

부산 해안지역의 물의 라돈 농도와 지하수 유출 특성

옥순일¹ · 함세영^{1*} · 이용우² · 차은지¹ · 김상현³ · 김인수⁴ · 김부근¹

¹부산대학교 지구환경시스템학부

²해양환경관리공단 기후수질팀,

³부산대학교 사회환경시스템공학부

⁴부산대학교 지질환경과학과

Characterizing Groundwater Discharge and Radon Concentration in Coastal Waters, Busan City

Soon-Il Ok¹, Se-Yeong Hamm^{1*}, Yong-Woo Lee², Eun-Jee Cha¹, Sang-Hyun Kim³,
In-Soo Kim⁴, Boo-Keun Khim¹

¹Division of Earth Environmental System, Pusan National University

²Climate and Marine Environment Team, Korea Marine Environment Management Corporation

³School of Civil and Environmental Engineering, Pusan National University

⁴Department of Geological Sciences, Pusan National University

ABSTRACT

Groundwater which infiltrated in recharge areas discharges in the forms of evapotranspiration, baseflow to streams, groundwater abstraction and eventually flows into the sea. This study characterized radon-222 concentration and electrical conductivity (EC) in coastal groundwater discharge, well groundwater, Ilkwang Stream water, and seawater in the coastal area of Busan Metropolitan City and subsequently estimated groundwater discharge rate to the sea. The median value of Rn-222 concentration is highest in well groundwater (18.36 Bq/L), and then decreases in the order of coastal groundwater discharge (15.92 Bq/L), Ilkwang Stream water (1.408 Bq/L), and seawater (0.030 Bq/L). The relationship between Rn-222 concentration and EC values is relatively strong in well groundwater and then in seawater. However, the relationship is not visible between coastal groundwater discharge and Ilkwang Stream water. The groundwater discharge rate to the sea is estimated as 3,130 m³/day by using radon mass budget model and 16,788 m³/day by using Darcy's law.

Key words : Radon-222, Groundwater discharge, Ilkwang Stream, Seawater, Busan Metropolitan City

1. 서 론

우리나라는 삼면이 바다로 둘러싸여 있어 해안유출수(Coastal groundwater discharge, CGD)와 해저유출수(Submarine groundwater discharge, SGD)의 형태로 상당량의 지하수가 바다로 유출되는 것으로 추정된다(Fig. 1). 해안유출수는 해안을 따라서 바다로 유출되는 지하수를 말한다. 한편, 함양지역으로부터 동수구배를 따라서 흐르는 담수 지하수가 대륙붕이나 해저사면에서 유출되거나 담수 지하수가 재순환되는 해수와 혼합되어 해저로 유출

되는 지하수를 해저유출수라고 한다(Burnett et al., 2001; 박관석 외, 2004). Zektser and Loaiciga(1993)는 해저유출수 중 담수 지하수의 양은 강물의 약 5~6%에 이르며, 재순환하는 염수의 유입량까지 합하면, 그 양은 강물의 약 48%에 이른다고 예측하였다. 그러나 해저유출수의 양은 공간적인 변화를 보이며 계절적 변동양상을 나타내기 때문에 해저유출수의 양을 정확히 측정하는 것은 어렵다(Burnett et al., 2006). 또한 파도의 영향 및 조석차도 해저유출수의 양에 영향을 미친다(Anthony et al., 2008). 이상규(1994)는 국내에서 최초로 항공원격탐사 자료의

*Corresponding author : hsy@pusan.ac.kr

원고접수일 : 2011. 8. 17 심사일 : 2011. 9. 6 게재승인일 : 2011. 9. 6

질의 및 토의 : 2011. 12. 31 까지

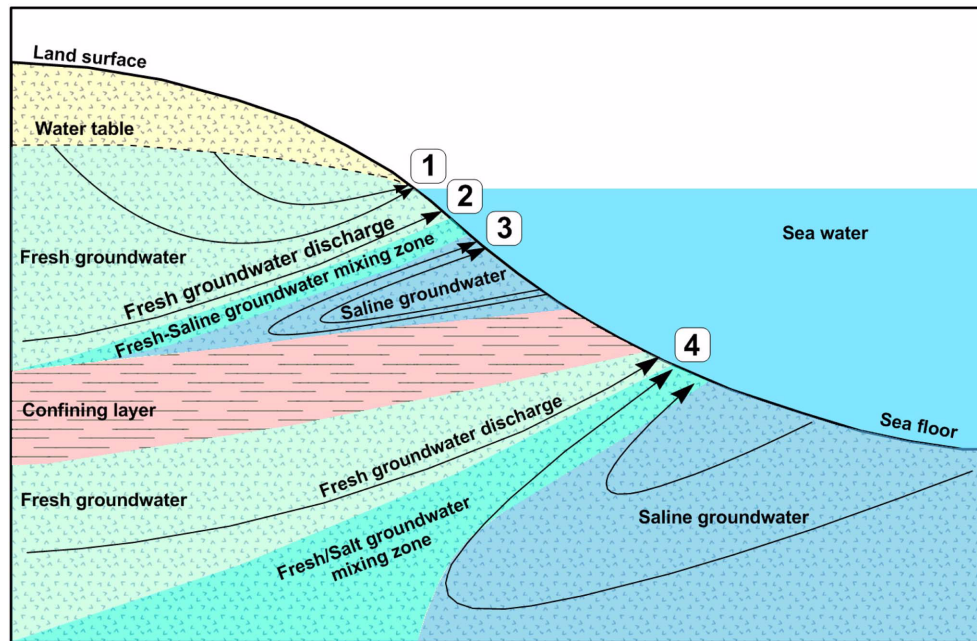


Fig. 1. Scheme of coastal groundwater discharge (1) and submarine groundwater discharge (2, 3 and 4) (slightly modified from Swarzenski et al., 2004).

해수면온도 분석에 의해 제주도 지역의 해저유출수를 탐사하였다. 박남식 외(2007)는 지하수흐름의 지배방정식과 Ghyben-Herzberg 원리를 이용하여 해안지역 비피압대수층과 피압대수층의 지하수 해안유출수의 양을 산정하였으며, 이로부터 해안 지하수 최적관리를 위한 개발가능량 산정기법을 제시하였다. 홍성훈 외(2003)는 경북 울진영역의 지하수의 해안유출량을 산정하였다. 이대근 외(2002)는 거제도 해안 지역의 위성영상 자료를 이용한 해수면온도 분석으로 해안유출지하수를 평가하였다. 백승균·박맹언(2005)은 원격탐사자료, GIS 기법과 수질분석 자료를 이용하여 제주도 연안의 해저유출수 산출 위치를 파악하였다. 또한 Li et al.(2006)은 해안의 자유면대수층을 통한 지하수 해저유출을 2차원 모델로 모사하였다. 황동운 외(2010)는 제주도, 영일만, 마산만, 여자만의 해저 담지하수 유출량을 각각 주변 강물 유출량의 약 50%, 57%, 89%, 420%로 산정하였다. 그러나, 국내에서 해안지역 지하수 유출수의 직접적인 현장조사 연구는 거의 없는 실정이다(김득호, 2010).

한편, 라돈, 라듐, 메탄 등의 지화학 추적자를 이용한 해저유출수에 대한 많은 연구가 이루어지고 있다(Garrison et al., 2003; Dulaiova et al., 2006; Swarzenski, 2007; Zektser and Loaiciga, 1993). 라듐과 라돈 동위원소들은 우라늄과 토륨의 자연적인 붕괴에 의해 생성되며, 보존성이 뛰어나 해저로 유출되는 지하수를 측정하는데 용이한

특성을 가지며(Dulaiova et al., 2006), 특히 라돈은 중요한 지화학 추적자로서 해저유출수 연구에 많이 이용되고 있다(Burnett et al., 2002; Burnett and Dulaiova, 2003). 라돈은 지구상에 70여종이 존재하며, 암석, 퇴적층, 토양 속에 포함되어 있는 고체상태의 화합물인 ^{226}Ra 원자의 방사능 붕괴로부터 생성된다(Mancini et al., 1995). 라돈은 무색, 무취, 무미의 비활성 기체로서 지하수나 지표수 중 용존 기체로 존재한다. 지하수 중의 라돈-222 농도는 대부분의 지표수보다 100배 내지 1000배 정도 더 높다고 알려져 있다(Dulaiova et al., 2010). Moore (1996)는 ^{226}Ra 추적자를 이용하여, 미국 동부해역에서 해저유출수의 양이 강물의 약 40%에 달한다고 보고하였다. 또한 Yang et al.(2002)은 ^{226}Ra , ^{228}Ra , SiO_2 를 이용하여 낙동강 하구언을 통한 담수 유출과 바닷물의 관련성을 평가하였다.

메탄은 보존성이 뛰어나지는 않지만 지하수내 농도가 매우 높아서 중요한 지화학 추적자로 사용된다(Bugna et al., 1996). 메탄은 멕시코만 북동부 해안(Bugna et al., 1996), 플로리다만(Corbett et al., 2000), 롱 아일랜드(Dulaiova et al., 2006), 한국(Kim and Hwang, 2002)에서 지하수 유출의 추적자로 성공적으로 적용된 바 있다. 지하수 중의 염소이온 농도는 바닷물에 비해서 훨씬 낮기 때문에 염소이온도 지하수 추적자로 이용될 수 있다(Martin et al., 2000). 광역적인 해저유출수 산정을 위해서는 해저퇴적물 바닥의 전기전도도의 공간적인 분포 특성

을 이용할 수 있다(Harvey et al., 1997). 해저유출수 내 지화학 추적자를 분석하기 위해서는 침투율 측정기(Seepage meter)를 사용한다(Lee, 1977; Taniguchi et al., 2006).

해저유출수는 바닷물에 비해 높은 농도의 영양염류와 무기물을 함유하고 있어서 적은 양이라도 해안지역 생태계에 큰 영향을 미치는 것으로 알려지고 있으며(Moore, 1996; Burnett and Taniguchi, 2001; Johannes, 1980; D'Elia et al., 1981; Valiela et al., 1990; Laroche et al., 1997; Boehm et al., 2004), 해저유출수의 용존 화학성분 농도를 분석하여 바다로 공급되는 화학성분들의 유입량을 알아낼 수 있다(Charette et al., 2001; Kelly and Moran, 2002; Hwang et al., 2005). 그러나 해저유출수의 화학성분 농도는 건기와 우기에 따라(Michael et al., 2005), 그리고 해저유출수의 유출속도와 지질학적 특성에 따라 달라질 수 있다(양한섭 · 황동운, 2007).

본 연구에서는 부산광역시의 연장 약 62 km의 동부와 남부 해안지역의 해안유출수, 우물 지하수, 그리고 하천수의 라돈 농도와 현장수질 특성을 파악하고, 이들을 해수의 라돈 농도와 비교 · 검토하였다.

2. 지형과 지질

2.1. 동부해안

동부해안 지역은 장안읍의 임랑해수욕장에서 해운대구 송정동에 위치한 송정해수욕장까지 약 16 km 구간으로서 동해안과 인접해 있으며, 북쪽으로부터 좌광천, 일광천, 신천천, 송정천 등의 소하천들이 서쪽으로부터 동쪽으로 흘러서 동해로 유입된다. 본 지역은 남북방향으로 발달하는

태백산맥의 남쪽 끝부분에 위치하며, 서쪽에는 달음산(해발고도 587.5 m), 월음산(해발고도 425.0 m), 일광산(해발고도 316.0 m) 등의 산지가 발달되어 있다. 이 지역의 지질은 중생대 백악기의 경상누층군 중 유천층군에 속하는 이천리층 퇴적암과 이를 관입 또는 분출한 유천층군의 화산암류(안산암질암, 화산력 응회암, 유문반암), 그리고 이들 암석을 관입한 불국사화강암류(섬록반암, 화강섬록암, 흑운모화강암)로 구성되어 있다(손치무 외, 1978; Fig. 2). 이천리층은 기장군 일광면의 거의 전역과 기장읍의 일부 지역에 넓게 분포되어 있다. 안산암질암은 기장군 철마면 일대에 넓게 분포하며, 화산력 응회암은 철마면의 남부와 기장읍의 남서부(내리)에 비교적 소규모로 분포한다. 유문반암은 해운대구 반송동과 좌동, 송정동에 나타난다. 한편 섬록반암은 북부 해안지역의 장안읍과 일광면의 경계부에 매우 작은 규모로 나타난다. 화강섬록암은 기장읍 남동부 해안지역(석산리, 시랑리, 당사리)과 철마면의 남동부 경계부분에 소규모로 나타나며, 기장읍 남동부 해안지역에서는 이천리층을 관입 · 접촉하고 있다. 그리고 흑운모화강암은 기장군 기장읍 학리, 죽성리, 대변리 일대에 암주상 형태로 나타난다.

해안선과 거의 평행하게 북북동-남남서 방향의 일광단층이 나타나며(Fig. 2), 일광단층의 서쪽에 위치하는 동래단층과 양산단층의 방향도 북북동-남남서 방향이다. 동부해안 지역의 위성사진 및 음영기복도를 이용한 선구조를 보면, 북동-남서 방향(N40~50E)이 가장 우세하며, 북북동-남남서 방향(N10~20E 방향)도 우세하게 나타난다(한국수자원공사, 2003). 또한, N30~40W 방향의 북서-남동 방향의 선구조가 다수 관찰된다.

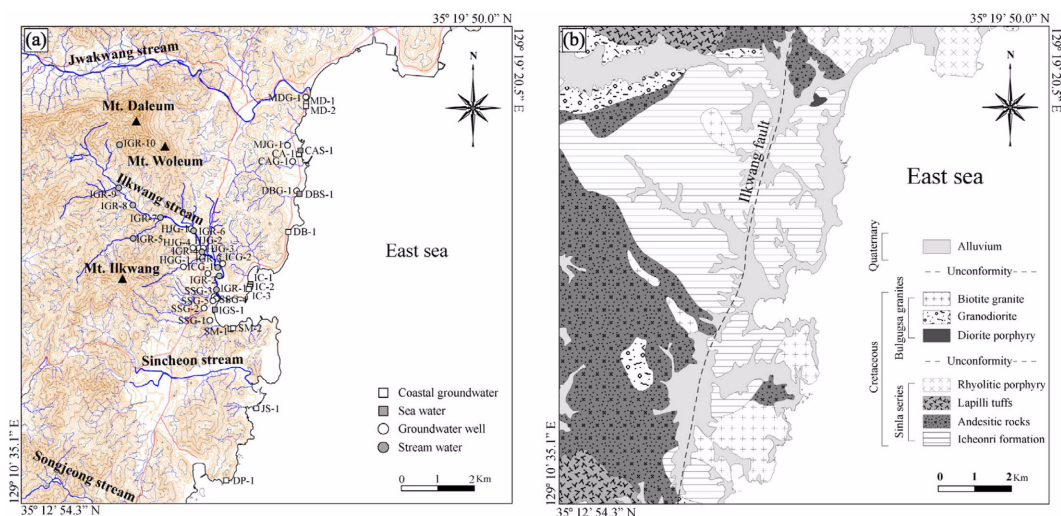


Fig. 2. (a) Location and (b) geology (Son et al., 1978) of the eastern part of Busan Metropolitan City.

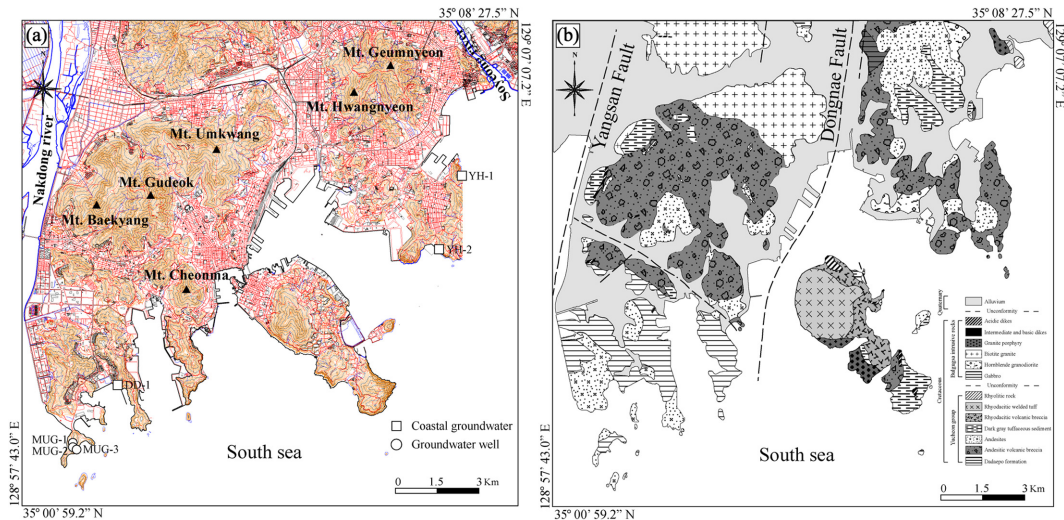


Fig. 3. (a) Location and (b) geology (Jang et al., 1983) of the southern part of Busan Metropolitan City.

2.2. 남부해안

남부해안 지역은 전체적으로 북고남저형의 지형을 나타내며, 북쪽에는 구덕산(해발고도 565.0 m), 엄광산(해발고도 503.9 m), 승학산(해발고도 496.2 m), 천마산(해발고도 325.1 m), 황령산(해발고도 427.6 m), 금련산(해발고도 415.0 m) 등이 분포하고 있다(Fig. 3). 연구지역의 동부에는 수영강이 북에서 남으로 그리고 서부에는 낙동강이 역시 북에서 남으로 남해로 유입되고 있다. 연구지역의 지질은 유천층군에 속하는 다대포층, 화산암류(안산암질 화산각력암, 응회질 퇴적암, 유문석영안산암질 화산각력암, 유문암질암), 불국사화강암류(각섬석화강섬록암, 흑운모 화강암, 화강반암, 중성암맥, 산성암맥) 그리고 층적층으로 구성되어 있다(장태우 외, 1983; Fig. 3). 다대포층은 해안의 서부에 넓게 분포하며, 안산암질 화산각력암은 전역에 걸쳐서 넓게 분포하고 있으며, 특히 북쪽의 산지는 주로 안산암질 화산각력암으로 구성되어 있다. 또한 영도의 봉래산(해발고도 394.6 m)은 유문암질암으로 구성되어 있다(Fig. 3).

남부해안 지역의 선구조들은 북북동-남남서(N10~20E) 방향이 가장 우세하며, 이는 연구지역내 존재하는 양산단층, 동래단층 방향인 북북동-남남서 방향과도 유사하다. 또한, 동-서(N80~90E)방향도 다수 관찰된다.

3. 연구방법

본 연구를 위하여 2009년과 2011년에 걸쳐서 부산광역시 동부해안과 남부해안의 해안유출수, 우물 지하수, 하

천수의 라돈(Rn-222) 농도와 현장수질을 분석하였다(Fig. 2, 3). 해안유출수는 동부해안 지역의 기장군 일광면, 기장읍의 14개소(MD-1, MD-2, MD-3, SM-1, SM-2, CA-1, DB-1, IC-1, IC-2, IC-3, JS-1, DP-1, YH-1, YH-2)와 남부해안 지역의 남구 용호동과 사하구 다대동의 3개소(YHO-1, YHO-2, DD-1), 우물 지하수는 동부해안 지역의 기장군 일광면, 기장읍의 22개소(일광면 삼성리 8개소(SSG-1~SSG-5, SSD-1~SSD-3), 문동리 1개소(MDG-1), 문중리 1개소(MJG-1), 용천리 1개소(YCG-1), 이천리 2개소(ICG-1, ICG-2), 칠암리 1개소(CAG-1), 동백리 1개소(DBG-1), 대리 1개소(DRG-1), 화룡리 1개소(HRG-1), 황계리 1개소(HGG-1), 화전리 4개소(HJG-1~HJG-4))와 남부해안 사하구 다대동 물운대의 3개소(MUG-1~MUG-3), 일광천의 10개 지점(IGR-1~IGR-10)에서 물시료를 채취하였다(Table 1~Table 4). 아울러서 해안유출수, 우물 지하수, 하천수의 라돈 농도와 일광면의 30개소, 일광면 문동리의 7개소, 일광면 이천리의 6개소, 기장읍 죽성리의 6개소, 기장읍 대변리의 5개소, 기장읍 연화리의 20개소, 사하구 다대동의 6개소에서 채취한 해수 시료의 라돈 농도를 비교·분석하였다.

3.1. 현장수질 분석

현장수질 분석항목(수온, pH, EC, TDS, 염분농도, Eh, DO, 알칼리도) 중 수온은 디지털온도계(Sato Model SM-1250MC), pH는 휴대용 pH미터(Orion Model 250A), EC, TDS, 염분농도는 휴대용 전기전도도 측정기(Orion Model 115), DO는 휴대용 용존산소 측정기(Orion

Table 1. ^{222}Rn concentration, electrical conductivity (EC), and discharge rate (Q) of coastal groundwater discharge in the study area

Sampling site	^{222}Rn		Q
	(Bq/L)	(μS)	
East	MD-1		0.225
	MD-2		1.279
	MD-3	0.720	417.0
	CA-1	32.72	940.0
	DP-1	21.90	389.0
	IC-1		0.332
	IC-2	10.12	1,721
	IC-3	40.83	958.0
	JS-1	0.365	3,122
	DB-1		2.296
	SM-1		
	SM-2	48.17	210.0
	YH-1	0.215	782.0
	YH-2	0.502	637.0
	DD-1	21.72	504.0
	YHO-1		
South	YHO-2		7.800
	Max.	48.17	3,122
	Min.	0.215	210.0
	Mean	17.73	968.0
	Median	15.92	710.0
	Std. dev.	18.17	868.0
	Skew.	0.532	2.014
	Kurt.	-1.225	4.290

Model 810)로 측정하였고, Eh는 pH미터에 산화-환원 전극을 부착하여 측정하였다. 그리고 알칼리도는 Lovibond사의 MultiDirect photometer로 측정하였다.

3.2. 라돈 농도 분석

라돈(Rn-222) 농도 측정을 위해서는 먼저 라돈의 누출을 최소화시키고 기포가 생기지 않도록 천천히 4리터와 1리터의 갈색 시료병으로 채수하였으며, 물시료 채수 즉시 튜브가 달린 덮개로 병 입구를 막아 운반 후 라돈 농도 측정기(RAD-7, Durrige 사) 및 흡습건조통과 연결시켰다. 그리고 밀폐된 공간에서 RAD-7으로부터 시료병에 공기를 불어넣어서 라돈을 방출시키고, 방출된 라돈을 흡습건조통을 통과시켜서 평형상태에 도달할 때까지 3~4회 라돈농도를 측정하였으며, 이 때 측정값의 오차범위는 $\pm 5\%$ 이내가 되게 하였다. 라돈 농도측정은 라돈의 반감기를 고려하여 시료채취 후 3.8일 이내에 측정하였다. 라돈 농도

Table 2. ^{222}Rn concentration and electrical conductivity (EC) values of well groundwater in the study area

Sampling site	^{222}Rn		EC
	(Bq/L)	($\mu\text{S}/\text{cm}$)	
East	CAG-1	30.97	894.0
	DBG-1	30.73	915.0
	DRG-1	7.346	353.0
	HGG-1	36.59	316.0
	HJG-1	19.43	422.0
	HJG-2	21.20	561.0
	HJG-3	16.42	1,247
	HJG-4	16.45	312.0
	HRG-1	43.39	364.0
	ICG-1	20.53	565.0
	ICG-2	18.04	568.0
	MDG-1	18.36	259.0
	MJG-1	26.14	764.0
	SSD-1	9.926	28,400
	SSD-2	14.54	1231
	SSD-3	3.752	26,400
South	SSG-1	32.31	281.0
	SSG-2	12.44	380.0
	SSG-3	5.977	3,390
	SSG-4	0.172	835.0
	SSG-5	0.172	366.0
	YCG-1	1.092	103.0
	MUG-1	24.22	401.0
	MUG-2	23.55	386.0
	MUG-3	21.84	385.0
	Max	43.39	28,400
	Min	0.172	103.0
	Mean	18.22	2,804
	Median	18.36	422.0
	Std. dev.	11.53	7,436
	Skew.	0.181	3.265
	Kurt.	-0.394	9.540

측정의 정밀도는 탐지모드에서는 8 CPM/Bq/m^3 , 일반모드에서는 16 CPM/Bq/m^3 이다.

밀폐된 공간에서 평형상태의 물속의 라돈 농도비(k)는

$$k = 0.105 + 0.405e^{-0.0502T} \quad (1)$$

로 표현된다(Weigel et al., 1978). 여기서 T 는 물의 온도 ($^{\circ}\text{C}$)이다. 시료병 내부의 온도를 일정하게 유지시켰을 때, 채수된 물시료 내 라돈의 최초 농도(C_w , Bq/L)는 현재 물시료에 남아 있는 라돈의 농도(kC_a)와 시료병 내 공기 중의 라돈의 농도(C_a , Bq/L)의 총합과 같다(Lee and

Kim, 2006).

$$C_w V_w = C_a V_a + k C_a V_w \quad (2)$$

여기서, V_w 와 V_a 는 각각 물의 부피와 공기의 부피를 나타낸다. (2)식으로부터 라돈의 농도(C_m)는

$$C_w = (C_a V_a + k C_a V_w) / V_w \quad (3)$$

이다.

4. 결과 및 고찰

4.1. 라돈 농도와 전기전도도 특성

4.1.1. 라돈농도와 전기전도도의 분포 특성

동부해안과 남부해안 지역의 해안유출수, 우물 지하수, 하천수, 해수의 라돈(^{222}Rn) 농도와 전기전도도의 분포특성을 파악하였다. 이를 위하여 해안유출수는 동부해안의 일광면 칠암리의 CA-1, 이천리의 IC-2, IC-3, 삼성리의 SM-2, 연화리의 YH-1, YH-2, 일광면 동백리의 DB-1, 문동리의 MD-3, 죽성리의 JS-1, 기장읍 대변리의 DP-1, 그리고 남부해안 지역의 다대동 DD-1에서 채취하였다

(Fig. 2, 3). 해안유출수 산출지점은 한정되어 있으며, 유출량은 소량이였다. 우물 지하수는 동부해안의 22개소, 그리고 남부해안의 3개소에서 채취하였다. 한편 하천수는 동부해안 지역의 일광천 하류부터 상류까지 IGR-1~IGR-10에서 채취하였다. 한편 해수 시료는 일광면, 일광면 문동리~이천리, 기장읍 죽성리~대변리, 기장읍 연화리, 사하구 다대동 연안에서 채취하였다(Fig. 4).

해안유출 지하수의 라돈 농도는 0.215~48.17 Bq/L(평균값 17.73 Bq/L, 중앙값 15.92 Bq/L)이고, 전기전도도는 210~3122 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (평균값 968 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 중앙값 710 $\mu\text{S}/\text{cm}$)이다(Table 1). 그러나, JS-1, MD-3, YH-1, YH-2는 전기전도도값과 비교할 때 해수 또는 하천수의 영향을 받는 것으로 보인다.

우물 지하수의 라돈 농도는 0.172~43.39 Bq/L(평균값 18.22 Bq/L, 중앙값 18.36 Bq/L)이며, 전기전도도는 103~28400 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (평균값 2804 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 중앙값 422 $\mu\text{S}/\text{cm}$)이다(Table 2). 연구지역의 우물 지하수는 일반적인 지하수의 라돈 농도(1~53 Bq/L)와 비슷하다(D'Alessandro and Vita, 2003). 우물 지하수의 라돈 농도를 해안유출 지하수와 비교하면 우물 지하수가 약간 더 큰 값을 가지며, 이

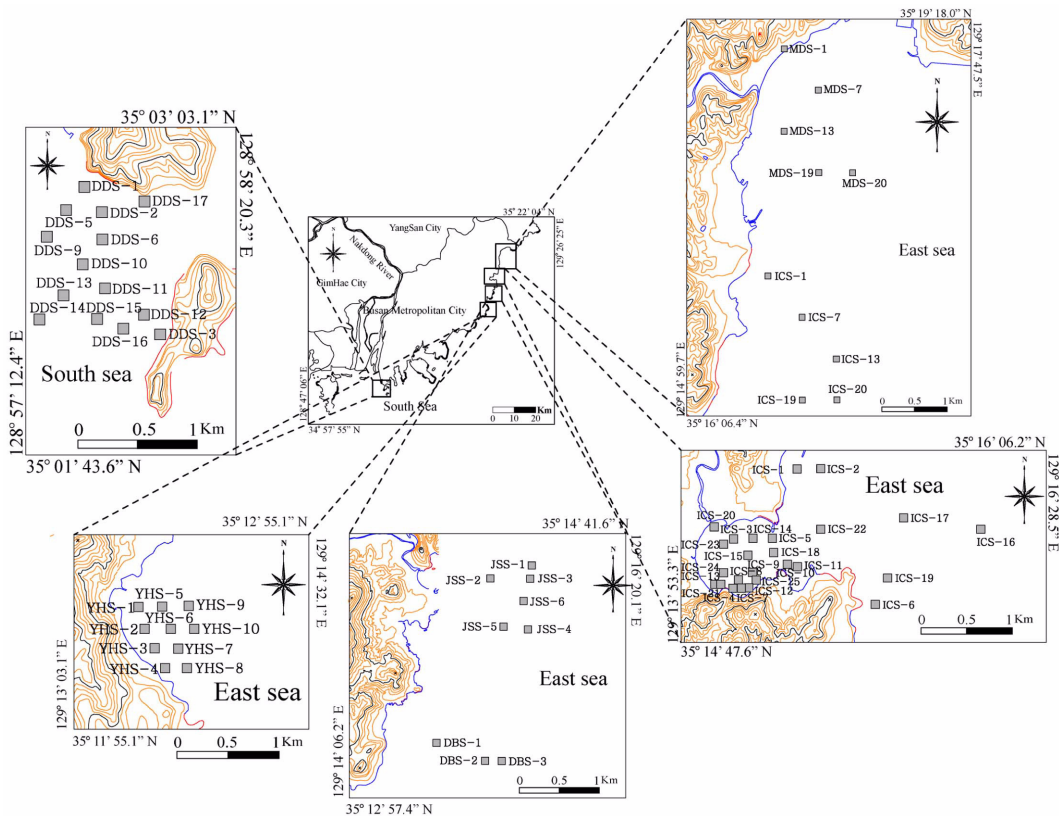


Fig. 4. Sampling locations of seawater.

Table 3. ^{222}Rn concentration and electrical conductivity (EC) values of Ilkwang stream water

Sampling site	^{222}Rn	EC
	(Bq/L)	($\mu\text{S}/\text{cm}$)
IGR-1	1.017	33,145
IGR-2	1.565	13,150
IGR-3	2.666	381.0
IGR-4	9.251	295.0
Ilkwang Stream water	0.790	128.0
IGR-6	1.251	263.0
IGR-7	1.043	189.0
IGR-8	2.005	166.0
IGR-9	1.632	148.0
IGR-10	0.952	120.0
Max	9.251	33,145
Min	0.790	120.0
Mean	2.217	4,798
Median	1.408	226.0
Std. dev.	2.536	10,758
Skew.	2.882	2.519
Kurt.	8.641	6.317

는 우물 지하수가 해안유출 지하수 보다 더 깊고 더 긴 유동 경로를 가지기 때문으로 보인다. 그러나 SSD-3, SSG-4~SSG-5, YCG-1의 라돈 농도는 5 Bq/L 미만으로 나타나며, 전기전도도와 함께 고려할 때 해수 또는 일광천의 영향을 받고 있음을 지시한다.

일광천의 라돈 농도는 0.790~9.251 Bq/L(평균값 2.217 Bq/L, 중앙값 1.408 Bq/L)로서 우물 지하수에 비해서 13 배 정도(중앙값 기준) 낮게 나타난다(Table 3). 하천수의 낮은 라돈 농도는 대기로의 계속적인 라돈 방출 때문이다. 한편, 일광천의 전기전도도는 120~33,145 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (평균값 4,798 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 중앙값 226 $\mu\text{S}/\text{cm}$)로서, 중앙값 기준으로 해안유출 지하수보다는 3배, 우물 지하수 보다는 약 2배 정도 더 낮다. 특히, 하류의 IGR-1에서는 해수의 영향으로 최대값인 33,145 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 을 보인다.

해수의 라돈 농도는 0.009~0.949 Bq/L(평균값 0.047 Bq/L, 중앙값 0.030 Bq/L)로서(Table 4) 연안의 해수의 평균 라돈 농도는 0.029 Bq/L와 비슷하다. 또한 중앙값 기준으로 우물 지하수보다 612배 그리고 하천수의 47배 정도 더 낮다. 해수의 전기전도도는 31,700~43,900 $\mu\text{S}/$

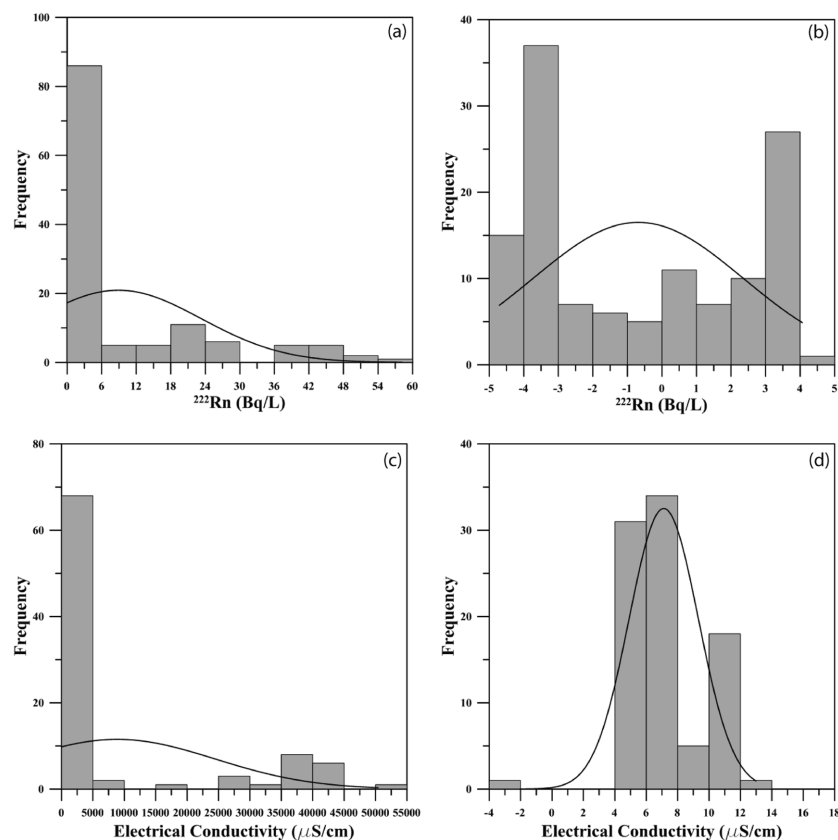
**Fig. 5.** (a) Normal distribution and (b) log-normal distribution of ^{222}Rn concentration, and (c) normal distribution and (d) log-normal distribution of electrical conductivity.

Table 4. ^{222}Rn concentration and electrical conductivity (EC) values of seawater in the study area

Sampling site	^{222}Rn (Bq/L)	EC ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Sampling site	^{222}Rn (Bq/L)	EC ($\mu\text{S}/\text{cm}$)
IGS-1	0.054	39,130	JSS-5	0.023	
IGS-2	0.041	39,450	JSS-6	0.031	
IGS-3	0.055	40,830	DBS-1	0.032	
IGS-4	0.035	40,350	DBS-2	0.012	
IGS-5	0.022	39,750	DBS-3	0.012	
IGS-6	0.031	39,450	YHS-1	0.016	
IGS-7	0.018	38,480	YHS-2	0.028	
IGS-8	0.044	40,470	YHS-3	0.033	
IGS-9	0.047	40,010	YHS-4	0.024	
IGS-10	0.044	39,820	YHS-5	0.030	
IGS-11	0.039	39,780	YHS-6	0.033	
IGS-12	0.030	39,630	YHS-7	0.024	
IGS-13	0.073		YHS-8	0.022	
IGS-14	0.038		YHS-9	0.014	
IGS-15	0.011		YHS-10	0.014	
IGS-16	0.018		DOS-1	0.155	43,900
IGS-17	0.024		SSS-1	0.949	31,700
IGS-18	0.021		DDS-1	0.049	
IGS-19	0.047		DDS-2	0.048	
IGS-20	0.073		DDS-3	0.032	
IGS-21	0.065		DDS-5	0.086	
IGS-22	0.034		DDS-6	0.037	
IGS-23	0.024		DDS-9	0.048	
IGS-24	0.028		DDS-10	0.038	
IGS-25	0.03		DDS-11	0.031	
MDS-1	0.028		DDS-12	0.035	
MDS-7	0.016		DDS-13	0.034	
MDS-13	0.031		DDS-14	0.021	
MDS-19	0.020		DDS-15	0.015	
MDS-20	0.020		DDS-16	0.024	
ICS-1	0.009		DDS-17	0.130	
ICS-7	0.010				
ICS-13	0.012		Max.	0.949	43,900
ICS-19	0.014		Min.	0.009	31,700
ICS-20	0.019		Mean	0.047	39,482
JSS-1	0.012		Median	0.030	39,765
JSS-2	0.028		Std. dev.	0.112	2,562
JSS-3	0.027		Skew.	7.788	-2.038
JSS-4	0.022		Kurt.	63.21	7.676

cm(평균값 39,482 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 중앙값 39,765 $\mu\text{S}/\text{cm}$)로서 매우 높다.

라돈 농도의 중앙값은 우물지하수에서 가장 높고, 다음으로 해안유출 지하수, 하천수, 해수의 순으로 낮아진다.

4.1.2. 라돈 농도와 전기전도도의 상관성

해안유출 지하수, 우물 지하수, 하천수(일광천), 해수의 라돈(^{222}Rn) 농도와 전기전도도(EC)의 상관성을 분석하였다. 상관성 분석을 위해서 먼저 각각의 물시료(해안유출수, 우물지하수, 하천수, 해수)의 라돈 농도와 전기전도도

값을 표준화시키고 정규분포 여부를 검토한 결과, 대수정규분포에 더 가까운 것으로 나타났다(Fig. 5).

SAS v.9.1.을 이용하여 해안유출 지하수, 우물 지하수, 하천수, 해수의 라돈 농도와 전기전도도(EC)간의 상관성을 분석한 결과, 전체 물 시료의 라돈 농도와 전기전도도 사이에는 비교적 높은 음의 상관성(상관계수 $r = -0.644$, $p < 0.0001$)이 나타났다. 그러나, 물시료의 종류별로 상관성을 분석한 결과, 해안유출수는 라돈 농도와 전기전도도 사이에 매우 낮은 음의 상관성($r = -0.343$, $p = 0.332$)을 보였고, 특히 시료들이 두 그룹(A, B 그룹)으로 확연히 구분되었다(Fig. 6). 즉, A 그룹은 비교적 높은 음의 상관성($r = -0.576$, $p = 0.232$)을 보이며 지하수의 영향을 많이 받음을 지시하는 반면에, B 그룹은 상대적으로 낮은 음의 상관성($r = -0.416$, $p = 0.584$)을 보이면서 해수의 영향을 많이 받고 있음을 지시한다. 한편, 우물 지하수 시료는 해수 또는 하천수의 영향을 많이 받고 있는 SSG-4, SSD-5, YCG-1을 제외한 상관성($r = -0.656$, $p = 0.001$)이 4종

류의 물시료(해안유출수, 우물지하수, 하천수, 해수) 중에서 가장 높다. 그러나, 일광천의 라돈 농도와 EC 사이에는 상관성($r = -0.080$, $p = 0.826$)이 거의 나타나지 않으며, 시료는 두 그룹(A, B 그룹)으로 나누어진다. A 그룹은 상류에 위치하고 담수와 연관되나, B 그룹은 하류에 위치하고 해수와 연관되는 것으로 보인다. 또한 담수기원의 그룹(A 그룹)은 지하수와는 달리 라돈 농도와 EC간에 양의 상관성을 보이고 있다. 마지막으로 해수는 비교적 높은 음의 상관성($r = -0.587$, $p = 0.027$)를 보이고 있으나, EC 증가에 따라서 라돈 농도가 가파르게 감소한다.

4.2. 해안 및 해저 유출 지하수의 유출량

4.2.1. 해안유출 지하수 측정

해안유출 지하수는 대부분 암반의 절리를 따라서 유출되고 있다. 해안유출 지하수의 유출지점에 유로를 막아서 간이 V-notch를 설치하고 월류수심을 측정하였다. 그리고 V-notch 설치가 힘든 지점에서는 비커를 사용하여 직접

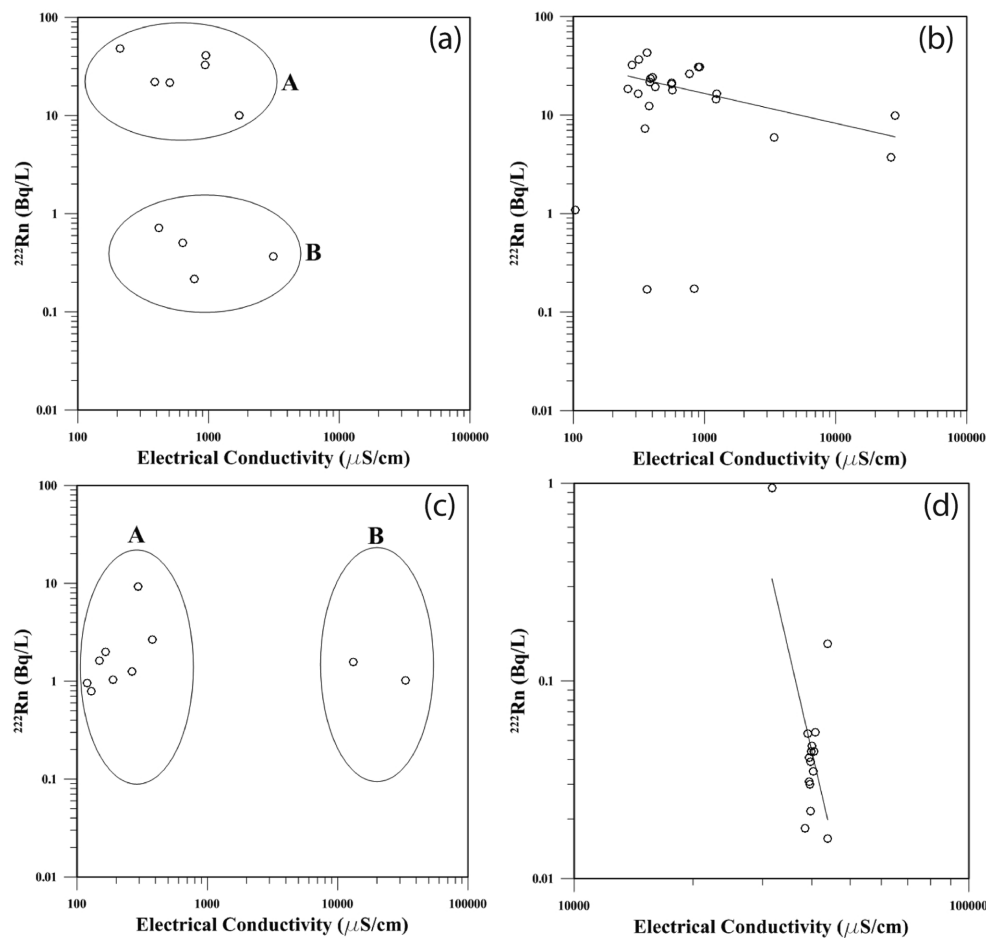


Fig. 6. Relationship between ^{222}Rn concentration and electrical conductivity of (a) coastal groundwater discharge, (b) well groundwater, (c) stream water, and (d) seawater in the study area.

유출량을 측정하였다.

측정한 해안유출 지하수의 유출량은 0.225~10 m³/day (평균 유출량 2.736 m³/day)이었다(Table 1). 동부해안의 칠암리(CA-1)는 생활용수로 사용하고 있는 해안지역의 유출수로서, 가장 높은 유출량(약 10 m³/day)을 보인다. 삼성리의 SM-2에서는 비교적 높은 유출량(3.283 m³/day)을 보이고 있으며, 동백리의 DB-1에서는 2.296 m³/day을 보인다. 문동리의 MD-1에서는 0.225 m³/day의 낮은 유출량을 보이고 있으며, 삼성리의 SM-1, 죽성리의 JS-1에서는 유출량이 너무 적어 직접 측정이 불가능하였다. 한편, 남부해안의 용호동에 위치하는 YHO-1에서는 7.800 m³/day, DD-1에서는 2,468 m³/day을 보인다.

지질과 해안유출 지하수의 관련성을 살펴보면, 죽성리의 JS-1과 대변리의 DP-1를 제외한 대부분의 유출 지점이 이천리층 분포지역에 속하며, 유출량이 비교적 많은 삼성리의 SM-2는 이천리층과 흑운모화강암의 경계부에 위치하고 있다. 따라서 해안유출수의 산출지점은 선구조와 비교적 잘 일치하고 있다.

4.2.2. 라돈 물질수지 식에 의한 지하수 유출량 산정

한편, 라돈(²²²Rn) 물질수지 모델식에 의하여 바다로 유출되는 지하수량을 Hwang et al.(2005)에 의해서 구할 수 있다. 라돈(²²²Rn) 물질수지 모델식에 의한 해저 유출 지하수의 라돈의 양(F_{seep})은

$$F_{seep} = F_{decay} + F_{atm} + F_{mix} - F_{str} - F_{diff} \quad (4)$$

$$F_{seep} = {}^{222}\text{Rn flux (Bq/day)} \quad (5)$$

와 같다. 여기서, F_{str} 은 하천을 통해서 바다로 공급되는 라돈의 양, F_{diff} 은 해저 퇴적물로부터 확산되는 라돈의 양, F_{decay} 는 해수 내에서 방사능 붕괴에 의해서 제거되는 라돈의 양, F_{mix} 는 외해수와 만내 해수의 혼합에 의한 라돈의 제거량, F_{atm} 는 대기로의 방출에 의한 라돈의 제거량이다. 최종적으로 해저유출 지하수의 양은 해저유출 지하수를 통해 일광면의 해수로 공급되는 라돈의 양과 연안 지하수 중의 라돈의 농도비로써 계산된다. 즉,

$$G_D = F_{seep} / {}^{222}\text{Rn}_{GW} \quad (6)$$

여기서, G_D 는 해저유출 지하수의 양(m³/day)이고, ${}^{222}\text{Rn}_{GW}$ 은 연안지하수 중의 라돈-222의 농도(Bq/L)이다.

2010년 7월 27일의 일광면 내에서 대기를 통해서 제거된 라돈의 양(F_{atm}), 방사능 붕괴에 의해 제거된 라돈의 양(F_{decay}), 그리고 외해수와 만내 해수의 혼합에 의한 라돈의 제거량(F_{mix}), 해저 퇴적물로부터 확산에 의해서 공급되는 라돈의 양(F_{diff})은 Table 5와 같다. 또한 일광면을 통해서 공급되는 라돈 양의 최대값, 최소값, 평균값은 Table 5에 제시된 값과 같다. 따라서 해저유출 지하수를 통해서 일광면 내로 공급되는 라돈의 양(F_{seep})은 평균 5.7010^7 Bq/day이다. 계산된 값들을 (6)식에 대입하여 해저 유출 지하수량을 계산하면, 2010년 7월에 일광면 내로 공급되는 해저유출 지하수량의 평균값은 3,130 m³/day이다. 한편, Duaiova et al.(2010)는 바다로 유출되는 지하수량은 총 하천수 유출량의 10% 또는 어떤 경우에는 1/3까지도 된다고 보고하였으며, 본 연구지역에서 라돈 물질수지 식에 의한 총 지하수 유출량은 하천수 유출량(19,057 m³/day)의 16.4%로 나타난다.

4.2.3. Darcy의 식에 의한 지하수 유출량 산정

지하수 유출량은 해저유출 지하수와 해안유출 지하수를 합한 값이지만, 연구지역내에서 해안유출 지하수의 양은 매우 작으므로 해저유출 지하수와 지하수 유출량은 거의 같다.

$$T_D = G_D + S_D \quad (7)$$

그리고 지하수 유출량(G_D , L³/T)은 Darcy의 법칙에 따라

$$G_D = K \cdot b \cdot W \cdot \frac{dh}{dL} \quad (8)$$

와 같다. 여기서, K 는 수리전도도(L/T), b 는 대수층의 두께(L), W 는 대수층의 너비(L), dh/dL 은 수두경사(무차원)이다.

먼저, 가장군 일광면 삼성리에 위치하는 SSD-1~SSD-3 시추공에서 순간충격시험을 실시하여 수리전도도($K = 9.841 \times 10^{-1}$ m/day)를 산정하였다. 그리고 해안의 지하수공들의 지하수위 자료를 이용하여 지표 해발고도(EL)와 지하수위(GWL)의 상관식을 구한 결과

Table 5. Input parameters of radon mass balance model

(unit: Bq/day)

F_{decay}	F_{atm}	F_{mix}	F_{diff}	F_{str}		
				Max	Min	Mean
2.42E+07	4.62E+07	2.18E+07	1.88E+06	8.43E+07	1.70E+07	3.32E+07

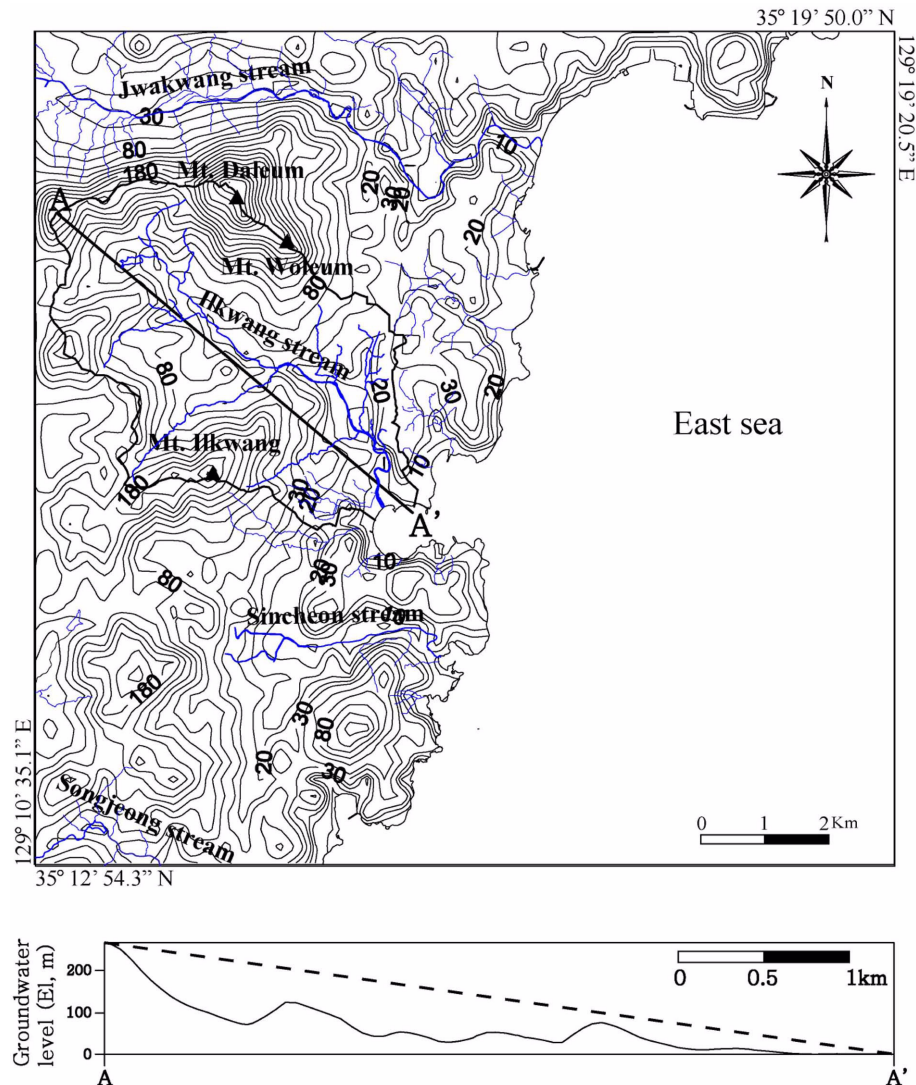


Fig. 7. Potentiometric map of the eastern coastal area in Busan Metropolitan City. In the cross section of A-A' line, the vertical scale was exaggerated 2.5 times relative to the horizontal scale and the broken line was used for estimating hydraulic gradient.

$$GWL = 0.7058 \cdot El - 1.6754$$

(9)

량을 합하면 35,845 m³/day이다.

이었다. 이 상관식을 근거로 연구지역의 지하수위 분포도를 작성하였으며(Fig. 7), A-A'단면의 수두경사는 $dh/dL = 261 \text{ m} / 7149 \text{ m} = 0.037$ 로 산정되었다. 또한 대수층의 두께는 100 m, 일광천의 유역의 해안 연장 4.61 km를 적용하였을 때, 바다로의 총 지하수 유출량은 16,788 m³/day이 된다. 대수층의 두께 100 m는 SSD-2호공의 공저의 충고용물의 농도 (366 mg/L)를 감안하여 결정하였다.

한편, 2010년 5월에 측정된 일광천의 유출량은 상류 0.21 m³/sec (18,144 m³/day), 중류 0.22 m³/sec (19,057 m³/day), 하류 2.51 m³/sec (216,864 m³/day)이다. 따라서 일광천 유역의 총 하천수 유출량의 중간값과 지하수 유출

5. 결 론

2009년부터 2011년까지 부산의 동부해안과 남부해안의 해안유출 지하수, 우물 지하수, 일광천, 해수의 라돈 농도 측정 및 지하수 조사를 통하여 라돈의 분포특성과 바다로의 지하수 유출량을 파악하였다. 라돈 농도와 전기전도도 측정 결과, 해안유출 지하수의 라돈 농도는 0.215~48.17 Bq/L(평균값 17.73 Bq/L, 중앙값 15.92 Bq/L)이고, 전기전도도는 210~3122 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (평균값 968 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 중앙값 710 $\mu\text{S}/\text{cm}$)이다. 우물 지하수의 라돈 농도는 0.172~43.39

Bq/L(평균값 18.22 Bq/L, 중앙값 18.36 Bq/L)이며, 전기전도도는 103~28400 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (평균값 2804 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 중앙값 422 $\mu\text{S}/\text{cm}$)이다. 일광천의 라돈 농도는 0.790~9.251 Bq/L(평균값 2.217 Bq/L, 중앙값 1.408 Bq/L)이며, 전기전도도는 120~33,145 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (평균값 4,798 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 중앙값 226 $\mu\text{S}/\text{cm}$)이다. 한편, 해수의 라돈 농도는 0.009~0.949 Bq/L(평균값 0.047 Bq/L, 중앙값 0.030 Bq/L)이며, 전기전도도는 31,700~43,900 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (평균값 39,482 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 중앙값 39,765 $\mu\text{S}/\text{cm}$)로서 매우 높다. 따라서, 라돈 농도의 중앙값은 우물지하수에서 가장 높고, 다음으로 해안유출지하수, 일광천, 해수의 순으로 낮아진다. 이는 우물 지하수가 상대적으로 더 깊고 더 긴 유동 경로를 가지기 때문으로 해석된다.

해안유출 지하수, 우물 지하수, 일광천, 해수의 라돈 농도와 전기전도도(EC)간의 상관성을 분석한 결과, 전체 물시료의 라돈 농도와 전기전도도 사이에는 비교적 높은 음의 상관성(상관계수 $r = -0.644$, $p < 0.0001$)이 나타났다. 그러나, 물시료의 종류별로 상관성을 분석한 결과, 해안유출 지하수에서는 라돈 농도와 전기전도도 사이에 매우 낮은 음의 상관성($r = -0.343$, $p = 0.332$)을 보인 반면에 우물 지하수 시료는 일부 시료를 제외하고는 상대적으로 높은 음의 상관성($r = -0.655$, $p = 0.001$)을 보인다. 한편, 하천수는 라돈 농도와 EC간에 거의 상관성을 보이지 않으며, 해수는 비교적 높은 음의 상관성($r = -0.587$, $p = 0.027$)을 보인다.

해안유출 지하수의 유출량은 0.225~10 m^3/day (평균 유출량 2.736 m^3/day)이며, 대부분 암반의 절리를 따라서 유출되고 있다. 또한 해안유출수의 산출지점은 선구조와 비교적 잘 일치하고 있다.

Darcy의 법칙에 의한 바다로의 총 지하수 유출량은 16,788 m^3/day 로서 라돈의 물질수지 모델에 의해서, 2010년 7월에 일광만 내로 공급되는 해저유출 지하수량(3,130 m^3/day)보다 약 5.4배 더 크다. Darcy의 법칙에 의해서 구한 일광만의 지하수 유출량은 한 지점의 수리전도도 값과 일광천의 주 계곡의 단면에서 구한 수두경사를 적용하여 구하였으나, 유역내의 지역적인 수리전도도 차이와 수두경사 차이로 인한 지하수 유출량의 불확실성이 내포되어 있다. 또한 라돈 물질 수지 모델에 의한 해저유출 지하수량도 라돈 측정 시기, 측정 지점, 그리고 하천유출량 측정 오차 등 여러 가지 불확실한 요소들을 포함하고 있다. 따라서 바다로 유출되는 지하수량 산정값은 앞으로 보다 많은 자료의 축적에 의해서 달라질 수 있을 것이다.

사 사

본 연구는 지역MT특성화사업의 일환으로 ‘부산 인근해역 해저유출수 탐사 및 개발사업단’의 연구비지원(과제번호: 지역MT-0802)으로 수행되었으며, 이에 감사드린다.

참 고 문 헌

- 김득호, 2010, 부산지역 해안유출수의 수리지질학적 특성 연구, 부산대학교 대학원 이학석사 학위논문, p. 123.
- 김용호, 배상근, 2005, 부동지구의 해안지하수 유출량, 한국수자원학회 학술발표 논문집, 1179-1183.
- 박관석, 김규범, 양한섭, 2004, 제주도 해안에서 해저지하수의 유출에 의한 환경화학적 특성과 유출량 측정, 한국해양공학회, 춘계학술대회 논문집.
- 박남식, 홍성훈, 서경수, 2007, 해안 지하수 최적관리를 위한 개발가능량 산정 기법, 한국수자원학회논문집, 40(8), 665-675.
- 백승균, 박맹언, 2005, 시계열 수질 분석에 의한 제주도의 해저유출수 탐사 및 검증, 자원환경지질, 36(4), 359-409.
- 손치무, 이상만, 김영기, 김상욱, 김형식, 1978, 동래 · 월내 도폭(1:50000) 및 설명서, 자원개발연구소, p. 27.
- 양한섭, 황동운, 2007, 부산 남동지역 연안 대수층내 지하수의 지화학적 특성과 유출, 한국수산화학회지, 40(3), 167-177.
- 이대근, 김형수, 박찬석, 원종호, 김규범, 2002, 거제도 해안유출 지하수 예비조사 및 활용방안 연구, 한국지하수토양환경학회 추계학술발표회, 253-256.
- 이상규, 1994, 제주도 지하수 문제에서 물리탐사의 역할, 대한지하수환경학회, 전략광물자원 연구센터-제주도 지하수자원의 환경학적 보전과 개발 이용, 75-91.
- 장태우, 강필중, 박석환, 황상규, 이동우, 1983, 부산 · 가덕 지질도폭(1:50000) 및 설명서, 한국동력자원연구소, p. 22.
- 한국수자원공사, 2003, 부산지역 지하수 기초조사.
- 홍성훈, 한수영, 박남식, 2003, 해안지역의 지하수개발 가능량 평가, 대한토목학회논문집, 23(3B), 201-207.
- 황동운, 김규범, 이재영, 2010, 한반도 주변 연안 해저를 통한 담 지하수의 유출: 미래 수자원으로서의 중요성, 한국해양학회지, 15, 192-202.
- Anthony, J.S., David, E.H., Jeffrey, and V.T., 2008, Wave effects on submarine groundwater seepage measurement, *Advances in Water Resources*, 32, 820-833.
- Boehm, A.B., Shellenbarger, G.G., and Paytan, A., 2004, Groundwater discharge: Potential association with focal indicator bacteria in the surf zone, *Environmental Science and Technology*, 38(13), 3558-3566.
- Bugna, G.C., Chanton, J.P., Cable, J.E., Burnett, W.C., and

- Cable, P.H., 1996. The importance of groundwater discharge to the methane budgets of nearshore and continental shelf waters of the northeastern Gulf of Mexico. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **60**(23), 4735-4746.
- Burnett, W.C. and Taniguchi, M., 2001. Measurement and significance of the direct discharge of groundwater into the coastal zone, *Journal of Sea Research*, **46**, 109-116.
- Burnett, W.C., Chanton, J.P., Christoff, J., Kontar, E., Lambert, M., Moore, W.S., O'Rourke, D., Smith, C., Smith, L., and Taniguchi, M., 2002. Assessing methodologies for measuring groundwater discharge to the ocean, *EOS*, **83**, 117-123.
- Burnett, W.C. and Dulaiova, H., 2003. Estimating the dynamics of groundwater input into the coastal zone via continuous radon-222 measurements, *Journal of Environmental Radioactivity*, **69**, 21-35.
- Burnett, W.C., Aggarwal, P.K., Aureli, A., Bokuniewicz, H., Cable, J.E., Charette, M.A., Kontar, E., Krupa, S., Kulkarni, K.M., Loveless, A., Moore, W.S., Oberdorfer, J.A., Oliveira, J., Ozyurt, N., Povinec, P., Privitera, A.M.G., Rajar, R., Ramessur, R.T., Scholten, J., Stieglitz, T., Taniguchi, M., and Turner, J.V., 2006. Quantifying submarine groundwater discharge in the coastal zone via multiple methods. *Science of the Total Environment*, **367**, 498-543.
- Broecker, W.S. and Peng, T.-H., 1971. The vertical distribution of radon in the BOMEX area, *Earth and Planetary Science Letter*, **11**, 99-108.
- Cable, J.E., Bugna, G.C., Burnett, W.C., and Chanton, J.P., 1996. Application of ^{222}Rn and CH_4 for assessment of groundwater discharge to the coastal ocean, *Limnology & Oceanography*, **41**, 1347-1353.
- Charette, M.A., Buesseler, K.O., and Andrews, J.E., 2001. Utility of radium isotopes for evaluating the input and transport of groundwater-derived nitrogen to a Cape Cod estuary, *Limnology & Oceanography*, **46**, 456-470.
- Corbett, D.R., Chanton, J., Burnett, W.C., Dillon, K., Rutkowski, C., and Fourqurean, J.W., 1999. Patterns of groundwater discharge into Florida Bay, *Limnology & Oceanography*, **44**, 1045-1055.
- Corbett, D.R., Dillon, K., Burnett, W.C., and Chanton, J.P., 2000. Estimating the groundwater contribution into Florida Bay via natural tracers, ^{222}Rn and CH_4 , *Limnology & Oceanography*, **45**, 1546-1557.
- D'Alessandro, W. and Vita, F., 2003. Groundwater radon measurements in the Mt. Etna area. *Journal of Environmental Radioactivity*, **65**, 187-201.
- D'Elia, C.F., Webb, K.L., and Porter, J.W., 1981. Nitrate-rich groundwater inputs to Discovery Bay, Jamaica: A significant source of N to local coral reefs?, *Bulletin of Marine Science*, **31**, 903-910.
- Dulaiova, H., Burnett, W.C., Chanton, J.P., Moore, W.S., Bokuniewicz, H.J., Charette, M.A., and Sholkovitz, E., 2006. Assessment of groundwater discharge into West Neck Bay, New York, via natural tracers, *Continental Shelf Research*, **26**(16), 1971-1983.
- Dulaiova, H., Camilli, R., Henderson, P.B., and Charette, M.A., 2010. Coupled radon, methane and nitrate sensors for large-scale assessment of groundwater discharge and non-point source pollution to coastal waters, *Journal of Environmental Radioactivity*, **101**, 553-563.
- Garrison, G.H., Glenn, C.R., and McMuntry, G.M., 2003. Measurement of submarine groundwater discharge in Kahana Bay, Oahu, Hawaii, *Limnology & Oceanography*, **48**, 920-928.
- Harvey, F.E., Lee, D.R., Rudolph, D.L., and Frape, S.K., 1997. Locating groundwater discharge in large lakes using bottom sediment electrical conductivity mapping, *Water Resources Research*, **33**, 2609-2615.
- Hwang, D.W., Lee, Y.W., and Kim, G., 2005. Large submarine groundwater discharge and benthic eutrophication in Bangdu Bay on volcanic Jeju Island, Korea, *Limnology & Oceanography*, **50**, 1393-1403.
- Hwang, D.W., Kim, G., Lee, Y.W., and Yang, H.S., 2005. Estimating submarine inputs of groundwater and nutrient to a coastal bay using radium isotopes, *Marine Chemistry*, **96**, 61-71.
- Johannes, R.P., 1980. The ecological significance of the submarine discharge of groundwater, Marine Ecology-Progress Series, **3**, 365-373.
- Kelly, R.P. and Moran, S.B., 2002. Seasonal changes in groundwater input to a well-mixed estuary estimated using radium isotopes and implications for coastal nutrient budgets. *Limnology & Oceanography*, **47**, 1796-1807.
- Kim, G. and Hwang, D.-W., 2002. Tidal pumping of groundwater into the coastal ocean revealed from submarine ^{222}Rn and CH_4 monitoring, *Geophysical Research Letters*, **29**(14), 23-27.
- Laroche, J., Nuzzi, R., Waters, R., Wyman, K., Falkowski, P.G., and Wallace, D.W.R., 1997. Brown tide blooms in Long Island's coastal waters linked to interannual variability in groundwater flow. *Global Change Biology*, **3**, 397-410.
- Lee, D.R., 1977. A device for measuring seepage flux in lakes and estuaries, *Limnology & Oceanography*, **22**, 140-147.
- Lee, J.M. and Kim, G.B., 2006. A simple and rapid method for analyzing radon in coastal and ground waters using a radon-in-air monitor, *Journal of Environmental Radioactivity*, **89**, 219-228.
- Li, E., Hyun, Y., Lee, K.-K., and Park, B.W., 2006. Numerical study of submarine groundwater discharge in a two-dimensional unconfined coastal aquifer, Proceedings of MODFLOW

and MORE 2006: Managing Groundwater Systems.

Mancini, C. and Giannelli, G., 1995, Determination of water-borne ^{222}Rn concentrations using AC canisters, *Health Physics*, **69**, 403-405.

Martin, J.B., Cable, J.E., Swarzenski, P.W., Lindenberg, M., and Hartl, K., 2000, Coastal groundwater discharge to the Indian River Lagoon - physical measurements and water sources, Geological Society of America-Southeastern Section, Charleston, South Carolina, 222-24 March.

Michael, H.A., Mulligan, A.E., and Harvey, C.F., 2005, Seasonal oscillations in water exchange between aquifers and the coastal ocean, *Nature*, **436**(7054), 77-87.

Moore, W.S., 1996, Large groundwater inputs to coastal waters revealed by ^{226}Ra enrichments, *Nature*, **380**, 612-614.

Swarzenski, P.W., 2007, U/Th series radionuclides as coastal groundwater tracers, *Chemical Reviews*, **107**, 663-674.

Swarzenski, P.W., Bratten, J.F., and Crusius, J., 2004, Submarine ground-water discharge and its role in coastal processes and ecosystems, USGS open file report 2004-1226, p. 4.

Taniguchi, M., Burnett, W.C., Dulaiova, H., Kontar, E.A., Povinec, P.P., and Moore, W.S., 2006, Submarine groundwater discharge measured by seepage meters in sicilian coastal waters, *Continental Shelf Research*, **26**, 835-842.

Valiela, I., Costa, J., Foreman, K., Teal, J.M., Howes, B., and Aubrey, D., 1990, Transport of groundwater-borne nutrients from watersheds and their effects on coastal waters, *Biochemistry*, **10**, 177-197.

Weigel, C., Chui, S.T., and Corbett, J.W., 1978, Renormalization-group calculation of defects in solids, *Physical Review B*, **18**, 2377-2386.

Yang, H.S., Hwang, D.W., and Kim, G.B., 2002, Factors controlling excess radium in the Nakdong River estuary, Korea: submarine groundwater discharge versus desorption from riverine particles, *Marine Chemistry*, **78**, 1-8.

Zektser, I.S. and Loaiciga, H.A., 1993, Groundwater fluxes in the global hydrologic cycle: past, present, and future, *Journal of Hydrology*, **144**, 405-427.