

라듐 동위원소를 이용한 육상기원 물의 여자만 표층에서의 체류시간 측정

황동운[†] · 홍석진 · 김형철 · 정래홍 · 이원찬

국립수산과학원 어장환경과

Estimating the Residence Time of Land-origin Waters in the Surface of the Yeoja Bay, Korea, using Radium Isotopes

Dong-Woon Hwang[†], Sokjin Hong, Hyungchul Kim, Rae-Hong Jung, and Won-Chan Lee

Marine Environment Research Division, National Fisheries Research & Development Institute, Busan 619-705, Korea

Received August 11, 2014/Revised September 12, 2014/Accepted September 24, 2014

We have measured the salinity and the activities of short-lived radium isotopes (^{223}Ra and ^{224}Ra) in stream water, coastal porewater, and surface seawater around Yeoja Bay in the southern sea of Korea to estimate the residence time of bay water. The porewater was characterized by low salinity and high activities of Ra isotopes relative to the seawater around Yeoja Bay. The correlation between activities of Ra isotopes and salinity in seawater reveal that the porewater is the major source of Ra isotopes for bay waters. Based on the $^{224}\text{Ra}/^{223}\text{Ra}$ ratio model using the activities of short-lived Ra isotopes in porewater and outer seawater of bay, the mean residence time of surface water (< 3 m depth) in Yeoja Bay estimated was about 6 days. This residence time also reflects the staying time of land-origin materials moved from inner region of bay to open ocean. Our results suggest that it is necessary to consider the residence time of bay water calculated by using Ra isotopes for estimating the allowable load of land-based pollutant in order to sustain the production of aquaculture organisms and to maintain the water quality in Yeoja Bay.

Key words: Ra isotopes, Porewater, Water residence time, Yeoja Bay

1. 서 론

전 세계적으로 1960년대 이후 임해 공업단지 및 신 도시의 조성, 해안도로의 확충 등 산업화와 도시화 과정에서 해안을 따라 인간활동이 증가하면서 육상으로부터 유입되는 각종 오염물질이 해양으로 유입되어 연안이 점점 오염되고 있다.¹⁻³⁾ 또한, 최근에는 양식 산업의 발달로 연안에 수많은 어패류 양식장이 설치되어 양식장에서 발생한 각종 유기오염물질들이 그대로 연안에 집적되어 환경오염을 가중시키고 있다. 이로 인해 부영양화, 빈산소수괴(hypoxia), 및 적조 등과 같은 연안 환경문제가 빈번히 일어나고, 아울러 수산생물이 대량 폐사하거나^{4,5)}, 양식 어패류의 생산량에 있어서 큰 변동을 보인다.^{6,7)}

이러한 연안 환경문제를 해결하고 수질을 개선하기 위하여 각 나라마다 여러 제도를 마련하여 육상으로부터 유입되는 오염물질의 배출량 감소를 위해 노력하고 있다. 예를 들어, 일본에서는 세토해와 동경만을 대상으로 부영양화에 의한 피해방지 및 연안 환경관리를 위해 관련 법을 개정하여 연안환경 보전에 힘쓰고 있으며, 미국에서는 최대 일일 오염 부하량(total maximum daily load)의 개념을 도입하여 수질 오염물질의 저감을 위한 방법으로 적용하고 있고, 유럽에서는 북해를 대상으로 육상기원 오염물질의 효율적인 관리를 위하여 인접국가 간의 긴밀한 협조체계를 구축하여 통합유역관리 제도를 실시하고 있다.^{3,8-10)}

우리나라에서도 마산만과 부산항과 같은 심각한 수질오염을 보이는 해역을 대상으로 오염물질 총량관리제

[†]To whom correspondence should be addressed.

도를 도입하여 육상으로부터 유입되는 오염물질의 저감을 위해 노력하고 있다. 특히, 우리나라 연안은 남해안을 중심으로 다양한 어패류 양식이 활발하고 이들 어장의 수질개선과 함께 수산자원의 지속적인 이용을 위해서는 육상으로부터 대가나 강물을 통해 유입되는 오염물질의 유입량과 함께 해양 자체의 해류 및 조류의 흐름, 생물에 의한 흡수 등을 고려한 환경용량에 근거한 어장 수질의 체계적인 관리대책이 필요하다. 즉, 해양특성을 고려하여 육상에서 기인한 오염물질이 하천을 통하여 연안으로 유입되었을 때 연안 어장환경을 개선시키거나 오염시키지 않을 수 있는 적절한 오염물질의 허용 부하량에 근거한 관리가 요구된다. 지금까지 우리나라 연안의 수질관리를 위하여 육상 오염물질의 허용 부하량을 산정하기 위해 박스모델을 이용한 물질수지¹¹⁾나 생태계 모델^{12,13)}을 이용한 방법 등이 사용되어 왔다. 이들 방법으로 육상 오염물질의 허용 부하량 산정 시 가장 중요한 요소는 육상기인 오염물질들의 연안에서의 체류시간, 즉 연안수의 체류시간(water residence time)이다. 비록 육상기인 오염물질의 체류시간은 해양 내 물리적인 혼합과정 외 생물·화학·지질학적 요소에 의해 달라지지만, 물리적인 혼합에 의한 물의 체류시간이 길면 길수록 해양 내 생물이나 퇴적물과의 반응시간이 길어져 미량금속과 같은 유해물질들이 생물이나 퇴적물에 농축·축적되어 해양의 오염도는 증가할 가능성이 높다.

여자만은 한반도 남해안 중앙부의 위치한 반폐쇄적인 내만으로 조간대가 발달하여 우리나라에서 유용 양식패류 중에 하나인 새꼬막의 대표적인 주산지이다.^{14,15)} 또한, 그 외 어패류의 생산과 산란·생육장으로 가치가 높아 국토의 계획 및 이용에 관한 법률 제40조에 의해 1982년 이후 수산자원보호구역으로 지정된 후 지속적인 보호 및 관리가 이루어지고 있는 해역이다.^{3,16)} 하지만, 최근 주변의 산업발달과 연안 이용의 증가, 과도한 밀집양식 등으로 인하여 육상 및 양식장으로부터 유입되는 각종 오염물질들의 양이 증가하면서 수질환경이 악화되고 만 내 유기물 오염이 진행되면서 새꼬막 생산량이 점차 감소하고 있는 실정이다.¹⁷⁾ 이러한 오염된 만 내 양식장 환경 개선과 수산자원의 회복을 위해서는 어장환경의 적정 수용력에 근거한 지속적인 수질 관리대책이 요구되며, 이를 위해서는 육상오염물질의 허용 부하량을 산정 시 필요한 만 내해수의 체류시간을 알아내는 것이 중요하다.

따라서, 이 연구의 목적은 우리나라의 대표적인 패류

생산해역인 남해안의 여자만 주변의 하천수, 공극수, 해수 중 짧은 반감기의 Ra 동위원소(²²³Ra과 ²²⁴Ra)를 분석하여 그 비 값을 이용한 ²²⁴Ra/²²³Ra ratio 모델로부터 해수의 체류시간을 파악하고 어장환경의 적정수용력 산정을 위한 기초자료를 제공하는데 있다.

2. 재료 및 방법

2.1. 연구해역

연구해역인 여자만은 북위 34° 35'~ 34° 55', 동경 127° 20'~ 127° 40' 사이에 위치한 서쪽의 고흥반도와 동쪽의 여수반도 및 고돌산반도로 둘러싸여 있는 반폐쇄적인 내만이다(Fig. 1). 만의 전체면적은 약 360 km²이고, 남북방향의 길이가 약 30 km, 동서방향의 폭이 입구에서 7 km로 가장 좁고 만 가운데에서 약 22 km로 가장 넓은 전체적으로 항아리 형태를 보인다.^{3,18)} 평균수심은 약 5 m로 해저경사는 비교적 완만하고, 만 중앙부에 위치한 여자도를 중심으로 북쪽해역으로 갈수록 점점 깊어져 5 m 이하의 낮은 수심을 보이는 반면, 만의 입구로 갈수록 점점 깊어져 좌측 서수로와 우측 조발수로에서 20 m 이상의 수심을 나타낸다.^{2,19)}

여자만 주변의 강수량은 연평균 1,470 mm로서 몬순 기후의 영향으로 계절에 따라 큰 변화를 보이며, 대부분의 강우는 여름철(7~9월)에 집중적으로 내린다.²⁰⁾ 주변에 육상으로부터 유입되는 큰 강은 없으나 북동쪽의 이사천과 동천, 북서쪽의 별교천 등 소하천을 통해 약 1.6×10⁵ m³/day의 담수가 유입되며^{3,20)}, 여름철 장마와 태풍으로 인한 집중강우에 의해 많은 양의 담수가 만으로 유입되어 해수의 염분이 일시적으로 저염분수를 나타내기도 한다. 해수의 흐름은 밀물 때 만의 남쪽에 북서-남동방향으로 발달한 좌우수로를 통하여 외해수가 유입된 후 반 시계방향으로 돌아 썰물 때 외해로 빠져 나가는데, 만 입구에 위치하는 낭도, 조발도, 백일도 등 크고 작은 많은 섬들이 산재해 있어 지형적인 특성의 영향으로 만 내해수와 외해수의 교환은 매우 제한적이다.^{21,22)}

조석은 일조부등(diurnal inequality)이 심한 반일주조석(semidiurnal tide)으로 평균조차는 약 3 m로서 Davies²³⁾의 분류기준에 의해 중조차 환경에 해당된다. 표층 퇴적물은 주로 실트질 점토(silty clay), 점토질 실트(clayey silt), 점토(clay)로 이루어져 있으며 이들 퇴적물이 만 내 퇴적물의 93%를 차지하고 그 외 모래(sand), 실트 점토질 모래(silty clayey sand)가 분포하

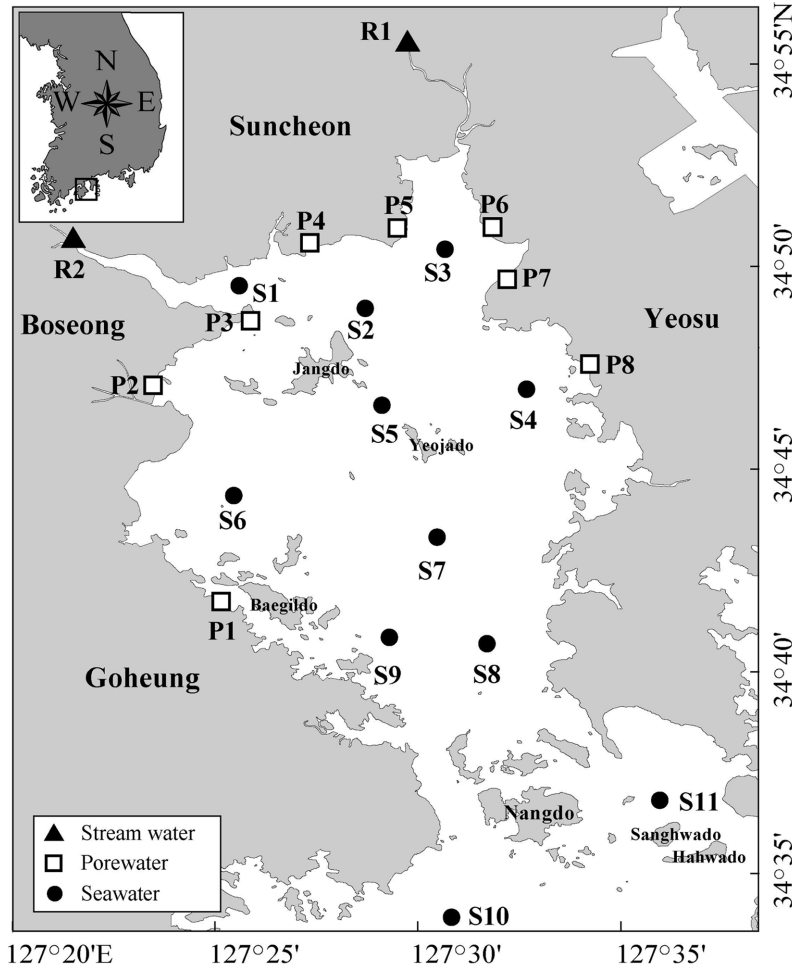


Fig. 1. A map showing the sampling sites in the study region during August 11-15, 2009. The Ra samples of stream water and shallow porewater were collected from the stations marked with filled triangles (Sts. R1 and R2) and blank squares (Sts. P1~P8), respectively. The filled circle marks represent the seawater sampling sites (Sts. S1~S11).

고 있다.²⁴⁾ 세립질 퇴적물은 주로 만 중앙부에 분포하고, 조립질 퇴적물은 만의 북쪽 하천수가 유입되는 해역과 입구 부근에 우세하게 분포한다.²⁴⁾ 해수의 흐름 및 지형적인 특성으로 인해 만의 가장 안쪽해역과 가장자리를 중심으로 넓은 펄 갯벌이 발달해 있으며, 이들 지역에는 새꼬막 등의 패류 살포식 양식이 성행하고 있다.^{17,19)}

2.2. 조사항목 및 분석방법

여자만 내 해수의 체류시간을 산정하기 위하여 2009년 8월 10일부터 15일까지 여자만 주변의 하천수 2개 정점(R1, R2), 공극수 8개 정점(P1~P8), 해수의 경우

만 내 9개 정점(S1~S9), 만 외 2개 정점(S10, S11)에서 시료를 채수하였다(Fig. 1). 하천수와 공극수는 차량을 이용하여 해안가를 따라 이동하면서 시료를 확보하였는데, 하천수의 경우 해수의 영향을 받지 않는 상류 지점에서 고무 양동이를 이용하여 약 200 L를 채수하였고, 공극수는 저조 시 해안가 주변에 삽으로 웅덩이를 만든 다음 흘러나온 물을 플라스틱 바가지를 이용하여 약 60 L 채수하였다. 해수는 국립수산과학원 조사선인 탐구 7호를 타고 만의 안쪽의 경우 저조 시 만의 입구에서부터 북쪽으로 이동하면서, 만의 바깥쪽은 고조시에 만의 입구에서 수중펌프(submersible pump)를 이용하여 수심 약 1.5 m 부근의 표층 해수를 약

100~150 L 채수하였다.

하천수와 공극수의 수온과 염분은 휴대용 염분계(YSI, Model - Professional Plus)를, 해수의 수온과 염분은 수중 염분계(CTD, Model - Seabird 19)을 이용하여 현장에서 측정하였다. 또한, 연구해역의 해수 중 수온과 염분의 수직적인 분포 특성을 파악하기 위하여 수중 염분계를 표층에서 해저면으로부터 1 m 깊이까지 하강하면서 1 m 간격으로 수온과 염분을 측정하였다. 하천수, 공극수, 해수 중 ^{223}Ra 과 ^{224}Ra 은 현장에서 Kim et al.²⁵⁾이 사용한 방법에 따라 채수한 물(60~200 L)을 폴리프로필렌 통(polypropylene cubitainer, ~20 L)에 넣은 후 MnO_2 -fiber (~60 g wet weight)가 들어 있는 아크릴 관(직경 4.5 cm, 길이 20 cm)에 ~1 L/min의 속도로 통과시켜 수중의 Ra 동위원소를 MnO_2 -fiber에 농축시켰다. 일반적으로, 해수와 담수를 포함한 자연수 중에서 Ra 동위원소를 추출하는데 가장 효율적인 매체는 산화망간이 피복된 아크릴 섬유(manganese-impregnated acrylic fiber, MnO_2 -fiber)이며²⁶⁾, Yamada and Nozaki²⁷⁾에 의하면 MnO_2 -fiber를 통과하는 해수의 유속이 2.0 L/min 이하일 때 수중 Ra이 95% 이상 추출된다고 보고하였다. 이후 Ra 동위원소를 흡착시킨 MnO_2 -fiber를 실험실로 옮겨 작은 플라스틱 관(직경 2.5 cm, 길이 20 cm)에 넣고 공기펌프를 이용하여 과잉의 수분을 제거하였다. 이는 MnO_2 -fiber내 수분이 많을 경우 Ra의 딸핵종인 라돈(Rn)이 MnO_2 -fiber 밖으로 빠져나가는 것을 방해되기 때문이다.^{25,28)} 그리고 나서 수분을 제거한 MnO_2 -fiber를 DCC 측정용 플라스틱 관(직경 5.0 cm, 길이 30 cm)에 옮겨 Moore

and Arnold²⁹⁾가 개발한 Delayed Coincidence Counter (DCC)를 사용하여 ^{223}Ra 과 ^{224}Ra 을 분석하였다. 이 DCC는 ^{223}Ra 과 ^{224}Ra 이 방사붕괴하여 나오는 ^{219}Rn (반감기: 3.92 초)과 ^{220}Rn (반감기: 54.5 초)을 가는 관을 통해 scintillation counter에 통과시켜 Rn과 그 딸핵종인 폴로늄(Po) 동위원소(^{215}Po , 반감기: 1.8×10^{-3} 초; ^{216}Po , 반감기: 0.16초)를 측정하며 이들 Rn과 Po는 반감기가 매우 짧기 때문에 공기의 순환속도를 6~8 L/min로 하였다(Fig. 2).

한편, 이 연구에서 ^{223}Ra 과 ^{224}Ra 의 검출효율(detection efficiency)은 ^{223}Ra 과 ^{224}Ra 표준용액을 시료와 같은 방법으로 MnO_2 -fiber에 흡착시킨 후 분석하여 측정하였으며, ^{223}Ra 과 ^{224}Ra 의 검출효율은 각각 0.14~0.17 cpm/dpm(평균 0.15 cpm/dpm)과 0.31~0.35 cpm/dpm(평균 0.33 cpm/dpm)이었다. 이들 검출효율을 이용하여 ^{223}Ra 과 ^{224}Ra 의 농도는 다음의 방정식 (1)을 이용하여 계산하였다.

$$A_{\text{Ra}} = \frac{(C_{\text{cpm}} - B_{\text{cpm}})}{\text{D.E.}} \times e^{\lambda t} \times \frac{100}{V} \quad (1)$$

여기서, A_{Ra} 은 시료채취 시 ^{223}Ra 과 ^{224}Ra 의 농도(dpm/100L)이고, C_{cpm} 은 ^{223}Ra , ^{224}Ra 과 방사평형된 딸핵종의 계수율(count per minute, cpm), B_{cpm} 은 기기의 공시험(background) 계수율(0.09~0.18 cpm), D.E.는 ^{223}Ra 과 ^{224}Ra 의 검출효율, λ 는 ^{223}Ra (0.0608 day⁻¹)과 ^{224}Ra (0.1904 day⁻¹) 동위원소의 방사붕괴 상수(decay constant), t 는 시료 채취일로부터 측정 시까지 경과한 시간(day), V 는 시료량(L)을 나타낸다.

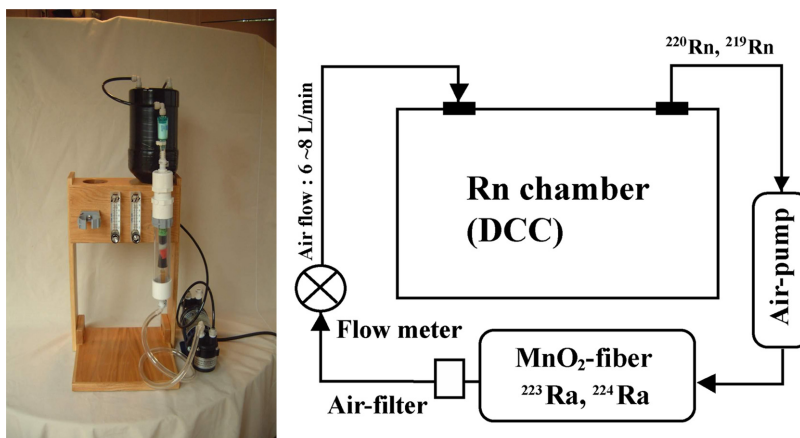


Fig. 2. The photograph (left) and schematic diagram (right) of the Rn circulation and Rn-Po counting system using delayed coincidence counter for the measurement of ^{223}Ra and ^{224}Ra (Moore and Arnold²⁹⁾).

3. 결과 및 고찰

3.1. 하천수와 공극수 중 수온, 염분, Ra 동위원소 분포 특성

연구기간 중 여자만 주변의 하천수, 공극수, 및 해수 중 수온, 염분, Ra 동위원소(²²³Ra과 ²²⁴Ra) 농도를 Table 1과 Fig. 3에 나타내었다. 하천수의 수온, 염분, ²²³Ra과 ²²⁴Ra 농도는 여자만의 북동쪽에 위치한 동천(R1)에서 각각 26.6°C, 0.0, 1.7 dpm/100L, 29 dpm/100L였고, 여자만의 북서쪽에 위치한 벌교천(R2)에서 각각 19.8°C, 0.0, 2.5 dpm/100L, 36 dpm/100L였다.

여자만 주변 공극수(P1~P8)의 경우, 온도는 25.8~29.1°C (평균 27.4±1.1°C) 범위였고, 염분은 8.0~21.9 (평균 15.6±5.9) 범위로 정점간에 큰 차이를 보였다. 여자만 북서쪽의 P5와 P7 정점에서 10.0 미만으로 낮고 여자만 서쪽의 P1과 P2 정점에서 21.0 이상으로 높은 염분을 나타내었다. 특히, 여자만 주변 공극수 중 염분은 조사기간 동안 해수(20.6~30.0)보다도 낮은 염분을 나타내었다. 이는 여자만 주변 공극수가 해안가를 통해 유출되는 담지하수의 영향을 크게 받고 있음을 의

미한다. 최근, Hwang et al.³⁰⁾은 여자만 해수 중 염분을 이용한 물수지 방법을 이용하여 여자만 내로 유입되는 담지하수 유입량을 추정된 결과, 주변 하천수 유입량에 4배 정도 많고 여자만 내 담수의 주 공급원이 해저지하수(submarine groundwater discharge, SGD)임을 보고한 바 있다. 공극수 중 ²²³Ra과 ²²⁴Ra 농도는 각각 36~320 dpm/100L(평균 130±96 dpm/100L)와 450~2900 dpm/100L(평균 1380±830 dpm/100L)범위였으며, 염분과 마찬가지로 정점간에 큰 차이를 보였다. 특히, 다른 정점들에 비해 상대적으로 낮은 염분을 보였던 여자만 북서쪽의 P5와 P7 정점과 높은 염분을 보였던 여자만 서쪽의 P1과 P2 정점에서 ²²³Ra은 100 dpm/100L, ²²⁴Ra은 1000dpm/100L 미만으로 다른 정점들에 비해 상대적으로 낮은 Ra 동위원소 농도를 보였다. 일반적으로 공극수를 비롯한 지하수 중 Ra 동위원소의 농도는 어미핵종인 우라늄(U)과 토륨(Th) 동위원소의 방사붕괴에 의해 공급되어 높은 농도를 보이지만, 지역적인 암석 내 U과 Th의 지하화적 특성³¹⁾이나 공극수의 흐름이 빠른 해역에서는 강우나 재순환된 해수에 의해 충전된 공극수 및 지하수가 퇴적물 내에서

Table 1. Salinity and the activities of ²²³Ra and ²²⁴Ra in the surface seawater, porewater and stream water around the Yeosu Bay during August 10-15, 2009

Station number	Location		Sampling depth (m)	Temp. (°C)	Sal.	Ra activity (dpm/100L)		²²⁴ Ra/ ²²³ Ra Ratio
	Latitude	Longitude				²²³ Ra	²²⁴ Ra	
Stream water	R1	34°56'36"N 127°29'59"E	0.0	26.6	0.0	1.7±0.2	29±1	17.1
	R2	34°50'45"N 127°20'34"E	0.0	19.8	0.0	2.5±0.2	36±1	14.4
Porewater	P1	34°41'57"N 127°24'48"E	< 0.5	28.0	21.5	68±1	720±3	10.6
	P2	34°44'56"N 127°23'28"E	< 0.5	27.3	21.9	78±2	970±5	12.4
	P3	34°48'35"N 127°25'44"E	< 0.5	27.1	16.0	190±3	1790±7	9.4
	P4	34°50'18"N 127°27'51"E	< 0.5	26.2	10.2	120±2	1300±6	10.8
	P5	34°50'21"N 127°29'19"E	< 0.5	25.8	8.7	36±2	450±3	12.5
	P6	34°50'39"N 127°31'36"E	< 0.5	28.2	20.9	180±4	2100±10	11.7
	P7	34°49'33"N 127°32'07"E	< 0.5	27.1	8.0	59±2	790±5	13.4
	P8	34°47'59"N 127°33'46"E	< 0.5	29.1	17.8	320±4	2900±10	9.1
Bay seawater	S1	34°48'45"N 127°24'44"E	1.5	27.6	20.6	36±1	360±1	10.0
	S2	34°48'20"N 127°29'04"E	1.5	27.3	25.1	14±1	110±1	7.9
	S3	34°49'57"N 127°30'20"E	1.5	27.4	25.6	20±1	200±2	10.0
	S4	34°44'32"N 127°32'77"E	1.5	28.3	26.0	14±1	100±1	7.1
	S5	34°46'69"N 127°29'21"E	1.5	26.5	24.6	15±1	160±2	10.7
	S6	34°43'88"N 127°26'53"E	1.5	26.0	28.8	13±1	100±2	7.7
	S7	34°42'50"N 127°30'89"E	1.5	26.0	28.2	15±1	180±2	12.0
	S8	34°42'46"N 127°30'94"E	1.5	26.0	28.0	11±1	93±1	8.5
	S9	34°41'02"N 127°29'16"E	1.5	25.4	29.6	12±1	110±1	9.2
Open ocean water	S10	34°34'43"N 127°30'54"E	1.5	25.4	29.3	11±1	54±1	4.9
	S11	34°36'73"N 127°36'94"E	1.5	25.1	30.0	11±1	60±1	5.5

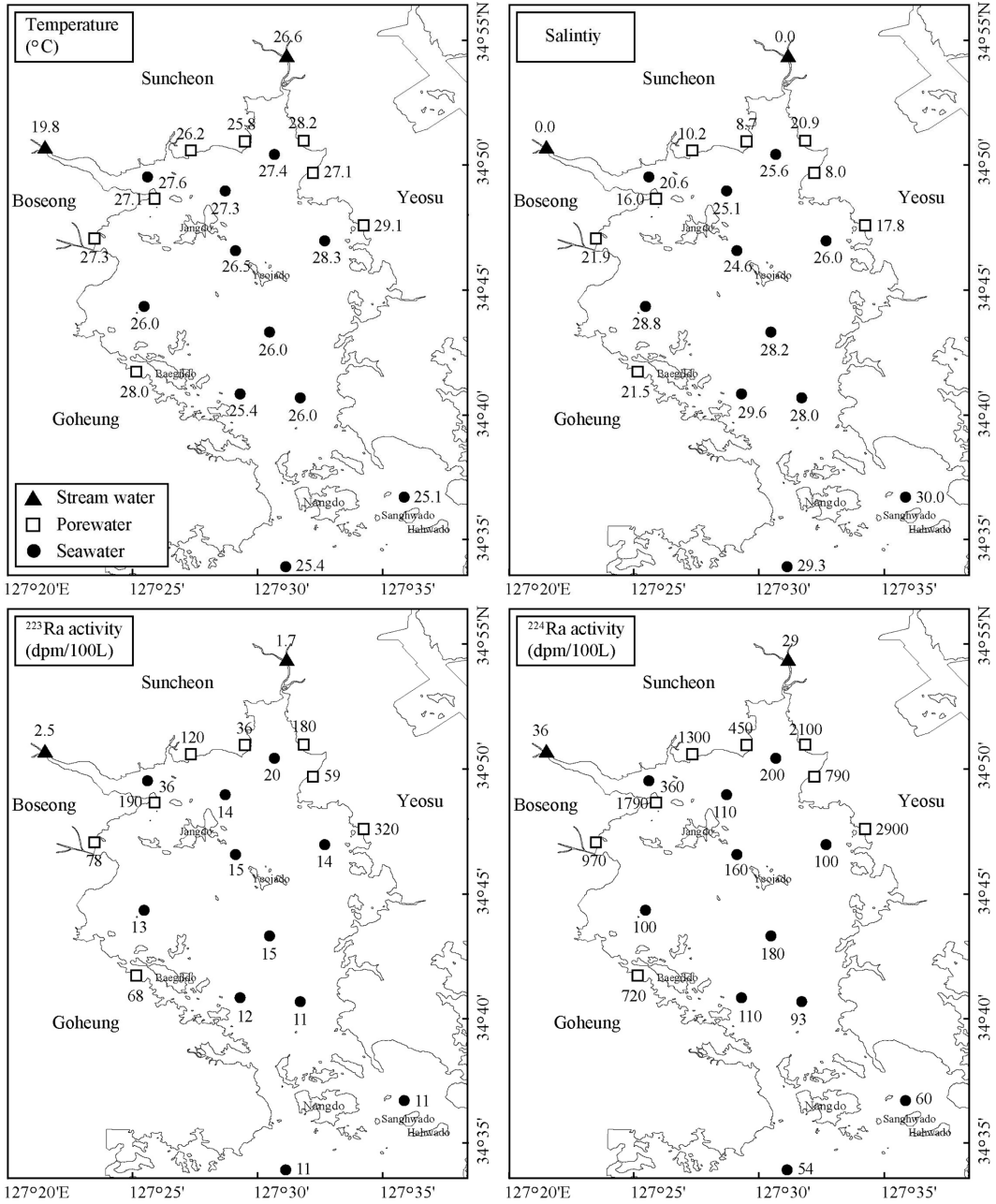


Fig. 3. The horizontal distributions of temperature, salinity and the activities of ²²³Ra and ²²⁴Ra in stream water, coastal porewater, and surface seawater of the study region observed during August 11~15, 2009.

체류시간이 짧아 Ra 동위원소가 적게 용출되어 낮은 농도를 보이기도 한다.^{32,33)} 따라서, 연구해역 내 공극수 중 Ra 동위원소는 연구해역 주변의 암석 내 Ra 동위원소의 어미핵종인 U과 Th의 지화학적 특성과 연안 퇴적물 내 공극수의 체류시간 및 육상으로부터 기원한

담지하수와 재순환된 해수의 혼합에 따른 퇴적환경의 변화에 기인한 Ra 동위원소의 용출속도(량)의 차이로 인해 공간적으로 큰 농도차이를 보이는 것으로 생각된다.

표층 해수의 온도와 염분은 만 내해수(S1~S9)의 경

우 각각 25.4~28.3°C(평균 26.7±1.0°C)와 20.6~29.6(평균 26.3±2.8) 범위였고, 만 외해수(S10~S11)의 경우 25.1~25.4°C(평균 25.3±0.2°C)와 29.3~30.0(평균 29.7±0.5) 범위였다. 여자만의 북서쪽 별교천 입구 쪽의 S1 정점에서 가장 낮고 만의 입구 쪽으로 갈수록 점차 증가하여 만 바깥쪽 해역에서는 약 30.0의 높은 염분을 보였다. ²²³Ra과 ²²⁴Ra 농도는 만 내해수의 경우 각각 11~36 dpm/100L(평균 17±8 dpm/100L)와 93~360 dpm/100L(평균 160±86 dpm/100L)범위였으며, 만 외해수의 경우 각각 11 dpm/100L와 54~60 dpm/100L(평균 57±4 dpm/100L)범위였다. 염분과 반대로, 가장 낮은 염분을 보였던 별교천 입구 쪽의 S1에서 가장 높고 만의 입구 쪽으로 갈수록 점차 감소하여 만 외해수 중 S10 정점에서 가장 낮은 Ra 동위원소 농도를 나타내었다.

한편, 여자만 내해수는 육상으로부터 유입되는 하천수와 외해수의 영향을 크게 받으며, 이들 하천수와 외해수가 물리적인 희석에 의한 보전적인 혼합특성을 보인다면 만 내해수 중 Ra 동위원소와 같은 용존 화학성분들은 하천수와 외해수의 혼합으로 나타나는 염분에 대한 1차 함수의 직선상에 위치하게 된다. 연구기간 조사된 하천수 R1, R2 정점과 외해수인 S10과 S11 정점에서 염분과 Ra 동위원소 농도는 매우 유사하였고 (Table 1), 이들 하천수와 외해수의 Ra 동위원소의 평균농도(하천수의 경우 ²²³Ra=2.1 dpm/100L, ²²⁴Ra=33

dpm/100L, 외해수의 경우 ²²³Ra=11 dpm/100L, ²²⁴Ra=57 dpm/100L)를 이용하여 물리적인 희석에 의한 보전적인 혼합에 의해 나타날 수 있는 염분에 따른 Ra 동위원소의 농도를 Fig. 4에 점선으로 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이, 여자만 내해수 중 Ra 동위원소 농도는 여자만 주변 하천수와 외해수의 혼합에 의해 예상되는 농도보다 높고, 염분과 좋은 음의 상관성(R²=0.70~0.73)을 나타내었다. 이는 여자만 주변 하천수와 외해수가 혼합되는 과정에서 여자만 주변의 Ra 공급원으로부터 과잉의 Ra 동위원소를 공급받았음을 의미한다. 일반적으로 연안수 중 Ra 동위원소의 주 공급원은 하천수를 통해 유입된 입자물질로부터 탈착, 퇴적물로부터 확산, 공극수를 포함한 해저지하수가 있다. 최근 Hwang et al.²⁰⁾은 Ra 동위원소를 이용하여 여자만의 해저지하수 유입량을 산정하면서 여자만 내 Ra 동위원소의 주 공급원이 주변 공극수 및 지하수로부터 기인한다고 보고하였다. 이 연구에서 염분과 Ra 동위원소의 수평적인 분포는 이전에 Hwang et al.²⁰⁾이 여자만 내에서 조사한 염분과 Ra 동위원소의 분포와 매우 유사하고, 특히, 연구기간 동안 공극수는 여자만 주변의 해수보다 염분은 낮고, Ra 동위원소의 농도는 높은 특성을 보였다. 따라서, 이상의 결과를 종합해 보았을 때, 연구기간 동안 여자만 내해수 중 Ra 동위원소의 주 공급원은 여자만 주변의 낮은 염분과 높은 Ra 동위원소 농도를 가진 공극수인 것으로 생각된다.

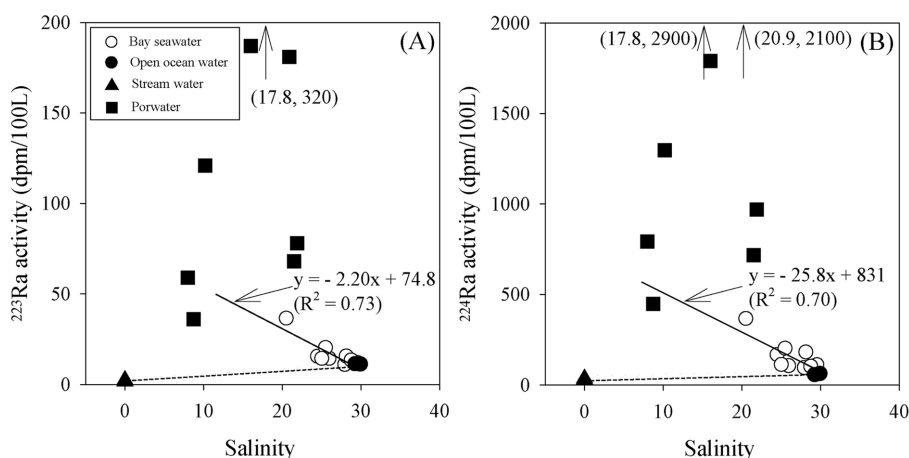


Fig. 4. Plots of salinity versus ²²³Ra (A) and ²²⁴Ra (B) activities in stream water, coastal porewater, and surface seawater of the study region during August 11-15, 2009. The filled triangle, square, and circle and blank circle marks represent the stream water, coastal porewater, open ocean water, and bay seawater, respectively. The dotted line represents the expected activity by the conservative mixing between stream water and open ocean seawater out from the bay.

3.2. Ra 동위원소를 이용한 해수 체류시간 산정

여자만은 만의 북서쪽에 위치한 하천 뿐만 아니라 해안가를 통해 흘러 나오는 해저지하수에 의해 지속적으로 담수가 유입되고 그 유입량은 계절적으로 큰 차이를 보인다.²⁰⁾ 또한, 대조기와 소조기에 조석과 조류의 영향으로 만 내로 유입되는 외해수의 양에 있어서도 큰 차이가 있다. 이러한 담수와 외해수의 유입량에 따라 여자만 내해수는 복잡한 혼합과정을 보이며 수평적수직적 분포를 달리한다. 연구기간 동안의 만 내해수의 염분의 수평적 분포를 살펴보면(Fig. 3), 만의 북서쪽에 20.0 이하의 낮은 염분을 가진 해수가 존재하고 만의 북쪽해역에 강한 염분전선이 존재하였다. 또한, 조사기간 동안 표층수와 저층수의 염분을 기초로 염분의 수직적 구조를 보았을 때(Fig. 5), 대부분의 정점에서 저층에 29.0 이상인 고염의 물이 존재하였고, 특히 표층 3 m 수심을 기준으로 강한 염분약층(halocline)이 형성되어 있었다. 그러므로 연구기간 동안 여자만 주변의 하천수와 해안가를 통해 흘러나온 공극수를 포함한 해저지하수는 만 내 표층수와 혼합되어 외해로 빠져나갈 가능성이 높다. 따라서, 이 연구에서는 여자만 전체가 아닌 수심 3 m 이내의 표층수에 대한 체류시간을 알아보았다.

일반적으로 연안에서 물의 체류시간은 그 물을 구성하고 있는 수괴의 크기, 지형, 조차 그리고 외부의 다른 수괴의 유입 등의 영향을 받아 큰 변화를 보인다.³⁴⁾ 이러한 연안에서의 물의 체류시간을 알아내는 방법은 1) 담수 유입량(freshwater discharge), 2) 조차(tidal prism 모델), 3) 잔차류(residual current), 4) Ra과 같

은 지화학적 추적자를 이용한 방법 등 다양하다.³⁵⁾ 자연수 중에 존재하는 Ra는 ^{223}Ra (반감기: 11.4일), ^{224}Ra (반감기: 3.64일), ^{226}Ra (반감기: 1620년), ^{228}Ra (반감기: 5.75년) 4개의 방사성 동위원소를 가지고 있으며, 각 동위원소별 반감기의 차이를 이용하여 연안수와 외해수의 혼합확산 속도 뿐만 아니라 해저지하수 유입량을 산정하는데 이용되어져 왔다.³³⁻³⁸⁾ 특히, ^{223}Ra 과 ^{224}Ra 은 다른 두 동위원소에 비해 상대적으로 매우 짧은 반감기를 가지고 있어 수~수십 일의 시간규모로 일어나는 연안수의 확산속도를 알아내는데 매우 유용한 추적자로 알려져 있으며, Moore³⁹⁾는 $^{224}\text{Ra}/^{223}\text{Ra}$ ratio 모델을 이용하여 연안에서 해수의 혼합율을 계산하여 이로부터 해수의 연령 및 체류시간을 추정하였다. 그러므로, 이 연구에서도 Moore³⁹⁾가 제시한 $^{224}\text{Ra}/^{223}\text{Ra}$ ratio 모델을 이용하여 여자만 내 표층 해수의 체류시간을 산정하였다.

먼저, $^{224}\text{Ra}/^{223}\text{Ra}$ 농도비를 이용하여 해수의 체류시간을 산정하기 위해서는 여자만 내 Ra 동위원소의 주 공급원을 알아야 한다. 앞서 3.1절에서 설명하였듯이, 여자만 내 Ra 동위원소의 주 공급원은 주변의 공극수 및 지하수로부터 기인하는 것으로 파악되었다. 이러한 공극수 및 지하수로부터 유입된 반감기가 짧은 ^{223}Ra 과 ^{224}Ra 은 일정시간이 지나면 반감기에 따라 그 농도비가 달라지며, Moore³⁹⁾가 제시한 모델을 이용하여 이를 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\left(\frac{^{224}\text{Ra}}{^{223}\text{Ra}}\right)_{\text{Obs}} = \left(\frac{^{224}\text{Ra}}{^{223}\text{Ra}}\right)_{\text{PW}} \times e^{-(\lambda_{^{224}\text{Ra}} - \lambda_{^{223}\text{Ra}}) \times T} \quad (2)$$

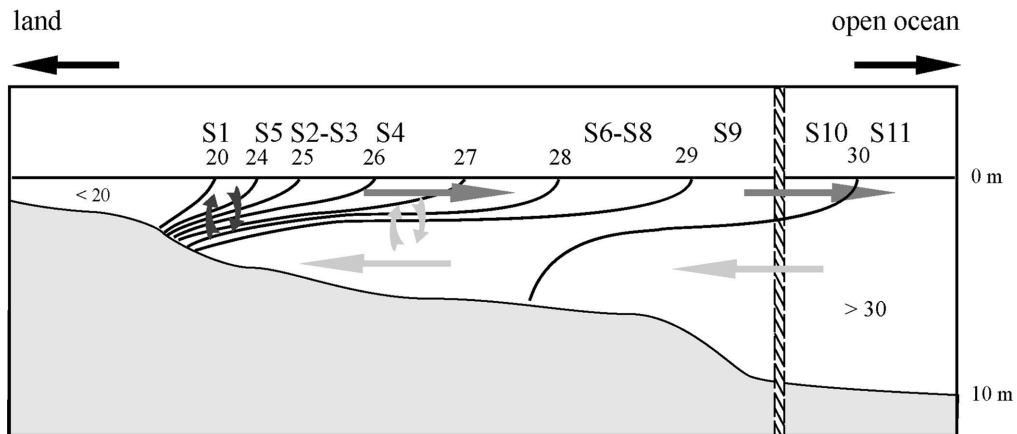


Fig. 5. A vertical contour of salinity along the north-south transect in Yeolja Bay during the study periods, showing a strong halocline in deep depth (~3 m) of innermost bay.

여기서 $(^{224}\text{Ra}/^{223}\text{Ra})_{\text{obs}}$ 는 여자만 주변 해수 중 ^{223}Ra 과 ^{224}Ra 농도비이고, $(^{224}\text{Ra}/^{223}\text{Ra})_{\text{PW}}$ 는 여자만 주변 공극수 중 ^{223}Ra 과 ^{224}Ra 농도비, $\lambda_{^{223}\text{Ra}}$ 과 $\lambda_{^{224}\text{Ra}}$ 는 ^{223}Ra 과 ^{224}Ra 방사붕괴 상수, T는 공극수가 만 내로 유입된 이후 경과시간 즉, 여자만의 해수 체류시간을 나타낸다. 따라서, 위 식 (2)를 체류시간에 대하여 다시 정리하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$T = \frac{\text{Ln}\left[\left(\frac{^{224}\text{Ra}}{^{223}\text{Ra}}\right)_{\text{PW}}\right] - \text{Ln}\left[\left(\frac{^{224}\text{Ra}}{^{223}\text{Ra}}\right)_{\text{Obs}}\right]}{\lambda_{^{224}\text{Ra}} - \lambda_{^{223}\text{Ra}}} \quad (3)$$

따라서, 여자만 주변 공극수 중 ^{223}Ra 과 ^{224}Ra 의 농도비와 외해수 중 ^{223}Ra 과 ^{224}Ra 의 농도비를 알면 여자만의 해수의 체류시간을 알 수 있다.

^{223}Ra 과 ^{224}Ra 농도비를 이용하여 여자만 내해수의 체류시간을 산정하기 위해서는 여자만 주변의 공극수와 만 외해수 중 ^{223}Ra 과 ^{224}Ra 의 단성분(end-member) 농도를 알아야 한다. 외해수의 경우, S10과 S11 정점에서 염분과 Ra 동위원소가 매우 유사하였다(Table 1). 따라서, 외해수 중 ^{223}Ra 과 ^{224}Ra 동위원소의 단성분 농도는 이들 두 정점의 ^{223}Ra 과 ^{224}Ra 농도의 평균값을 이용하였다. 이로부터 계산된 외해수 중 ^{223}Ra 과 ^{224}Ra 의 단성분 농도는 각각 11 dpm/100L와 57 dpm/100L 이었으며, $^{224}\text{Ra}/^{223}\text{Ra}$ 농도비는 약 5.2 였다. 공극수의 경우에는, 외해수와 달리 염분과 Ra 동위원소 농도가 공간적으로 매우 큰 차이를 보였다. 따라서, 제한된 자료에 의한 과대 혹은 과소평가를 방지하고 체류시간의 오차를 줄이기 위해 연구기간 동안 공극수 중 가장 높은 그리고 가장 낮은 ^{223}Ra 과 ^{224}Ra 농도를 나타낸 P8 정점과 P5 정점을 제외한 정점들의 ^{223}Ra 과 ^{224}Ra 의

평균값을 단성분 농도로 정하였다. 이로부터 계산된 공극수의 ^{223}Ra 과 ^{224}Ra 단성분 농도는 각각 120 dpm/100L와 1280 dpm/100L 이었으며, $^{224}\text{Ra}/^{223}\text{Ra}$ 비는 약 10.7이었다. 이들 값을 방정식 (3)에 대입하면 여자만 연안 공극수가 여자만으로 유입된 이후 외해로 빠져나가는데 걸리는 시간, 즉, 만 내해수의 체류시간을 알 수 있다.

이 연구에서 위의 값을 이용하여 추정된 여자만 내 표층 해수의 체류시간은 약 6일이었다. 이 같은 결과는 최근 Hwang et al.²⁰⁾이 이 연구와 같은 해역에서 비슷한 시기에 Ra 동위원소와 영양염류 중 규산염과의 물질수지 모델을 이용하여 추정한 표층 해수의 체류시간(5~8일)이나 Hwang et al.⁴²⁾이 연구해역과 인접한 가막만에서 $^{224}\text{Ra}/^{223}\text{Ra}$ ratio 모델을 이용하여 추정한 만 내해수의 체류시간(5~9일)과는 유사하였다(Table 2). 반면, Kim et al.⁴³⁾이 Ra 동위원소와 영양염류 중 규산염의 물질수지 모델을 이용하여 추정한 영일만의 표층 해수의 체류시간(12~18일)보다는 매우 빠른 시간이었다. 이는 일반적으로 만 내해수의 체류시간은 지형이나 조석의 크기에 따른 조차와 밀접한 관련이 있는데, 여자만의 경우 비록 영일만에 비해 지형적으로 입구가 좁고 면적은 넓지만, 영일만보다 2 m 이상의 높은 조차를 보임으로서 외해수와의 교환이 활발하여 체류시간이 더 빠른 것으로 생각된다. 한편, 이 연구에서 Ra 동위원소를 이용하여 산정한 체류시간은 이전에 Lee⁴⁰⁾, Lee and Chang⁴¹⁾, Cho et al.⁴⁴⁾이 조차(tidal prism 모델)를 이용하여 각각 추정한 여자만(약 70일), 가막만(약 11일), 득량만(14~47일)의 해수 체류시간보다는 빠른 시간이었다(Table 2). 이는 본 연구에서와 같이 Ra 동위원소를 이용한 산정한 체류시간이 이전의 조차(tidal

Table 2. A comparison of water residence time in the coastal bay of Korea

Study region	Estimating methods	Bay area (km ²)	Average water depth (m)	Applied water depth (m)	Applied water volume (×10 ⁶ m ³)	Water residence time (day)	Reference
Youngil Bay	Ra-Si mass balance	120	~ 20	9	1080	12~18	Kim et al. ⁴¹⁾
Masan Bay	Water balance	74	9.5	9.5	~ 780	~ 23	KORDI ⁴⁵⁾
Gamak Bay	Tidal prism	112	6.3	6.3	~ 710	~11*	Lee and Chang ⁴³⁾
	Ra tracer	150	8	8	1200	5~9	Hwang et al. ⁴⁰⁾
Deukryang Bay	Tidal prism	420	7.8	7.8	~ 3300	14~47	Cho et al. ⁴⁴⁾
Yeoja Bay	Tidal prism	365	5.4	5.4	~ 2300	~ 70*	Lee ⁴²⁾
	Ra-Si mass balance	320	5	3	960	5~8	Hwang et al. ²⁰⁾
	Ra tracer	320	5	3	960	~6	This study

*Water residence time was calculated by dividing the water volume of bay by the difference of tidal exchange volume between ebb tide and flood tide reported in each literature.

prism 모델)를 이용한 일반적인 물의 체류시간과 다른 의미를 가지기 때문인 것으로 생각된다. 즉, Ra 동위원소를 이용한 체류시간은 공극수나 육상의 연안 지하수 중의 Ra 동위원소의 농도를 기초로 이들 공극수나 지하수가 만 내에 유입된 이후 외해로 빠져나가는데 걸리는 시간을 의미하는 반면, 이전에 조차(tidal prism 모델)를 이용하여 추정된 체류시간은 표층의 표류부이 이동패턴이나 만 입구의 해수 흐름(유향, 유속 등)과 만 전체 해수의 용적을 고려하여 체류시간을 산정하기 때문에 외해에서 해수가 만 내로 들어와 내해수와 혼합되어 빠져나가는데 걸리는 시간을 의미한다. 그러므로, 기존의 물의 체류시간보다 본 연구에서 추정된 체류시간은 육상기인 용존 오염물질들이 만 내에 유입되어 외해로 빠져나가는데 걸리는 시간을 더 잘 반영한다고 볼 수 있다. 그러므로, 이러한 여자만 내 체류시간 특성을 고려하여 앞으로 육상기인 오염물질의 적절한 허용 부하량을 산정하고 여자만 내 수질개선을 위한 관리대책을 마련할 필요가 있다.

4. 결 론

여자만 내 육상기인 물의 체류시간을 산정하기 위하여 2009년 8월 여자만 주변의 하천수, 해수, 공극수 중 염분 및 Ra 동위원소(^{223}Ra 과 ^{224}Ra)를 분석하였다. 여자만 주변의 공극수는 해수보다도 염분은 낮고 Ra 동위원소 농도는 높았으며, 여자만 내 ^{223}Ra 과 ^{224}Ra 의 주된 공급원인 것으로 나타났다. 비록 연구기간 동안 표·저층 사이에 성층이 이루어져 여자만 전체 해수의 체류시간을 산정하지는 못했지만, 여자만 주변의 공극수와 만 외해수 중 $^{224}\text{Ra}/^{223}\text{Ra}$ ratio 모델을 이용하여 추정된 여자만 내 표층 해수(3 m 이내)의 체류시간은 약 6일 이었으며, 이는 육상기인 용존 오염물질들이 만 내로 유입되어 외해로 빠져나가는데 걸리는 시간을 의미한다. 따라서, 여자만의 체류시간을 고려한 육상기인 오염물질의 적절한 허용 부하량을 산정할 필요가 있다. 아울러, 앞으로 수질오염으로 양식생물의 생산량이 감소하고 있는 여자만의 어장 내 수질개선과 주요 양식 생물인 새꼬막을 비롯한 수산자원의 지속적인 이용을 위하여 종합적인 수질 관리대책의 수립이 요구된다.

감사의 글

이 연구의 현장조사에 도움을 준 국립수산과학원 것

별연구소 및 탐구7호 선원들과 시료분석에 도움을 준 서울대학교 김규범 교수님 및 환경·해양 생지화학 연구실 학생들에게 감사를 드립니다. 이 논문은 국립수산과학원 수산시험연구사업(RP-2014-ME-40)의 지원에 의해 연구되었습니다.

참고문헌

1. D. W. Hwang, H. G. Jin, S. S. Kim, J. D. Kim, J. S. Park, and S. G. Kim, "Distribution of organic matters and metallic elements in the surface sediments of Masan Harbor, Korea", *Journal of Korean Fisheries Society*, **2006**, 39, 106-117.
2. D. W. Hwang, P. J. Kim, S. B. Jeon, and B. S. Koh, "Geochemical characteristics of intertidal sediment in the semi-enclosed bays of the southern region of Jeollanam Province", *Korean Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, **2013**, 46, 638-648.
3. H. C. Kim, W. C. Lee, J. G. Kim, S. J. Hong, K. M. Kim, Y. S. Cho, S. E. Park, and J. H. Kim, "Assessment of permissible inflow load for water quality management in Yeosu Bay, Korea", *Journal of the Korean Society of Marine Environment and Safety*, **2011**, 17, 345-356.
4. J. S. Hong, "Summer oxygen deficiency and benthic biomass in the Chinhae Bay system", *Journal of Oceanology Society of Korea*, **1987**, 18, 169-179.
5. R. W. Macdonald, D. M. Macdonald, M. C. O'Brien, and C. Gobeil, "Accumulation of heavy metals (Pb, Zn, Cu, Cd), carbon and nitrogen in sediments from Strait of Georgia, B. C. Canada", *Marine Chemistry*, **1991**, 34, 109-135.
6. G. H. Lee, "Fisheries oceanographical studies on the production of the farming oyster in Kamak Bay", *Ph. D. Dissertation, Pusan National Fisheries University*, **1993**, 0-178.
7. B. K. Kim, "Marine environment of Gamak Bay by field observations and numerical experiments", *Master Dissertation, Yeosu National University*, **2006**, 0-97.
8. US Environmental protection agency, <http://www.epa.gov>, August 2014.
9. G. E. Arnold, J. L. Wim, and M. W. Blind, "The concerted action Harmony-CA: facilitating the dialogue and bridging the gap between research and the WFD implementation", *Environmental Science and Policy*, **2005**, 8, 213-218.
10. Y. Tsuzuki, "An index directly indicates land-based pollutant load contributions of domestic wastewater to the water pollution and its application", *Science of the Total Environment*, **2006**, 370, 425-440.

11. S. J. Hong, W. C. Lee, S. P. Yoon, S. E. Park, Y. S. Cho, J. N. Kwon, and D. M. Kim, "Reduction of autochthonous organics in Masan Bay using a simple box model", *Journal of the Korean Society of Marine Environment and Safety*, **2007**, 13, 111-118.
12. H. C. Kim, W. J. Choi, W. C. Lee, J. H. Koo, P. Y. Lee, S. E. Park, S. J. Hong, and J. H. Jang, "Estimating carrying capacity of Lake Shihwa for water quality management", *Journal of the Environmental Science*, **2007**, 16, 571-581.
13. D. I. Lee, J. M. Choi, Y. G. Lee, M. O. Lee, W. C. Lee, and J. K. Kim, "Coastal environmental assessment and management by ecological simulation in Yejoa Bay, Korea", *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **2008**, 80, 495-508.
14. D. K. Min, "Mollusks in Korea", **2004**, 0-387, Hanguel Graphics, Korea.
15. S. Y. Kim, Y. K. Shin, H. K. Lim, and W. C. Lee, "Gonadal development and reproductive cycle of the ark shell *Scapharca subcrenata* (Bivalvia: Arcidae) from Yejoa Bay", *Journal of Aquaculture*, **2008**, 21, 252-258.
16. J. I. Kim, Y. I. Seo, S. K. Lee, S. T. Kim, H. Joo, S. I. Jang, and T. Y. Oh, "Fishing investigation and species composition of the catch caught by a bottom trawl in the Yoe-Ja bay, Korea", *Journal of the Korean Society of Fisheries Technology*, **2007**, 43, 241-250.
17. Y. K. Shin, W. C. Lee, S. Y. Kim, J. C. Jun, and E. O. Kim, "Variation in physiological energetic of blood cockle *Scapharca subcrenata* (Bivalvia: Arcidae) from Yejoa bay, South coast of Korea", *Korean Journal of Malacology*, **2011**, 27, 205-211.
18. J. M. Choi, Y. G. Lee, and H. J. Woo, "Seasonal and spatial variations of tidal flat sediments in Yejoa Bay, south coast of Korea", *Journal of Korean Earth Science Society*, **2005**, 26, 253-267.
19. Y. H. Kim, H. C. Shin, and K. H. Lim, "Distribution of benthic Polychaeta community in Yoja Bay, Korea", *Journal of Korean Fisheries Society*, **2005**, 38, 399-412.
20. D. W. Hwang, G. Kim, Y. W. Lee, and H. S. Yang, "Estimating submarine inputs of groundwater and nutrients to a coastal bay using radium isotopes", *Marine Chemistry*, **2005**, 96, 61-71.
21. J. M. Choi, H. J. Woo, and Y. G. Lee, "Suspended sediments influx and variation of surface sediments composition in semi-enclosed bay - spring season in Yejoa Bay, south coast of Korea", *Journal of the Korean Society for Marine Environmental Engineering*, **2007**, 10, 1-12.
22. S. Y. Park, S. S. Kim, P. J. Kim, E. S. Cho, B. M. Kim, S. B. Jeon, and S. J. Jang, "Long-term variation and characteristics of water quality in the Yejoa Bay of south sea, Korea", *Journal of the Korean Society of Marine Environment and Safety*, **2011**, 17, 203-218.
23. J. S. Davies, "A morphogenic approach to world shorelines", *Zeitschrift für Geomorphologie*, **1964**, 8, 127-142.
24. J. M. Choi, "Sediment behavior mechanism in Yejoa Bay, south coast of Korea", *Ph. D. Dissertation, Yosu National University*, **2004**, 0-166.
25. G. Kim, W. C. Burnett, H. Dulaiova, P. W. Swarzenski, and W. S. Moore, "Measurement of ^{224}Ra and ^{226}Ra activities in natural waters using a radon-in-air monitor", *Environment Science and Technology*, **2001**, 35, 4680-4683.
26. W. S. Moore, "Sampling ^{228}Ra in the deep ocean", *Deep-Sea Research*, **1976**, 23, 647-651.
27. M. Yamadaa and Y. Nozaki, "Radium isotopes in coastal and open ocean surface waters of the western North Pacific", *Marine Chemistry*, **1986**, 19, 379-389.
28. Y. Sun and T. Torgersen, "The effects of water content and Mn-fiber surface conditions on ^{224}Ra measurement by ^{220}Rn emanation", *Marine Chemistry*, **1998**, 62, 299-306.
29. W. S. Moore and R. Arnold, "Measurement of ^{223}Ra and ^{224}Ra in coastal waters using a delayed coincidence counter", *Journal of Geophysical Research*, **1996**, 101, 1321-1329.
30. D. W. Hwang, G. Kim, and J. Y. Lee, "Submarine discharge of fresh groundwater through the coastal area of Korea Peninsula: Importance as a future water resource", *The Sea - Journal of the Korean Society of Oceanography*, **2010**, 15, 192-202.
31. R. P. Kelly and S. B. Moran, "Seasonal changes in groundwater input to a well-mixed estuary estimated using radium isotopes and implications for coastal nutrient budgets", *Limnology and Oceanography*, **2002**, 47, 1796-1807.
32. G. Kim, K. K. Lee, K. S. Park, D. W. Hwang, and H. S. Yang, "Large submarine groundwater discharge (SGD) from a volcanic island", *Geophysical Research Letters*, **2003**, 30(21)
33. D. W. Hwang, Y. W. Lee, and G. Kim, "Large submarine groundwater discharge and benthic eutrophication in Bangdu Bay on volcanic Jeju Island, Korea", *Limnology and Oceanography*, **2005**, 50, 1939-1403.
34. M. A. Charette, K. O. Buesseler, and J. E. Andrews, "Utility of radium isotopes for evaluating the input and transport of groundwater-derived nitrogen to a Cape Cod estuary", *Limnology and Oceanography*, **2001**, 46, 456-470.

35. W. S. Moore, "High fluxes of radium and barium from the mouth of the Ganges-Brahmaputra River during low river discharge suggest a large groundwater source", *Earth and Planetary Science Letters*, **1997**, 150, 141-150.
36. W. S. Moore, "Determining coastal mixing rates using radium isotopes", *Continental Shelf Research*, **2000**, 20, 1993-2007.
37. D. W. Hwang, G. Kim, and H. S. Yang, "Measurement of ^{224}Ra and ^{223}Ra in the Nakdong River estuary and the South Sea of Korea", *Journal of the Korean Society of Oceanography*, **2003**, 38, 80-86.
38. W. S. Moore and J. Oliveira, "Determination of residence time and mixing processes of the Ubatuba, Brazil, inner shelf waters using natural Ra isotopes", *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **2008**, 76, 512-521.
39. W. S. Moore, "Ages of continental shelf waters determined from ^{223}Ra and ^{224}Ra ", *Journal of Geophysical Research*, **2000**, 105, 22117-22122.
40. D. W. Hwang, G. Kim, W. C. Lee, and H. T. Oh, "The role of submarine groundwater discharge (SGD) in nutrient budgets of Gamak Bay, a shellfish farming bay, in Korea", *Journal of Sea Research*, **2010**, 64, 224-230.
41. G. Kim, J. W. Ryu, and D. W. Hwang, "Radium tracing of submarine groundwater discharge (SGD) and associated nutrient fluxes in a highly-permeable bed coastal zone, Korea", *Marine Chemistry*, **2008**, 109, 307-317.
42. M. C. Lee, "The exchange of sea water in Yeolja Bay", *Bulletin of Korean Fisheries Technology Society*, **1983**, 19, 33-39.
43. M. C. Lee and S. D. Chang, "Tidal exchange of sea water in Gamag Bay", *The Journal of the Oceanological Society of Korea*, **1982**, 17, 12-18.
44. K. D. Cho, C. I. Lee, B. G. Lee, K. W. Cho, and D. S. Kim, "Study on the water and material exchange in Deukryang Bay. I. Volume transport and turnover time of sea water", *Journal of the Korean Environmental Sciences Society*, **1998**, 7, 311-319.
45. Korea Ocean Research and Development Institute (KORDI), "Land-Ocean interactions in the coastal zone", **2003**, 69-117.