

해저 하구의 지하수 중 콜로이드 상 ^{210}Pb 과 ^{210}Po 의 중요성

김태훈^{1,*} · 김인태²

¹University of South Carolina, Biological Science Department, Marine Science Program,
Columbia, South Carolina 29208, USA.

²한국해양과학기술원 부설 극지연구소 극지해양환경연구부

Importance of Colloidal ^{210}Pb and ^{210}Po in Groundwater of Subterranean Estuary

TAE-HOON KIM^{1,*} AND INTAE KIM²

¹University of South Carolina, Biological Science Department, Marine Science Program, Columbia, South Carolina 29208, USA

²Division of Polar Ocean Environment, Korea Polar Research Institute (KOPRI), KIOST, Incheon 406-840, Republic of Korea

해저 하구의 지하수 중 콜로이드 상 ^{210}Pb (반감기: 22.2년)과 ^{210}Po (반감기: 138일)의 분포 특성을 알아내기 위해 서, 용존 상(<10 kDa)과 콜로이드 상(10 kDa-0.45 μm)의 ^{210}Pb 과 ^{210}Po 시료를 채취하여 측정하였다. 함평만(2010년 7월)과 제주도(2011년 1월)의 연안 지하수 중 용존 상 ^{210}Pb 의 농도는 0.21-2.52 mBq L^{-1} 범위를 보였고, 콜로이드 상에서는 0.10-1.71 mBq L^{-1} 범위를 보였다. 용존 상 ^{210}Po 의 농도는 0.12-2.07 mBq L^{-1} 범위를 보였고, 콜로이드 상에서는 0.03-0.97 mBq L^{-1} 범위를 보였다. 총 용존 상에서 콜로이드 상 ^{210}Pb 과 ^{210}Po 의 비율은 각각 $40\pm 5\%$ 와 $28\pm 5\%$ 를 차지하였다. 이 결과는 해저를 통한 미량 원소의 해양 유출에 콜로이드가 중요한 역할을 한다는 것을 나타낸다.

In order to evaluate the distributions of colloidal ^{210}Pb (half life = 22.2 years) and ^{210}Po (half life = 138 days) in subterranean estuary, we have measured ^{210}Pb and ^{210}Po , for the first time, in the total dissolved (<0.45 μm), true dissolved (<10 kDa), and colloidal (10 kDa-0.45 μm) phases in subterranean estuary of Hampyeong Bay in July 2010 and of Jeju Island in January 2011. The ^{210}Pb and ^{210}Po activities in groundwater were in the ranges of 0.21-2.52 mBq L^{-1} and 0.12-2.07 mBq L^{-1} for true dissolved phase and 0.10-1.71 mBq L^{-1} and 0.03-0.97 mBq L^{-1} for colloidal phase, respectively. The proportions of the colloidal phase to the total dissolved phase were $40\pm 5\%$ for ^{210}Pb and $28\pm 5\%$ for ^{210}Po in groundwater. This result indicates that colloids may play an important role in transporting trace elements through subterranean estuary into the coastal ocean.

Key words: Subterranean estuary, ^{210}Pb , ^{210}Po , Colloid, Trace elements

서 론

자연방사성 핵종인 ^{210}Pb (반감기: 22.2년)과 ^{210}Po (반감기: 138일)는 ^{238}U 의 붕괴계열에 속한다. ^{210}Pb 은 어미핵종인 ^{226}Ra (반감기: 1620년)의 방사붕괴에 의해 생성되고, ^{210}Po 은 어미핵종인 ^{210}Pb 의 방사붕괴에 의해 생성된다. 일반적으로 해양에서 ^{210}Pb 과 ^{210}Po 은 입자에 의해 잘 제거되며, ^{210}Po 은 생물체에 의해서도 잘 흡수되고 재생된다고 알려져 있다(Wei and Murray, 1994; Kim, 2001; Stewart *et al.*, 2005). 이로 인해, 해양 표층수에서 어미핵종인 ^{210}Pb 과 딸핵종인 ^{210}Po 의 방사비평형(disequilibrium) 정도로부터 상부

층에서 입자제거속도(Cherry *et al.*, 1975; Cochran *et al.*, 1983; Fowler and Knauer, 1986; Nozaki *et al.*, 1997; Swarzenski *et al.*, 1999; Masqué *et al.*, 2002) 및 입자성 유기 탄소의 공급량(Shimmield *et al.*, 1995; Friedrich and Rutgers van der Loeff, 2002; Murray *et al.*, 2005; Stewart *et al.*, 2010)에 대한 많은 연구가 수행되었다. 최근, Kim and Kim (2012)는 해수 중에서 콜로이드(colloid) 상의 ^{210}Pb 과 ^{210}Po 의 농도를 측정하였고 체류시간을 계산한 결과, 생물에 필수적인 미량 원소(trace elements)들이 콜로이드에 의해 아주 오랫동안(63일) 재순환되기 때문이라는 것을 밝혀내었다.

해저 하구(subterranean estuary)는 해저 퇴적층 내에서 담 지하수(fresh groundwater)와 재순환된 해수(recirculating seawater)가 만나 혼합되는 지역으로 정의된다(Moore, 1999). 퇴적층 내 공급

수가 해저 하구에서 해수와 만나게 되면, 급격한 pH 및 용존 산소의 농도 변화로 인해 용존 유기 물질(dissolved organic matter)과 미량 원소의 생성과 제거에 영향을 미치게 된다(Charette and Sholkovitz, 2002; Swarzenski *et al.*, 2006; Kim *et al.*, 2012; Kim *et al.*, 2013). 이로 인해 지하수를 통해 연안 해역으로 공급되는 이들 화학 성분의 양이 결정되므로 해저 하구 내에서 지구화학적 특성에 대한 연구는 매우 중요하다.

Sañudo-Wilhelmy *et al.* (2002)에 의하면, 미국 Long Island의 지하수 중 총 용존 상(total dissolved)의 미량 원소는 대부분 콜로이드 상이며, 이는 humic 물질(substance)과 밀접한 관계가 있음을 보고하였다. 일반적으로, 콜로이드는 용존 유기 물질에서 매우 큰 부분을 차지하고 있어 전 지구적 탄소순환에 중요한 역할을 한다(Guo and Santschi, 1997). 또한, 콜로이드는 다양한 착화물(complex)을 형성하기 때문에 입자와의 흡착이 강한 미량 원소 및 방사성핵종의 생지화학적 순환에 영향을 미친다고 알려져 왔다(Guo and Santschi, 1997). 그러나, 외양에 비해 해저 하구는 상대적으로 접근성이 낮을 뿐만 아니라 육상기원, 해양기원, 생물기원, 자생적 광물의 침전 등에 의한 퇴적물이 혼재되어 있는 환경이기 때문에, 해저 하구 내에 존재하는 많은 화학종들의 생지화학적 특성과 콜로이드 상 거동에 관해서는 자세히 밝혀지지 않았다. 그러므로, 본 연구에서는 해저 하구 내에서 용존 상(true dissolved phase)과 콜로이드 상(colloidal phase)의 ^{210}Pb 과 ^{210}Po 농도를 측정하여, 미량 원소의 해양 유출에 콜로이드의 중요성을 평가하였다.

재료 및 방법

조사지역

대한민국 서해 남부에 위치한 함평만은 총 면적이 약 85 km² 이르는 반 폐쇄성 만으로 약 50% 이상이 조간대로 이루어져 있다. 만 내의 표층퇴적상은 대부분 세립한 니질 퇴적상으로 분포되어 있다(Kim *et al.*, 2012). 만 안으로는 큰 강의 유입이 없으며, 조석은 만일주조의 특징을 보인다. Waska and Kim (2011)에 의하면, ^{226}Ra 수치모델을 이용하여 계산한 해저 지하수 유출량은 4.3-10×10⁹ m³ yr⁻¹ 이었다.

대한민국 남해에 위치한 제주도는 총 면적이 약 1,830 km² 이르는 화산섬으로 90% 이상이 투수성이 높은 다공질의 현무암과 조면암으로 이루어져 있다. Kim *et al.* (2003)에 의하면, 제주 연안에서 수동 seepage meter를 사용하여 측정한 해저 지하수 유출(submarine groundwater discharge; SGD) (50-300 m yr⁻¹)은 일반 대륙 연안(0.03-40 m yr⁻¹)보다 매우 높은 수준으로 보고 되었다. 제주도 전 지역에서 해저를 통해 유출되는 담 지하수와 재순환된 해수를 계산한 결과, 서부지역(1.3×10⁹ m³ yr⁻¹)에서는 동부지역(0.2×10⁹ m³ yr⁻¹)에 비해 담 지하수 유출량이 많은 반면, 동부지역에서는 재순환된 해수가 해저를 통해 유출되는 지하수의 대부분을 차지하는 것으로 나타났다.

시료채취 및 분석항목

본 연구에서는 연안 지하수 시료를 함평만에서 2010년 7월에 2개(정점 1, 2) 제주도에서 2011년 1월에 5개(정점 3, 4, 5, 6, 7) 정점에서 채취하였다(Fig. 1). 연안 지하수 시료는 간조 시 들어난

부분에 약 50 cm 깊이의 얇은 우물을(shallow-well) 만든 후, 차오르는 물(seeping groundwater)을 플라스틱 비커를 사용하여 2-3 번 걸러낸 후, 다시 차오른 지하수를 채취하였으며, 휴대용 염분계(portable salinometer, Professional, YSI)를 이용하여 현장에서 직접 염분을 측정하였다. 지하수 중 ^{210}Pb 과 ^{210}Po 은 아주 낮은 농도로 존재하기 때문에 약 30 L의 시료를 채취하여 약 0.45 μm (Millipore, mixed cellulose ester) 여과지로 여과한 후, 10 L에 대해서 총 용존 상 ^{210}Pb 과 ^{210}Po 을 측정하고, 나머지 20 L은 용존 상과 콜로이드 상 ^{210}Pb 과 ^{210}Po 을 분리하는데 사용하였다.

용존 상 및 콜로이드 상 ^{210}Pb 과 ^{210}Po 분리

여과한 20 L은 Tangential (cross)-flow filtration (TFF) system (PLCGC, Pellicon)을 이용하여 콜로이드 상과 용존 상 ^{210}Pb 과 ^{210}Po 을 분리하였다. TFF 장치를 사용하여 콜로이드 상을 분리하기 전후에 1 M 염산(Samchun co.), 10 L 증류수, 0.5 M 수산화나트륨(Merck co.), 10 L 증류수 순으로 세척하여 준다. 분리 시 유속은 분당 1L로 조절한다. 용존 상과 콜로이드 상의 분리 과정에서 발생하는 손실(loss)을 알아내기 위하여 용존 상과 콜로이드 상 ^{210}Pb 과 ^{210}Po 의 각각 측정값과 콜로이드를 분리하지 않은 총 용존 상 측정값을 비교하였다. 본 연구에서는 제주도 시료(n=5)를 이용하여 TFF 장치의 회수율을 계산한 결과, ^{210}Pb 은 92에서 107%(평균: 101±6%), ^{210}Po 은 85에서 105%(평균: 98±8%) 범위의, 매우 좋은 회수율을 보였다(Fig. 2).

^{210}Pb 과 ^{210}Po 농도 측정

약 10-20 L 정도의 시료에 녹아 있는 ^{210}Po 과 ^{210}Pb 을 Fe과 공침시켜 농축시켰다. 농축된 ^{210}Po 은 0.5 M HCl 용액에 녹여, 은판에 plating시킨 후, 알파계측기(Canberra co.)를 이용하여 측정하였다. 그리고 ^{210}Po 의 어미 핵종인 ^{210}Pb 은 ^{210}Pb 시료에서 ^{210}Po 을 완전히 제거한 후 수개월 후에 생성된 ^{210}Po 의 양을 측정하여 알아내었다. 이때, ^{210}Po 은 ^{209}Po 를 화학적 회수율 추적자로, ^{210}Pb 은 안정 Pb를 화학적 회수율 추적자로 이용하였다.

결과 및 고찰

연안 지하수 중 ^{210}Pb 과 ^{210}Po 의 분포

함평만에서 채취한 연안 지하수 중 염분은 28-30 범위였으며, 제주도에서 채취한 연안 지하수 중 염분은 1-30 범위로 담 지하수(n=2)와 염 지하수(n=3)의 특징을 나타내었다(Table 1).

함평만과 제주도 연안 지하수에서의 ^{210}Pb 농도는 용존 상에서 0.21-2.52 mBq L⁻¹ 범위를 보이고, 콜로이드 상에서는 0.10-1.71 mBq L⁻¹ 범위를 보였다. ^{210}Po 농도는 용존 상에서 0.12-2.07 mBq L⁻¹ 범위를 보이고, 콜로이드 상에서는 0.03-0.97 mBq L⁻¹ 범위를 보였다. 본 연구지역에서의 총 용존 상의 ^{210}Pb 과 ^{210}Po 의 농도는 브라질의 Guarani 지하수 중 농도(^{210}Pb : <7 mBq L⁻¹, ^{210}Po : <2 mBq L⁻¹) (Bonotto and Bueno, 2008)와 비슷하였다. 또한, 해저 하구 지하수 중 ^{210}Pb 농도는 ^{210}Po 보다 최대 80%까지 높았다. 이런 특징은 다양한 지역의 연안지하수 중에서도 나타났다(Ruberu *et al.*, 2007; Bonotto and Bueno, 2008). 일반적으로, ^{210}Po 농도가 ^{210}Pb 농도보다 상대적으로 낮은 것은 ^{210}Po 이 ^{210}Pb 에 비해 무기 입자(particulate

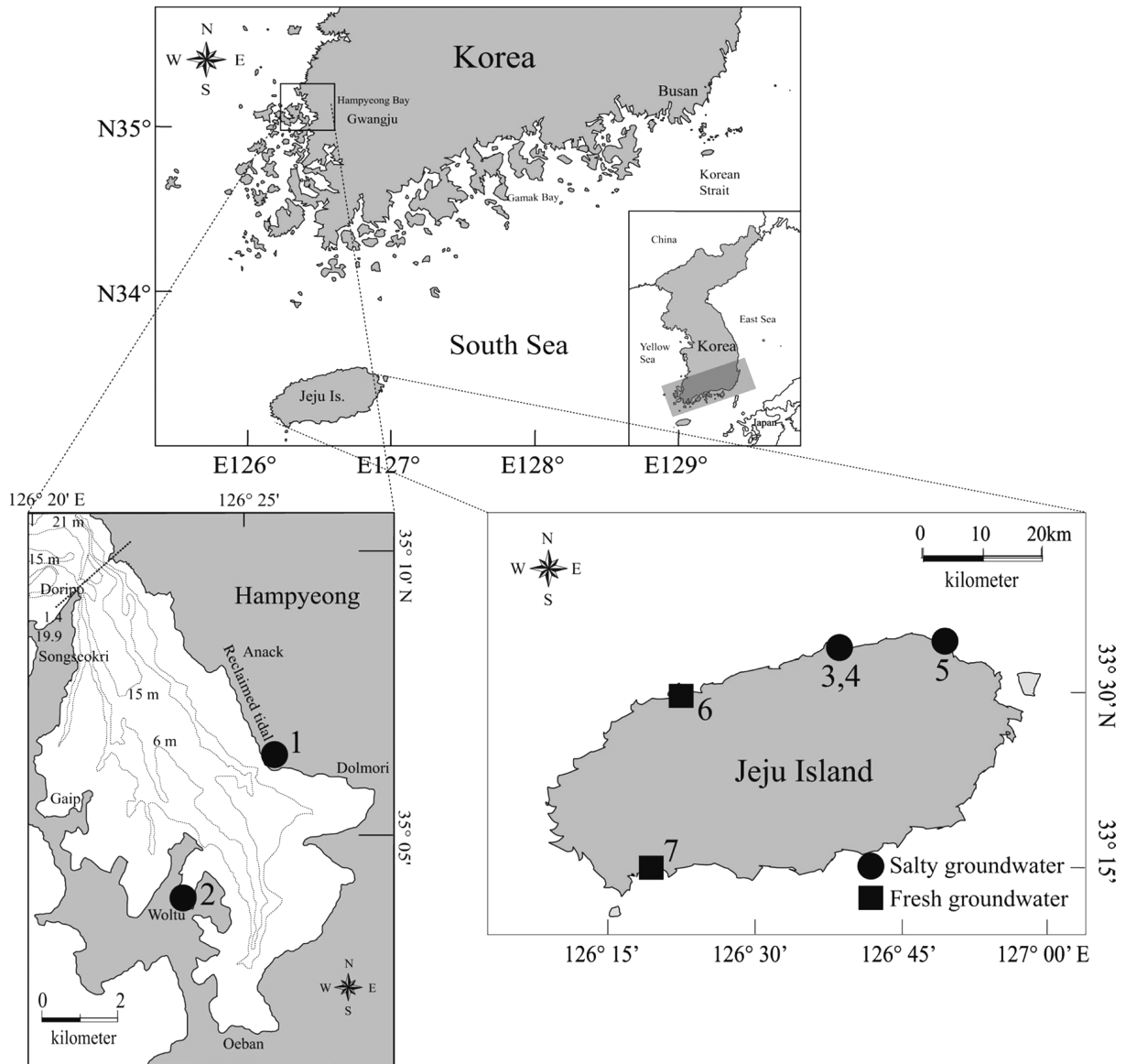


Fig. 1. Map showing sampling stations in Hampyeong Bay and Jeju Island.

matter)에서 높은 제거속도상수(k)을 보이기 때문이다(Kadko, 1993). Kim et al. (2011)은 지하수 내에서 ^{210}Po 농도는 5 mBq L^{-1} 보다 낮으며, 이는 입자와의 강한 흡착 때문이라고 보고하였다. 이와 같이 본 연구지역에서도 ^{210}Po 농도가 낮고 어미핵종에 비해 부족량을 보이는 것은 지하 대수층에서 입자와의 강한 흡착 때문일 것으로 판단된다.

제주도 연안에서 담 지하수와 염 지하수(염분 20-30)에서 용존상과 콜로이드 상 ^{210}Pb 과 ^{210}Po 농도가 다르게 나타났다. 담 지하수(정점 6, 7)에서 평균 ^{210}Pb (용존 상: 0.27 mBq L^{-1} , 콜로이드 상: 0.14 mBq L^{-1})과 ^{210}Po (용존 상: 0.13 mBq L^{-1} , 콜로이드 상: 0.05 mBq L^{-1})농도가 염 지하수(정점 3, 4, 5)에서 보다 약 10배 정도 더 낮았다. 일반적으로, 이온 강도(ionic strength)가 증가할수록 용존 유기 물질의 응집력(aggregation)이 증가한다고 알려져 있다(Pan et al., 2008). 이와 같이, 염 지하수에서 상대적으로 높은 용

존 상과 콜로이드 상 ^{210}Pb 과 ^{210}Po 농도를 보이는 것은 염분의 영향에 의한 이온 강도 때문이라 판단된다.

연안 지하수 중 콜로이드 상 ^{210}Pb 과 ^{210}Po 의 분포특성

연안 지하수에서 총 용존 상에서 용존 상과 콜로이드 상 ^{210}Pb 이 차지하는 비율은 각각 54-69%(평균: $60\pm 5\%$)와 31-46%(평균: $40\pm 5\%$)범위를 보였고(Fig. 3), ^{210}Po 은 각각 65-79%(평균: $72\pm 5\%$)와 21-35%(평균: $28\pm 5\%$)범위를 보였다(Fig. 4). 최근 Kim and Kim의 (2012) 결과에 의하면, 동해 표층 수 중 콜로이드 상 ^{210}Pb 과 ^{210}Po 이 각각 58%과 65%를 차지한다고 보고하였다. 외 해수와 비교해 보았을 때, 본 연구에서 관측된 콜로이드 상 ^{210}Pb 과 ^{210}Po 의 비율은 상대적으로 낮은 값을 보였다. 특히, 연안 지하수 중 콜로이드 상 ^{210}Po 의 비율은 2배 가까이 낮은 수준이었다. 이에 대한 증거로, Sañudo-Wilhelmy et al. (2002)는 미국 Long Island의 연안 지하수 중

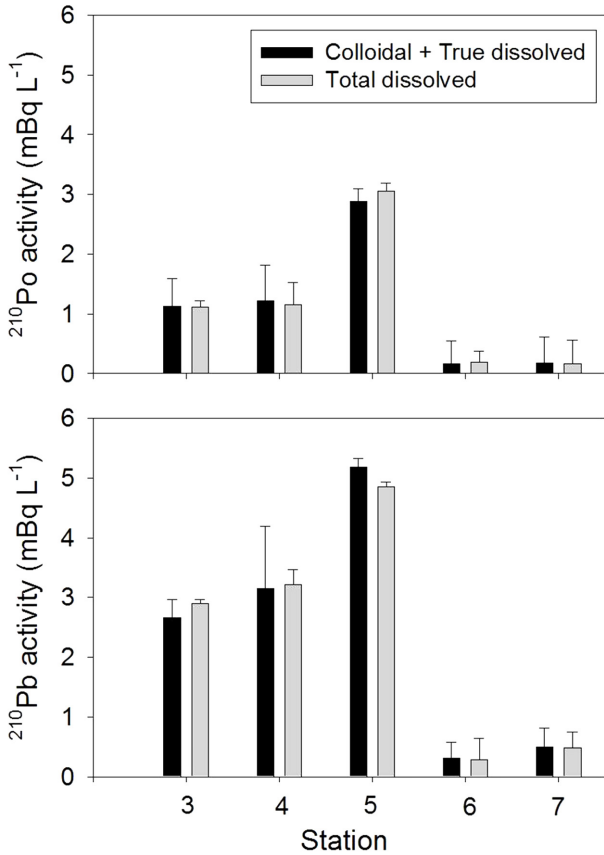


Fig. 2. Mass balance of colloidal separation of (a) ²¹⁰Po and (b) ²¹⁰Pb using tangential flow filtration system in the groundwater of Jeju Island. Black bars indicate true dissolved (<10 kDa)+colloidal (10 kD-0.45 μm) fraction, and gray bars indicate total dissolved (<0.45 μm) fraction. Error bars represent standard deviations.

용존 유기 탄소 농도(dissolved organic carbon; DOC) (<50 μM)는 대서양 표층수에 비해 2배 낮은 값을 보였고, Kim *et al.* (2012)는 함평만 shallow-well 지하수 중 용존 유기 탄소 농도(평균: 75 μM)가 연안 표층수의 농도(평균: 144 μM)보다 낮았으며, Kim *et al.* (2013)는 제주도 지하수 중 용존 유기 탄소 농도(평균: 50 μM)가 연안 표층수의 농도(평균: 60 μM)보다 낮음을 보고하였다. 이와 같이, 해양에서는 유기물에 의해 콜로이드가 빨리 만들어져 많이 분포하고, 해저 하구 내에서는 유기물의 농도가 상대적으로 낮고 콜로이드 비율도 낮을 것으로 판단된다.

콜로이드는 부피에 비하여 표면적이 크기 때문에 흡착력

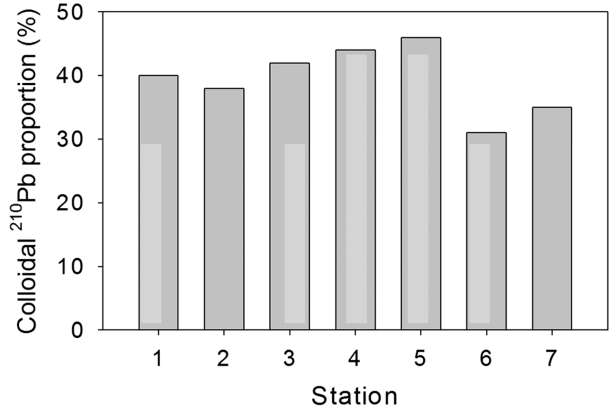


Fig. 3. Vertical bars showing the percentage of ²¹⁰Pb found in the colloidal (10 kD-0.45 μm) fraction in subtterranean estuaries. Percentage of colloidal ²¹⁰Pb=[colloidal ²¹⁰Pb/(true dissolved ²¹⁰Pb+colloidal ²¹⁰Pb)]×100.

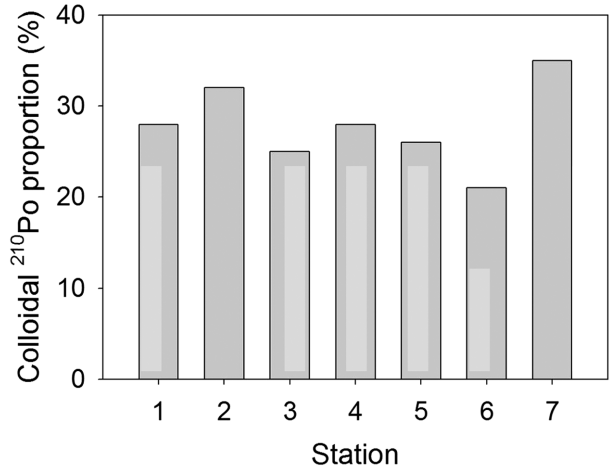


Fig. 4. Vertical bars showing the percentage of ²¹⁰Po found in the colloidal (10 kD-0.45 μm) fraction in subtterranean estuaries. Percentage of colloidal ²¹⁰Po=[colloidal ²¹⁰Po/(true dissolved ²¹⁰Po+colloidal ²¹⁰Po)]×100.

(adsorption)이 강하다(Farley and Morel, 1986; Honeyman and Santschi, 1991). 이러한 특징은 Kersting *et al.* (1999)의 결과에서도 보여지는데, 미국 Nevada 핵 실험 장소인 지하수 중에서 물에 용해도(solubility)가 낮고 암석에 흡착성이 강한 플루토늄(Pu)조차도 콜로이드에 흡착되어 이동된다는 사실을 밝혔다. 이처럼, 해수

Table 1. Distributions of salinity and activities (mBq L⁻¹) of total dissolved (<0.45 μm), true dissolve (<10 kDa), and colloidal (10 kDa-0.45 μm) ²¹⁰Pb and ²¹⁰Po in subtterranean estuary

Station	Salinity	True diss. ²¹⁰ Pb	True diss. ²¹⁰ Po	Colloidal ²¹⁰ Pb	Colloidal ²¹⁰ Po	Total diss. ²¹⁰ Pb	Total diss. ²¹⁰ Po
1	30	2.52±0.05	1.86±0.08	1.71±0.05	0.72±0.07	-	-
2	27.6	2.28±0.13	2.07±0.20	1.42±0.11	0.97±0.16	-	-
3	20.4	1.53±0.08	0.87±0.12	1.13±0.30	0.26±0.44	2.90±0.07	1.11±0.11
4	29.5	1.77±0.25	0.90±0.36	1.38±1.01	0.32±1.47	3.21±0.26	1.15±0.38
5	30	2.80±0.07	2.18±0.11	2.38±0.13	0.70±0.19	4.85±0.08	3.05±0.14
6	3	0.21±0.15	0.13±0.22	0.10±0.22	0.03±0.32	0.28±0.36	0.19±0.51
7	1	0.32±0.13	0.12±0.11	0.17±0.29	0.06±0.42	0.48±0.27	0.17±0.39

와 비교하여 지하수 중에 콜로이드 상 ^{210}Pb 과 ^{210}Po 의 비율이 낮을지라도 해저 지하수 중 콜로이드는 연안으로 입자 반응성 원소(Pb, Pa, Be 등)와 Po과 같은 황그룹 원소(S, Se, Te)를 공급하는 중요한 매개체임을 나타낸다.

Sañudo-Wilhelmy *et al.* (2002)는 미국 Long Island의 지하수 중 콜로이드 상 미량원소와 유기 탄소를 관측하였고, 그 결과, 망간(Mn), 아연(Zn), 카드뮴(Cd)은 콜로이드 상이 차지하는 비율이 약 40%이며, 유기탄소는 약 23%로 나타났다. 환경적으로 다르지만, 본 연구 지역의 결과와 비교해 보면, 미국 Long Island의 지하수 중 Mn, Zn, Cd의 콜로이드 상 비율은 ^{210}Pb 결과와 유사했고, 유기탄소는 ^{210}Po 과 비슷하였다. 최근, Kim and Kim (2012)은 콜로이드 상 ^{210}Po 의 체류시간은 60일 정도로, 일반적으로 알려져 있는 콜로이드 상 ^{234}Th 의 약 10일 보다 훨씬 더 긴 것을 밝혀내었으며, 콜로이드 상 ^{210}Po 의 부족량(deficiency)는 용존 유기 탄소와 좋은 상관관계가 보여주어, ^{210}Po 이 생물친화성 미량 원소(bio-reactive trace element) 추적자로서의 가능성을 제시하였다. 이와 같이, 해저 하구에 존재하는 지하수 중 미량 원소의 거동이 여전히 잘 알려지지 않았으므로, 콜로이드 상 ^{210}Pb 과 ^{210}Po 은 미량 원소의 추적자로서 활용 가능성이 클 것으로 판단된다.

결 론

본 연구에서는 해저 하구의 지하수에서 콜로이드 상 ^{210}Pb 과 ^{210}Po 농도를 처음으로 측정하였다. 콜로이드 상 ^{210}Pb 과 ^{210}Po 의 비율은 각각 40%와 28%이며, 이는 콜로이드가 해저 하구 내에 존재하는 미량 원소를 해양으로 수송하는 중요한 역할을 할 것으로 판단된다. 하지만, 해저 하구의 지하수 중 콜로이드에 대한 연구는 거의 이루어져 있지 않았다. 향후, 콜로이드에 대한 지속적인 연구를 통해 콜로이드가 미량 원소 뿐만 아니라 방사성 핵종 및 안정 동위원소의 생지화학적 순환에 어떠한 영향을 미치는지에 대한 연구도 함께 진행되어야 할 것이다.

사 사

이 연구를 수행할 수 있도록 많은 도움을 주신 서울대학교 김규범 교수님께 감사드립니다. 이 논문은 2013년도 정부의 재원으로 한국연구재단의 중견연구자지원 도약과제(NRF-2013R1A2A1A05004343)와 학문후속세대양성사업(No. 2013R1A6A3A03062189) 지원을 받아 수행되었습니다.

참고문헌(References)

- Bonotto, D.M. and T.O. Bueno, 2008. The natural radioactivity in Guarani aquifer groundwater, Brazil. *Appl. Radiat. Isot.*, **66**: 1507–1522.
- Charette, M.A. and E.R. Sholkovitz, 2002. Oxidative precipitation of groundwater-derived ferrous iron in the subterranean estuary of a coastal bay. *Geophys. Res. Lett.*, **29**: doi:10.1029/2001GL014512.
- Cherry, R.D., S.W. Fowler, T.M. Beasley and M. Heyraud, 1975. Polonium-210: its vertical oceanic transport by zooplankton metabolic activity. *Mar. Chem.*, **3**: 105–110.
- Cochran, J.K., M. Bacon, S. Krishnaswami and K. Turekian, 1983. ^{210}Po and ^{210}Pb distributions in the central and eastern Indian Ocean. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **17**: 295–273.
- Farley, K.J. and F.M.M. Morel, 1986. The role of coagulation in the kinetics of sedimentation. *Environ. Sci. Technol.*, **20**: 187–195.
- Fowler, S.W. and G.A. Knauer, 1986. Role of large particles in the transport of elements and organic compounds through the oceanic water column. *Prog. Oceanogr.*, **16**: 147–194.
- Friedrich, J. and M. Rutgers van der Loeff, 2002. A two tracer (^{210}Po - ^{234}Th) to distinguish organic carbon and biogenic silica export flux in the Antarctic Circumpolar Current. *Deep-Sea Res.*, **49**: 101–120.
- Guo, L. and P.H. Santschi, 1997. Composition and cycling of colloids in marine environments. *Rev. Geophys.*, **35**: 17–40.
- Honeyman, B.D. and P.H. Santschi, 1991. Coupling adsorption and particle aggregation: Laboratory studies of “colloidal pumping” using ^{59}Fe -labelled hematite. *Environ. Sci. Technol.*, **25**: 1739–1747.
- Kadko, D., 1993. Excess ^{210}Po and nutrient cycling within the California coastal transition zone. *J. Geophys. Res.*, **98**: 857–864.
- Kersting, A.B., D.W. Efurud, D.L. Finnegan, D.J. Rokop, D.K. Smith and J.L. Thompson, 1999. Migration of plutonium in ground water at the Nevada Test Site. *Nature*, **397**: 56–59.
- Kim, G., K. Lee, K. Park, D. Hwang and H. Yang, 2003. Large submarine groundwater discharge (SGD) from a volcanic island. *Geophys. Res. Lett.*, **30**: doi:10.1029/2003GL018378.
- Kim, G., 2001. Large deficiency of polonium in the oligotrophic oceans interior. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **192**: 15–21.
- Kim, G., T.H. Kim and T.M. Church, 2011. Po-210 in the environment: Biogeochemical cycling and bioavailability. In: *Handbook of Environmental Isotope Geochemistry*, edited by M. Baskaran, Springer-Verlag, Berlin, pp. 271–284.
- Kim, T.H. and G. Kim, 2012. Important role of colloids on the removal of ^{210}Po and ^{210}Pb in the ocean: Results from the East/Japan Sea. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **95**: 134–142.
- Kim, T.H., H. Waska, E.H. Kwon, I.G.N. Suryaputra and G. Kim, 2012. Production, degradation, and flux of dissolved organic matter in the subterranean estuary of a large tidal flat. *Mar. Chem.*, **142**: 1–10.
- Kim, T.H., E. Kwon, I. Kim, S.A. Lee and G. Kim, 2013. Dissolved organic matter in the subterranean estuary of a volcanic island, Jeju: Importance of dissolved organic nitrogen fluxes to the ocean. *J. Sea Res.*, **78**: 18–24.
- Masqué, P., J.A. Sanchez-Cabeza, J.M. Bruach, E. Palacios and M. Canals, 2002. Balance and residence times of Pb-210 and Po-210 in surface waters of the northwestern Mediterranean Sea. *Cont. Shelf Res.*, **22**: 2127–2146.
- Moore, W.S., 1999. The subterranean estuary: a reaction zone of ground water and sea water. *Mar. Chem.*, **65**: 111–125.
- Murray, J.W., B. Paul, J.P. Dunne and T. Chapin, 2005. ^{234}Th , ^{210}Pb , ^{210}Po and stable Pb in the central equatorial Pacific: Tracers for particle cycling. *Deep-Sea Res. I*, **52**: 2109–2139.
- Nozaki, Y., J. Zhang and A. Takeda, 1997. ^{210}Pb and ^{210}Po in the equatorial Pacific and the Bering Sea: The effects of biological productivity and boundary scavenging. *Deep-Sea Res.*, **44**: 2203–2220.

- Pan, B., S. Ghosh and B. Xing, 2008. Dissolved organic matter conformation and its interaction with Pyrene as affected by water chemistry and concentration. *Environ. Sci. Technol.*, **42**(5): 1594–1599.
- Ruberu, S.R., Y.G. Liu and S.K. Perera, 2007. Occurrence and distribution of ^{210}Pb and ^{210}Po in selected California groundwater wells. *Health Phys.*, **92**: 432–441.
- Sañudo-Wilhelmy, S.A., F.K. Rossi, H. Bokuniewicz and R.J. Paulsen, 2002. Trace metal levels in uncontaminated groundwater of a coastal watershed: importance of colloidal forms. *Environ. Sci. Technol.*, **36**: 1435–1441.
- Shimmield, G.B., G.D. Ritchie and T.W. Fileman, 1995. The impact of marginal ice zone processes on the distribution of ^{210}Pb , ^{210}Po , and ^{234}Th and implications for new production in the Bellingshausen Sea, Antarctica. *Deep-Sea Res. II*, **42**: 1313–1335.
- Stewart, G.M., S.W. Fowler, J.-L. Teyssie, O. Cotret, J.K. Cochran and N.S. Fisher, 2005. Contrasting transfer of polonium-210 and lead-210 across three trophic levels in marine plankton. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **290**: 27–33.
- Stewart, G.M., S.B. Moran and M.W. Lomas, 2010. Seasonal POC fluxes at BATS estimated from ^{210}Po deficits. *Deep-Sea Res. I*, **57**: 113–124.
- Swarzenski, P.W., B.A. McKee, K. Sørensen and J.F. Todd, 1999. ^{210}Pb and ^{210}Po , manganese and iron cycling across the $\text{O}_2/\text{H}_2\text{S}$ interface of a permanently stratified Fjord: Framvaren, Norway. *Mar. Chem.*, **67**: 199–217.
- Swarzenski, P.W., W.G. Orem, B.F. McPherson, M. Baskaran and Y. Wan, 2006. Biogeochemical transport in the Loxahatchee river estuary: The role of submarine groundwater discharge. *Mar. Chem.*, **101**: 248–265.
- Waska, H. and G Kim, 2011. Submarine groundwater discharge (SGD) as a main nutrient source for benthic and water-column primary production in a large intertidal environment of the Yellow Sea. *J. Sea Res.*, **65**: 103–113.
- Wei, C.-L. and J.W. Murray, 1994. The behavior of scavenged isotopes in marine anoxic environments: ^{210}Pb and ^{210}Po in the water column of the Black Sea. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **58**: 1795–1811.

2014년 4월 8일 원고접수

2014년 5월 13일 수정본 접수

2014년 5월 14일 수정본 채택

담당편집위원: 김동선