

## 한반도 연안 해역에서 해저 지하수 유출의 환경 생태학적 중요성

김규범\* · 황동운 · 류재웅 · 이용우  
서울대학교 지구환경과학부

### Environmental and Ecological Consequences of Submarine Groundwater Discharge in the Coastal Areas of the Korea Peninsula

GUEBUEM KIM\*, DONG-WOON HWANG, JAE-WOONG RYU AND YONG-WOO LEE  
*School of Earth and Environmental Sciences/RIO, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea*

전통적으로 육지로부터 해양으로의 물질 수송은 눈에 보이는 강을 통해서 이루어 진다고 생각했었다. 하지만, 해저 열수 및 대기를 통한 물질 유입도 상당한 부분을 차지한다는 것이 지난 수십 년 동안 밝혀졌다. 최근에는 해저를 통한 지하수 유출이 물질 수송에 있어 강물 못지 않는 중요한 역할을 한다는 것이 밝혀지고 있다. 특히, 한반도 주변에서의 연구 결과, 해저 지하수 유출이 다른 지역에 비해 더 중요한 해양학적 역할을 한다는 것이 밝혀졌으며, 그 몇 가지 예는 다음과 같다. 남해의 여러 내만 해역에서는 연안의 오염된 지하수가 유출되면서, 과잉의 영양염류가 공급되어 적조 등의 생태계 변화에 큰 영향을 미친다. 암석의 공극률이 큰 제주도에서는 해저 지하수의 흐름이 전세계적으로 아주 높은 범주에 속해, 지하수의 오염이 적어도 연안 생태계 및 부영양화에 결정적 역할을 한다. 황해에서는 전 해양으로 유출되는 지하수 및 지하수에 의한 영양염류 유출량이 황해로 흐르는 양자강 등의 큰 강 못지않게 중요한 역할을 한다. 동해는 해양 퇴적물의 투수성이 높고 단층대가 발달해 있어, 여름철 지하수 유출량이 일반 대륙연안에 비해 아주 크다. 한편, 하구둑이 건설되어 있는 낙동강 하구역에서 댐 안쪽 담수와 바깥쪽 해수 사이의 수위차에 의해, 강물의 방류량이 적고 댐의 수위가 높은 경우 해저 지하수의 유출이 훨씬 더 높게 나타났다. 여태까지 밝혀진 자료를 토대로 볼 때, 해저 지하수 유출은 한반도 주변에서 육상 오염물질을 해양으로 수송하는 가장 중요한 통로 중의 하나이며, 갯벌 생태계, 적조, 산호 생태계, 및 연안 오염에 결정적으로 영향을 미칠 것으로 판단된다. 따라서, 해저 지하수 유출을 고려한 연안 오염 부하량 추정, 산사댐의 영향 예측, 적조 및 부영양화 원인 규명 등의 연안 환경 정책 수립이 시급하다.

Recognition has emerged that nutrient inputs from the submarine discharge of fresh, brackish, and marine groundwaters into the coastal ocean are comparable to the inputs via river discharge. The coastal areas of the Korea peninsula and adjacent seas exhibit particular importance in the role of submarine groundwater discharge (SGD), in terms of the magnitude of SGD and associated continental material fluxes. For example, in the southern sea of Korea, SGD transports excess nutrients into the coastal regions and thus appears to influence ecosystem changes such as the outbreak of red tides. Around volcanic island, Jeju, which is composed of high permeability rocks, the amount of SGD is higher by orders of magnitude relative to the eastern coast of North America where extensive SGD studies have been conducted. In particular, nutrient discharge through SGD exerts a significant control on coastal ecosystem changes and results in benthic eutrophication in semi-enclosed Bang-du bay, Jeju. In the entire area of the Yellow Sea, the submarine discharge of brackish groundwater and associated nutrients are found to rival the river discharges into the Yellow Sea, including those through Yangtze River, Han River, etc. In the eastern coast of the Korea peninsula, SGD is significantly higher during summer than winter due to high hydraulic gradients and due to wide distribution of high permeability sandy zones, faults, and fractures. On the other hand, in the estuarine water, downstream construction of the dam in the Nakdong River, SGD was highest when the river discharge was lowest (but water level of the dam was highest). This suggests that even though there is no visible freshwater discharge into this estuary, the discharge of chemical species is significant through SGD. On the basis of the results obtained from the coastal areas of the Korea peninsula, SGD is considered to be an important pathway of continental contaminants influencing tidal-flat ecosystems, red tides, and coral ecology. Thus, future costal management should pay great attention to the impact of SGD on coastal pollution and eutrophication.

**Key words:** Submarine Groundwater Discharge, Nutrients, Red tides, Eutrophication

\*Corresponding author: gkim@snu.ac.kr

서론

육상의 담수는 지표수(강, 하천 등)나 지하수의 형태로 해양으로 유출된다. 해저 지하수는 육상으로부터 해양으로 직접 공급되는 담지하수 뿐만 아니라, 해수가 해저 퇴적물로 침투하였다가 다시 해양으로 유입되는 재순환된 해수(re-circulated seawater)를 포함한다(Burnett *et al.*, 2003). 염지하수의 유출은 담지하수 보다 육상물질을 해양으로 수송하는데 더 중요한 역할을 담당한다(Burnett *et al.*, 2003). 실제 담수가 해양으로 유출되는 양은 강물의 약 5-6% 밖에 안되지만, 재순환된 해수를 포함하면 강물의 약 48%에 이른다고 보고되었다(Zektzer and Loaiciga, 1993). Moore(1996)는 미국 동부의 대륙붕 및 대륙 사면에서 재순환된 해수를 포함하면 해저 지하수 유출량이 강물의 약 40%에 이른다고 보고하였다. 용천수 형태의 해저 지하수 유출은 세계의 많은 연안지역과 해양에서 폭넓게 연구 되었으며(Kohout, 1966; Zektzer *et al.*, 1973; Swarzenski *et al.*, 2001; Elhatip, 2003), 지역의 단층 또는 파쇄대와 같은 지질학적 특징과 연관이 있다(Shaban *et al.*, 2005).

따라서, 해저를 통한 해저 지하수 유출은 (1) 자유면 대수층에서 재순환된 해수와 섞여 수심이 얕은 연안 지역으로의 유출(nearshore seepage), (2) 피압 대수층 내의 균열된 틈을 통한 대륙붕 퇴적물로의 유출(offshore seepage), (3) 피압 대수층을 따라 해양으로 바로 유입되는 해저 용천수(submarine springs)의 형태로 나눌 수 있다(Burnett *et al.*, 2001)(Fig. 1).

해저 지하수는 지하수위와 해수면의 변동에 따른 수리학적 압력(hydraulic pressure)차에 의해 육상에서 연안 해역으로 유출된다. 또한, 파도와 조석과 같은 다양한 해양학적 기작에 의해서도 영향을 받는다. Kim and Hwang(2002)은 부산 해운대 동백섬에

서 해저 지하수 유출의 추적자인  $^{222}\text{Rn}$ 과  $\text{CH}_4$ 를 연속적으로 관측한 결과  $^{222}\text{Rn}$  동위원소와  $\text{CH}_4$ 의 농도는 조석주기와 좋은 상관관계를 보였다(Fig. 2). 해수중  $^{222}\text{Rn}$ 과  $\text{CH}_4$  농도는 일간변동과 15일의 주기적인 변동을 보였으며, 조금(neap tide)시에는 낮고 사리(spring tide)시에는 높게 나타났다. 이는 조금시 보다 조석의 변동 폭이 큰 사리시에 조석 펌핑(tidal pumping) 작용에 의해 상대적으로 더 많은 해저 지하수가 해양으로 유입된다는 것을 의미한다. 이러한 조석 펌핑에 의한 지하수 유출은 여름철 강수량이 많을 때는 뚜렷이 나타났지만, 가을철 건기에는 그 효과가 미흡하였다(Fig. 2).

해저 지하수는 육상의 오염물질과 높은 농도의 영양염류, Ra, Rn,  $\text{CH}_4$ , Ba 등의 용존 화학원소를 해양으로 운반하는 역할을 하므로(Church, 1996; Burnett *et al.*, 2001; Taniguchi *et al.*, 2002; Kim and Hwang, 2002), 연안역의 부영양화(eutrophication)와 생태계에 큰 영향을 줄 수 있다(Johannes, 1980; Valiela *et al.*, 1990; Simmons, 1992; Burnett *et al.*, 2001; Hwang *et al.*, 2005a; 2005b). Capone and Salter(1990)는 뉴욕의 Great South Bay에서 오염된 지하수를 통하여 만내로 공급된 질산염은 만 해수중 질산염의 약 50%를 차지한다고 보고하였고, LaRoche *et al.*(1997)은 Long Island의 연안에서 해저 지하수 유입량과 식물플랑크톤의 기초생산(algae production)간의 좋은 상관관계를 밝혀냈다.

연안해역에서 계절변화에 따른 해저 지하수 유출량은 대체로 겨울보다 여름철에 높게 나타난다. South Atlantic Bight에서 Ra 동위원소의 계절변화를 관측한 결과 봄과 겨울보다 여름철에 높았고 유사한 계절적인 차이는 North Inlet에서도 관측되었다(Moore, 1987; Bollinger and Moore, 1993). 마찬가지로, Rhode Island에서 Ra 동위원소 측정으로부터 산정된 월별 지하수의 유

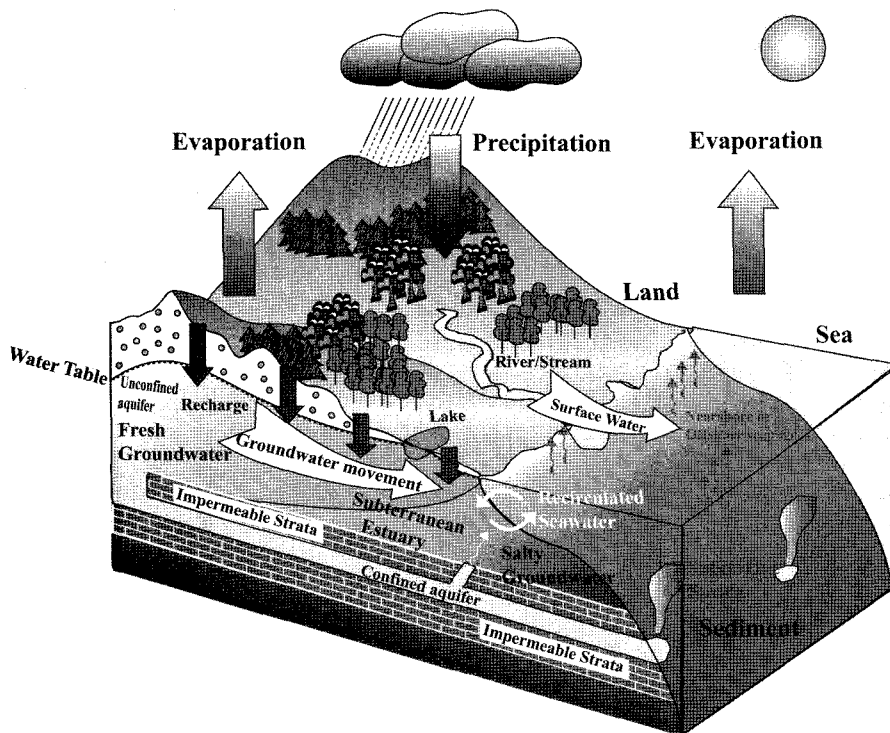
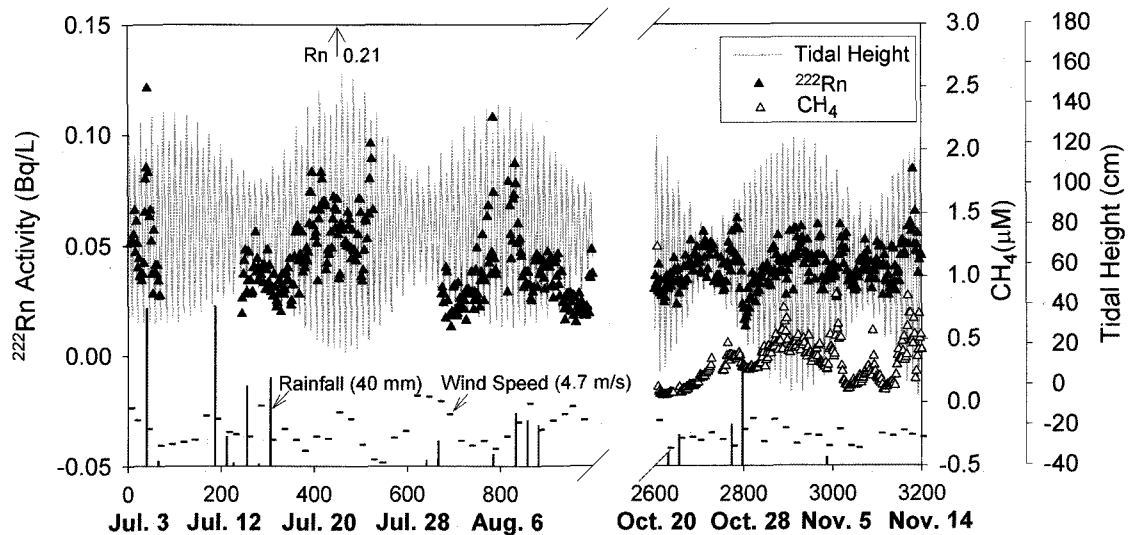


Fig. 1. Schematic diagram showing the types of submarine groundwater discharge. A subterranean estuary is formed at the transition zone between fresh groundwater and recirculating seawater.



**Fig. 2.** Temporal variations of  $^{222}\text{Rn}$  and  $\text{CH}_4$  in seawater near the bottom of rocky-sandy shores, located in the South Sea of Korea (adapted from Kim and Hwang, 2002). The tidal amplitude, rainfall amount, and wind speed are shown. The scale of wind speed and precipitation is proportional to the points indicated (zero across the x-axis). The sharp increase of  $^{222}\text{Rn}$  from neap to spring tide during wet season indicates the proportional SGD increase, due to effective tidal pumping.

출은 다른 계절보다 여름에 뚜렷한 피크를 보였다(Kelly and Moran, 2002). 이렇게 해서 지하수 유출이 시·공간적으로 크게 변하기 때문에, 그 환경 생태학적 영향도 시·공간적으로 크게 다를 것이다.

해서 지하수 유출에 대한 관심은 높아져 가고 있지만, 지하수 유출량을 직접 측정하는 데는 어려움이 있다. 측정 방법으로는 수리학적 모델링(Oberdorfer *et al.*, 1990), seepage meter를 이용한 유출속도 측정(Cable *et al.*, 1997; Kim *et al.*, 2003a), 방사능 추적자(Ra, Rn,  $\text{CH}_4$ )를 이용한 물질수지 모델(Corbett *et al.*, 1999; Kelly and Moran, 2002; Hwang *et al.*, 2005a; 2005b; Kim *et al.*, 2005) 등이 있다. 수동 seepage meter를 이용하여 직접 측정하는 방법은 많은 시간과 노력을 필요로 한다. 따라서 해서 지하수의 유출량을 알아내기 위해서 해수에 비해 해서 지하수중 농도가 높은 화학적 추적자( $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{222}\text{Rn}$ ,  $\text{CH}_4$ )를 이용하는 방법이 주로 이용되며, 방사능 추적자를 이용한 측정 방법은 해서 지하수 유출의 큰 시·공간적인 변화를 측정하는데 아주 유용하게 이용되고 있다(Bugna *et al.*, 1996; Moore, 1996; Hussain *et al.*, 1999; Hwang *et al.*, 2005a; 2005b).

해양으로의 해서 지하수 유출에 대한 연구는 미국의 동부지역을 포함한 유럽, 일본, 호주 등의 지역에서 활발히 진행되고 있으나, 조사 지역이 특정 장소에 한정되어 있고 측정방법도 서로 달라, 아직 전세계적인 지하수 유출량 연구는 초보단계에 있다고 할 수 있다. 특히, 해서 지하수의 유출 기작, 시·공간적 변화, 지하수 유출에 의한 화학물질 수송량, 연안에서의 생태학적인 반응 등은 지역마다 다른 특성을 보이기 때문에, 앞으로 많은 주요 해안에서 집중적인 연구가 진행되어야 한다.

본 연구에서는 한반도 주변 해역에서 해서 지하수 연구 사례를 소개하고, 그 연구 결과가 의미하는 바를 알아봄, 이러한 연구 결과들을 토대로 앞으로 어떠한 연구가 진행되어야 할 지에 대해 소개하고자 한다.

## 한반도 주변 해역에서의 해서 지하수 유출 연구결과

### 황해에서의 해서 지하수 유출과 영양염류 플럭스

황해는 수심이 평균 50 m, 면적이  $\sim 4 \times 10^5 \text{ km}^2$ 로, 세계에서 가장 큰 대륙붕중의 하나이다. 수심은 북쪽보다 남쪽이 더 깊고, 해저경사는 서쪽보다 동쪽이 더 가파르다(Fig. 3). 황해의 조차는 한반도 서쪽 연안에서 최대 10 m를 보인다. 황해 중앙부에서의 저층 퇴적물은 황하강에서 기원한 세립질의 실트와 점토이고, 그 외의 지역에서는 주로 조립질의 모래로 구성되어 있다. 황해로 유입되는 양자강(Yangtze River)의 유입량은 계절과 지형에 따라 변화가 크기 때문에 잘 알려져 있지 않지만, 그 양은 총 양자강 유출량의 약 14% 정도이다. 또한, 황하강, 압록강, 한강, 금강, 영산강과 같은 비교적 작은 강으로부터의 담수의 유입량은 황해로 유입되는 양자강의  $\sim 75\%$ 를 차지한다(Liu *et al.*, 2003).

황해는 물의 체류시간이 5–6 년으로 길고(Nozaki *et al.*, 1991), 중국과 한반도의 대륙과 연결된 반폐쇄적인 해역이기 때문에, 양국에서의 오염물질이 모여 오래 체류하는 해양 환경 특성을 지니고 있다. 최근 산업화에 의해 그 오염량은 가속화되고 있는데, 실제 하천과 강에 의한 오염량과 대기를 통한 오염에 관심이 집중되어 있다. 하지만, 최근 Kim *et al.*(2005)이 황해의 표층수중 과잉  $^{226}\text{Ra}$ 의 농도로부터 계산한 해서 지하수 유출량(약  $1\text{--}6.7 \times 10^{11} \text{ m}^3 \text{ yr}^{-1}$ )은 강물의 총 유출량( $\sim 2.3 \times 10^{11} \text{ m}^3 \text{ yr}^{-1}$ )(Liu *et al.*, 2003)의 최소한 40% 이상을 차지하였다. 이렇게 큰 해서 지하수 유출량은 이 지역의 높은 조차( $\sim 10 \text{ m}$ )와 조립질 퇴적물의 폭넓은 분포 때문인 것으로 판단된다.

또한, 해서 지하수 유출량과 연안 지하수에서의 평균 Si 농도로 계산된 해서 지하수를 통한 Si의 공급량은 약  $4\text{--}24 \times 10^9 \text{ mol yr}^{-1}$ 이었으며, 이는 주변의 모든 강물로부터 유입되는 양( $\sim 23 \times 10^9 \text{ mol yr}^{-1}$ )(Liu *et al.*, 2003)의 약 20–100%를 차지하였다(Kim *et al.*,

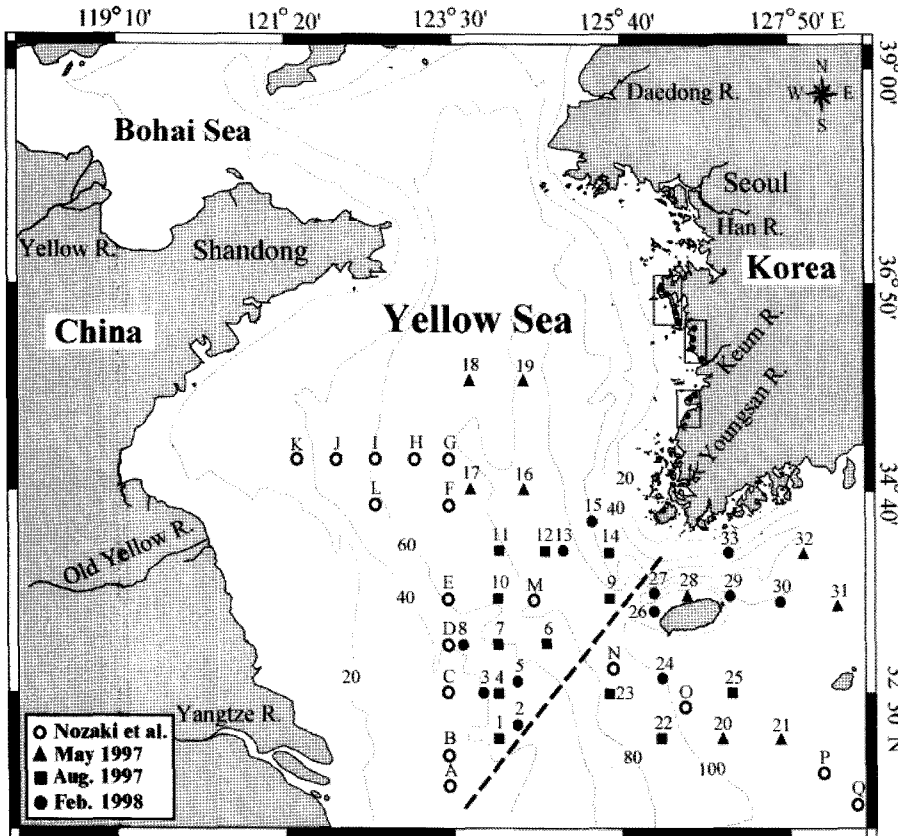


Fig. 3. A map showing the study area of Kim *et al.*, 2005 in the Yellow Sea and adjacent seas. The sampling locations for Ra isotopes, which are SGD tracers, are shown.

2005). 이렇게 큰 대륙붕에서의 지하수에 의한 영양염류 유출량의 중요성은 전 지구적으로도 해저 지하수에 의한 영양염류 유출이 중요한 위치를 차지할 수 있음을 나타낸다. 따라서, 앞으로 황해의 오염 관리를 위해서는 한국과 중국에서 해저 지하수에 의한 오염물질 유출량을 포함하여 양국의 실제 총 오염 부하량을 산정하여야 한다.

#### 제주도에서의 해저 지하수 유출과 영양염류 플럭스

제주도는 대부분 투수성이 높은 다공질의 현무암과 조면암과 같은 화산암류로 이루어져 있어 강우량이 적은 시기에는 강우의 대부분이 지하로 스며들지만, 강우량이 많은 6-8월에는 일시적으로 지표면에 간헐천이 형성되어 강우의 일부가 해양으로 유출된다. 또한, 지하수 함양율이 44%로서 전국 평균치인 18%보다 훨씬 높으며, 강우량이 많고 적음에 따라 지하수위의 큰 변동이 있다(Park *et al.*, 1994). Kim *et al.*(2003a)이 제주 연안에서 수동 seepage meter들을 사용하여 측정한 해저를 통한 지하수의 유출속도(50-300 m/yr)는 일반 대륙 연안(0.03-40 m/yr)(Giblin and Gaines, 1990; Valiela *et al.*, 1990; Bugna *et al.*, 1996; Gallagher *et al.*, 1996; Corbett *et al.*, 1999; Taniguchi *et al.*, 2002)보다 아주 높았다(Fig. 4). 하지만, 강우량이 많은 열대 산호섬인 Barbados (270-450 m/yr)보다는 다소 낮게 나타났다. 또한, 제주도 동부와 서부지역의 해저를 통해 유출되는 담지하수와 재순환된 해수의 양을 계산한 결과, 서부지역으로의 담지하수 유출량( $1.3 \times 10^9$  m<sup>3</sup>/yr)은 동부지역( $0.2 \times 10^9$  m<sup>3</sup>/yr)보다 훨씬 많은 반면, 재순환된 해수는

동부지역에서 큰 유출량을 보였다(Kim *et al.*, 2003a)(Table 1). 그 결과 재순환된 해수에 의한 영양염류가 담지하수에 의한 유출량보다 훨씬 높게 나타났다. 하지만, 이 연구에서는 연안의 깊이 1 m 이하에서만 측정 되었기 때문에, 실제 제주도 전 해안 깊이 별 지하수 유출량은 상당히 다를 수 있다.

제주도에서 유일한 반 폐쇄적인 만인 동부지역에 위치한 방두만은 총 면적이  $8.0 \times 10^5$  m<sup>2</sup>, 평균수심이 약 3 m이다. 최대조차는 약 3 m로써 만 안의 평균수심과 거의 같으며, 해저 퇴적물은 투수성이 높은 사질로 이루어져 있다. 지질구조는 투수성이 높은 현무암이 해수면 아래 약 120 m 깊이까지 분포하고 있어 해수침투가 용이하며, 이로 인해 지하수의 염수화가 심각하다(Kim *et al.*, 2003b). 특히, 해안가를 따라 염지하수를 이용한 대단위의 육상 수조식 연안양식이 활발하여 높은 농도의 영양염류를 함유한 양식장 배출수가 방두만으로 유입되면서 해양오염을 가중시키고 있다(박, 2004; Oh *et al.*, 2000). 방두만 주변으로는 큰 하천수의 유입이 없기 때문에 만 내 해수의 혼합형태는 주로 해저 지하수의 유입량과 조석에 의한 외해수의 유입량에 따라 크게 달라질 것으로 예상된다. 따라서, Hwang *et al.*(2005b)은 해수중 해저 지하수 유출 추적자인 Ra 동위원소와 <sup>222</sup>Rn의 물질수지를 이용하여 해저 지하수 유출을 조사하였다. 라돈의 물질수지를 이용하여 계산된 만 전체에서 해저를 통한 평균 지하수의 유출속도는 ~34 cm/day로 Ra 동위원소의 물질수지를 통해 추정된 속도 ~47 cm/day와 비슷하였으며, 이는 수동 seepage meter를 사용하여 제주도 동부 연안에서 측정된 유출 속도(14-82 cm/day)의 범위에 포함된다(Kim *et al.*,

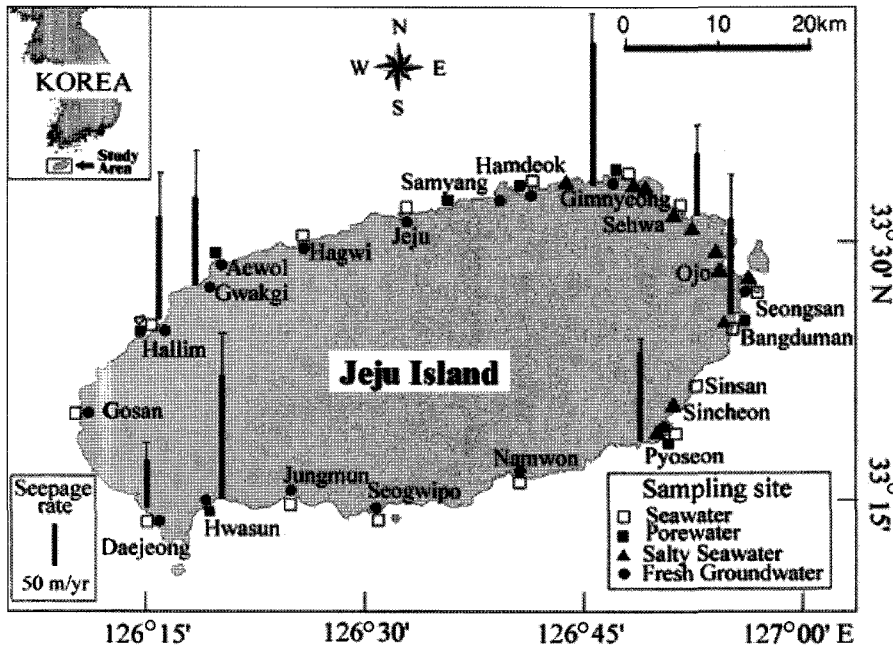


Fig. 4. The variation of seepage rates determined by manual seepage meters (adapted from Kim *et al.*, 2003a). The bar scale is proportional to the length of the indexed rate of 50 m/yr. The study area and sampling sites for the study of Kim *et al.*, 2003a are also shown.

Table 1. Discharge of freshwater and recirculating seawater and associated <sup>226</sup>Ra, DIN, DIP, and DSi fluxes through the eastern and western coast of Jeju island (adapted from Kim *et al.*, 2003a).

	Water (10 <sup>9</sup> m <sup>3</sup> /yr)	<sup>226</sup> Ra (10 <sup>9</sup> Bq/yr)	DIN	DIP (10 <sup>9</sup> g/yr)	DSi
<b>Eastern Jeju</b>					
Fresh groundwater	0.2	0.03	0.2	0.01	0.9
Re-circulating seawater	9	49	4.3	0.53	41
<b>Western Jeju</b>					
Fresh groundwater	1.3	0.3	1.3	0.07	6
Re-circulating seawater	6	32	2.9	0.35	27

Table 2. Comparison of nutrient fluxes through fish farm water, bottom sediment, and submarine groundwater discharge in Bangdu Bay, Jeju Island (adapted from Hwang *et al.*, 2005b).

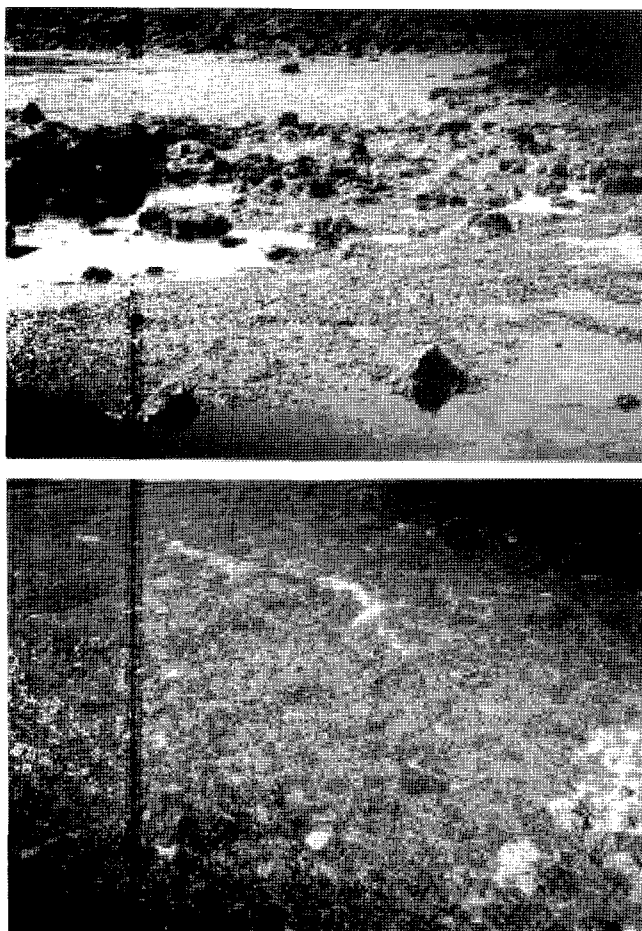
Pathway	Nutrients (× 10 <sup>3</sup> mol d <sup>-1</sup> )		
	DIN	DIP	DSi
Fish-farm water	0.78	0.009	4.8
Diffusion from bottom sediments	1.1	0.5	4.1
Submarine groundwater discharge	17	0.13	37

2003a). Hwang *et al.*(2005b)에 의하면, 이 지역에서 해저 지하수 유출에 의한 영양염류의 유입량이 만내로 유입되는 총 영양염류의 대부분을 차지하였다(Table 2). 방두만은 부영양화로 인해 갈파래류(*Ulva sp.*) 등의 해양식물이 과잉으로 증식하는 현상을 보이고, 이러한 해양식물의 과잉증식은 계절적으로 큰 차이를 보이며, 특히 여름철에 그 현상이 뚜렷하게 나타난다(Fig. 5). 따라서, 해저 지하수를 통해 유입된 영양염류는 해안가 주변의 갈파래류(*Ulva sp.*) 등과 같은 해양생물의 과잉증식에 큰 영향을 미치는 것으로 추측된다(Hwang *et al.*, 2005b).

**남해 여자만에서 해저 지하수 유출과 영양염류 플럭스**

여자만은 남해의 고흥반도와 여수반도 사이에 위치한 반폐쇄적

인 만이다(Fig. 6). 만의 면적은 약 320 km<sup>2</sup>, 평균 수심은 약 5 m이다. 여자만으로 유입되는 담수의 유입량은 평상시 약 1.6×10<sup>5</sup> m<sup>3</sup>/day이고, 주로 만의 동쪽에 위치한 이사천과 동천, 서쪽에 위치한 벌교천을 통해 유입된다. 그러나 이 해역에서의 연 강수량은 약 1470 mm로써, 계절에 따라 큰 변화를 보이며, 대부분의 강우는 여름철에 많이 내린다. 여자만 내 표층 퇴적상은 중앙부에 주로 세립질 퇴적물로 구성된 반면, 조립질의 퇴적물은 만의 북쪽과 입구에 분포하고 있다(Choi, 2004). 여자만의 외해역인 외나로도 부근에서는 해마다 와편모조 적조가 가장 먼저 발생하여 심각한 문제를 일으키고 있으며, Hwang *et al.*(2005a)은 이러한 적조를 일으키는 과잉 영양염류가 여자만으로부터 올 수 있다고 판단하여 여자만으로 유입되는 지하수의 양과 지하수 유출에 의한 영양

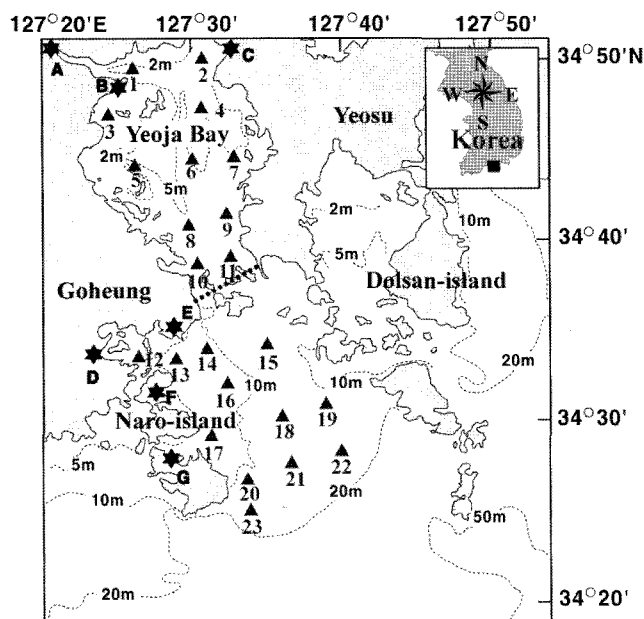


**Fig. 5.** Photos of dense distribution of benthic green algae in the shallow zone of Bangdu Bay (adapted from Hwang *et al.*, 2005b). This benthic eutrophication appears to be due to large submarine salty groundwater discharge.

염류 유입량을 측정하였다.

수심 3 m 이내의 얇은 깊이에서 해저퇴적물을 통한 지하수의 유출속도는 ~0.32 m/day 이었으며, 면적을 고려한 해저 지하수의 유출량은 ~3.5×10<sup>7</sup> m<sup>3</sup>/day를 보였다(Hwang *et al.*, 2005a). 해저 지하수를 통한 영양염류의 공급량을 계산한 결과, 해저 지하수를 통한 DIP의 유입량은 해저퇴적물로부터 확산에 의해 공급되는 양보다는 낮지만, DIN과 DSi의 경우에는 하천수와 해저 퇴적물로부터 유입된 양보다 훨씬 더 높았다. 그러므로, 해저 지하수에 의해 유입된 DIN과 DSi는 외해수에 의한 공급을 제외하면 영양염류의 가장 큰 공급원인 것으로 나타났다.

특히, 여자만 부근의 지하수는 질산염 오염이 심각하여 소량의 지하수 유출도 연안으로의 과잉 질산염 유입을 초래할 수 있다. 이러한 과잉 질산염 유출과 외해 적조 발생과의 관계는 현재 연구가 진행 중이며, 여태까지의 연구결과에 의하면 적조 발생은 지하수에 의해 공급된 과잉 질산염이 생물에 흡수되어 무기 영양염이 낮아 규조류의 증식이 제한되고, 죽은 생물로부터 유기 영양염류로 전환이 증가할 때, 유기 영양염류를 이용할 수 있는 외편모조 적조가 변성하게 되는 것으로 나타났다. 하지만, 적조 발생 기



**Fig. 6.** A map showing the study area of Hwang *et al.*, 2005a in Yeoja Bay and off Naro-island. The submarine discharge of groundwater and nutrients to the entire area of Yeoja Bay was determined using Ra and Si tracers.

작은 아주 복잡적이기 때문에 해저 지하수와와의 관련성을 증명하기 위해서는 보다 집중적인 연구가 요구된다.

### 낙동강 하구역에서 해저 지하수 유출량 변화

낙동강은 길이가 총 525 km, 유역면적은 약 23,600 km<sup>2</sup>으로, 이 지역의 강수량은 연평균 1,160 mm, 강물의 연간 유출량은 63×10<sup>9</sup> ton이며, 이 중 70%는 홍수기(7-9월)에 대부분 유출된다(김과 이, 1980). 낙동강 하구역은 강물의 유출량을 조절하기 위해 1987년에 낙동강 댐을 설치하여 댐 안쪽의 담수와 바깥쪽의 해수 사이에 수위차가 생기고, 이에 따라 해저 지하수 유출량이 영향을 받을 것으로 예상된다. 따라서, Yang *et al.*(2002)은 낙동강 하구역에서 Ra 동위원소(<sup>226</sup>Ra과 <sup>228</sup>Ra)를 이용하여 관측 시기별 해저 지하수 유출량의 상대적인 변화를 알아 보았다(Fig. 7).

연구결과, 담수와 해수의 혼합에 의해서 예상되는 Ra 동위원소의 농도보다 높은 과잉의 Ra 농도가 관측되었다(Yang *et al.*, 2002). 1997년 7월에 표층수중 과잉의 <sup>226</sup>Ra과 <sup>228</sup>Ra 농도는 각 정점에서 측정된 총 <sup>226</sup>Ra과 <sup>228</sup>Ra 동위원소 농도의 각각 약 47%와 46%를 차지한 반면, 1998년 4월과 1999년 6월에 관측된 과잉의 Ra 동위원소 농도는 1997년 7월에 비해 다소 낮았다(Yang *et al.*, 2002)(Fig. 7). 이러한 과잉의 Ra 동위원소 중, 강물로부터 유입되는 부유입자 물질로부터의 탈착, 해저퇴적물로부터 확산에 의한 양을 제외한 양을 해저 지하수에 의해 공급되었다고 가정할 때, 낙동강 하구역에서 해저 지하수의 유출은 강물의 방류량이 적고, 댐 안쪽의 담수와 바깥쪽 해수와의 수위차가 큰 1999년에 상대적으로 가장 높게 나타났다(Fig. 7). 이러한 현상은 눈에 보이는 강물의 흐름이 줄어들었을 때, 지하수를 통한 육상물질의 수송이 상대적으로 더 중요하며, 특히 댐이 있는 지역은 댐수위의 영향을 받

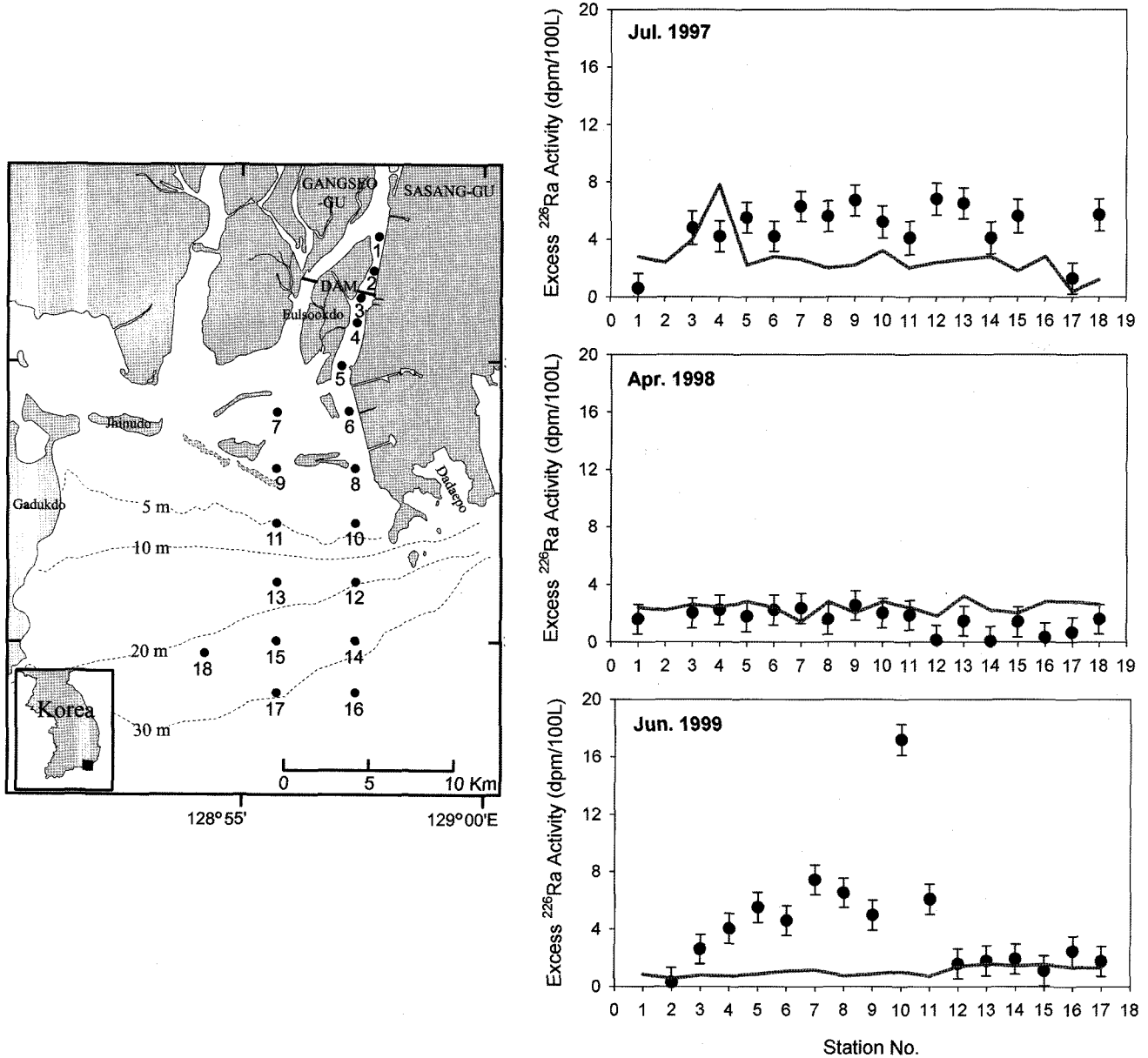


Fig. 7. Horizontal variations (right) of excess  $^{226}\text{Ra}$  in the Nakdong River estuary (left) in July 1997, April 1998, and June 1999 (adapted from Yang *et al.*, 2002). The gray line shows the potential activities of  $^{226}\text{Ra}$  by desorption from suspended solids.

아 이러한 효과가 특히 크다는 것을 의미한다.

### 앞으로의 연구

해저를 통한 지하수 유출은 이미 전 세계적으로 관심이 집중되어 있고, 그 수리학적, 환경학적, 생태학적 중요성이 밝혀지고 있다. 하지만, 해저 지하수 유출은 지역의 지질학적, 수리학적, 해양학적, 환경학적 특성에 따라 그 차이가 아주 커, 주요 연안에서는 직접적인 측정이 이루어져야 그 영향을 평가할 수 있다. 최근의 한반도 주변연구를 통하여 볼 때, 앞으로 다음과 같은 연구가 한반도 주변해역에서 이루어져야 한다.

(1) 서해는 해저 지하수 유출을 조절하는 중요한 기작인 조석차가 세계적으로도 가장 높은 해역이고, 넓은 갯벌이 분포하고 있어, 조석 주기에 따른 해저 지하수 유출량의 변화 및 이 변화에 의한 갯벌 생태계 반응을 연구하는 것이 중요하다. 예비 연구 결과, 서해의 사질 갯벌에서는 지하수 유출속도가 일반 대륙 주변 보다 높게 나타나기 때문에, 그 생태학적 영향을 클 것으로 생각된다.

(2) 남해는 리아스식 해안으로 만 주변의 많은 해역에서 양식을 하고 있고, 적조 발생에 의한 피해가 크다. 특히, 남해의 연안 지하수는 질산염 등의 오염이 심한 것으로 나타났으며, 이러한 오염 영양염류가 해양으로 유입될 때, 적조 등의 생태계 변화가 일어날 수 있다. 반폐쇄적인 만은 지하수가 오랫동안 모이는 역할을 해

지하수 유출에 의한 영향이 다른 해역보다 크게 나타날 것으로 예상되기 때문에, 적조가 발생하는 만을 중심으로 집중적인 연구가 이루어져야 한다.

(3) 동해는 수심이 급격히 증가하고, 사질 퇴적물, 단층대가 잘 발달해 있으며, 큰 강이 없어 해저 지하수의 유출이 어느 지역보다 높을 수 있다. 특히, 여름철에는 육지와 지하수 수위차가 크고 조석차가 작아, 담지하수의 유출이 클 것으로 예상되기 때문에, 계절에 따른 담지하수와 염지하수의 유출량을 측정하는 것이 중요하다. 또한, 단층대를 따라 나타날 수 있는 해저 용천수 연구를 하기에 적합하다.

(4) 제주도 지하수 자원이 풍부하며, 경제 사회적으로 중요한 역할을 한다. 또한, 투수성의 현무암층으로 이루어져 있어, 강을 통한 해양으로의 물 수송 보다는 해저를 통한 지하수 유출이 훨씬 더 중요하다. 이러한 이유로 제주도에서 해저 지하수 유출속도는 전세계적으로 아주 높은 범위에 속하며, 연안의 부영양화, 산호 생태계 변화 등에 미치는 영향을 집중적으로 조사해야 한다. 동시에 해저 지하수의 자원학적 활용에 대한 연구도 진행되어야 한다.

(5) 산업의 발달과 함께 육상의 지하수는 각종 중금속(As, Zn, Cu 등)과 유기화합물(농약 등)에 의해 오염되어 있다. 이러한 오염물질들이 해저를 통하여 해양으로 유출되는 양과 기작을 평가하여, 연안 오염의 총 부하모형을 만들어야 한다. 지하수에 의한 중금속 및 유기 화합물의 해양으로의 유출 연구는 그 중요성을 고려할 때, 한반도 주변의 연안 해역뿐만 아니라 황해 등의 세계적으로 큰 대륙붕도 포함하여야 한다.

### 감사의 글

본 연구는 서울대학교 연구비(3345-20031009)로 지원되었습니다.

### 참고문헌

김원형, 이형호, 1980. 낙동강 하구지역의 퇴적물 운반 및 퇴적에 대한 고찰. 한국지질학회지, **16**: 180-188.

박관석, 2004. 제주도에서 해저를 통해 유출되는 지하수의 화학적 특성과 유출량 추정. 박사학위논문, 부경대학교, 42 pp.

Bollinger, M.S. and W.S. Moore, 1993. Evaluation of salt marsh hydrology using radium as a tracer. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **57**: 2203-2212.

Bugna, G.C., J.P. Chanton, J.E. Cable, W.C. Burnett and P.H. Cable, 1996. The importance of groundwater discharge to the methane budgets of nearshore and continental shelf waters of the north-eastern Gulf Mexico. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **60**: 4735-4746.

Burnett, W.C., H. Bokuniewicz, M. Huettel, W.S. Moore and M. Taniguchi, 2003. Groundwater and pore water inputs to the coastal zone. *Biogeochemistry*, **66**: 3-33.

Burnett, W.C., M. Taniguchi and J. Oberdorfer, 2001. Measurement and significance of the direct discharge of groundwater into the coastal zone. *J. Sea Res.*, **46**: 109-116.

Cable, J.E., W.C. Burnett and J.P. Chanton, 1997. Magnitude and variations of groundwater seepage along a Florida marine shore-

line. *Biogeochemistry*, **38**: 189-205.

Capone, D.G. and J.M. Slater, 1990. Interannual patterns of water table height and groundwater derived nitrate in nearshore sediments. *Biogeochemistry*, **10**: 277-288.

Choi, J.M., 2004. Sediment behaviour mechanism in Yeosu Bay, South Coast of Korea. Ph.D. Thesis, Yosu National University, 166 pp.

Church, T.M., 1996. An underground route for the water cycle. *Nature*, **380**: 579-580.

Corbett, D.R., J.P. Chanton, W.C. Burnett, K. Dillon, C. Rutkowski and J. Fourqurean, 1999. Patterns of groundwater discharge into Florida Bay. *Limnol. Oceanogr.*, **44**: 1045-1055.

Elhatip, H., 2003. The use of hydrochemical techniques to estimate the discharge of Ovacik submarine springs on the Mediterranean coast of Turkey. *Environ. Geol.*, **43**: 714-719.

Gallagher, D.L., A.M. Dietrich, W.G. Reay, M.C. Hayes and G.M. Simmons, 1996. Ground water discharge of agricultural pesticides and nutrients to estuarine surface water. *Ground Water Mon. R. (Winter)*, 118-129.

Giblin, A.E. and A.G. Gaines, 1990. Nitrogen inputs to a marine embayment: the importance of groundwater. *Biogeochemistry*, **10**: 309-328.

Hussain, N., T.M. Church and G. Kim, 1999. Use of <sup>222</sup>Rn and <sup>226</sup>Ra to trace groundwater discharge into the Chesapeake Bay, *Mar. Chem.*, **65**: 127-134.

Hwang, D.W., G. Kim, Y.W. Lee and H.S. Yang, 2005a. Estimating submarine inputs of groundwater and nutrients to a coastal bay using radium isotopes. *Mar. Chem.*, **96**: 61-71.

Hwang, D.W., Y.W. Lee and G. Kim, 2005b. Large submarine groundwater discharge and benthic eutrophication in Bangdu Bay on volcanic Jeju Island, Korea. *Limnol. Oceanogr.*, **50**: 1393-1403.

Johannes, R.E., 1980. The ecological significance of the submarine discharge of groundwater. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **3**: 365-373.

Kelly, R.P. and S.B. Moran, 2002. Seasonal changes in groundwater input to a well-mixed estuary estimated using radium isotopes and implications for coastal nutrient budgets. *Limnol. Oceanogr.*, **47**: 1796-1807.

Kim, G. and D.W. Hwang, 2002. Tidal pumping of groundwater into the coastal ocean revealed from submarine <sup>222</sup>Rn and CH<sub>4</sub> monitoring. *Geophys. Res. Lett.*, **29**: GL015093.

Kim, G., K.K. Lee, K.S. Park, D.W. Hwang and H.S. Yang, 2003a. Large submarine groundwater discharge (SGD) from a volcanic island. *Geophys. Res. Lett.*, **30**: GL018378.

Kim, G., J.W. Ryu, H.S. Yang and S.T. Yun, 2005. Submarine groundwater discharge (SGD) into the Yellow Sea revealed by <sup>228</sup>Ra and <sup>226</sup>Ra isotopes: Implications for global silicate fluxes. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **237**: 156-166.

Kim, Y., K.S. Lee, D.C. Koh, D.H. Lee, S.G. Lee, W.B. Park, G.W. Koh and N.C. Woo, 2003b. Hydrogeochemical and isotopic evidence of groundwater salinization in a coastal aquifer: a case study in Jeju volcanic island, Korea. *J. Hydrol.*, **270**: 282-294.

Kohout, F.A., 1966. Submarine springs. A neglected phenomenon of coastal hydrology. In: Hydrology and Water Resources Development - *Symp. C.E.N.T.O.*, Ankara, pp. 391-413.

LaRoche, J., R. Nuzzi, R. Waters, K. Wyman, P.G. Falkowski and



- D.W.R. Wallace, 1997. Brown tide blooms in Long Island's coastal waters linked to interannual variability in groundwater flow. *Global Change Biol.*, **3**: 397-410.
- Liu, S.M., J. Zhang, S.Z. Chen, H.T. Chen, G.H. Hong, H. Wei and Q.M. Wu, 2003. Inventory of nutrient compounds in the Yellow Sea. *Cont. Shelf Res.*, **23**: 1161-1174.
- Moore, W.S., 1987.  $^{228}\text{Ra}$  in the south Atlantic Bight. *J. Geophys. Res.*, **92**: 5177-5190.
- Moore, W.S., 1996. Large groundwater inputs to coastal waters revealed by  $^{226}\text{Ra}$  enrichments. *Nature*, **380**: 612-614.
- Nozaki Y., H. Tsubota, V. Kasemsupaya, M. Yashima and N. Ikuta, 1991. Residence times of surface water and particle-reactive  $^{210}\text{Pb}$  and  $^{210}\text{Po}$  in the East China and Yellow Seas. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **55**: 1265-1272.
- Oberdorfer, J.A., M.A. Valentino and S.B. Smith, 1990. Groundwater contribution to the nutrient budget of Tomales Bay, California. *Biogeochemistry*, **10**: 199-216.
- Oh, Y.K., K.H. Kim and S.P. Ryu, 2000. Physicochemical characteristics of groundwater salinization in the eastern area of Cheju Island. *J. Korean Environ. Sci. Soc.*, **9**: 253-259.
- Park, W.B., S.K. Yang and G.W. Koh, 1994. Study on the fluctuations of groundwater levels in Cheju Island, Korea. *J. Korean Environ. Sci. Soc.*, **3**: 333-348.
- Shaban A., M. Khawlie, C. Abdallah and G. Faour, 2005. Geologic controls of submarine groundwater discharge: application of remote sensing to north Lebanon. *Environ. Geol.*, **47**: 512-522.
- Simmons, G.M., 1992. Importance of submarine groundwater discharge (SGWD) and seawater cycling to the material flux across sediment/water interfaces in marine environments. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **84**: 173-184.
- Swarzenski P.W., C.D. Reich, R.M. Spechler, J.L. Kindinger and W.S. Moore, 2001. Using multiple geochemical tracers to characterize the hydrogeology of the submarine spring off Crescent Beach, Florida. *Chem. Geol.*, **179**: 187-202.
- Taniguchi, M., W.C. Burnett, J.E. Cable and J.V. Turner, 2002. Investigation of submarine groundwater discharge. *Hydrol. Process.*, **16**: 2115-2129.
- Valiela, I., J. Costa, K. Foreman, J.M. Teal, B. Howes and D. Aubrey, 1990. Transport of water-borne nutrients from watersheds and their effects on coastal waters. *Biogeochemistry*, **10**: 177-198.
- Yang, H.S., D.W. Hwang and G. Kim, 2002. Factors controlling excess radium in the Nakdong River estuary, Korea: submarine groundwater discharge versus desorption from riverine particles. *Mar. Chem.*, **78**: 1-8.
- Zektser, I.S. and H.A. Loaiciga, 1993. Groundwater fluxes in the global hydrologic cycle: past, present and future. *J. Hydrol.*, **144**: 405-427.
- Zektser, I.S., V.A. Ivanov and A.V. Meskheteli, 1973. The problem of direct groundwater discharge to the seas. *J. Hydrol.*, **20**: 1-36.

---

2005년 11월 18일 원고접수

2005년 11월 26일 수정본 채택

담당편집위원: 김경렬