지질학회지 제 50권 제 5호, p. 681-687, (2014년 10월)
J. Geol. Soc. Korea, v. 50, no. 5, p. 681-687, (October 2014)
DOI http://dx.doi.org/10.14770/jgsk.2014.50.5.681

ISSN 0435-4036 (Print)
ISSN 2288-7377 (Online)

<Review>
눈 속에서의 용질이동에 관한 기작-리뷰

이정훈[1,‡] · 고동찬[2] · 김혜린[1]
[1]이화여자대학교 과학교육과
[2]한국지질자원연구원 지하수연구실

요 약

온대지역에서 눈 속에서 이온 또는 오염원이 이송되는 기작에 대하여 고찰하였다. 스노우팩 속에 대기에서부터 초래된 이온 또는 오염원들이 겨울동안 축적되었다가 융설과 함께 많은 양이 수계로 배출된다. 이와 같이 산악지역에서 봄철에 융설에 의해 유출이 일어날 때 호수 및 하천의 산성화를 보여 주는데 이를 이온펄스라고 부른다. 이온펄스의 주된 요인으로는 호수 및 하천으로 이온들이 불균등하게 이동되기 때문으로 추정되는데, 이는 눈이 녹는 초반시기에 대부분의 이온들이 호수나 하천으로 이동되기 때문이다. 이러한 과정은 눈이 재결정화 되면서 이온들이 눈의 경계부에 위치하게 되고 한꺼번에 씻겨 나가기 때문으로 설명할 수 있다. 이러한 이온펄스의 크기는 용질이 눈 속을 어떤 기작으로 이송되는 지에 달려 있으며 이를 설명하기 위하여 여러 가지 모델이 제시되었고, 현재에는 모블-이모블모델로써 눈 속에서 용질의 이송을 설명하고 있다. 이번 리뷰논문에서는 모델의 발전과정을 설명하고 현재 진행되고 있는 눈 속에서의 용질 이송에 대한 연구를 소개하였으며 향후 국내에서도 수행될 수 있는 연구주제를 제시하였다.

주요어: 스노우팩, 융설, 용질의 이송, 모블-이모블모델

Jeonghoon Lee, Dong-Chan Koh and Hyerin Kim, 2014, A review on solute transport mechanisms in a snowpack. Journal of the Geological Society of Korea. v. 50, no. 5, p. 681-687

ABSTRACT: Transport mechanisms of solutes (ion or contaminant) in a snowpack in temperate regions are reviewed. In temperature regions, a seasonal snowpack accumulates and stores atmospherically derived chemical ions or contaminants from winter to spring and solutes are released with snowmelt to the watershed. Due to spring runoff in the mountainous areas, the acidification of the nearby lakes and streams has been reported, which is called the "ionic pulse". The major cause of the ionic pulse is attributed to the preferential elution of chemical impurities from a snowpack to the lake or stream during the earlier phase of snowmelt. Since solutes are positioned outside of the snow grains during snow metamorphism, they are easily washed out from the snow grains. Because the magnitude of ionic pulse relies on the solute transport mechanism, several mechanisms have been suggested. Among them, a mobile-immobile model can explain many features of the previous tracer experiments. In this review, solute transport mechanisms in a snowpack are introduced and suggested in near future in Korea.

Key words: snowpack, snowmelt, solute transport, mobile-immobile model

(Jeonghoon Lee and Hyerin Kim, Dept. of Science Education, Ewha Womans University, Seoul 120-750, Republic of Korea; Dong-Chan Koh, Groundwater Department, Korea Institute of Geosciences and Mineral Resources, Daejeon 305-350, Republic of Korea)

1. 서 론

온대지역(temperate region)에서는 겨울철에 눈(seasonal snow)이 내려 쌓여 있다가 봄이 되면서 갑자기 녹기 시작하여 많은 양의 융설(snowmelt)이 발생하며 북반구와 산악지역에서는 수자원으로서 중요한 역할을 하고 있다(Lee *et al.*, 2008a, 2008b, 2012a). 대기에서부터 건성침전(dry deposition)과 습성침전

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

(wet deposition)에 의해 용질(solute) 및 이온(ion)은 스노우팩(snowpack) 속에 저장되게 된다(Lee *et al.*, 2008b). 이렇게 저장된 용질 및 이온들은 융설과 함께 영양분(nutrient) 또는 오염원(contaminant)으로서 수계(watershed 또는 catchment) 및 생태계(ecosystem)로 이동하게 된다. 따라서 온대지역에서 융설은 봄철에 수계 및 생태계로 용질을 이동시키는 가장 중요한 요소 중의 하나이다(Feng *et al.*, 2001). 이로 인해 융설의 화학조성에 대한 연구는 지난 30여년 동안 꾸준히 이루어져 왔다(Harrington and Bales, 1998; Feng *et al.*, 2001; Lee *et al.*, 2008a).

겨울철에 쌓인 눈이 한꺼번에 녹으면서 수리학적으로는 지하수 및 하천(stream)을 충진(recharge)시키지만, 때로는 봄철 강우(rain-on-snow event)와 함께 홍수를 일으키기도 한다(Singh *et al.*, 1997; Lee *et al.*, 2012a). 화학적으로는 겨울철 눈에 쌓여 있던 이온(H^+, Cl^-, SO_4^{2-}, NO_3^-등)들이 한꺼번에 융설과 함께 배출(release)되면서 이온펄스(ionic pulse)라는 환경문제를 일으키기도 한다(Williams and Melack, 1991). 이온펄스는 눈 속에 포함되어 있는 이온들이 융설과 함께 균등하게 배출되는 것이 아니라 봄이 되어 눈이 녹기 시작할 때, 대부분의 이온들이 불균등하게 배출되는 현상을 뜻한다(Wolford *et al.*, 1996). 눈이 20~30% 정도 봄에 녹았을 때 이온의 70~80% 정도가 불균질하게 배출되는 것으로 알려져 있으며 이로 인해 호수(lake)나 하천의 산성도 및 이온의 농도를 급격하게 변화시킨다.

대기 중의 이온의 총량(loading)이 점점 늘어가는 추세이기 때문에(Wilkening *et al.*, 2000), 눈 속에서 이온이 이동하는 기작과 눈에서 배출되는 기작에 이해가 필요하다. 이는 봄철에 발생하는 수질변화를 예측하고 장기적으로 온대지역의 건강한 생태계를 유지하는 데 매우 중요하다. 따라서 이 논평에서는 눈 속에서 용질이 이동되는 기작과 관련된 연구결과를 소개하고 최근 해외 및 국내 연구동향과 전망에 대하여 소개하고자 한다. 이를 위해서 다음 장에서는 눈에서의 용질이동에 의해 관찰되었던 현상에 대하여 소개하고, 3장에서는 2장에서 관찰된 현상들을 설명하기 위한 용질이송기작(solute transport mechanisms)에 대한 연구를 제시하였다. 마지막장에서는 향후 국내에서 연구해야 할 방향을 제시하였다.

2. 눈에서의 용질 이동

2.1 이온펄스(ionic pulse)

앞 장에서도 언급했지만, 이온펄스는 대기에서

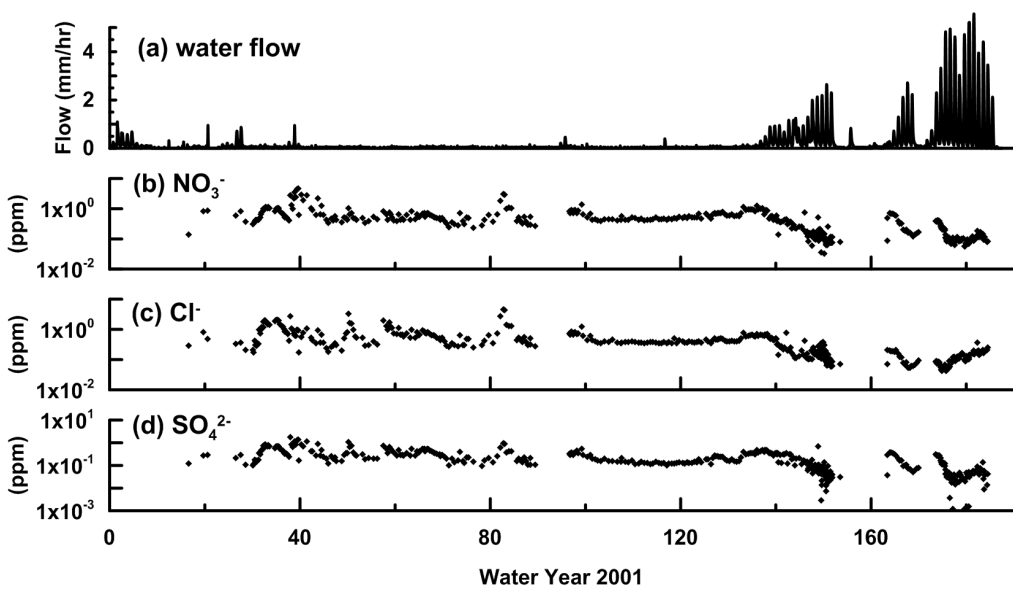

Fig. 1. Chemical compositions of snowmelt (NO_3^-, Cl^- and SO_4^{2-}) collected during the winter of 2001 at the Central Sierra Snow Laboratory. Day 1 starts November, 1st. The chemical compositions of snowmelt in the discharge are from the experiments by Lee *et al.* (2008b).

부터 유도되어 스노우팩(snowpack) 속에 저장되어 있던 이온들이 융설과 함께 불균등하게 배출되면서 발생되는 환경문제를 뜻한다(Johannessen and Henriksen, 1978; Tranter *et al.,* 1986; Harrington and Bales, 1998). 대부분의 이온들이 융설이 처음 발생될 때 한꺼번에 배출되면서 눈 속에서 호수 환경이나 하천으로 이동되게 된다. 20～30% 정도의 융설과 함께 70～80% 정도의 이온들이 불균등하게 배출되면서 산성도가 증가하고 이온들의 농도가 증가하게 되면서, 생태계에 큰 문제를 일으키게 된다(Harrington and Bales, 1998). 이온펄스의 원인은 눈의 재결정화(recrystallization) 또는 눈이 변성화(metamorphism) 될 때 눈 속에 들어 있던 용질 및 이온들이 얼음 결정의 바깥 경계부(exterior)에 위치하게 되면서 융설이 발생되어 눈 속을 지나 갈 때 융설과 함께 같이 용질이 쉽게 배출되는 것으로 알려져 있다(Harrington *et al.,* 1996). 따라서 눈이 얼고 녹는 과정(melt-freeze)을 반복하는 횟수가 많아지면 이온펄스에 의해 배출되는 이온 및 용질의 양이 더 많아질 것이라는 것을 알 수 있다(Bales *et al.,* 1989). 수계마다 이러한 산성의 융설을 중화(neutralization)시키는 정도가 다르기 때문에, 이러한 이온펄스에 대한 연구는 지역에 따라 연구방법이 달라 질 수 있다. 중화의 정도는 토양의 깊이, 토양내의 알칼리도 등에 따라 결정된다.

그림 1은 미국 캘리포니아 주 중앙시에라네바다 눈 연구소(Central Sierra Snow Laboratory)에서 지난 2001년(2000.11.1부터 2001.10.31까지)에 스노우팩의 기저부에서 채집 된 융설의 화학조성을 분석한 결과이다(Lee *et al.,* 2008b). 40일 정도까지 융설이 상대적으로 크게 발생될 때 농도가 크게 증가함을 알 수 있으며 82일에 이온들의 농도가 급격하게 증가함을 알 수 있다. 하지만 140일부터 융설의 양(그림 1a)이 증가하면서 농도가 급격하게 감소함을 알 수 있다(y축의 단위는 log). 따라서 대기에서부터 기원한 이러한 이온들은 스노우팩내에 존재하면서 초반 융설과 함께 스노우팩내에서 제거됨을 알 수 있다. 용질 및 이온이 제거된 후 융설의 이들에 대한 농도는 급격히 감소함을 알 수 있다. 즉, 눈 표면에서 생성된 눈 녹은 물이 눈 속을 통과할 때, 표면에서 융설의 양이 증가하게 되면 용질의 농도가 희석되기 때문이다.

2.2 생태학적인 중요성

온대지역에서, 겨울철부터 봄철까지 쌓여 있는 눈은 낮은 열전도도로 인해 표면과 대기의 열 교환을 감소시켜 기온이 낮은 겨울 동안 절연체(insulating blanket) 역할을 하기도 한다. 이로 인해 대기의 온도에 비해 눈 속의 온도는 그리 낮지 않아, 눈 밑에 식물들이 겨울에 얼어 죽지 않게 하는 역할을 하고 있다(Lee and Ko, 2011). 또한 봄에 눈이 녹으면서 식물에게 필요한 수분 및 영양분을 공급하고 있다. 하지만 산악지역(alpine basin)은 식물성장을 저해하는 여러 가지 요인(multiple stresses)이 존재한다. 예를 들어, 낮은 온도, 바람의 세기가 세며 성장할 수 있는 시기가 짧다. 따라서 산악지역의 생태계는 다른 생태계에 비해 질소(N)을 효과적으로 사용할 수 있는 것으로 알려져 있다(Williams *et al.,* 1995).

숲 생태계에 질소 및 황(S)의 침전(deposition)에 대한 연구는 수십 년 째 이루어져오고 있지만, 이 원소들의 순환에 대한 이해가 가장 부족한 부분이 겨울 동안 눈 속에서 질소와 황의 증가 및 감소를 조절하는 기작이다(Campbell *et al.,* 2006). 하지만, 겨울철을 지나 봄철까지 생물학적인 동화작용, 즉 식물에 의한 섭취(uptake)되는 양이 최저이며, 융설에 의해 지하수 또는 유출의 양이 온대지역의 숲에서는 최대로 증가한다. 하천에서 질소 및 황의 형태는 질산염(NO_3^-)과 황산염(SO_4^{2-})이 가장 우점종(dominant species)이며, 질산염과 황산염이 가장 많이 하천으로 빠져 나가는 시기이다. 하천에서 질산염과 황산염의 농도는 최대로 이르게 되는데, 봄철강우와 융설에 의해 이온펄스를 일으키게 되는 주요 원인이 된다. 또한, 순간적인 pH의 감소로 인해 무기질의 알루미늄(Al)의 농도가 증가하게 되어 생태계에 위협이 되기도 한다(Lee, 2014). 질소와 황의 기원 및 종의 변화를 살펴보기 위해 주로 안정동위원소가 사용되지만(Campbell *et al.,* 2006), 이는 본 논평의 범위를 벗어나므로 다루지 않았다.

이온펄스의 타이밍(timing) 및 규모와 질소를 포함하는 생태계에 영향을 줄 수 있는 이온의 이송은 스노우팩 내에서 용질의 이송기작에 모두 영향을 받고 있으며 이러한 용질의 이송기작을 설명하기 위해 1980년대부터 여러 모델이 제시되었다. 용질의 이송기작에 대한 연구결과 및 제시되었던 모델을 이용한 연구결과를 다음 장에서 소개하고자 한다.

3. 눈 속에서의 용질의 이송기작에 대한 연구

앞 장에서 스노우팩 내에서의 용질 또는 이온의 이동에 대한 기작을 이해하는 것이 산악지역에서의 물질 순환 및 환경문제를 이해 또는 해결하는 데 중요한 역할을 한다는 것을 제시하였다. 이번 장에서는 이러한 눈 속에서의 용질 이동을 설명하기 위하여 제시되었던 모델에 대하여 고찰해 보기로 한다.

3.1 스노우팩내에서의 용질이송기작을 위한 모델

비포화대(unsaturated) 내에서 용질의 기작은 비포화대 수리지질학(vadose zone hydrogeology)에서도 많은 관심을 받는 분야이다. 눈은 기본적으로 불포화다공질매질(unsaturated porous medium)이므로, 비포화대 수리지질학에서 쓰는 기본 개념을 이용하여 용질의 이송을 설명하기 시작하였다(Colbeck, 1981). Colbeck (1972)은 최초로 균질한 눈 속을 흐르는 물의 수학적인 방정식을 제시하였으며, 스노우팩에서의 일차원 유동방정식은 질량보존(mass conservation)의 법칙을 이용하여 다음과 같이 유도된다.

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

$$K=\frac{\rho_w k g}{\mu} \tag{2}$$

여기에서 ϕ는 공극률, S_i는 더 이상 줄일 수 없는 물(irreducible water), S는 유효포화도(effective water saturation), K는 수리전도도, t는 시간, n은 지수(n=3, Wankiewicz, 1978), k는 고유투수율(intrinsic permeability), μ는 점도, ρ_w는 물의 밀도, g는 중력가속도이고 z는 수직방향의 거리이다. 융설이 눈 속에서 흐르는 속도 (u)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$u=\frac{KS^n}{\phi(S_w-S_i)}=\frac{KS^{n-1}}{\phi(1-S_i)} \tag{3}$$

용질의 이송식은 Hibberd (1984)에 의하여 제시되었으며 그 지배방정식(governing equation)은 다음과 같다(그림 2a).

$$S\frac{\partial C_m}{\partial t}+\frac{\partial(uSC_m)}{\partial z}=\frac{\partial}{\partial z}\left(SD\frac{\partial C_m}{\partial z}\right) \tag{4}$$

여기에서 C_m은 융설에 있는 용질의 농도를 나타내며 D 는 분산계수이다. Hibberd (1984)에서는 식 (1)과 (4)를 이용하여 분산계수를 변수(fitting parameter)로 취급하였다. 대부분의 이온펄스의 특징, 즉, 융설의 초반부에 대부분의 이온들이 스노우팩을 빠져 나가는 것을 모사하였다.

Hibberd (1984)가 제시한 모델은 이온펄스를 정량적으로 모사할 수 없었으며, 용질이 도달한 후 용질의 농도가 길게 늘어지는 것(long tail)을 모사할 수 없었다. 지하수학(subsurface hydrology)이 제시한 새로운 용질이송모델, 즉 모블-이모블모델(mobile-immobile model, MIM)을 Harrington and Bales (1998)에서 처음으로 시도하였으며 그 지배방정식은 아래의 식 (5), (6)과 같다. MIM을 이용하여 Hibberd (1984)의 모델이 구현할 수 없었던 점들을 모사할 수 있다. MIM에서는 물(liquid water)의 영역을 두 부분(모블, 이모블)으로 나눈다(그림 2b). 모블영역(mobile region)은 아래로 흐를 수 있다는 것이 이모블영역(immobile region)과의 차이점이며 이모블의 농도는 모블과의 일차반응(first-order kinetics)으로 조절될 수 있다(Bajracharya and Barry, 1997; Griffioen *et al.*, 1998).

$$\frac{\partial(SC_m)}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial z}\left(SD\frac{\partial C_m}{\partial z}\right)-\frac{\partial}{\partial z}(uSC_m)+\frac{\omega}{\phi(1-S_i)}(C_i-C_m) \tag{5}$$

$$\frac{\partial C_i}{\partial t}=\frac{\omega}{\phi S_i}(C_m-C_i) \tag{6}$$

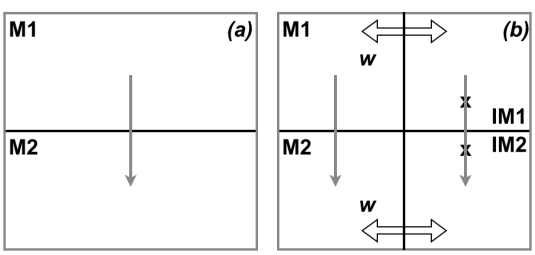

Fig. 2. Conceptual diagrams of solute transport in a snowpack (a) diffusion-advection model (b) mobile-immobile water model. x indicates water does not flow in the direction.

여기에서 C_m과 C_i는 각각 mobile water 영역 및 immobile water의 영역에 있는 용질의 농도를 나타내며 ω는 mobile과 immobile water의 교환속도상수(exchange coefficient)이다. 교환속도상수는 Harrington and Bales (1998)에서는 일정하다고 가정하였으며 그 값은 $4\times10^{-6}s^{-1}$으로 보고되었다. 일정한 교환상수를 이용하여, 모블상의 용질의 농도와 눈 속에서의 물의 속도(flow rate)가 음의 상관관계, 즉 속도가 증가하면 용질의 농도가 감소함을 보였다.

희토류원소(rare earth elements)를 이용하여 인공강우실험(artificial rain-on-snow experiments)을 통해 Feng *et al.* (2001)의 연구에서는 물의 속도와 용질의 농도가 음의 상관관계가 아닌 양의 상관관계임을 발견하였다. 눈이 올 때 눈 표면에 매번 다른 희토류 원소를 분사(spray)하였다. 이로 인해, 추적자들이 대부분 이모블상에 존재하게 된다. 이 실험결과를 모사하기 위해, 같은 모델을 이용하였지만 교환상수를 일정하게 하지 않고 물의 속도와 연동시켜 실험에서 발견된 양의 상관관계를 모사할 수 있었다. 용질 및 이온들이 이모블상에 존재하게 되면, 물의 속도가 증가할 때 교환상수가 증가하지 않는다면 이모블상에서 모블상으로 이동된 용질의 농도는 증가된 물에 양에 의해 희석(dilution)될 수 밖에 없고, 이로 인해 물의 속도가 증가할 때 농도는 감소하는 음의 상관관계를 보일 수 밖에 없게 된다. 반대로, 교환상수가 물의 속도와 함께 증가하게 된다면 용질의 농도가 물의 속도와 함께 증가하여 양의 상관관계를 나타나게 된다. 따라서, Harrington and Bales (1998)의 모델을 이용해서는 Feng *et al.* (2001)에서 나타난 용질과 물의 속도간의 관계를 설명할 수 없게 된다.

Lee *et al.* (2008a)에서는 Feng *et al.* (2001)에서 제시한 사실, 교환상수가 일정한 것이 아니라 물의 속도와 연동되어 계속 변하다는 것을 이용하여 용질의 농도와 물의 속도의 두 상관관계를 모두 모사할 수 있었다. 비반응추적자(conservative tracer)를 이용하여 멜트 팬(melt pan) 주변에 물탱크를 설치하고 추적자와 물을 섞어 눈 표면에 물을 뿌려 눈 기저부에서 융설의 농도를 측정하여 모델의 결과와 비교하였다. 이로 인해, 추적자는 대부분 모블상에 존재하게 된다. Feng *et al.* (2001)의 연구에서는 식 (1)의 S를 일정하다고 가정하였으므로 다양한 수리학적인 조건(hydrological conditions)을 모사할 수 없었으나 Lee *et al.* (2008a)과 Lee *et al.* (2008b)에서는 수치적으로 식 (1)를 풀어 S를 계산하여 다양한 수리학적인 조건을 고려할 수 있었다. 물의 속도가 증가하게 되면 모블상에 있던 추적자들이 이모블상으로 이동하게 되어 모블상의 추적자의 농도가 감소하게 된다. Lee *et al.* (2008a)과 Lee *et al.* (2008b)에서 개발된 모델은 Lee (2012a)와 Lee (2012b)의 연구를 통하여 검증되었다. 다양한 수리학적인 조건을 고려할 수 있기 때문에, 인공강우실험에서 나타난 여러 번의 농도감소를 잘 모사할 수 있었다.

3.2 이중공극모델(dual porosity model)

Lee *et al.* (2008a)과 Lee *et al.* (2008b)에서 개발된 모델은 Feng *et al.* (2001)과 Lee *et al.* (2008a)에서의 현장실험결과를 대부분 잘 모사할 수 있었다. 하지만, Lee *et al.* (2008b)에서는 이 모델에서 구현할 수 없었던 여러 현상을 논의하였다. 먼저, Lee *et al.* (2008a)에서는 눈 속에서 선택류(preferential flow)의 존재로 인해 현장의 실험에서 관찰되는 현상을 모사할 수 없었다. 선택류의 존재로 인해, 인공강우실험 후에 모델결과보다 빠른 농도감소 및 농도증가를 보였지만, 모델에서는 이러한 것을 고려하지 않았기 때문에 모사할 수 없었다. 전체적인 매트릭스 플로우(matrix flow)가 도착하기 전에 선택류에 의해 눈의 기저부에 빠르게 도달하는 것으로 실험에서 관찰된 사실을 설명할 수 있다.

Lee *et al.* (2008b)에서는 물의 속도가 증가할 때 추적자의 농도가 증가하는 양의 관계를 수치적으로 모사하였지만, 일반적인 초기조건(initial condition)으로는 모사하지 못하였다. 관찰된 추적자의 농도를 모사하기 위하여 초기조건을 바꾸어서 융설의 속도가 증가할 때 이모블상의 농도를 증가시키고 속도가 감소할 때 이모블상의 농도를 감소시키는 조건으로 바꾸어 수치모의를 시도하였고 합리적(reasonable)으로 관찰된 결과를 모사하였다. 식(1)은 단일공극모델(single porosity model)의 지배방정식이며 융설의 이동을 설명하는 데 많이 이용되어 왔다. 식(1)에서는 모블상의 물만 아래로 흐르고 이모블상의 물은 그대로 존재한다(그림 2b). 하지만, 위에서 언급한 초기조건은 마치 이모블상의 농도를 모델속에서 "있다 없다(turned on and off)" 하는 것처럼 가정하였을 때 실험에서 관찰된 현상을 설명할 수 있다.

이모블상의 물이 그 자리에 그대로 있는 것이 아니라 모블상의 물처럼 같이 아래로 흘러야만 이와 같은 모델결과를 물리적으로 설명할 수 있다. 이는 최근 지하수학에서 제기되고 있는 이중공극모델에서 사용하고 있는 개념이다(Haws *et al.*, 2004; Schwartz *et al.*, 2000). 그림 3은 이중공극모델의 개념을 나타낸 그림이며, 그림에서 화살표의 크기는 투수율의 차이를 나타냈으며 개념적으로 모블상의 물이 이모블상의 물보다는 눈 속에서 더 잘 흐르는 것으로 나타내었다. 향후 눈 속에서의 용질 이송에 대한 연구를 수행하기 위해서는 새로운 모델을 개발할 필요가 있을 것으로 판단된다.

4. 국내 연구전망 및 과제

강설층에 축적된 대기 기원의 용질 및 이온은 봄에 융설에 의해 수계 및 생태계로 이동하여 오염원이 되거나 필요한 영양물질이 될 수 있어 수리학적으로나 생태학적으로 중요하다. 겨울철에 대부분의 수증기가 시베리아에서 기원하여 중국의 대도시 및 산업시설이 밀집된 지역을 통과하여 한반도에 도달하게 된다(Lee *et al.*, 2013). 이러한 관점에서, 한반도에 내리는 겨울철 눈의 화학적 조성을 연구해야 할 필요가 있으며, 또한 이러한 화학조성이 수계 및 생태계에 어떤 영향을 주는가에 대한 환경평가도 필요한 시점이다. 강설에 의한 용질 공급을 포함하여 한반도의 수계 내에서 눈에 의해 질소 및 황의 순환이 생태계에 어떻게 영향을 미치는 가에 대한 연구가 필요하다.

국내에서는 이온이 눈에 침전(deposition)되어 생태계에 어떻게 들어가게 되는지, 또한 수계에 어떻게 들어가게 되는 지에 대한 연구가 거의 없는 실정이며, 실험을 수행할 수 있는 연구지역 및 눈 연구실(snow laboratory)도 없는 실정이다. 해외에서는 대기에서 눈과 함께 침전된 유기물이 눈 속에서 어떻게 이동하는 지에 대한 연구도 시작되고 있다(Meyer and Wania, 2011). 국내에서도 제주지역, 울릉도지역, 강원지역에서는 눈에 의한 겨울철 물순환 및 물질순환이 클 것이라고 예상되지만 현재까지 연구 된 것이 없다. 눈에 대한 연구를 수행하기 위해서는 연구지역에서 실험을 수행할 수 있는 눈 연구실이 필수적이다. 눈 시료를 겨울철동안 일회성이 아니라 꾸준히 채취할 수 있는 연구 기반이 마련되어 눈에 의해 한반도에 들어오고 나가는 이온 및 오염물질의 양에 대한 체계적인 모니터링이 필요하다.

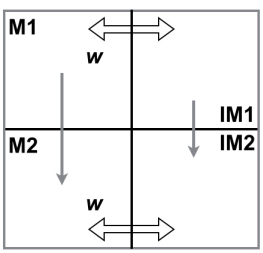

Fig. 3. Conceptual diagram of a suggested model for solute transport in a snowpack (a dual porosity model).

사 사

이 연구는 극지연구소 "국내 학·연 극지진흥 프로그램(Polar Academic Program, PAP)" 지원 및 한국지질자원연구원의 주요사업인 "수리생태학적 기법을 활용한 수권 경계면에서 물질 순환 평가 기술 개발(14-3211-2)" 과제의 일환으로 이루어졌습니다. 논문을 심사해 주신 3분의 심사위원님들께 감사드립니다.

REFERENCES

Bajracharya, K. and Barry, D.A., 1997, Nonequilibrium solute transport parameters and their physical significance: Numerical and experimental results. Journal of contaminant hydrology, 24, 185-204.

Bales, R.C., Davis, R.E. and Stanley, D.A., 1989, Ion elution through shallow homogeneous snow. Water Resources Research, 25, 1869-1877.

Campbell, J.L., Mitchell, M.J. and Mayer, B., 2006, Isotopic assessment of NO_3^- and SO_4^{2-} mobility during winter in two adjacent watersheds in the Adirondack Mountains, New York. Journal of Geophysical Research, 111, G04007, doi: 10.1029/2006JG000208.

Colbeck, S.C., 1972, A theory of water percolation in snow. Journal of Glaciology, 11, 369-385.

Colbeck, S.C., 1981, A simulation of the enrichment of atmospheric pollutants in snow cover runoff. Water Resources Research, 17, 1383-1388.

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 tracers and

artificial rainstorms on snow. Water Resources Research, 37, 1425-1435.

Griffioen, J.W., Barry, D.A. and Parlange, J.Y., 1998, Interpretation of two-region model parameters. Water Resources Research, 34, 373-384.

Harrington, R. and Bales, R.C., 1998, Modeling ionic solute transport in melting snow. Water Resources Research, 34, 1727-1736.

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.

Haws, N.W., Das, B.D. and Rao, P.S., 2004, Dual-domain solute transfer and transport processes: Evaluation in batch and transport experiments. Journal of contaminant hydrology, 75, 257-280.

Hibberd, S., 1984, A model for pollutant concentrations during snow-melt. Journal of Glaciology, 30, 58-65.

Johannessen, M. and Henriksen, A., 1978, Chemistry of snow meltwater: changes in concentration during melting. Water Resources Research, 14, 615-619.

Lee, J., 2012a, Development of mathematical model for both solute transport in snow and isotopic evolution of snowmelt. Journal of Soil and Groundwater Environment, 17, 31-39 (in Korean with English abstract).

Lee, J., 2012b, Validations of a numerical model of solute transport in a snowpack. Economic and Environmental Geology, 45, 525-533.

Lee, J., 2014, Use of multivariate statistical approaches for decoding chemical evolution of groundwater near underground storage caverns. Journal of the Korean Earth Science Society, 35, 225-236 (in Korean with English abstract).

Lee, J. and Ko, K.S., 2011, An energy budg*et al*gorithm for a snowpack-snowmelt calculation. Journal of Soil and Groundwater Environment, 16, 82-89 (in Korean with English abstract).

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, doi: 10.1029/2006WR005477.

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.

Lee, J., Worden, J., Koh, D.C., Yoshimura, K. and Lee, J.E., 2013, A seasonality of δD of water vapor (850-500 hPa) observed from space over Jeju Island, Korea. Geosciences Journal, 17, 87-95.

Meyer, T. and Wania, F., 2011, Modeling the elution of organic chemicals from a melting homogeneous snow pack. Water Research, 45, 3627-3637.

Schwartz, R.C., Juo, A.S.R. and McInnes, K.J., 2000, Estimating parameters for a dual-porosity model to describe non-equilibrium, reactive transport in a fine-textured soil. Journal of Hydrology, 229, 149-167.

Singh, P.G., 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.

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.

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.

Wolford, R.A., Bales, R.C. and Sorooshian, S., 1996, Development of a Hydrochemical Model for Seasonally Snow-Covered Alpine Watersheds: Application to Emerald Lake Watershed, Sierra Nevada, California. Water Resources Research, 32, 1061-1074.

투 고 일 : 2014년 9월 11일
심 사 일 : 2014년 9월 16일
심사완료일 : 2014년 9월 30일