

<Technical Report> 스노우팩 내에서 용설 배출수와 용질 농도 간의 상관관계를 통한 용질의 이동 해석

이정훈* · 정혜정
이화여자대학교 과학교육과

요 약

눈 속에서 어떻게 대기에서 유도된 용질이 이동하는 가에 대한 이해는 봄철에 지하수 및 지표수의 수질변동 관리 및 건강한 생태계유지를 위해서 중요하다. 눈 표면에서 눈이 녹아 발생된 용설이 어떻게 용질을 눈 기저부 까지 이동하는 가를 이해하기 위하여 배출수와 농도간의 상관관계를 고찰해 보았다. 여러 연구에서 배출수가 증가할 때 농도가 증가하는 양의 상관관계, 농도가 감소하는 음의 상관관계 및 두 관계를 모두 제시하였지만 배출수와 농도 간의 관계를 정량적으로 설명하지 못하였다. 이동성-비이동성(mobile-immobile) 모델을 이용하여 배출수와 농도 간의 관계를 정량적으로 이해하기 시작하였다. 먼저, 눈 속에서 용설의 속도가 증가함에 따라 이동성-비이동성의 수리학적인 교환상수가 같이 증가할 때, 배출수와 용질 간의 관계를 설명할 수 있었다. 또한, 용질이 이동성-비이동성에 있는 것이 농도와 배출수간의 관계를 결정할 수 있으며, 눈 속에 전체적으로 분포하고 있는 것과 표면에 부분적으로 분포하는 것으로도 결정됨을 알 수 있다. 이러한 눈 속에서의 용질의 이동기작은 수계 단위의 비포화대 연구에서의 용질 이송 및 라이시미터와 하천에서 관찰된 농도와 배출수간의 관계에도 적용할 수 있을 것으로 기대된다.

주요어: 눈, 용질, 배출수, 농도, 이동성-비이동성 모델

Jeonghoon Lee and Hyejung Jung, 2020, Analysis of solute transport by the relationship between solute concentration and meltwater discharge in a snowpack. Journal of the Geological Society of Korea. v. 56, no. 1, p. 101-108

ABSTRACT: Understanding of how atmospherically derived solutes transport in a snowpack is crucial for management of variations of surface water quality and maintenance of healthy ecological environment. To better understand how the meltwater generated at the snow surface transport to the bottom of the snowpack, we review the relationship between discharge and solute concentration. While the discharge of meltwater increases at the bottom of the snow, the solute concentration decrease (negative relationship), but increases with increasing of the discharge (positive relationship), which has been reported in several studies. These relationships have not been quantitatively explained, but Mobile-Immobile Model (MIM) helps in explaining the relationships. In the MIM, the hydraulic exchange rate constant between mobile and immobile water increased with increasing of meltwater velocity in the snow. The relationships were explained by that the solutes stay either mobile or immobile phase and the solutes exist either in the whole snow or only at the surface of the snow. The mechanisms may be relevant to solute transport processes in unsaturated soil and may shed light on explanation of concentration-discharge relationships observed from lysimeters and streams.

Key words: snowpack, solute, discharge, concentration, Mobile-Immobile Model (MIM)

(Jeonghoon Lee and Hyejung Jung, Department of Science Education, Ewha Womans University, Seoul 03760, Republic of Korea)

* Corresponding author: +82-2-3277-3794, E-mail: jeonghoon.d.lee@gmail.com

1. 서론

물 순환(water cycle)에서 눈의 중요성은 기후변화에 대한 관심으로 인해 새롭게 부각되고 있다(Vihma *et al.*, 2016). 물 순환 중에서 에너지의 변화에 가장 민감한 부분이 빙권(cryosphere)이기 때문에, 양극지역 및 온대 지역의 눈 또는 빙하가 어떻게 기후변화에 반응할 것인지에 대한 연구가 폭발적으로 증가하고 있다. 전통적으로, 늦은 가을부터 쌓이기 시작하여 다음 해 봄에 녹기 시작하는 눈(seasonal snow)에 대해 해외에서는 1960년대 이후 꾸준히 다양한 시각으로 연구가 진행되어 왔다(Colbeck *et al.*, 1982; Taniguchi and Kayane, 1986; Taylor *et al.*, 2002; Lee *et al.*, 2009). 눈에 의해 지하수가 충전되는 많은 지역에서 안정적인 수자원 확보, 수력발전소 운영, 강우와 용설(snowmelt)에 의한 홍수 예방 등을 위해서 눈이 녹는 시기 및 눈이 녹은 물의 양에 대해 많은 연구가 이루어져 왔다(Ahmad and Hasnain, 2009; Lee and Ko, 2011). 겨울에 눈이 많이 내리는 지역에서 봄철이 되어 눈이 녹기 시작하면, 지하수는 충전되고, 이러한 봄철에 눈이 녹은 물, 즉 용설의 화학 및 동위원소 조성에 대한 연구는 해외에서 지난 30년간 꾸준히 이루어져 왔다(Kendall *et al.*, 1995; Singh *et al.*, 1997; Piatek *et al.*, 2005; Sprenger *et al.*, 2018). 용설이 수계에 어떠한 영향을 주는 가에 대한 동위원소 수분분리연구(isotopic hydrograph separation)를 수행하기 위하여 눈의 동위원소 변동에 대한 연구도 진행되어 왔다(Taylor *et al.*, 2001; Feng *et al.*, 2002; Lee *et al.*, 2009).

겨울철에 쌓여 있던 눈이 한꺼번에 녹으면서 수계 및 생태계에 많은 양의 물과 용질(solute) 및 이온이 배출되는데, 이로 인해 홍수나 이온펄스(ionic pulse) 같은 자연재해 및 환경문제를 일으킬 수 있다(Harrington and Bales, 1998; Cost *et al.*, 2018). 또한 대기에서 건성침전(dry deposition) 및 습성침전(wet deposition)에 의해 용질 및 이온은 눈 속에 저장되게 된다. 온대 지역(temperate region)에서 이렇게 저장된 용질 및 이온은 용설과 함께 수계 및 생태계로 이동하게 된다. 예를 들어, 대기에서 침전된 질산염이 수계에 과공급될 경우 오염원으로 작용하게 되며 수중 생태계를 위협하는 부영양화와 같은 환경문제를 일으키게 된다. 이러한 오염의 심각성을 깨닫고 용설 배출수의 화학조성에 대한 연구 역시 지난 30여년간 꾸준히

이루어져 왔다(Johannessen and Henriksen, 1978; Tranter *et al.*, 1986; Feng *et al.*, 2001; Lee *et al.*, 2008a). 이온펄스와 같이 용질이 용설의 양과 반비례하여 급격하게 감소하거나, 태양에너지에 의해 용설양이 증가하면서 용질의 양이 감소하는 음의 관계(negative relationship between solute and meltwater) 등이 관찰되었다(Bales *et al.*, 1989). 지표에서 눈이 녹아 물의 양이 증가하게 되면, 용질이 증가하지 않는 이상 눈 속을 지나가는 물의 화학성분의 농도는 감소할 것이다. 한편, 눈이 녹으면서 용설의 양이 증가하면서 주변 천부 지하수 및 지류의 화학성분이 증가하는 양상도 관찰되었다(양의 관계, positive relationship between solute and discharge; Feng *et al.*, 2001; Lee *et al.*, 2008a). 눈이 녹으면서 제설제 성분의 이온들이 봄철에 증가하는 경향도 관찰되었다.

대기 중의 이온의 총량/loading이 점점 늘어가는 추세이기 때문에, 대기에서 기원한 눈 속에서 이온이 이동하는 기작(mechanism)과 눈의 기저부에서 이온이 배출되는 기작에 대한 이해가 필요하다(Wilkening *et al.*, 2000). 이는 눈이 많은 내리는 지역(snow-dominated area)에서 봄철에 발생하는 수질 변동을 예측하고 장기적으로 온대지역의 건강한 생태계를 유지하는 데 매우 중요하다. 하지만, 용설이 발생할 때 이온 및 용질의 양이 증가하거나 감소하는 현상은 여러 연구에서 보고되어 있지만, 그 기작 및 정량적인 접근방법에 대한 연구는 많지 않다(Anderson *et al.*, 1997). 따라서, 이번 연구에서는 눈 기저부에서 관찰되는 배출수 양과 용질 농도간의 상관관계를 설명하기 위해서 눈 속에서 용질이송 기작 및 상관관계를 설명하기 위한 모델에 대하여 고찰하였다.

2. 눈 속에서의 용질 또는 이온의 이동

겨울철에 쌓인 눈이 한꺼번에 녹으면서 눈에 쌓여 있던 이온(H^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- 등)들이 한꺼번에 용설과 함께 배출되면서 이온펄스라는 환경문제를 일으키기도 한다(Williams and Melack, 1991). 이온펄스는 눈 속에 포함되어 있는 이온들이 용설과 함께 균등하게 배출되는 것이 아니라 봄이 되어 눈이 녹기 시작할 때, 대부분의 이온들이 불균등하게 배출되는 현상을 뜻한다. 즉, 20~30%의 눈이 녹아 수계로 이동할 때 눈 속의 70~80% 정도 이온이 빠져 나가는

것을 의미한다. 이러한 이온펄스의 결과로 인해 봄철에 눈이 녹으면서 유출(runoff)이 발생하게 되면 강과 하천의 산성화가 발생한다(Williams *et al.*, 1991). 이온펄스의 원인은 눈이 얼음으로 물리적 변성 과정을 겪으면서, 재결정화(recrystallization)가 되고 눈 속에 포함되어 있던 용질들이 얼음의 바깥쪽에 위치 한 후 용설이 발생되어 눈 속을 통과할 때 용설과 함께 용질이 쉽게 배출되는 것으로 알려져 있다(Harrington *et al.*, 1996; Lee *et al.*, 2014).

이러한 이온펄스의 강도(magnitude)는 용질이 어떠한 기작으로 눈 속을 통과하느냐에 달려 있다(Feng *et al.*, 2001). 눈 속에서 용질을 이동시키는 가장 기본적인 개념은 피스톤 흐름(piston flow)과 선택적 흐름(preferential flow) 두 가지가 있다. 피스톤 흐름에서는 지표면에서 발생된 용설이 눈 속으로 순차적으로 이동하게 되고, 아래로 모든 용질 또는 이온을 이동시킬 수 있다. 이에 반해, 선택적 흐름에서는 채널(channel)에 있는 용질 또는 이온만 효과적으로 이동되며, 기질(matrix)에 있는 용질 또는 이온은 채널로 이동되었을 때만 이동될 수 있다. 특정 관찰로서 이런 두 흐름을 구별 지을 수도 있다. 예를 들면, 선택적 흐름에서 용질의 농도는 배출수가 증가함에 따라 감소할 수 있는데, 이는 채널에 들어오는 물의 양이 증가하여 용질의 농도가 희석될 수 있기 때문이다. 피스톤 흐름은 이러한 용질과 배출수 간의 상관관계가 없을 수도 있다. 대신, 용질의 농도 변화는 배출수의 변화보다 늦게 일어날 수 있는데, 이는 파동이 전파되는 운동학적인 특성(kinematics of wave propagation)에 기인한다. 주어진 시스템에서 어떤 흐름이 더 우세한 가는 매우 복잡한 문제이며, 이는 눈의 특성과 눈 속에 들어 있는 물의 양에 기인할 수 있다.

3. 눈 속에서 배출수와 농도와의 상관관계

3.1 모델개념

눈의 기저부에서 방출되는 용설 배출수(meltwater discharge)와 이온과의 관계는 Hibberd (1984)의 연구로부터 시작되었다. Hibberd (1984)에서는 기본적인 이송-확산(standard advection-diffusion) 방정식을 이용하여 용설의 배출수가 증가하면 농도가 감소함을 보였다. 하지만, 용질이 최초로 도달한 이후 길게 늘어지는 현상(long tailed)을 묘사하지 못하였으

며, 이에 Harrington and Bales (1998)는 이동성-비이동성(mobile-immobile) 모델을 제시하였다. 이는 지하수에서 널리 사용되는 비평형 용질이동(non-equilibrium solute transport)을 용설에서의 용질 이동(solute transport)에 적용한 것이다. 이동성-비이동성 모델(Mobile-Immobile Model, MIM)은 눈 속을 흐르는 mobile water와 흐르지 않는 immobile water 간에 수리학적인 질량이동(hydraulic mass transfer)을 통해 용질을 교환하는 것으로 정의하고 있다. 이때 질량이동상수를 mobile-immobile water 교환상수(mobile-immobile exchange constant)라고 한다. 이동성 영역(mobile region)은 아래로 흐를 수 있다는 것이 비이동성 영역(immobile region)과의 차이점이다. Feng *et al.* (2001)에서는 눈이 올 때마다 희토류원소를 눈 위에 인위적으로 뿌리는 인공강우실험(artificial rain-on-snow experiment)을 통해 배출수에서 이를 확인하고자 하였다. 하지만, 이전 연구와는 다르게 배출수의 양이 증가할 때 배출수의 희토류 농도는 증가하였으며, 이는 이전 연구 결과에서 보여 주었던 것과 반대로 양의 상관관계를

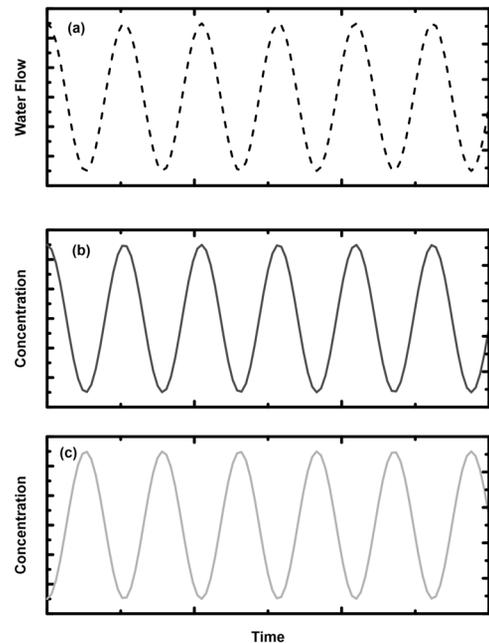


Fig. 1. Relationship between water flow and chemical compositions in meltwater discharge. (a) water flow, (b) chemical concentration that shows a positive relationship with water flow and (c) chemical concentration showing a negative relationship with water flow.

나타내었다(그림 1b). 이는 추적자가 비이동성 영역에 존재하였기 때문에 배출수의 양이 늘어남에 따라 이동성-비이동성 상간의 교환반응이 증가하였고, 결국 추적자의 농도가 증가하였다. Harrington and Bales (1998)에서는 이 수리화학적 질량이동이 속도와 상관없이 일정하게 일어나는 것이라 가정하여, 용설 배출수가 증가할 때 이온의 농도가 감소함을 제시하였다(음의 상관관계)(그림 1c).

Lee *et al.* (2008a)에서는 비반응 추적자(conservative tracer)인 Cl⁻ 및 Br⁻를 이용하여 멜트 팬(melt pan) 주변에 물탱크를 설치하고 추적자와 물을 섞어 눈 표면에 물을 뿌려 눈 기저부에서 용설의 농도를 측정하여 모델 결과와 비교하였다. 물탱크에는 추적자와 물이 함께 눈 위에 뿌려지게 되면 눈 속에서 용질은 이동성 영역에 존재하게 된다. 이로 인해 이동성 영역에 용설이 증가하게 되고 눈의 기저부에서의 배출수가 증가하게 되면, 추적자의 농도가 감소하게 되는 음의 관계를 가지게 된다. 인공강우 및 눈 표면에서의 용해는 눈 표면에서의 수리 조건을 계속 변화시키기 때문에 기존의 모델로는 다양한 수리화학적 조건(hydrological conditions)을 모사할 수 없다. 따라서 수리화학적 조건을 포함한 새로운 모델을 개발하였다. Lee *et al.* (2008b)에서는 Feng *et al.* (2001)과 동일한 실험을 한 후 눈 위에 뿌린 희토류 원소와 대기에서 유도된 질산염과 황산염의 농도를 분석하였다. 따라서 희토류원소와 배출수간에는 양의 상관관계를 나타내지만, 대기에서 유도된 질산염과 황산염의 경우 용설이 발생하여 배출수가 증가할 때 농도가 감소하였다. 황산염과 질산염의 경우에는 희토류원소와는 달리 이동성 영역에 존재하였고, 따라서 용설이 증가하게 되면 자연적으로 농도는 감소하는 것으로 해석하였다. 다음 절에서는 이러한 관찰을 MIM을 이용하여 어떻게 정량적으로 이해하였는가를 설명하고자 한다.

3.2 모델연구

Hibberd (1984)와 Harrington and Bales (1998)에서 정량적인 연구를 시도하였지만, 수리화학적 부분은 일정하다고 가정하고 농도의 변화만을 모델로서 관찰하였다. Feng *et al.* (2001)에서 처음으로 배출수와 농도 간의 상관관계에 대하여 정량적으로 모델연구를 제시하였다. MIM을 이용하여 수리화학적

용질의 질량이동이 발생할 때, 이전 연구에서 제시한 것처럼 수리화학적 질량이동이 일정한 것이 아니라 용설이 눈 속을 내려갈 때 속도와 연관이 있는 것으로 가정하였다(그림 2). 모델에서 수리화학적 것은 일정하다고 가정하였으므로, 눈 속에서의 용설이 아래로 내려가는 속도가 변하는 것을 모사하기 위하여 이 연구에서 사용된 모델의 지배방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial(SC_m)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(SD \frac{\partial C_m}{\partial z} \right) - \frac{\partial}{\partial z} (uSC_m) + \frac{\omega}{\phi(1-S_i)} (C_i - C_m) \tag{1}$$

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = \frac{\omega}{\phi S_i} (C_m - C_i) \tag{2}$$

여기에서 u 는 눈 속을 내려가는 용설의 속도, ϕ 는 공극률, S_i 는 더 이상 줄일 수 없는 물(irreducible water), S 는 유효포화도(effective water saturation), t 는 시간, z 는 수직 방향의 거리, C_m 과 C_i 는 각각 mo-

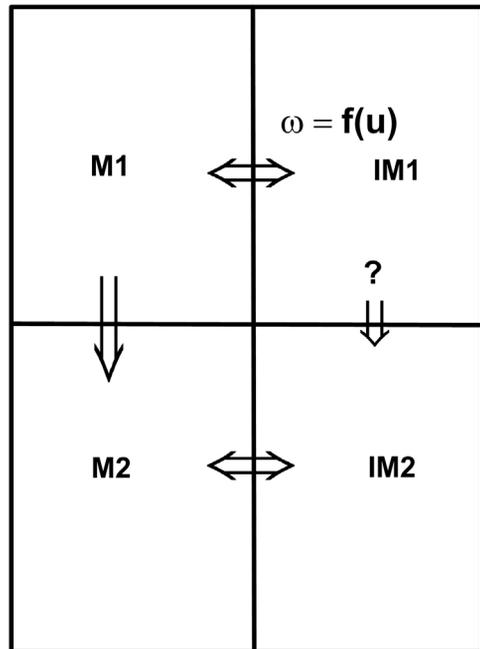


Fig. 2. A conceptual diagram of mobile-immobile water model, implying a more sophisticated flow model, for example, a dual-porosity model (M1: Upper mobile region, M2: Bottom mobile region, IM1: Upper immobile region and IM2: Bottom immobile region).

Table 1. Initial conditions of the model for discharge-concentration relationships.

| Reference | Chemical conditions |
|---------------------------|---|
| Feng <i>et al.</i> (2001) | $C_{mobile} = 0$ (mg/L) $C_{immobile} = 0$ (mg/L) Positive relationship $C_{mobile} = 100$ (mg/L) $C_{immobile} = 0$ (mg/L) |
| Lee <i>et al.</i> (2008a) | Negative relationship $C_{mobile} = 100$ (mg/L) $C_{immobile} = 0$ (mg/L) Positive relationship $C_{mobile} = 0$ (mg/L) $C_{immobile} = \begin{cases} 0 & \text{when } z \leq 60 \\ 3000 & \text{when } z > 60 \end{cases}$ (mg/L) |
| Lee <i>et al.</i> (2008b) | $C_{ice} = \begin{cases} 0 & \text{when } z \leq 60 \\ 1500 & \text{when } z > 60 \end{cases}$ (mg/L) Negative relationship $C_{mobile} = 0.4$ (mg/L) $C_{immobile} = 0.4$ (mg/L) $C_{ice} = 0$ (mg/L) |

bile water 영역 및 immobile water의 영역에 있는 용질의 농도를 나타내며, D 는 분산계수(cm/s)이며, ω 는 mobile 과 immobile water 의 수리학적 질량 이동상수(hydraulic exchange constant)이다(Jaynes *et al.*, 1995).

수리화적인 요소(S)가 일정하다고 가정하였기 때문에, 눈 속에서 물의 양과 용질의 농도에 불연속면(discontinuity)이 생길 수 있다. 눈 속에서 용설의 속도를 변화시키기 위해서 눈 표면에서 발생하는 물의 양을 변화시킨 이후 속도 파면(wave front)을 추적하기 위하여 눈 속에서 속도 파면 위, 아래의 속도를 결정하였다. 속도 파면 전의 물의 양과 이온의 농도는 다음과 같이 결정할 수 있다.

$$V = \frac{K}{\phi(1-S_i)} \frac{S_+^n - S_-^n}{S_+ - S_-} \quad (3)$$

$$V[S_+ C_m + \beta C_{i+} - S_+ C_m - \beta C_{i-}] = S_+^n C_{m+} - S_-^n C_{m-} - S_+ D_+ \frac{\partial C_{m+}}{\partial z} + S_- D_- \frac{\partial C_{m-}}{\partial z} \quad (4)$$

여기에서 K 는 수리전도도, +와 -는 속도 파면 이전과 이후를 나타내며, β 는 $S_i/(1-S_i)$ 를 나타낸다. 눈 표면에서 물의 양이 증가하였을 때, 일정시간 이후 배출수의 증가로 이어지게 되며, 이에 따라 용질의 농도가 증가하거나 감소할 수 있다. Feng *et al.* (2001)의 실험에서는 배출수의 증가와 함께 용질의 농도가 증가하였으며, 이를 모델에서 구현하기 위하여 MIM에서 두 상의 교환상수인 ω 를 일정하다고 가정하였던 이전 연구와는 달리 용설의 속도와 연동하여 변화하게 하여 배출수와 용질의 양의 상관관계를 증명하였다.

Lee *et al.* (2008a, 2008b)에서는 다음의 유동방정식(식 5, 6)을 이용하고, 용질의 이동은 같은 지배방정식으로 초기조건(initial conditions) 및 경계조건(boundary condition)을 다르게 하여 배출수와 농도간의 두 가지 상관관계를 제시하였다. 사용된 유동방정식은 다음과 같다.

$$\phi(1-S_i) \frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial(KS^n)}{\partial z} = 0 \quad (5)$$

$$K = \frac{\rho_w k g}{\mu} \tag{6}$$

여기에서 n 은 지수($n=3$, Wankiewicz, 1978), k 는 고유투수율(intrinsic permeability), μ 는 점도, ρ_w 는 물의 밀도, g 는 중력가속도이다. 여기에서 S_i 가 immobile 하다고 가정하면 눈 속에서 물이 내려가는 속도(u)는 다음과 같다.

$$u = \frac{KS^{n-1}}{\phi(1-S_i)} \tag{7}$$

Lee *et al.* (2008a)에서는 용질이 어떠한 초기 및 경계 조건을 가지느냐에 따라 양의 상관관계와 음의 상관관계를 보이는 가에 대한 모델결과를 제시하였다(표 1). Lee *et al.* (2008b)에서는 대기에서 유도된 질산염은 이동성 영역에 존재하면서 배출수의 양과 음의 관계를, 눈 표면에 뿌린 희토류원소는 비이동성 영역에 존재할 때 배출수의 양과 양의 관계를 가질 수 있음을 증명하였으며 초기조건을 표 1에 제시하였다. 이러한 실험 및 모델 연구로서 알려진 바는 다음과 같다.

첫 번째로, MIM에서 수리학적 교환상수가 눈 속을 통과하는 용질의 속도와 함께 변화하여야만 농도와 배출수간의 상관관계를 설명할 수 있다. 수리학적 교환상수가 일정하다면 배출수가 증가하였을 때 용질 및 이온의 질량은 변함이 없기 때문에 농도는 감소할 수밖에 없다(Harrington and Bales, 1998). Feng *et al.* (2001)에서는 농도와 배출수간의 양의 상

관관계를 희토류추적자 실험으로 관찰하고 이를 설명하기 위하여 눈 속에서의 물의 양(water content)이 증가할 때 수리학적 교환상수를 증가시켜 눈 속에서의 용질 및 이온의 질량이 증가하여 실험에서 관찰된 양의 상관관계를 모델에서 구현하였다(그림 3). 하지만, 이 연구에서 사용된 모델은 눈 속에서 물의 양(S)이 일정하다고 가정하였기 때문에, 모델 내에서 S 를 증가시키고 속도파면 개념을 이용하여 용질의 이동을 모사하였다. 이러한 접근 방법은 현장에서 얻은 결과를 재현할 수 없고 배출수와 농도간의 관계를 개념적으로만 설명할 수 있다.

두 번째로, MIM에서 농도와 배출수와의 관계는 추적자에 어디에 위치하며, 눈속에서 어떻게 분포되어 있는지가 중요함을 알 수 있다(Lee *et al.*, 2008a, b). 표 1에서 제시되어 있듯이 추적자가 이동성 영역에 있는 것과 비이동성 영역에 있는 것이 농도와 배출수간의 관계를 결정할 수 있으며, 눈 속에 전체적으로 분포하고 있는 것과 표면에 부분적으로 분포하는 것으로도 결정됨을 알 수 있다. Lee *et al.* (2008b)에서 동일한 실험에서 희토류원소는 양의 상관관계를, 질산염은 음의 상관관계를 동시에 보여 주었다. 희토류원소(Yb)가 60 cm 이상에 존재하고 있기 때문에, 비이동성 영역과 얼음에 존재하였을 때 양의 상관관계를 모델 연구로 증명하였다. 질산염은 이동성-비이동성 영역 두 군데 모두 존재하였을 때 음의 상관관계를 나타내었다. 이러한 농도와 배출수의 상관관계는 추적자가 어떻게 이동(transport) 되는가에 따라 나타날 수 있는 현상으로 눈 속에서 용질이 이동되는 과정을 설명할 수 있다.

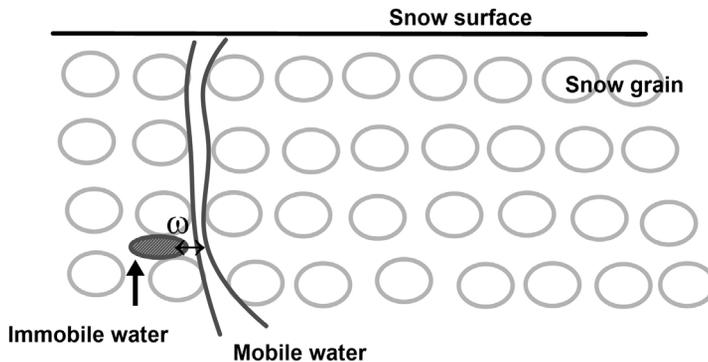


Fig. 3. A schematic diagram of mass transfer or solute transfer in snowpack showing snow grains, mobile/immobile water and exchange frequency (ω). Two grey solid lines represent a channel for mobile water.

마지막으로, MIM은 기본적으로 눈 속에서 이중 공극모델(dual-porosity flow system)을 채택하고 있으며 지난 50여년간 사용되어 왔다(Gao *et al.*, 2010). 모델에서는 배출수와 농도간의 상관관계를 대부분 구현하였으나, 농도의 변화폭을 구현하는 데에는 한계가 있었다(Lee *et al.*, 2008b). 이는 눈 속에서 추적자가 다른 물리적인 기작에 의해 이동될 수 있는 가능성을 제시할 수 있다. 예를 들어, 희토류원소가 배출수가 증가할 때면 비이동성 영역에서 이동성 영역으로 이동되며, 배출수가 감소하게 되면 추적자가 이동되지 않는다면 좀 더 변동 폭이 큰 농도와 배출수 간의 상관관계를 구할 수 있다. 또는 비이동성 영역이 MIM에서는 이동하지 않는다고 가정하지만, 변동 폭을 설명하기 위해서는 비이동성 영역이 아래로 이동되어야 변동 폭을 설명할 수 있을 것으로 예상된다(그림 2). 하지만, 지하수 및 토양 시스템에서 사용되고 있는 이중투과율모델(dual-permeability flow system)이 향후 개발될 필요성이 있을 것으로 판단된다.

4. 요약

본 연구에서는 눈 표면에서 용설이 발생하였을 때, 눈 속에 존재하는 용질이 어떻게 이동하는가에 대하여 고찰해 보았다. 발생된 용설이 눈 속을 통과하면서 배출수와 농도간의 상관관계를 이해함으로써, 대기에서 유도된 용질 및 이온이 눈 속에서 어떻게 빠져 나가는가에 대하여 이해할 수 있다. 눈 속에서 배출수와 용질사이의 관계는 MIM을 이용하여 이해할 수 있었으며, 눈 속에서 용설의 속도가 증가함에 따라 이동성-비이동성 영역의 수리학적인 교환상수가 같이 증가하면서 배출수와 용질 간의 관계를 설명할 수 있었다. 또한, 용질이 이동성-비이동성 영역에 있는 것을 통해 농도와 배출수간의 관계를 결정할 수 있으며, 눈 속에 전체적으로 분포하고 있는 것이 아니면 표면에 부분적으로 분포하고 있는가에 의해서도 결정됨을 알 수 있었다.

여러 수계에서 이러한 농도와 배출수의 상관관계는 하천 및 지하수에서도 관찰되어 보고되어 있다(Hornberger *et al.*, 2001; Borah *et al.*, 2003). 비록 다양한 요인(예를 들어, 서로 다른 지형학적인 조건에서의 서로 다른 이동 경로를 가지는 경우)들이 더 고려되어야 하겠지만, 본 연구에서 보고된 이러한

눈 속에서의 용질의 이동기작은 수계 단위의 비포화대 연구에 적용할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

이 연구는 한국지질자원연구원 “지구/우주의 진화과정 해석을 위한 동위원소 및 미량원소 지구화학 프록시 개발” 및 극지연구소 “서남극 스웨이트 빙하 돌발붕괴의 기작규명 및 해수면 상승 영향 연구(KIMST20190361)”의 지원으로 이루어졌습니다.

REFERENCES

- Ahmad, S. and Hasnain, S.I., 2009, Snow and stream-water chemistry of the Ganga headwater basin, Garhwal Himalaya, India. *Hydrological Sciences Journal*, 46, 103-111.
- Anderson, S.P., Dietrich, W.E., Torres, R., Montgomery, D.R. and Loague, K., 1997, Concentration-discharge relationships in runoff from a steep, unchanneled catchment. *Water Resources Research*, 33, 211-225.
- Bales, R.C., Davis, R.E. and Stanley, D.A., 1989, Ion elution through shallow homogeneous snow. *Water Resources Research*, 25, 1869-1877.
- Borah, D.K., Bera, M. and Shaw, S., 2003, Water, sediment, nutrient, and pesticide measurements in an agricultural watershed in Illinois during storm events, *Trans. ASAE*, 46, 657-674.
- Colbeck, S.C. and Anderson, E.A., 1982, The permeability of a melting snow cover. *Water Resource Research*, 18, 904-908.
- Cost, D., Pomeroy, J. and Wheeler, H., 2018, A numerical model for the simulation of snowpack solute dynamics to capture runoff pulses during snowmelt: The PULSE model. *Advances in Water Resources*, 122, 37-48.
- Feng, X., Kirchner, J.W., Renshaw, C.E., Osterhuber, R.S., Klaue, B. and Taylor, S., 2001, A study of solute transport mechanisms using rare earth element and artificial rainstorms on snow. *Water Resources Research*, 37, 1425-1435.
- Feng, X., Taylor, S., Renshaw, C.E. and Kirchner, J.W., 2002, Isotopic evolution of snowmelt. 1. A physically based one-dimensional model. *Water Resources Research*, 38, 35-1-35-8.
- Gao, G., Zhan, H., Feng, S., Fu, B., Ma, Y. and Huang, G., 2010, A new mobile-immobile model for reactive solute transport with scale-dependent dispersion. *Water Resources Research*, 46, W08533.
- Harrington, R. and Bales, R.C., 1998, Interannual, seasonal, and spatial patterns of meltwater and solute fluxes in a seasonal snowpack. *Water Resource Research*, 34,

- 823-831.
- Harrington, R., Bales, R.C. and Wagnon, P., 1996, Variability of meltwater and solute fluxes from homogeneous melting snow at the laboratory scale. *Hydrological processes*, 10, 945-953.
- Hibberd, S., 1984, A model for pollutant concentration during snow-melt. *Journal of Glaciology*, 30, 58-65.
- Hornberger, G.M., Scalon, T.M. and Raffensperger, J.P., 2001, Modelling transport of dissolved silica in a forested headwater catchment: the effect of hydrological and chemical time scales on hysteresis in the concentration-discharge relationship. *Hydrology Processes*, 15, 2029-2038.
- Jaynes, D.B., Logsdon, S.D. and Horton, R., 1995, Field method for measuring mobile/immobile water content and solute transfer rate coefficient. *Soil Science Society of America Journal*, 59, 352-356.
- Johannessen, M. and A. Henriksen, 1978, Chemistry of snow meltwater: Changes in concentration during melting. *Water Resources Research*, 14, 615-619.
- Kendall, C., Campbell, D.H., Burns, D.A., Shanley, J.B., Silva, S.R. and Chang, C.C.Y., 1995, Tracing sources of nitrate in snowmelt runoff using the oxygen and nitrogen isotopic compositions of nitrate. *Biogeochemistry of Seasonally Snow-Covered Catchments (Proceedings of a Boulder Symposium)*. IAHS Publ., 228, 339-348.
- Lee, J., 2012a, Validations of a numerical model of solute transport in a snowpack. *Economic and Environmental Geology*, 45, 525-533.
- Lee, J., 2012b, Development of mathematical model for both solute transport in snow and isotopic evolution of snowmelt. *Journal of Soil and Groundwater Environment*, 17, 31-39.
- Lee, J., 2014, A numerical study of isotopic evolution of a seasonal snowpack and its meltwater by total rates. *Geosciences Journal*, 18, 503-510.
- Lee, J., Feng, X., Posmentier, E.S., Faiia, A.M., Osterhuber, R. and Kirchner, J.W., 2008a, Modeling of solute transport in snow using conservative tracers and artificial rain-on-snow experiments. *Water Resources Research*, 44, W02411.
- Lee, J., Feng, X., Posmentier, E.S., Faiia, A.M. and Taylor, S., 2009, Stable isotopic exchange rate constant between snow and liquid water. *Chemical Geology*, 260, 57-62.
- Lee, J. and Ko, K.S., 2011, An Energy Budget Algorithm for a Snowpack-Snowmelt Calculation. *Journal of Soil and Groundwater Environment*, 16, 82-89 (in Korean with English abstract).
- Lee, J., Koh, D.C. and Kim, H., 2014, A review on solute transport mechanisms in a snowpack. *Journal of the Geological Society of Korea*, 50, 681-687 (in Korean with English abstract).
- Lee, J., Nez, V.E., Feng, X., Kirchner, J.W., Osterhuber, R. and Renshaw, C.E., 2008b, A study of solute redistribution and transport in seasonal snowpack using natural and artificial tracers. *Journal of Hydrology*, 357, 243-254.
- Piatek, K.B., Mitchell, M., Silva, S.R. and Kendall, C., 2005, Sources of Nitrate in Snowmelt Discharge: Evidence From Water Chemistry and Stable Isotopes of Nitrate. *Water Air and Soil Pollution*, 165, 13-35.
- Singh, P., Spitzbart, G., Hübl, H. and Weinmeister, H.W., 1997, Hydrological response of snowpack under rain-on-snow events: a field study. *Journal of Hydrology*, 202, 1-20.
- Sprenger, M., Tetzlaff, D., Buttle, J., Laudon, H., Leister, H., Mitchell, C.P.J., Snelgrove, J., Weiler, M. and Soulsby, C., 2018, Measuring and Modeling Stable Isotopes of Mobile and Bulk Soil Water. *Vadose Zone Journal*, 17, 1-18.
- Taniguchi, M. and Kayane, I., 1986, Changes in soil temperature caused by infiltration of snowmelt water. In *Proc. Budapest Symp. Modelling Snowmelt-induced Processes*. IAHS Publ., 155, 93-101.
- Taylor, S., Feng, X., Kirchner, J., Osterhuber, R., Klaue, B. and Renshaw, C., 2001, Isotopic evolution of a seasonal snowpack and its melt. *Water Resources Research*, 37, 759-769.
- Taylor, S., Feng, X., Williams, M. and McNamara, J., 2002, How isotopic fractionation of snowmelt affects hydrograph separation. *Hydrological Processes*, 16, 3683-3690.
- Tranter, M., Brimblecombe, P., Davies, T.D., Vincent, C.E., Abrahams, P.W. and Blackwood, I., 1986, The composition of snowfall, snowpack and meltwater in the Scottish highlands-evidence for preferential elution. *Atmospheric Environment*, 20, 517-525.
- Vihma, T., Screen, J., Tjernström, M., Newton, B., Zhang, X., Popova, V., Deser, C., Holland, M. and Prowse, T., 2016, The atmospheric role in the Arctic water cycle: A review on processes, past and future changes, and their impacts. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 121, 586-620.
- Wankiewicz, A., 1978, A review of water movement in snow. In *Proc. Modeling of Snow Cover Runoff*, edited by S.C. Colbeck and M. Ray, U.S. Army Cold Reg. Res. and Engg. Lab., Hanover, NH., 222-252.
- Wilkening, K.E., Barrie, L.A. and Engle, M., 2000, Trans-Pacific air pollution. *Science*, 290, 65-67.
- Williams, M.W., Bales, R.C., Brown, A.D. and Melack, J.M., 1995, Fluxes and transformations of nitrogen in a high-elevation catchment, Sierra Nevada. *Biogeochemistry*, 28, 1-31.
- Williams, M.W. and Melack, J.M., 1991, Solute chemistry of snowmelt and runoff in an alpine basin, Sierra Nevada. *Water Resources Research*, 27, 1575-1588.

Received : November 8, 2019

Revised : December 5, 2019

Accepted : December 12, 2019