하천 및 호수로 유입되며 천부지하수 중 일부는 이동 중에 단열대를 만나면 심부로 유입되어 심부지하수 시스템에 영향을 주기도 하지만 대부분 지역에서는 동토에 의해 완벽하게 격리되어 있다. 천부지하수의 화학 및 동위원소 조성은 강수에 의한 영향을 가장 많이 받지만 동토지역 대부분의 심부지하수는 체류시간이 길기 때문에 주로 물-암석반응에 의한 영향을 많이 받는다. 또한 천부지하수와 연결성이 거의 없기 때문에 심부지하수의 화학 및 동위원소 조성은 천부지하수와 뚜렷이 구분된다.

일부 동토지역의 지하수는 광물자원 개발과 지하유류 이동시설 및 저장고로부터 유출된 유류에 의해 오염되어 있는데 이렇게 오염된 지하수는 동토지역 및 주변 국가들이 이용할 수 있는 수자원을 감소시킬 수 있기 때문에 이에 대한 지하수의 오염 및 복원에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 많은 연구 결과로부터 동토지역 오염된 지하수를 복원하는데 걸리는 시간이 저위도 지방에 비해 매우 길게 소요된다는 것을 알게 되었으나 아직까지도 제한적인 지역에서만 연구들이 수행되어 동토지역 지하수의 전반적인 수질특성을 충분히 이해하지 못하고 있다. 더욱 효과적인 동토지역의 자원개발과 부지이용, 지하수 특성 이해를 위해서는 많은 연구자들의 관심과 노력이 촉구되며 무엇보다 동토지역을 훼손시키지 않으면서 발전할 수 있도록 노력해야 할 것이다.

## 사 사

본 연구는 한국해양연구원 부설 극지연구소의 “서남극 빙봉지역 용출수량 및 수화학 조성 변화 모니터링 연구(PP10080)”에 의해 지원되었습니다.

## 참고문헌

- 남승일, 이현경, 윤호일, Forwick, M. and Hald, M., 2008, 북극해 스발바르군도 반 미엔피오르덴 퇴적물의 유기물 특성과 기원. 지질학회지, 44, 5-14.
- 이재일, 김예동, 윤호일, 2003, 북극권 카라해 세인트 안나 트러프의 후기 제4기 고환경 연구. 지질학회지, 39, 65-80.
- 한옥, 이춘기, 남상현, 이방용, 김예동, 2005, 북극 다산과학기지 활동층의 열전달 메카니즘. 지질학회지, 41, 91-100.
- Aislabie, J., Foght, J. and Saul, D., 2000, Aromatic hydrocarbon-degrading bacterial from soil near Scott

- Base, Antarctica. *Polar Biology*, 23, 183-188.
- Anderson, S.P., Drever, J.I. and Humphrey, N.F., 1997, Chemical weathering in glacial environments. *Geology*, 25, 399-402.
- Ångström, A., 1974, Sveriges klimat. Generalstabens Litografiska Anstalts Förlag, Stockholm, 156 p.
- Bej, A.K., Saul, D. and Aislabie, J., 2000, Cold-tolerant alkane-degrading *Rhodococcus* species from Antarctica. *Polar Biology*, 23, 100-105.
- Børresen, M., Breedveld, G.D. and Rike, A.G., 2003, Assessment of the biodegradation potential of hydrocarbons in contaminated soil from a permafrost site. *Cold Regions Science and Technology*, 37, 137-149.
- Braddock, J.F. and McCarthy, K.A., 1996, Hydrologic and microbiological factors affecting persistence and migration of petroleum hydrocarbons spilled in a continuous-permafrost region. *Environmental Science and Technology*, 30, 2626-2633.
- Caine, N. and Thurman, E.M., 1990, Temporal and spatial variations in the solute content of an alpine stream Colorado Front Range. *Geomorphology*, 4, 55-72.
- Caritat, P., Danilova, S., Jæger, Ø., Reimann, C. and Storø, G., 1998, Groundwater composition near the nickel-copper smelting industry on the Kola Peninsula, central Barents Region (NW Russia and NE Norway). *Journal of Hydrology*, 208, 92-107.
- Chakraborty, R. and Coates, J.D., 2004, Anaerobic degradation of monoaromatic hydrocarbons. *Applied Microbiology Biotechnology*, 64, 437-446.
- Chiang, C.Y., Salanitro, J.P., Chai, E.Y., Colthart, J.D. and Klein, C.L., 1989, Aerobic biodegradation of benzene, toluene, and xylene in a sandy aquifer-data analysis and computer modeling. *Ground Water*, 27, 823-834.
- Chuvilin, E.M., Yershov, E.D., Naletova, N.S. and Miklyaeva, E.S., 2000, The use of permafrost for the storage of oil and oil products and the burial of toxic industrial wastes in the Arctic. *Polar Record*, 36, 211-214.
- Collins, C.M., Racine, C.H. and Walsh, M.E., 1993, Fate and effects of crude oil spilled on subarctic permafrost terrain in interior Alaska: fifteen years later. CRREL report No. 93-13. US Army Corps of Engineers, Cold Regions Research Engineering Laboratory, Hanover.
- Cooper, R.J., Wadham, J.L., Tranter, M., Hodgkins, R. and Peters, N.E., 2002, Groundwater hydrochemistry in the active layer of the proglacial zone, Finsterwalderbreen, Svalbard. *Journal of Hydrology*, 269, 208-223.
- Craig, H., 1961, Isotopic variations in meteoric water. *Science*, 133, 1702-1703.
- Darmody, R.G., Torn, C.E., Harder, R.L., Schlyter, J.P.L. and Dixon, J.C., 2000, Weathering implications of water chemistry in an arctic-alpine environment, northern Sweden. *Geomorphology*, 34, 89-100.
- Dixon, J.C., Darmody, R.G., Schlyter, P. and Thorn, C.E., 1995, Preliminary investigation of geochemical process responses to potential environmental change in Kärkevagge, Northern Scandinavia. *Geografiska Annaler*, 77A, 259-267.
- Douglas, M., Clark, I.D., Raven, K. and Bottemley, D., 2000, Groundwater mixing dynamics at a Canadian Shield mine. *Journal of Hydrology*, 235, 88-103.
- Gibson, J.J., 1996, Non-steady isotopic methods for estimating lake evaporation: development and validation in arctic Canada. Ph.D. Dissertation, University of Waterloo, Waterloo, Ontario, Canada.
- Gibson, J.J., Edwards, T.W.D., Bursey, G.G. and Prowse, T.D., 1993, Estimating evaporation using stable isotopes: quantitative results and sensitivity analysis for two catchments in northern Canada. *Nordic Hydrology*, 24, 79-94.
- Gislason, S.R., Arnorsson, S. and Armannsson, H., 1996, Chemical weathering of basalt as deduced from the composition of precipitation, rivers and rocks in Southwest Iceland: effect of runoff, age of rocks and vegetative/glacial cover. *American Journal of Science*, 296, 837-907.
- Gonfiantini, R., 1978, Standard for stable isotope measurement in natural compound. *Nature*, 271, 534-536.
- Hayashi, M., Quinton, W.L., Pietroniro, A. and Gibson, J.J., 2004, Hydrology function of wetlands in a discontinuous permafrost basin indicated by isotopic and chemical signatures. *Journal of Hydrology*, 296, 81-97.
- Hutton, J., 1975, *The Theory of the Earth*, Two Volumes, William Creech, Edinburgh, Scotland.
- Iwakun, O., Biggar, K. and Segol, D., 2010, Influence of cyclic freeze-thaw on the mobilization of LNAPL and soluble oil in a porous media. *Cold Regions Science and Technology*, in press.
- Johannesson, K.H. and Hendry, M.J., 2000, Rare earth element geochemistry of groundwaters from a thick till and clay-rich aquitard sequence, Saskatchewan, Canada. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64, 1493-1509.
- Jonsson, C.E., Leng, M.J., Rpsqvist, G.C., Seibert, J. and Arrowsmith, C., 2009, Stable oxygen and hydrogen isotopes in sub-Arctic lake waters from northern Sweden. *Journal of Hydrology*, 376, 142-151.
- Kashulina, G., Reimann, C., Finne, T.E., Caritat, P. and Niskavaara, H., 1998, Factors influencing NO<sub>3</sub> concentrations in rain, stream water, ground water and podzol profiles of eight small catchments in the

- European Arctic. *Environmental Pollution*, 51, 559-568.
- Lowenstein, T.K., Hardie, L.A., Timofeeff, M.N. and Demicco, R.V., 2003, Secular variation in seawater chemistry and the origin of calcium chloride basinal brines. *Geology*, 31, 857-860.
- McKelvie, J.R., Lindstrom, J.E., Beller, H.R., Richmond, S.A., Lollar, B.S., 2005, Analysis of anaerobic BTX biodegradation in a subarctic aquifer using isotopes and benzylsuccinates. *Journal of Contaminant Hydrology*, 81, 167-186.
- Meteorological Service of Canada (MSC), 2002, National Climate Data Archive of Canada, Dorval, Quebec.
- Moldovan, B.J., Hendry, M.J. and Harrington, G.A., 2008, The arsenic source term for an in-pit uranium mine tailings facility and its long-term impact on the regional groundwater. *Applied Geochemistry*, 23, 1437-1450.
- National Research Council of Canada (NRC), 1988, Glossary of Permafrost and Related Ground-Ice Terms, Permafrost Subcommittee, Associate Committee on Geotechnical Research. Technical Memorandum no. 142, Ottawa.
- National Wetlands Working Group (NWWG), 1988, Wetlands of Canada: Ecological Land Classification Series, no. 24. Sustainable Development Branch, Environment Canada, Ottawa, Ontario, and Polyscience Publications Inc., Montreal, Quebec, 452 p.
- Nordstrom, D.K. and Southam, G., 1997, Geomicrobiology of sulfide mineral oxidation. In: Banfield, J.F., Nealson, K.H.(eds.), *Geomicrobiology: Interactions between Microbes and Minerals*. Reviews in Mineralogy, vol. 35. Mineralogical Society America, Washington, DC, 361-390.
- Petrovic, R., Berner, R.A. and Goldhaber, M.B., 1976, Rate control in dissolution of alkali feldspars I. Study of residual grains by X-ray photoelectron spectroscopy. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 40, 537-548.
- Phillips, D., 1990, The climates of Canada. Catalogue No. En56-11990E. Supply and Services Canada, Canada, 176 p.
- Pokrovsky, O.S., Schott, J., Kudryavtzev, D.I. and Dupre, B., 2005, Basalt weathering in Central Siberia under permafrost conditions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 69, 5659-5680.
- Poland, J.S., Riddle, M.J. and Zeeb, B.A., 2003, Contaminants in the Arctic and the Antarctic: a comparison of sources, impacts, and remediation options. *Polar Record*, 39, 369-383.
- Quinton, W.L. and Marsh, P., 1998, The influence of mineral earth hummocks on subsurface drainage in the continuous permafrost zone. *Permafrost and Periglacial Processes*, 9, 213-228.
- Quinton, W.L. and Marsh, P., 1999, A conceptual framework for runoff generation in a permafrost environment. *Hydrological Processes*, 13, 2563-2581.
- Quinton, W.L., Gray, D.M. and Marsh, P., 2000, Subsurface drainage from hummock-covered hillslopes in the Arctic tundra. *Journal of Hydrology*, 237, 113-125.
- Raidla, V., Krsimäe, K., Vaikmäe, R., Jõelett, A., Karro, E., Marandi, A. and Savitskaja, L., 2009, Geochemical evolution of groundwater in the Cambrian-Vendian aquifer system of the Baltic Basin. *Chemical Geology*, 258, 219-231.
- Richmond, S.A., Lindstrom, J.E. and Braddock, J.F., 2001, Assessment of natural attenuation of chlorinated aliphatics and BTEX in subarctic groundwater. *Environmental Science and Technology*, 35, 4038-4045.
- Semkin, R.G., Mierle, G. and Neureuther, R.J., 2005, Hydrochemistry and mercury cycling in a High Arctic watershed. *Science of the Total Environment*, 342, 199-221.
- Shouakar-Stash, O., Alexeev, S.V., Frape, S.K., Alexeeva, L.P. and Drimmie, R.J., 2007, Geochemistry and stable isotopic signatures, including chlorine and bromine isotopes, of the deep groundwaters of the Siberian Platform, Russia. *Applied Geochemistry*, 22, 589-605.
- Smedley, P.L. and Kinniburgh, D.G., 2002, A review of the source, behavior and distribution of arsenic in natural waters. *Applied Geochemistry*, 17, 517-568.
- Spormann, A. and Widdel, F., 2000, Metabolism of alkylbenzenes, alkanes, and other hydrocarbons in anaerobic bacteria. *Biodegradation*, 11, 85-105.
- Stefansson, A. and Gislason, S.R., 2001, Chemical weathering of basalts, Southwest Iceland: effect of rock crystallinity and secondary minerals on chemical fluxes to the oceans. *American Journal of Science*, 301, 513-556.
- Stotler, R.L., Frape, S.K., Ruskeeniemi, T., Ahonen, L. and Onstott, T.C., 2009, Hydrogeochemistry of groundwaters in and below the base of thick permafrost at Lupin, Nunavut, Canada. *Journal of Hydrology*, 373, 80-95.
- Strömquist, L. and Rehn, J., 1981, Rainfall measurements; runoff and sediment transport in Kärkevagge, Swedish Lapland. *Japanese Geomorphological Union Transactions*, 2, 211-222.
- Suarez, M.P. and Rifai, H.S., 1999, Biodegradation rates for fuel hydrocarbons and chlorinated solvents in groundwater. *Bioremediation Journal*, 3, 337-362.
- Tye, A.M. and Heaton, T.H.E., 2007, Chemical and isotopic characteristics of weathering and nitrogen release in non-glacial drainage waters on Arctic tundra. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 71, 4188-4205.
- Van Everdingen, R.O., 1990, Ground water hydrology. In:



- Prowse, T.D., Ommanney, C.S.L. (eds.), Canadian Perspectives. NHRI Science Report, 77-101.
- Van Stempvoort, D. and Talbot, C., 2006, Investigation of groundwater conditions and impact of fuel spills at Wrigley Airport, Northwest Territories. Unpublished Report, April, 2006. National Water Research Institute, Burlington, Ontario, Canada.
- Van Stempvoort, D.V. and Biggar, K., 2008, Potential for bioremediation of petroleum hydrocarbons in groundwater under cold climate conditions: A review. Cold Regions Science and Technology, 53, 16-41.
- White, D., Autier, V., Yoshikawa, K., Jones, J. and Seelen, S., 2008, Using DOC to better understand local hydrology in a subarctic watershed. Cold Regions Science and Technology, 51, 68-75.
- Whyte, L.G., Bourbonnière, L. and Greer, C.W., 1997, Biodegradation of petroleum hydrocarbons by psychrotrophic psychrotrophic *Pseudomonas* strains possessing both alkane (*alk*) and the naphthalene (*nah*) catabolic pathways. Applied and Environmental Microbiology, 63, 3719-3723.
- Whyte, L.G., Greer, C.W. and Inniiss, W.I., 1996, Assessment of the biodegradation potential of psychrotrophic microorganisms. Canadian Journal of Microbiology, 42, 99-106.
- Wilson, B.H., Bledsoe, B.E., Kampbell, D.H., Wilson, J.T., Armstrong, J.M. and Sammons, J.H., 1986, Biological fate of hydrocarbons at an aviation gasoline spill site. Proceedings Conference on Petroleum Hydrocarbons and Organic Chemicals in Ground Water, National Water Well Association, Columbus, OH, 78-90.

---

투 고 일 : 2010년 8월 5일

심 사 일 : 2010년 8월 5일

심사완료일 : 2010년 8월 30일