

한반도 주변 연안 해저를 통한 담지하수의 유출: 미래 수자원으로서의 중요성

황동운¹ · 김규범^{2,*} · 이재영³

¹국립수산과학원 갯벌연구소

²서울대학교 지구환경과학부

³국토해양부 해양환경정책과

Submarine Discharge of Fresh Groundwater Through the Coastal Area of Korea Peninsula: Importance as a Future Water Resource

DONG-WOON HWANG¹, GUEBUEM KIM^{2,*} AND JAE YOUNG LEE³

¹Tidal Flat Research Institute, National Fisheries Research and Development Institute, Gunsan 573-882, Korea

²School of Earth and Environmental Sciences/RIO, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea

³Marine Environment Policy Division, The Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, Gyeonggi-Do 427-712, Korea

해저지하수 유출은 최근 전 지구적인 혹은 지역적인 규모에서 육상의 담수, 영양염류 및 다른 용존 화학원소들을 해양으로 공급하는 중요한 역할을 담당하는 것으로 밝혀지고 있다. 특히, 해저를 통한 육상 담지하수의 해양으로의 유출은 해양환경학적 측면뿐만 아니라 미래 수자원 확보측면에서 매우 중요한 의미를 가진다. 일반적으로 해저를 통한 담지하수 유출은 전 세계 연안해역에서 일어나고 있으며, 그 양은 지역 또는 측정 방법에 따라 강물 유출량의 0.01-17% 범위인 것으로 보고되고 있다. 본 연구에서 조사 및 계산된 한반도 주변 해저 담지하수의 유출량은 제주도, 영일만, 마산만, 여자만 지역에서 주변 강물 유출량의 약 50%, 57%, 89%, 420%로 다른 나라의 연안 해역에 비해 상당히 양이 많고 지역적으로 큰 차이를 보였다. 하지만, 본 연구에서 이용한 담지하수 유출량 계산 방법은 연안해역에서의 기초적인 물수지 방법을 이용한 것으로, 보다 정확한 담지하수 유출량 평가를 위해서는 앞으로 연안해역에서 물수지에 영향을 미치는 여러가지 요인들(강수량, 조석, 증발, 물의 체류시간 등)의 시공간적 변화에 대한 지속적인 모니터링이 필요하다. 또한, 여전히 해저 담지하수 유출량을 평가하는데 있어서 방법적인 문제가 많이 제기되고 있는 만큼, 수리역학적인 방법 및 seepage meter를 이용한 실제측정 등을 통한 상호비교가 요구된다.

Submarine groundwater discharge (SGD) has been recognized as a provider for freshwater, nutrients, and dissolved constituents from continents to the oceans and paid more attention with regard to the mass balance of water or dissolved constituents on local and global scales. The submarine discharge of fresh groundwater (fresh SGD) through seepage or springs in coastal ocean may be especially important in aspects of water resource and marine environment managements in the future. Based on the worldwide compilations of observed fresh SGD, our review reveals that fresh SGD occurs in various marine environments along most shoreline of the world and the global estimates of fresh SGD were approximately 0.01-17% of surface runoff. In addition, the input of fresh SGD calculated and investigated in this study were about 50%, 57%, 89%, and 420% of total river discharge in Jeju Island, Yeongil Bay, Masan Bay, and Yeoja Bay, respectively. These inputs from fresh SGD along the shoreline of Korea Peninsula are much higher than those of the whole world, greatly vary with the region. However, since these estimates are based on the water balance method mainly used in coastal ocean, we have to perform continuous monitoring of various parameters, such as precipitation, tide, evapotranspiration and water residence time, which have an impact on the water balance in a lot of areas for evaluating the precise input of fresh SGD. In addition, since the method estimating the input of fresh SGD has brought up many problems, it is required to make an intercomparison between various methods such as hydrogeological assumption, numerical modeling, and seepage meter.

Keywords: Fresh Submarine Groundwater Discharge, Water Resource, Water Balance

*Corresponding author: gkim@snu.ac.kr

서론

지구상의 물은 지속적으로 순환하고 있으나, 사람에게 이용되는 양은 극히 일부이며 주로 빗물이 바다로 빠져나가는 과정에서 얻어진다. 육상에서 해양으로 흘러가는 물은 지표수의 형태와 지하수의 형태로 나눌 수 있는데, 지표수는 일반적으로 육안으로 쉽게 관측하고 이용할 수 있는 반면, 지하수는 지각중 투수성의 암석과 지층을 통해 흘러가기 때문에 그 양을 알아내는 것이 아주 어렵다.

연안해역에서 지하수의 해저를 통한 유출 형태를 살펴보면(Fig. 1), 수리학적 압력경사(hydraulic pressure gradient)에 의해 지각내 불투수성 지층사이의 피압 대수층(confined aquifer)을 따라 용천수로 유출되는 형태(submarine spring)와 자유면 대수층(unconfined aquifer)을 통하여 유출되는 형태(nearshore or offshore seepage)가 있다. 용천수의 형태로 유출되는 지하수는 해수와의 교환이 적어 염분이 낮은 반면(일반적으로 5 이하), 자유면 대수층을 통하여 유출되는 지하수는 파도(wave setup), 조석, 밀도차 등의 영향을 받아 재순환하는 해수(re-circulating seawater)와 혼합되어 염분이 높다(Church, 1996; Moore, 1999; Taniguchi et al., 2002).

이러한 담지하수 또는 염지하수의 해저를 통한 유출은 육상의 영양염류를 비롯한 각종 용존 화학원소들을 해양으로 운반하는 중요한 공급원으로 알려지면서 해양 환경학적인 측면에서 그 중요성이 크게 대두되고 있다(Church, 1996, Taniguchi et al., 2002, Burnett et al., 2003, 2006, Kim et al., 2005b). 예를 들면, Moore (1996)는 ²²⁶Ra 동위원소를 이용하여 미국 동부의 대륙붕 및 대륙사면에서 재순환된 해수를 포함한 해저지하수 유출량이 주변의 강물 유출량의 약 40%에 이르며, Ba, Cs, Cd, P 등과 같은 많은 화학성분들을 해양으로 실어 나른다고 보고하였다. 또한, 전세계에

서 해저지하수를 통해 해양으로 유입되는 Ca의 양은 강물을 통해 유입되는 양보다 10-20% 많으며(Milliman, 1993), 미국 New York의 Great South Bay에서 오염된 지하수를 통하여 만으로 공급된 질산염은 만내 해수중 질산염의 약 50%를 차지하는 것으로 나타났다(Capone and Salter, 1990). 이러한 해저지하수를 통해 육상에서 해양으로 운반된 영양염류를 비롯한 각종 용존 화학원소들은 연안해역의 부영양화(eutrophication)와 해양생태계에 큰 영향을 줄 수 있다(Johannes, 1980; Simmons, 1992; Burnett et al., 2001; Hwang et al., 2005a; 2005b; Lee et al., 2009). 최근, Kim et al.(2005a)은 한반도 주변에서 이러한 해저지하수 유출이 연안 환경 및 생태계(예, 적조) 등에 미치는 영향을 종합하여 보고 한 바 있다.

한편, 급격한 인구증가와 산업화로 인해 전 세계적으로 물 부족 현상이 심각해 지고 있으며, 이러한 물 부족을 해소하기 위하여 기존의 강물에 새로운 댐을 건설하여 추가적인 수자원을 확보하거나 인공강우, 북극과 남극의 빙하 등을 이용한 대체 수자원이 대안으로 제시되어왔다. 그러나, 실제 지구상에서 인간이 사용할 수 있는 담수의 96%가 지하수로 존재함에도 불구하고 인간에 의해 사용되는 지하수의 양은 1%도 되지 않는다. 특히, 육상에서 이러한 지하수를 이용하기 위해서는 고도의 관정개발기술과 많은 비용을 들여 수 백미터의 깊은 우물을 파야하는 어려움이 있다. 또한, 해안가 주변에 위치한 도시의 지하수 개발은 지하수위의 저하로 인한 지반침하나 지하수량의 감소로 인한 해수침투를 강화시켜 해안지하수의 염수화와 같은 여러 가지 지하수 오염 및 환경문제를 발생시킬 수 있다(심, 2003).

최근에 지하수 활용방안으로 제안된 것은 해양으로 지하수가 빠져나가는 대수층내에 인공적인 물막이 벽을 설치하고 집수정을 이용하여 지하수를 안정적으로 취수하는 시설인 지하담을 건설하거

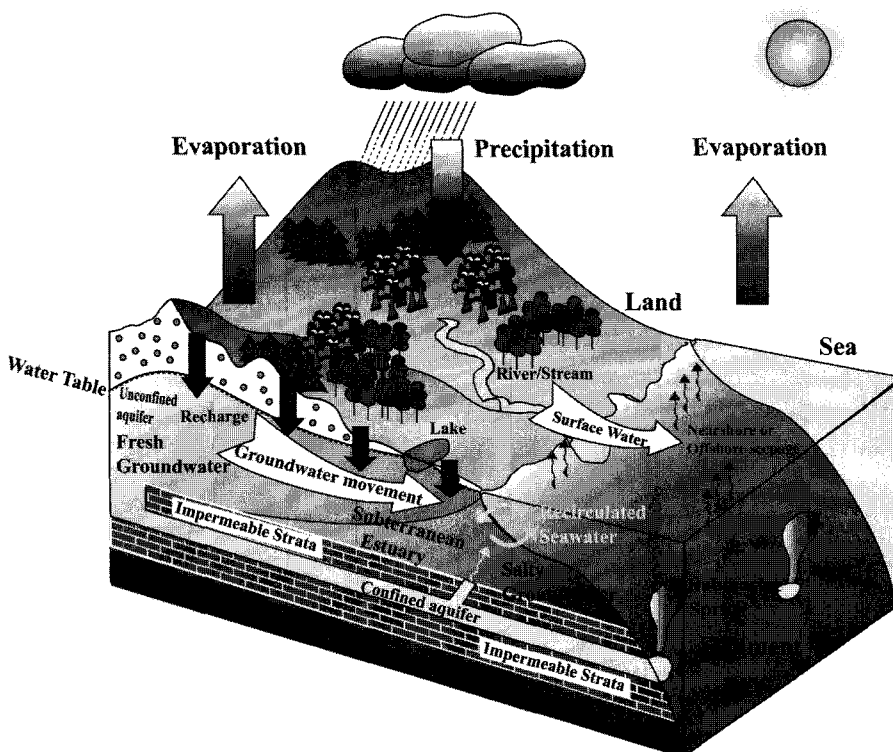


Fig. 1. Schematic diagram showing the types of submarine groundwater discharge. Arrows indicate the directions of fluid movement. A Subterranean estuary is formed at the transition zone between fresh groundwater and recirculating seawater (Hwang, 2005).

나, 해안가 부근에 담지하수 용출이 아주 강한 곳에 바다담을 건설하여 수자원을 확보하는 방법이 고려되고 있다(김갑 김, 2001; Taniguchi *et al.*, 2002). 이러한 연안지역에 댐을 건설할 경우 이용되지 않은 채 바다로 유출되는 담지하수를 막아 이용할 수 있을 뿐만 아니라 해안가 부근으로 바닷물이 스며드는 것도 방지할 수 있다는 장점이 있다. 하지만, 해저로 유출되는 지하수는 연안의 화학물질 공급 및 생물생산에 절대적인 영향을 미치므로(Moore, 1996; Burnett *et al.*, 2003; Hwang *et al.*, 2005a), 이러한 댐 건설에 단순히 수자원적인 측면만을 고려해서는 안 된다. 연안 지하담 혹은 바다담을 건설하기 위해서는 무엇보다 해저로 유출되는 담지하수의 양, 입지적인 적절성, 해양 생태계의 영향 등을 포함한 개발타당성을 먼저 평가하여야 할 것이다.

그러므로, 본 연구에서는 지금까지 전 세계적에서 밝혀진 담지하수 유출에 대한 역사적 기록 및 이용사례를 소개하고, 한반도 주변해역에서 수행된 해저지하수 연구결과를 기초로 담지하수 유출량을 산정하여 주변의 강물 유출량 및 전세계 다른 연안지역의 담지하수 유출량과 비교하였다.

해저 담지하수 유출의 역사적 배경 및 이용

연안해역에서 담지하수와 해수사이의 혼합작용에 대해서는 이미 육수학이나 수리학 분야에서 오래 전부터 많은 연구가 이루어져 왔다(Segol and Pinder, 1976; Reilly and Goodman, 1987). 그러나, 이들의 주된 관심은 주로 해양에서 육지쪽으로의 물의 이동 즉, 해수 침투(saltwater intrusion)에 관한 것이었다. 이러한 해수 침투에 대한 연구는 해안 대수층의 염수화가 세계적으로 광역화되면서 최근까지 활발하게 진행되고 있다. 이에 반해, 해저지하수 유출량은 물수지 연구에서 잘 고려되지 않았는데, 그 주된 원인은 측정방법이 잘 알려져 있지 않았기 때문이다. 그러나 Garrels and MacKenzei(1971)는 해양에서 해저지하수의 유출량은 지표면을 통한 담수 유출량의 10%에 달한다고 보고하였고, 하와이 섬의 서부 연안(Kay *et al.*, 1977)과 유카탄 반도(Hanshaw and Back, 1980)에서는 대부분의 육상의 담수가 해저를 통해 해양으로 유출되는 것으로 나타났다. 특히, 용천수 형태의 해저지하수 유출이 지중해, 대서양, 태평양 등 전세계의 많은 연안지역에서 발견되었으며, 이러한 용천수 중의 일부는 인간에게 필요할 만큼 충분한 양의 담수를 제공하는 것으로 조사되었다(Zektzer *et al.*, 1973).

육상의 담지하수가 용천수 형태로 해양으로 유출되는 것과 관련된 이야기는 이미 수십 세기 전부터 전해 내려 오고 있다. BC63~AD21에 살았던 로마의 지리학자인 Strabo는 시리아(지중해)의 Aradus 섬 부근 Latakia에서 외양으로 약 4 km 떨어진 용천수 부근에서 담수를 채수하여 인근 도시(Armit)로 운반하여 사용하였다는 기록을 남겼다(Kohout, 1966). 흑해에서는 육지로부터 약 60 km 떨어진 용천수 형태의 담지하수가 마치 파이프를 통하여 빠져나온 것처럼 솟구쳤다는 기록도 있다(Pliny the Elder, ca 1st century AD). 이뿐만 아니라 스페인의 Cadiz만에서도 이러한 용천수의 형태로 빠져 나온 담수를 바다에서 육지로 운반하였다는 기록이 있다(Zektzer *et al.*, 1973). Calvino and Stefanon(1969)는 프랑스와 이탈리아의 경계부근에 많은 용천수가 집단적으로 분포하고 있고 이들 중 가장 큰 용천수는 약 8,600 m³/day의 지하수를 해양으로 분

출한다고 보고하였다. 또한, 흑해의 Caucasus 해안 부근의 Gagra 지역에서도 많은 해저 용천수가 발견되었고 이들 중 가장 큰 용천수는 2,000 m³/day의 지하수를 바다로 흘러 보내는 것으로 보고되었다(Zektzer *et al.*, 1973). 특히, 대서양의 Florida 북동쪽 연안에 위치한 Crescent Beach의 해안으로부터 4 km 떨어져 있는 큰 해저 용천수는 3.7×10⁶ m³/day의 담지하수를 해양으로 분출하는 것으로 알려져 있다(Kohout, 1966).

이러한 용천수의 형태로 해양으로 유출되는 담지하수는 대부분 수자원(water resource)으로서 다양한 목적으로 생활에 이용되었다. 과거 Etruscan 시민들은 'hot baths'를 위해 연안 용천수를 사용하였고(Pausanius, ca 2nd century AD), 호주 북부의 Carpentaria 만 부근에서는 긴 대나무 줄기를 이용해 해저샘으로부터 담수를 얻어 생활용수로 사용하였으며(Semikhatov, 1954), 페르시아만 Bahrain섬의 원주민들도 이와 유사한 방법으로 담지하수를 끌어다 생활에 이용하였다(Williams, 1946). 또한, 흑해의 Gagra지역에서 해저샘을 통해 빠져나온 담지하수는 지나가는 큰 배들의 생활용수로 사용되기도 하였다(Zektzer *et al.*, 1973). 미국의 경우 미국 동부연안의 뉴욕과 다른 도시들에 생활용수를 공급할 목적으로 대서양 대륙붕내 담지하수를 이용할 수 있는 방안을 추진하기도 하였으며, 일부 지역에선 해안가 대수층내 구멍을 뚫어 담지하수를 뽑아 사용하기도 하였다(Zektzer *et al.*, 1973). 특히, 이러한 해저 담지하수를 가장 효율적으로 이용한 사례는 그리스 남동부 연안 부근에 건설한 바다담을 들 수 있다. 이 댐으로 인해 바닷가 부근에 큰 담수호가 형성되었고, 지속적으로 이 담수를 인근 육지로 끌어 사용할 수 있게 되었다(Zektzer, 1996).

한편, 이러한 용천수에 대한 역사적인 기록은 우리나라에서도 속담라록과 조선왕조 실록중 탐라록과 같은 문헌을 통해 일부 전해 내려오고 있다(<http://www.jejuwater.go.kr/>). 이들 역사적인 기록을 보면, 제주도 해안을 따라 많은 용천수가 존재하고 있고 이러한 용천수를 중심으로 현(지금의 마을)이 형성되었다고 보고하고 있다. 특히, 금성구 남천록(金聲久 南遷錄)에는 "기타 샘(泉)과 같은 것과 도내에는 모두 단샘(甘泉)이 없다. 백성들은 10리 내에서 떠다 마실 수 있으면 가까운 샘으로 여기고 멀면 혹은 4-50리에 이른다. 물맛은 짜서 참고 마실 수 없으나 지방민은 익어서 괴로움을 알지 못한다. 외지인은 이를 마시면 곧 번번이 구토하고 헛구역질을 하며 병이 난다"는 문구가 있어 일부 식수로도 사용되었음을 보여주고 있다. 최근에, 러시아의 학자인 Eckstein(1969)는 제주도 주변의 용천수를 조사한 결과, 제주도 주변에서 해저 용천수의 형태로 유입되는 담지하수 양은 4×10⁶ m³/day라고 하였으며, 이는 제주도에 내리는 총 강수량의 4.4%에 해당한다. 이러한 용천수는 상수도가 제대로 보급되지 않았던 1980년대 이전까지 제주도민의 식수원뿐만 아니라 생활 및 농업용수로 이용되어 왔으며, 지금도 서귀포 앞바다의 범섬이나 괘직와 같은 일부지역에서는 해안 주변의 용천수를 간이 목욕탕이나 빨래터로서 이용하고 있다(Fig. 2).

비록 이들 용천수를 통한 직접적인 담수 유출량의 비교는 어렵지만, 전세계의 대부분의 해안선을 따라 누출되는 담지하수 또한 용천수 못지 않게 육상으로부터 많은 양의 담수를 해양으로 공급하는 것으로 알려져 있다. 특히 육상과 해양의 경계면인 해안가 부근의 지층은 물이 쉽게 빠져나올 수 있는 약한 대수층으로 이

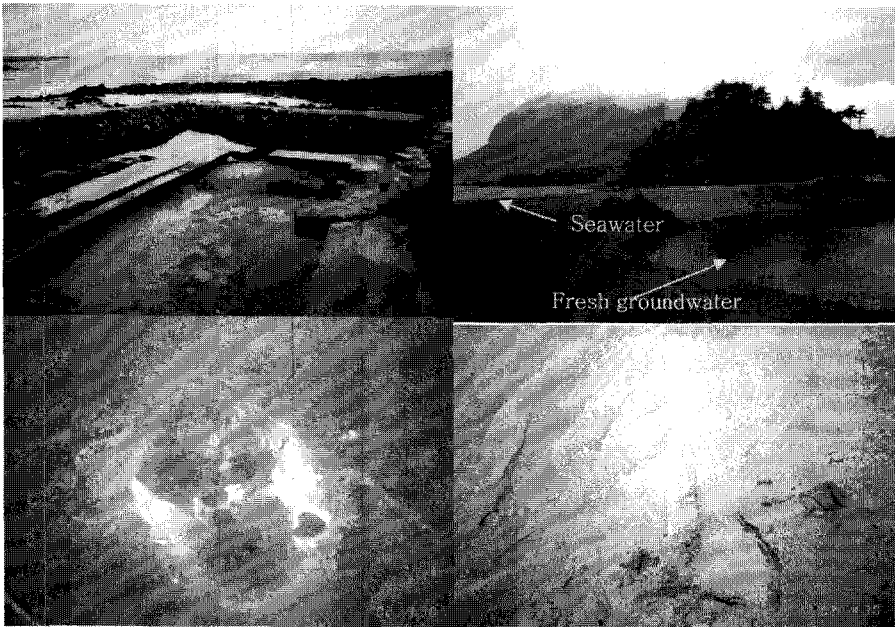


Fig. 2. Photographs of fresh groundwater discharged through submarine springs and seepage along the shoreline in Jeju Island.

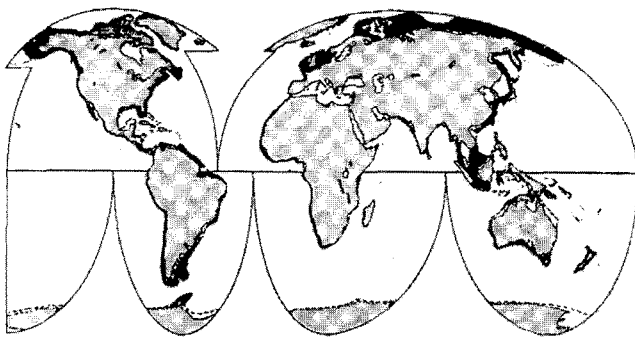


Fig. 3. Global distribution of permeable sediments on continental shelves for potential submarine groundwater discharge (Burnett *et al.*, 2003).

루어져 있고(Lambert and Burnett, 2003), 일반적으로 육상의 지하수면은 해수면보다 높기 때문에 해안을 통해 담지하수가 항상 해양으로 유출될 가능성이 높다. 또한, 해안선을 따라 누출(seepage) 되는 담지하수는 넓은 지역을 통해 해양으로 유출되기 때문에 그 유출량에 있어서 용천수의 형태로 유입되는 담지하수 보다 상대적으로 더 중요할 수 있다(Taniguchi *et al.*, 2002; Fig. 3).

연구 방법 및 자료

해저 담지하수 유출량 계산

해안을 통해 빠져나오는 해저지하수의 유출량은 시공간적으로 변화가 크기 때문에 그 유출량을 알아내는데 많은 어려움이 있다. 일반적으로 해저지하수의 유출량을 알아내는 방법은 여러 가지가 있으나 크게 3가지로 나눌 수 있다(Burnett *et al.*, 2001, 2006). 하나는 침윤계(seepage meter)를 이용하여 직접적으로 그 유출량을 알아내는 방법이고(Cable *et al.*, 1997; Kim *et al.*, 2003), 둘째는 물수지(water or salt balance), 수리지질학적 모델(hydrogeologic

assumption; hydrogeographic separation; Darcy's Law) 등과 같이 모델링을 이용한 방법이며(Garrels and MacKenzie, 1971; Zektzer *et al.*, 1973; Giblin and Gaines, 1990; Oberdorfer *et al.*, 1990), 셋째는 ^{226}Ra , ^{222}Rn , CH_4 등과 같은 지하수중에 풍부한 원소를 추적자로 이용하여 그 유출량을 알아내는 방법이다(Corbett *et al.*, 1999; Kelly and Moran, 2002; Hwang *et al.*, 2005a, 2005b; Kim *et al.*, 2005b). 이중 침윤계와 추적자를 이용하여 해저지하수 유출량을 평가하는 방법은 육상으로부터 유입되는 담지하수 뿐만 아니라 재순환하는 해수를 포함하기 때문에 담지하수의 유출량을 평가하는데 적절하지 않다. 따라서, 일반적으로 해저 담지하수의 유출량을 평가하는데 가장 널리 이용되고 있는 방법은 물수지 모델이며, 이는 다음과 같은 간단한 식으로 표현할 수 있다(Oberdorfer, 2003; Eq. 1).

$$\text{GW} = \text{P} - \text{SRO} - \text{ET} \quad (1)$$

여기서, GW는 담지하수의 유출량(m^3/day), P는 강수량(precipitation, m^3/day), SRO는 지표수의 유출량(surface runoff, m^3/day), ET는 증발산량(evapotranspiration, m^3/day)을 나타낸다(Fig. 4). 이 물수지 모델은 강물과 강우, 증발에 의한 물의 부피변화를 고려하여 해저 담지하수의 유출량을 알아내지만, 실제 각항(특히 증발산량)에 대한 정확한 값을 측정하여 알아내기가 어렵다는 단점이 있다. 따라서, 본 연구에서는 좀더 정확한 해저 담지하수 유출량을 알아내기 위하여 다음과 같이 변형된 물수지 방정식을 이용하여 계산하였다(Eq. 2).

$$\text{GW} = (f \times V)/\tau - P \times A - \text{SRO} \quad (2)$$

여기서, GW는 담지하수의 유출량(m^3/day), f 는 시스템(or 만)내 담수가 차지하는 비율, V는 시스템 내 물의 부피(m^3), τ 는 시스템 내 물의 체류시간(day), P는 일 평균 강수량(m/day), A는 시스템의 면적(m^2), SRO는 하천이나 강물을 통한 일 평균 담수 유입량(m^3/day)을 나타낸다.

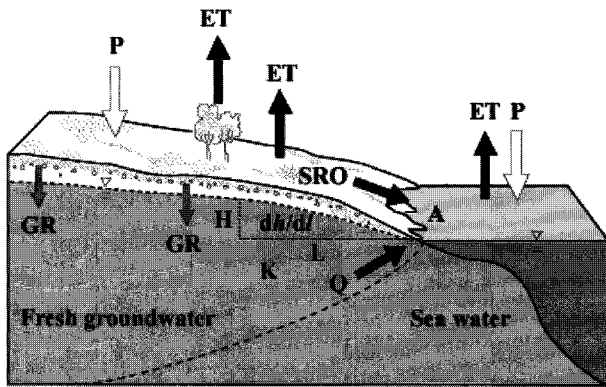


Fig. 4. Components of hydrogeologic and water balance models (Q: Groundwater discharge, A: Cross-section area, K: Hydraulic conductivity, dh/dl : Hydraulic head gradient, P: Precipitation, ET: Evapotranspiration, SRO: Surface runoff, GR: Groundwater recharge).

연구 자료

한반도 주변 연안 해저를 통한 담지하수의 유출량을 산정하기 위해 남해의 제주도(Kim et al., 2003; Hwang et al., 2005a), 여자만(Hwang et al., 2005b), 마산만(KORDI, 2003), 그리고 동해의 영일만(Kim et al., 2008) 등 지금까지 우리나라 주변해역에서 수행된 해저지하수 연구자료와 물수지 방법을 이용하였다. 여기서, 물수지 균형을 맞추기 위한 각 연구지역의 경계는 이전의 연구자들이 해저지하수 유출량을 산정하기 위해 제시한 연구지역으로 제한하였다. 또한, 이들 자료는 대부분이 남해안을 중심으로 연구되어져 있어 한반도 전체에 대한 담지하수 유출량을 알아보기에는 부족함이 있다. 이러한 공간적인 자료의 제약을 보충하기 위하여 본 연구에서는 기존에 수리지질학적 모델중 달시의 법칙(Darcy's Law)을 이용하여 추정된 우리나라 주변의 담지하수 유출 자료(Yang et al., 2004; Han et al., 2006)도 함께 이용하였다.

결과 및 고찰

한반도 주변 연안 해저를 통한 담지하수의 유출량

한반도 주변 연안 해저를 통한 담지하수 유출량 산정을 위해 사용한 물수지 방정식의 각각의 기호와 각 해역별 값들을 Table 1에 나타내었다.

제주도 주변 연안의 담지하수 유출량

남해에 위치한 화산섬인 제주도는 투수성이 높은 다공질의 현무암이나 조면암과 같은 화산암류로 이루어져 있어 강우량이 적은 시기에는 강우의 대부분이 지하로 스며들지만, 강우량이 많은 시기(6-8월)에는 일시적으로 지표면에 간헐천(intermittent stream)

이 형성되어 강우의 일부가 해양으로 유출되는 특성을 보인다. 또한, 지하수 함양율이 44%로서 전국 평균치인 18%보다 훨씬 높으며, 강우량이 많고 적음에 따라 지하수위의 변동이 매우 크다(Park et al., 1994). 한편, 제주도 동부의 성산부근에 위치한 방두만은 반폐쇄적인 내만해역으로 총면적이 $8.1 \times 10^5 \text{ m}^2$, 평균수심이 약 3 m이다. 조치는 최대 약 3 m로써 만내 평균수심과 거의 같으며, 해저퇴적물은 투수성이 높은 사질로 이루어져 있다. 방두만 주변으로는 큰 하천수의 유입이 없으며, 이로 인해 만내 해수의 혼합은 주로 해저지하수의 유출량과 조석에 의한 외해수의 유입량에 따라 크게 달라질 것으로 예상된다. Hwang et al.(2005a)은 해수중 해저지하수 유출 추적자인 Ra 동위원소와 ^{222}Rn 의 물질수지를 이용하여 방두만내 해저지하수 유출량을 조사한 바 있다.

Hwang et al.(2005a)이 2005년 5월에 측정한 방두만내 해수의 평균 염분은 32.99, 외해수의 평균 염분은 34.01였으며, 이로부터 계산된 만내 담수가 차지하는 비율은 3.0% 이다. 여기서, 방두만의 전체 물의 부피($2.5 \times 10^6 \text{ m}^3$)를 고려하면, 만내 담수량은 $7.5 \times 10^4 \text{ m}^3$ 이며, 여기에 만내 물의 체류시간(2 days; Hwang et al., 2005a)을 고려하였을 때 하루동안 만내로 유입되어야 하는 담수량은 약 $3.7 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{day}$ 인 것으로 추정되었다. 그러나 방두만의 경우 주변에 만내로 유입되는 하천이나 강물이 없고 관측일 일주일전 강수량은 없었기 때문에 전적으로 $3.7 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{day}$ 의 담수가 해저지하수의 형태로 유입된 것으로 생각된다. 이는 이전에 Hwang et al.(2005a)이 추정한 방두만내로 유입되는 전체 해저지하수 유입량($2.8\text{-}3.8 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{day}$)의 약 10-13%에 해당한다. 또한, 비록 제주도의 특성상 육상으로부터 해양으로 흘러 가는 큰 강이 없어 방두만 주변의 강물 유출량과 담지하수 유출량 사이의 실질적인 비교는 어려우나 방두만을 통한 담지하수 유출량은 제주도에 내리는 일평균 강수량($9.3 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{day}$; Hahn et al., 1997)과 비교했을 때 0.4%에 해당하였다.

한편, Kim et al.(2003)은 이전에 seepage meter를 이용한 해저지하수 유출량 연구에서 해수중 염분값으로 물수지를 이용하여 추정한 제주도 전체 해안가를 통해 유출되는 담지하수의 유출량은 $4.1 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{day}$ 였으며, Eckstein(1969)이 제주도 해안가 주변의 해저샘(submarine spring)을 통해 빠져나가는 담지하수 유출량은 $4.1 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{day}$ 이라고 보고하였다. 이들 결과를 종합해 볼 때 제주도의 경우 연안해역에서 누출과 해저샘의 형태로 유입되는 담지하수 유출량은 제주도의 일평균 강수량의 약 50% 정도인 것으로 판단된다.

여자만 주변 연안의 담지하수 유출량

여자만은 남해의 고흥반도와 여수반도 사이에 위치한 반폐쇄적인 내만으로, 면적은 약 320 km^2 , 평균수심은 약 5 m이다. 만내

Table 1. The values used in the water balance equation for estimating the fresh SGD

Parameter Study Area	f	V m ³	τ day	P* m/day	A m ²	SRO m ³ /day	Reference
Bangdu Bay, Jeju Is.	0.030	2.5×10^6	2	0	8.1×10^5	0	Hwang et al. (2005a)
Yeoja Bay	0.234	9.6×10^8	9	0.016	3.2×10^8	3.8×10^6	Hwang et al. (2005b)
Masan Bay	0.043	8.1×10^8	23	0.004	7.4×10^7	6.4×10^5	KORDI (2003)
Yeongil Bay	0.005	1.1×10^9	15	0.001	1.2×10^8	1.6×10^5	Kim et al. (2008)

*Precipitation represents the average precipitation before 7 days of the study period

로 유입되는 담수는 만의 동쪽에 위치한 이사천과 동천, 그리고 서쪽에 위치한 벌교천을 통해서 주로 유입되고 그 유입량은 평상시 약 $1.6 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{day}$ 인 것으로 알려져 있다. 여자만에서의 조차는 최대 4.3 m로 매우 크지만, 만내 해수와 외해수와의 교환은 좁은 입구와 복잡한 수로로 인해 원활하지 못하다. 여자만내 표층 퇴적상은 세립질 퇴적물이 만내 퇴적물의 93%를 차지하고 있으며, 조립질 퇴적물은 하천의 입구쪽과 만의 북쪽지역에 주로 분포하고 있다. Hwang *et al.*(2005b)은 여자만 주변에서 발생하는 적조를 일으키는 과잉의 영양염류가 여자만으로부터 유입된다고 생각하여 Ra 동위원소의 물질수지를 이용하여 여자만내 해저지하수 유출량과 지하수 유출에 의한 영양염류 유입량을 측정하였다.

Hwang *et al.*(2005b)이 2003년 8월에 측정된 여자만내 해수의 평균 염분은 22.25, 외해수의 평균 염분은 29.06였으며, 이로부터 계산된 만내 담수가 차지하는 비율은 23.4%였다. 여기서, 여자만의 표층 3 m이내의 물의 부피($9.6 \times 10^8 \text{ m}^3$)를 고려하였을 때 만내 담수량은 약 $2.2 \times 10^8 \text{ m}^3$ 였으며, 만내 물의 체류시간(9 days; Hwang *et al.*, 2005b)을 고려하였을 때 하루동안 만내로 유입되는 담수 유입량은 약 $2.5 \times 10^7 \text{ m}^3/\text{day}$ 인 것으로 추정되었다. 이중 관측일 일주일전 일평균 강수량(0.016 m/day)과 만의 면적($3.2 \times 10^8 \text{ m}^2$) 그리고 강수량을 기초로 여자만 내로 유입되는 일평균 하천수 유입량($3.8 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{day}$; Choi, 2001)을 고려한 여자만 주변의 해저를 통해 유입되는 담지하수 유출량은 약 $1.6 \times 10^7 \text{ m}^3/\text{day}$ 였다. 이는 Hwang *et al.*(2005b)이 추정된 여자만내로 유입되는 전체 해저지하수 유입량($2.0 \times 10^7 \text{ m}^3/\text{day}$)의 80%에 해당한다. 또한, 벌교천, 이사천, 그리고 동천과 같은 여자만으로 유입되는 하천을 통해 공급되는 담수 유입량보다 약 4배 더 많은 양이며, 이는 여자만내 담수의 주 공급원이 해저지하수임을 의미한다.

마산만 주변 연안의 담지하수 유출량

마산만은 한반도의 남동부 진해만내 북동쪽 깊숙한 곳에 위치한 반폐쇄적인 내만으로, 면적은 약 74 km^2 , 평균수심은 약 11 m이다. 만내로 유입되는 담수는 주로 만의 북동쪽에 위치한 창원천과 남천을 통해 유입되고 그 유입량은 평상시 약 $6.4 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{day}$ 인 것으로 알려져 있다. 마산만 부근에서의 평균조차는 약 1.3 m로 매우 작으며, 외해로부터 가덕수로와 부도수로를 따라 남북방향으로 약 13 km의 좁고 긴 형태의 지형적 특성에 의해 외해수와의 교환은 활발하지 않다. 마산만내 표층 퇴적상은 대부분 실트와 점토성분이 97% 이상인 세립질 퇴적물로 이루어져 있다. KORDI(2003)는 마산만내 주 오염원이 해저지하수라고 생각하고 Ra 동위원소의 물질수지를 이용하여 마산만내 해저지하수 유출량과 지하수 유출에 의한 영양염류 유입량을 산정하였다.

KORDI(2003)이 제시한 장기관측을 통한 마산만내 해수의 평균 염분은 26.68, 마산만 외측 진해만 입구부근의 외해수의 평균 염분은 27.87였으며, 이로부터 계산된 만내 담수가 차지하는 비율은 약 4.3%였다. 여기서, 마산만의 물의 부피($8.1 \times 10^8 \text{ m}^3$)를 고려하였을 때 만내 담수량은 약 $3.5 \times 10^7 \text{ m}^3$ 였으며, 만내 물의 체류시간(~23 days; KORDI, 2003)을 고려하였을 때 하루동안 만내로 유입되는 담수 유입량은 $1.5 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{day}$ 인 것으로 추정되었다. 이중 마산만 주변의 일평균 강수량(0.004 m/day)과 만의 면적($7.4 \times 10^7 \text{ m}^2$) 그리고 마산만내로 유입되는 일평균 하천수 유입량(6.4

$\times 10^5 \text{ m}^3/\text{day}$)을 고려한 마산만내로 해저를 통해 유입되는 담지하수 유출량은 약 $5.7 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{day}$ 였다. 이는 KORDI(2003)이 추정된 마산만내로 유입되는 전체 해저지하수 유입량($5.5 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{day}$)과 비슷하고, 창원천과 같은 마산만으로 유입되는 하천을 통해 공급되는 담수 유입량의 약 89%에 해당하였다.

영일만 주변 연안의 담지하수 유출량

영일만은 한반도의 동해남부에 위치한 반폐쇄적인 만으로, 만의 면적은 약 120 km^2 , 평균수심은 약 14 m이다. 만내로 유입되는 담수는 만의 서쪽에 위치한 형산강을 통해 주로 유입되고 그 유입량은 평상시 약 $1.6 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{day}$ 인 것으로 알려져 있다. 영일만 부근의 평균조차는 약 0.3 m로 조석간만의 차가 거의 없으며, 만의 폭이 10 km로 매우 넓어 북상하는 동안난류와 남하하는 북한한류수의 영향을 직접적으로 받는다. 영일만내 표층 퇴적상은 대부분 입자가 큰 모래와 자갈로 이루어져 있고, 만의 남동쪽에 일부 세립질의 실트와 점토가 분포하고 있다. Kim *et al.*(2008)은 단층이 발달되어 있는 영일만에 해저지하수 유출 가능성이 크다고 생각하여 Ra 동위원소의 물질수지를 이용하여 영일만내 해저지하수 유출량을 산정하였다.

Kim *et al.*(2008)이 2004년 8월에 측정된 영일만내 해수의 평균 염분은 33.57, 영일만 입구쪽 외해수의 평균 염분은 33.73였으며, 이로부터 계산된 만내 담수가 차지하는 비율은 0.5%였다. 여기서, 영일만의 표층 9 m이내의 물의 부피($1.1 \times 10^9 \text{ m}^3$)를 고려하였을 때 만내 담수량은 $5.2 \times 10^6 \text{ m}^3$ 였으며, 만내 물의 체류시간(~15 days; Kim *et al.*, 2008)을 고려하였을 때 하루동안 만내로 유입되는 담수 유입량은 약 $3.5 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{day}$ 인 것으로 추정되었다. 이중 관측일 일주일 전 영일만 주변의 일평균 강수량(0.0008 m/day)과 만의 면적($1.2 \times 10^8 \text{ m}^2$) 그리고 관측일 동안 영일만으로 유입된 형산강의 일평균 강물 유입량($1.6 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{day}$)을 고려하면 영일만내로 해저를 통해 유입되는 담지하수 유출량은 약 $0.9 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{day}$ 였다. 이는 Kim *et al.*(2008)이 추정된 영일만내로 유입되는 전체 해저지하수 유입량($6.0 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{day}$)의 약 5% 이하로 매우 적은 양이지만, 형산강을 통해 유입되는 담수 유입량의 약 57%에 해당하였다.

전 세계 연안 해저를 통한 담지하수의 유출량

전 지구적인 규모로 지금까지 물수지와 수리지질학적 모델(hydrogeologic assumption or hydrogeographic separation) 등을 통해 밝혀진 담지하수의 유출량과 전 세계 평균 강물 유출량에 대한 담지하수 유출량의 상대적인 비율을 Table 2에 나타내었다.

전세계적으로 해안을 통해 해양으로 유입되는 담지하수의 유출량은 대부분 강물 유입량의 약 0.01-17% 범위에 있는 것으로 나타났다. 지금까지 우리나라의 경우 해저를 통한 담지하수 유출량에 대한 조사나 연구는 거의 이루어지지 않았으나 최근에 Han *et al.*(2006)이 수리지질학적 모델(Darcy's Law)을 이용하여 우리나라의 권역별 충적층 지하수의 해안유출량을 평가하였다. 그에 의하면, 낙동강, 영산강/섬진강, 금강 주변 수계의 전체 해안을 통해 빠져 나오는 담지하수의 유출량은 각각 $3.1 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{day}$, $1.6 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{day}$, $0.3 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{day}$ 라고 추정하였다. 이를 그 지역으로 유입되는 평균 강물 유출량(Yang *et al.*, 1999; Yang *et al.*, 2002; 한과 박, 2003;

Table 2. Comparison of the input of fresh SGD on the global scale.

Method	Amounts of fresh SGD to surface runoff (%)	Reference
Hydrogeologic assumption	1	Nace (1970)
Water balance	10	Garrels and MacKenzie (1971)
Water balance etc.	10	Zektzer <i>et al.</i> (1973)
Water balance	31*	Lvovich (1974)
Hydrogeologic assumption	4.5	Chandury and Clauer (1986)
Hydrogeologic assumption	0.3	COSOD (1987)
Literature	6*	Berner and Berner (1987)
Hydrogeographic separation	6*	Zektzer and Loaiciga (1993)
Literature	0.01-10	Church (1996)
Water balance	6	Shiklomanov (1999)
Water balance	2.7-8.0	Burnett <i>et al.</i> (2003)
Water balance	12-17	Seiler (2003)

*Total water flux = base flow + surface runoff

*Global surface-runoff : 37,500 km³/year**Table 3.** Importance of fresh SGD on local scale

Study Area	Method	Fresh SGD ($\times 10^4$ m ³ /day)	Amount of fresh SGD to surface runoff (%)	Reference
United States	Water balance	52000	12	Nace (1969)
Great South Bay, New York	Water balance	6.8	20	Pluhowki and Kantrowitz (1964)
	Darcy's Law	7.2	21	
Long Island, New York	Water balance	1.5	33	Isbister (1966)
Eastern Coast	Mathematical Model	120	1.0	McGuinness (1963)
Tomales Bay, California	Darcy's Law	0.7	4	Oberdorfer <i>et al.</i> (1990)
Santa Barbara, California	Water balance	0.03	0.04	Muir (1968)
Kahuku, Oahu, Hawaii	Water balance	21	1.0	Takasaki and Valenciano (1969)
Marine Cove, Cape Cod, Massachusetts	Water balance	1.2	27	Giblin and Gaines (1990)
	Darcy's Law	8.9	200	
	Salinity/tidal budget	0.8	18	
Waquoit Bay, Cape Cod, Massachusetts	Hydrogeological assumption	5.9	133	Mulligan and Charette (2006)
	Recharge estimate	2.7	62	
	Seepage meter	2.3	52	
	Seepage meter	5.2	119	
South Atlantic Bight	Mathematical Model	120	1.7	Younger (1996)
Chesapeake Bay	Darcy's Law	1.1	0.006	Robinson (1996)
	Numerical Model	0.6	0.004	
Baltic Sea	Water balance	300	1.1	Zektzer (1968)
Aral Sea	Water balance	550	4.0	Pashkovsky (1969)
Gulf of Riga, Latvia	Water balance	30	1.0	Zektzer <i>et al.</i> (1973)
Korea				
Jeju Island	Water balance	410	44*	Kim <i>et al.</i> (2003)
	Submarine spring	41	4.4*	
Bandu Bay, Jeju Island	Water balance	3.75	0.4*	Hwang <i>et al.</i> (2005a)
Yeongil Bay	Water balance	9.2	58	Kim <i>et al.</i> (2008)
Yeoja Bay	Water balance	1600	417	Hwang <i>et al.</i> (2005b)
Masan Bay	Darcy's Law	2.7	4.1	Yang <i>et al.</i> (2004)
	Water balance	57	89	
Nakdong River watershed	Darcy's Law	310	8.5	Han <i>et al.</i> (2006)
Youngsan/Soemjin River watershed	Darcy's Law	160	14.6	Han <i>et al.</i> (2006)
Guem River watershed	Darcy's Law	31	2.3	Han <i>et al.</i> (2006)

*Amount of fresh SGD to precipitation in the study region.

Table 4. Comparison of the inputs of fresh SGD per unit shoreline distance on local scale

Study Area	Method	Input of fresh SGD (m ³ /day/ km shoreline)	Reference
United States			
Lake Michigan	Literature	350-8300	Sellinger (1995)
Chesapeake Bay	Darcy's Law	6.6	Robinson (1996)
West Neck Bay	Water balance	500	Cambareri and Eichner (1998)
Waquoit Bay	Hydrogeological assumption	4000	Mulligan and Charette (2006)
Australia			
Cockburn Sound	Water balance	2500-4800	Smith and Nield (2003)
Korea			
Jeju island	Water balance	16200	Kim <i>et al.</i> (2003)
Bangdu Bay	Water balance	13400	Hwang <i>et al.</i> (2005a)
Yeoja Bay	Water balance	107000	Hwang <i>et al.</i> (2005b)
Yeongil Bay	Water balance	1500	Kim <i>et al.</i> (2008)
Masan Bay	Water balance	8000	KORDI (2003)
	Darcy's Law	500	Yang <i>et al.</i> (2004)
Nakdong River watershed	Darcy's Law	9300	Han <i>et al.</i> (2006)
Youngsan/Soemjin watershed	Darcy's Law	4900	Han <i>et al.</i> (2006)
Guem River watershed	Darcy's Law	2000	Han <i>et al.</i> (2006)

Kwon *et al.*, 2004)과 비교했을 때 2-15% 사이인 것으로 나타났다. 또한, Yang *et al.*(2004)은 마산만 주변지역에서 수리지질학적 모델(Darcy's Law)을 이용하여 추정된 담지하수 유출량 2.7×10⁴ m³/day라고 하였으며, 이는 주변의 창원천과 산호천 등을 통하여 마산만으로 유입되는 담수 유입량의 약 4%에 해당하였다. 이들 추정값은 지금까지 밝혀진 지구적인 규모로 물수지와 수리지질학적 모델 등을 통해 밝혀진 전 지구적인 규모의 강물유출량에 대한 담지하수의 유출량의 상대적인 비율과 비슷하다. 그러나 본 연구에서 밝혀진 제주도 주변과 여차만, 영일만, 그리고 마산만 주변의 해저 담지하수 유출량은 주변의 하천이나 강물을 통해 유입되는 담수 유입량의 50-450% 범위인 것으로 나타났다. 이는 일반적으로 해저지하수의 유출이 시공간적으로 큰 차이를 보이고, 일부 수리지질학적 가정을 기초로 Darcy's Law를 이용한 모델의 경우 연안 대수층의 깊이 즉, 해안선으로부터 해저 담지하수가 빠져나오는 거리를 과소평가 하기 때문인 것으로 생각된다(Taniguchi *et al.*, 2002).

한편, 본 연구결과처럼 해안을 통한 담지하수의 유출은 지역적인 규모에서 더 중요한 역할을 담당할 수 있다. 지금까지 전세계적으로 보고된 지역적인 규모에서의 해저 담지하수 유출량과 주변 강물 유출량과의 상대적인 비율을 Table 3에 나타내었다. 일반적으로 해안가 부근에서 담지하수는 수리학적 압력경사(hydraulic pressure gradient)에 의해 주로 이류적 흐름의 형태를 보이며 해양으로 유입되고 그 유입량은 지층의 경사도나 강수량, 암석의 투과율과 같은 수리지질학적 특성과 조차, 해저지형, 해저퇴적물의 입도 등과 같은 해양학적 특성에 따라 크게 의존하며 큰 변화를 보인다(Burnett *et al.*, 2003). 유럽의 Baltic Sea, Aral Sea, Gulf of Riga 그리고 미국 동부의 South Atlantic Bight와 Chesapeake Bay 등 전 세계의 대부분의 지역에서 수리학적 모델과 물수지 모델을 이용하여 알아낸 담지하수의 유출량은 우리나라의 낙동강과 금강 주변 수계에서처럼 주변의 강물 유입량의 10% 이하인 것으로 나타났다(Zektzer, 1968; Pashkovsky, 1969; Zektzer *et al.*,

1973; Robinson, 1996; Younger 1996). 그러나, 미국 동부의 Great South Bay, Long Island, Waquoit Bay, Cape Cod 등 일부 지역에서는 우리나라의 제주도과 여차만, 마산만, 영일만과 같이 담지하수의 유출량이 주변의 강물 유출량의 20% 이상인 것으로 나타났다. 특히, Great South Bay의 경우 강물 유출량에 대한 담지하수 유출량이 20% 밖에 되지 않지만 만대로 유입되는 강물의 90% 이상이 주변 지하수로부터 기원하기 때문에 실질적으로 만대로 유입되는 담수 중에서 담지하수가 기여하는 비율은 이보다 훨씬 클 것으로 예상된다.

우리나라의 해안을 통해 해양으로 빠져나가는 담지하수 유출량이 다른 나라에 비해 어느 정도인지 알아보기 위하여 단위 길이 (or 해안선 길이)당 담지하수 유출량을 Table 4에 나타내었다. 수리지질학적 모델(Darcy's Law)과 물수지 모델을 이용하여 추정된 우리나라 주변에서 해안을 통해 해양으로 빠져 나오는 담지하수 유출량은 500~107,000 m³/day/km shoreline 범위로 지역적으로 큰 차이를 보였으나 대체로 여차만과 낙동강, 그리고 제주도 등이 위치한 남해안이 서해(금강)나 동해(영일만)에 비해 다소 높은 담지하수 유출량을 나타내었다. 이러한 담지하수 유출량은 미국 동부지역의 Lake Michigan, Waquoit Bay, 그리고 호주의 Cockburn Sound 주변에서 추정된 담지하수 유출량과는 비슷하고, 미국 동부의 Chesapeake Bay나 West Neck Bay 부근에서 추정된 담지하수 유출량보다는 4배 이상 높았다.

결론

물수지 모델을 이용하여 추정된 한반도 주변 해저 담지하수의 유출량은 제주도, 영일만, 마산만, 여차만 지역에서 각각 주변의 강물 유출량의 약 50%, 57%, 89%, 420%였다. 비록, 연구지역이 특정 장소에 한정되어 있어 정확한 비교는 어려우나 우리나라 주변의 해안을 통한 담지하수의 유출량은 세계 다른 나라에 비해 다소 높고, 지역적으로 큰 차이를 보이는 것으로 나타났다. 이는 우

리나라에서 해안을 통해 유출되는 담지하수가 미래 수자원으로서 이용 가능성이 높다는 것을 의미하며, 해저 담지하수 유출에 대한 지속적인 연구가 수행되어야 할 것으로 생각된다. 일반적으로 대부분의 해저지하수 유출은 재순환된 해수를 통해 이루어지고 있고, 이 부분에 대한 연구는 전 세계적으로 높은 관심을 가지고 집중적으로 연구되어 해저지하수 유출이 연안에서 환경학적, 생태학적으로 매우 중요하다는 사실이 밝혀지고 있다 그러나, 해안을 통한 담지하수 유출에 대한 연구는 아직 전세계적으로 연구가 많이 이루어져 있지 않다. 특히, 해저 담지하수 유출은 그 지역의 지질학적, 수리학적, 해양학적 특성에 따라 각기 다른 양상을 보이고, 주요 연안에서는 해저지하수 유출에 대한 정확하고 신뢰할 만한 자료가 확보되어야만 그 영향을 평가할 수 있다. 따라서, 해안 담지하수 유출에 대해 앞으로 넓은 지역에서 다양한 방법을 이용하여 집중적인 연구가 수행되어야 한다. 아울러, 현재까지 해저 담지하수 유출량을 정확하게 알아 낼 수 있는 방법이 정립되지 않았기 때문에 이를 알 수 있는 새로운 방법을 개발하여 한반도 부근에서 장기간에 걸친 조사를 통해 담지하수 유출지역 및 그 유출량을 조사할 필요가 있다. 이러한 자료가 확보된 이후, 연안 지하담 및 바다담 건설의 타당성을 조사하여 미래 수자원 확보에 해저 담지하수를 이용할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국립수산과학원 수산시험연구과제(저서동물군집을 이용한 생태계 평가기법 연구, RP-2010-ME-048)의 지원에 의해 연구되었습니다.

참고문헌

- 김형수, 김성주, 2001. 한반도 동해안 유출 지하수에 대한 연구. 지구물리학회지, 4: 71-84.
- 심병완, 2003. 부산 동남해안 지역의 수리동역학적 해수침투 특성 연구. 부경대학교 박사학위논문, 부산, 123pp.
- 한상국, 박미옥, 2003. 영산강 방류수중 유기화합물 분석. 대한환경공학회 2003 춘계학술대회 논문집, 한국과학기술원, pp. 1264-1268.
- Berner, E.K. and R.A. Berner, 1987. The global water cycle. Prentice-Hall: Englewood Cliffs, NJ, pp. 12-24.
- 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.
- 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., P.K. Aggarwal, A. Aureli, H. Bokuniewicz, J.E. Cable, M.A. Charette, E. Kontar, S. Krupa, K.M. Kulkarni, A. Loveless, W.S. Moore, J.A. Oberdorfer, J. Oliveira, N. Ozyurt, P. Povinec, A.M.G. Privitera, R. Rajar, R.T. Ramessur, J. Scholten, T. Stieglitz, M. Taniguchi and J.V. Turner, 2006. Quantifying submarine groundwater discharge in the coastal zone via multiple methods. *Sci. Total Environ.*, 367: 498-543.
- Cable, J.E., W.C. Burnett, J.P. Chanton, D.R. Corbett and P.H. Cable, 1997. Field evaluation of seepage meters in the coastal marine environment. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 45: 367-375.
- Calvino, F. and A. Stefanon, 1969. The submarine springs of fresh water and the problems of their capture. Rapp. P-V Réunion, Commis. Int. Explor. Sci. Mer Méditerran. Monaco, 19: 609-610.
- Cambareri, T.C. and E.M. Eichner, 1998. Watershed delineation and ground water discharge to a coastal embayment. *Ground Water*, 36: 626-634.
- 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.
- Chandury, S. and N. Clauer, 1986. Fluctuations of isotopic composition of strontium in seawater during the Phanerozoic Eon. *Chem. Geol.*, 59: 293-303.
- Choi, H.Y., 2001. Oceanographic condition of the coastal area between Narodo Is. and Sorido Is. in the Southern Sea of Korea and its relation to the disappearance of red-tide observed in summer 1998. *The Sea - J. Kor. Soc. Oceanogr.*, 6: 49-62.
- 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.
- COSOD II, 1987. Fluid circulation in the crust and the global geochemical budget. Report of the Second Conference on Scientific Ocean Drilling, Strasbourg, France, 6-8 July.
- Eckstein, Y., 1969. Hydrogeology of a volcanic island Che ju Do, Korea. *Bull. Int. Assoc. Sci. Hydrol.*, 14: 45-60.
- Garrels, R.M. and F.T. MacKenzie, 1971. Evolution of sedimentary rocks. Norton & Co., New York, 397 pp.
- Giblin, A.E. and A.G. Gaines, 1990. Nitrogen inputs to a marine embayment: the importance of groundwater. *Biogeochemistry*, 10: 309-328.
- Hahn, J., Y. Lee, N. Kim, C. Hahn and S. Lee, 1997. The groundwater resources and sustainable yield of Cheju volcanic island, Korea. *Environ. Geol.*, 33: 43-53.
- Han, S.Y., H.S. Hong and N. Park, 2006. Distribution of coastal groundwater discharge from surficial aquifers of major river districts. *J. Kor. Soc. Civil Engineer.*, 26: 1-6.
- Hanshaw, B.B. and W. Back, 1980. Chemical mass-wasting of the northern Yucatan Peninsula by groundwater dissolution, *Geol.*, 8: 222-224.
- Hwang, D.W., 2005. Magnitudes and mechanisms of submarine groundwater discharge (SGD) in the South Sea of Korea. Doctor thesis, Pukyong National University, 186 pp.
- Hwang, D.W., Y.W. Lee and G. Kim, 2005a. Large submarine groundwater discharge and benthic eutrophication in Bangdu Bay on volcanic Jeju Island, Korea. *Limnol. Oceanogr.*, 50: 1393-1403.
- Hwang, D.W., G. Kim, Y.W. Lee and H.S. Yang, 2005b. Estimating submarine inputs of groundwater and nutrients to a coastal bay using radium isotopes. *Mar. Chem.*, 96: 61-71.
- Isbister, 1966. Geology and hydrology of northeastern Nassau County, Long Island, New York. U.S. Geol. Surv. Water-Supply Pap., 1825, 89 pp.
- Johannes, R.E., 1980. The ecological significance of the submarine

- discharge of groundwater. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **3**: 365–373.
- Kay, A.E., L.S. Lau, E.D. Stroup, S.J. Doller, D.P. Fellows and R.H.F. Young, 1977. Hydrological and ecological inventories of the coastal waters of West Hawaii, Univ. Hawaii, Water Resources Research Center Technical Report, 105, 94 pp.
- 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., D.W. Hwang, J.W. Ryu and Y.W. Lee, 2005a. Environmental and ecological consequences of submarine groundwater. *The Sea - J. Kor. Soc. Oceanogr.*, **10**: 204–212.
- Kim, G., K.K. Lee, K.S. Park, D.W. Hwang and H.S. Yang, 2003. Large submarine groundwater discharge (SGD) from a volcanic island. *Geophys. Res. Lett.*, **30**: doi: 10.1029/2003GL018378.
- Kim, G., J.W. Ryu and D.W. Hwang, 2008. Radium tracing of submarine groundwater discharge (SGD) and associated nutrient fluxes in a highly-permeable bed coastal zone, Korea. *Mar. Chem.*, **109**: 307–317.
- Kim, G., J.W. Ryu, H.S. Yang and S.T. Yun, 2005b. Submarine groundwater discharge (SGD) into the Yellow Sea revealed by ^{228}Ra and ^{226}Ra isotopes: Implications for global silicate fluxes. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **237**: 156–166.
- Kohout, F.A., 1966. Submarine springs: a neglected phenomenon of coastal hydrology. *J. Hydrol.*, **26**: 391–413.
- KORDI, 2003. Land-ocean interactions in the coastal zone. BSPE827-01-1493-4, 505 pp.
- Kwon, K.Y., C.H. Moon, J.S. Lee, S.R. Yang, M.O. Park and P.Y. Lee, 2004. Estuarine behavior and flux of Nutrients in the Seomjin River Estuary. *The Sea - J. Kor. Soc. Oceanogr.*, **9**: 153–163.
- Lambert, M.J. and W.C. Burnett, 2003. Submarine groundwater discharge estimates at a Florida coastal site based on continuous radon measurements. *Biogeochemistry*, **66**: 55–73.
- Lee, Y.W., D.W. Hwang, G. Kim, W.C. Lee and H.T. Oh, 2009. Nutrient inputs from submarine groundwater discharge (SGD) in Masan Bay, an embayment surrounded by heavily industrialized cities, Korea. *Sci. Total Environ.*, **407**: 3181–3188.
- Lvovich, M.L., 1974. World water resources and their future. Mysl. Publisher: Moscow, 448 pp.
- McGuinness, C.L., 1963. The role of groundwater in the national water situation. U.S. Geol. Surv. Water-Supply Pap., 1800, pp. 76–246.
- Michael, H.A., 2004. Seasonal dynamics in coastal aquifers: investigation of submarine groundwater discharge through field measurements and numerical models. PhD Dissertation, MIT.
- Michael, H.A., J.S. Lubetsky and C.F. Harvey, 2003. Characterizing submarine groundwater discharge: a seepage meter study in Waquoit Bay, Massachusetts. *Geophys. Res. Lett.*, **30**: doi:10.1029/2002GL016000.
- Milliman, J.D., 1993. Production and accumulation of calcium carbonate in the ocean: budget of a non-steady state. *Glob. Biogeochem. Cycles*, **7**: 927–957.
- Moore, W.S., 1996. Large groundwater inputs to coastal waters revealed by ^{226}Ra enrichments. *Nature*, **380**: 612–614.
- Moore, W.S., 1999. The subterranean estuary: a reaction zone of groundwater and seawater. *Mar. Chem.*, **65**: 111–125.
- Muir, K.S., 1968. Groundwater reconnaissance of the Santa Babara-Montecito Sea, Santa Barbara County, California. U. S. Geol. Surv. Water-Supply Pap., 1859-A, 28pp.
- Mulligan, A.E. and M.A. Charette, 2006. Intercomparison of submarine groundwater discharge estimates from a sandy unconfined aquifer. *J. Hydrol.*, **327**: 411–425.
- Nace, R.L., 1969. Groundwater: perspectives and prospects. *Water Well J.*, **23**: 28–29.
- Nace, R.L., 1970. World hydrology: status and prospects. In: Symposium on World Water Balance, Vol I. IAHS Publication No.92. IAHS/UNESCO: Louvain, pp. 1–10.
- Oberdorfer, J.A., 2003. Hydrogeologic modeling of submarine groundwater discharge: comparison to other quantitative methods. *Biogeochemistry*, **66**: 159–169.
- Oberdorfer, J.A., M.A. Valentino and S.V. Smith, 1990. Groundwater contribution to the nutrient budget of Tomales Bay, California. *Biogeochemistry*, **10**: 199–216.
- Park, W.B., S.K. Yang and G.W. Koh, 1994. Study on the fluctuations of groundwater levels in Cheju Island, Korea. *J. Kor. Environ. Sci. Soc.*, **3**: 333–348.
- Pashkovsky, I.S., 1969. Groundwater discharge to the Aral Sea at present and in future. *Byull. Mosk. O-va. Ispyt. Prir., Geol.*, **4**: 110–118.
- Pluhowski, E.J. and I.H. Kantrowitz, 1964. Hydrology of the Babylon-Islip Area, Suffolk County, Long Island, New York. U.S. Geol. Surv. Water-Supply Pap., 1768, 120 pp.
- Reilly, T.E. and A.S. Goodman, 1987. Analysis of salt water upconing beneath a pumping well. *J. Hydrol.*, **89**: 169–204.
- Robinson, M.A., 1996. A finite element model of submarine groundwater discharge to tidal estuarine waters. PhD Dissertation. Virginia Polytechnic Institute, Blacksburg, Virginia.
- Segol, G. and G.F. Pinder, 1976. Transient simulation of salt water intrusion in southeastern Florida. *Water Res. Res.*, **12**: 65–70.
- Semikhatov, A.N., 1954. Hydrogeology. Selkhozgiz, Moscow, 328pp.
- Seiler, K.P., 2003. Potential areas of subsurface freshwater discharge to the oceans (abs.). In: Proceedings of the XXIII General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG). Sapporo, Japan.
- Sellinger, C.E., 1995. Groundwater flux into a portion of Eastern Lake Michigan. *J. Great Lakes Res.*, **21**: 53–63.
- Shiklomanov, I.A., 1999. World Water Resources: Modern Assessment and Outlook for the 21st Century. In: International Hydrological Program. UNESCO, Paris.
- 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.
- Smith, A.J. and S.P. Nield, 2003. Groundwater discharge from the superficial aquifer into Cockburn Sound Western Australia: estimation by inshore water balance. *Biogeochemistry*, **66**: 125–144.
- Takasaki, K.J. and S. Valenciano, 1969. Water in the Kahuhu area, Hawaii, U.S. Geol. Surv. Water-Supply Pap., 1874.
- Taniguchi, M., W.C. Burnett, J.E. Cable and J.V. Turner, 2002. Inves-

- tigation of submarine groundwater discharge. *Hydrol. process.*, **16**: 2115–2129.
- Williams, M.O., 1946. Bahrain: port of peals and petroleum, *Nation. Geograph.*, **89**: 194–210.
- 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.
- Yang, J.S., H.Y. Cho, S.T. Jeong and S.J. Kim, 2004. Estimation of the groundwater discharges in Masan Bay Watershed. *J. Kor. Soc. Coast. Ocean Engin.*, **16**: 213–223.
- Yang, J.S., J.Y. Jeong, J.Y. Heo, S. Lee and J.Y. Choi, 1999. Chemical mass balance of materials in the Keum River estuary: 1. Seasonal distribution of nutrients. *The Sea - J. Kor. Soc. Oceanogr.*, **4**: 71–79.
- Younger, P.L., 1996. Submarine groundwater discharge. *Nature*, **382**: 121–122.
- Zektzer, I.S., 1968. Natural resources of fresh groundwater of the area adjacent to the Baltic Sea. Nedra, Moscow, 105 pp.
- Zektzer, I.S., 1996. Groundwater discharge into the seas and oceans: state of the art. In Groundwater discharge in the coastal zone, Buddemeier R.W. (ed.). LOICZ/Russian Academy of Sciences: Texel, Netherlands/Moscow, pp. 122–123.
- Zektzer, I.S., V.A. Ivanov and A.V. Meskheteli, 1973. The problem of direct groundwater discharge to the seas. *J. Hydrol.*, **20**: 1–36.
- Zektzer, I.S. and H.A. Loaiciga, 1993. Groundwater fluxes in the global hydrologic cycle: past, present and future. *J. Hydrol.*, **144**: 405–427.

2010년 7월 25일 원고접수

2010년 11월 10일 수정본 채택

담당편집위원: 강동진