

남해 강진만 담수유입에 따른 체류시간 변화 모델링

김진호 · 박성은^{1*} · 이원찬¹

국립수산과학원 남해수산연구소, ¹국립수산과학원 어장환경과

Modeling Variation in Residence Time Response to Freshwater Discharge in Gangjin Bay, Korea

Jin Ho Kim, Sung-Eun Park^{1*} and Won-Chan Lee¹

South Sea Fisheries Research Institute, National Institute of Fishery Science, Yeosu 58780, Korea

¹Marine Environment Research Division, National Institute of Fishery Science, Busan 46083, Korea

The term residence time is defined as the time taken for substances in a system to leave the system and is a useful concept to explain the physical environment characteristics of a coastal area. It is important to know the spatial characteristics of the residence time to understand the behavioral properties of pollutants generated in a marine system. In this study, the spatial distribution of average residence time was calculated for Gangjin Bay, Korea, using a hydrodynamic model including a particle tracking module. The results showed that the average residence time was about 10 days at the surface layer and about 20 days at the bottom layer. Spatially, this was the longest residence time in the southwestern sea. There was no significant difference in average residence time at the surface layer due to freshwater discharge, but spatial variation at the bottom layer was larger. The average residence time at the bottom layer decreased in the southwestern area due to freshwater discharge and increased in the northern area. This result suggests that the residence time of anthropogenic pollutants may have a large spatial difference depending on the freshwater discharge, and thus the time taken to influence cultured organisms may also vary.

Keywords: Residence time, Freshwater discharge, Vertical variation, Particle tracking model

서론

남해 강진만은 사천시, 하동군과 남해군에 위치한 주요 패류 생산 해역 중 하나로 수출용패류생산지정해역 제7호로 지정되어 있다(Shin et al., 2018). 지정해역은 수입국 기준에 따라 해역의 수질, 패류의 위생 상태를 비롯하여 오염원에 대한 지속적인 관리가 이루어진다(Park et al., 2011). 따라서 패류의 위생안전성 확보를 위해서는 해역의 수질뿐만 아니라 병원성 세균이나 입자유해물질과 같은 육상기인 오염물질의 유입량, 이동경로, 확산범위 등 수로학적 요소에 대한 평가가 요구된다(US FDA, 2017). 패류의 경우 주로 연안에 서식하고 있어 육상기인 오염물질에 쉽게 노출될 수 있으며 패류의 여과섭식 과정에서 이러한 오염물질이 축적될 우려가 있어 특별한 위생관리가 필요하다(Shin et al., 2017). 2012년 3월에 실시된 수출용패류생산지

정해역 현장점검에서 노로바이러스가 검출되면서 수출이 전면 중단되어 약 800억원의 피해액이 발생한 바가 있으며 이로 인해 수출용패류생산 해역의 위생학적 안전성 확보를 위한 육상기인 오염물질의 관리에 대한 관심이 높아지고 있는 실정이다.

육지와 인접한 해역의 경우 육상기인 오염물질에 매우 취약한데(Mee, 2012), 해역을 위생학적으로 안전하게 관리하기 위해서는 오염물질의 거동특성에 대한 연구는 필수적이다(Balachandran et al., 2008). 체류시간은 물질수송시간을 표현하는 개념 중 하나로 해역 내의 물질이 경계를 벗어나기까지 소요된 시간으로 정의된다(Monsen et al., 2002; Delhez et al., 2014). 체류시간의 공간분포 특성은 해역의 물리과정뿐만 아니라 생지화학 과정의 공간적인 차이를 설명하는데 유용하며, 육상기인 오염물질의 거동 특성에 대한 간접적인 정보를 제공한다(Monsen et al., 2002; Park et al., 2011b; Kim et al., 2020).

*Corresponding author: Tel: +82. 51. 720. 2521 Fax: +82. 51. 720. 2515

E-mail address: separk@korea.kr



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

<https://doi.org/10.5657/KFAS.2021.0480>

Korean J Fish Aquat Sci 54(4), 480-488, August 2021

Received 23 June 2021; Revised 15 July 2021; Accepted 22 July 2021

저자 직위: 김진호(연구사), 박성은(연구사), 이원찬(과장)

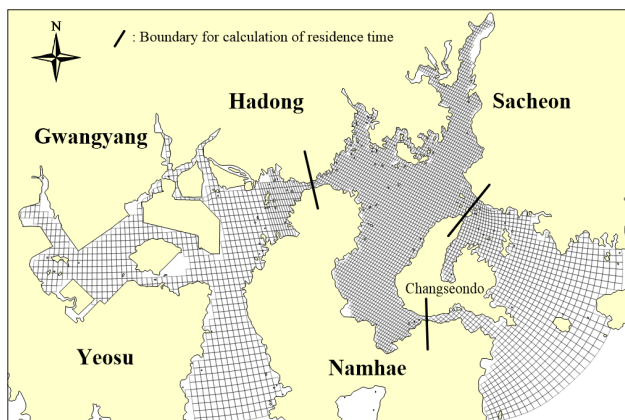


Fig. 1. Computation grid for study area.

남해 강진만의 경우 자연 하천과 함께 인구 밀집지역이 인접하고 있는 반폐쇄성 내만으로 강우시 유입되는 육상기인 오염물질이 해상 양식장과 양식생물에 직접적인 영향을 줄 가능성이 매우 높다(Park et al., 2011a). 또한, 해역으로 유입된 육상기인 오염물질의 성상에 따라 침강특성이 달라지며 수심별 해수순환 특성의 차이에 따라 오염물질의 해역 내 체류시간 또한 큰 차이가 발생할 수 있다. 여기에 남해 강진만은 지형적인 특성으로 인해 대방수로, 노랑수로, 창선수로 등 주요 수로를 통해 해수의 유출입이 일어나므로 시간에 따라 만 내부에 복잡한 해수순환 구조가 형성되며(Kim and Yoon, 2009), 이로 인해 만 내로 유입된 물질의 거동 특성 또한 시·공간적으로 복잡할 것으로 판단된다.

본 연구에서는 강우에 따른 육상기인 오염물질의 거동 특성을 파악하기 위해서 해수유동모델과 입자추적모델을 사용하여 체류시간(Monsen et al., 2002; Park et al., 2011b)의 공간적 분포 특성을 파악하였다. 또한, 강우시 하천을 통해 담수가 대량으로 유입될 때 표층과 저층의 체류시간 변화를 정량적으로 비교하였다.

재료 및 방법

사용모델

본 연구에서는 남해 강진만의 해수순환 특성을 재현하기 위해서 EFDC (environmental fluid dynamic code)를 사용하였다. EFDC는 수평방향으로는 직교-곡선좌표계를 사용하며 수직으로는 Sigma (Sigma-Aldrich Co. Ltd., St. Louis, MI, USA)나 sigma-zed 좌표계를 사용할 수 있는 것이 특징이다(Hamrick and Mills, 2000). EFDC에는 입자추적모듈이 포함되어 있어 해역의 해수순환 특성 재현과 동시에 입자추적 모의하는 것이 가능하다. Lagrangian 입자추적모듈은 Random walk method를 적용하고 있는데 이를 통해 난류혼합에 의한 입자의 거동을

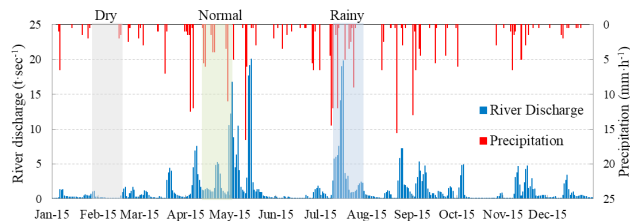


Fig. 2. Precipitation and simulated river discharge at Sacheongang station.

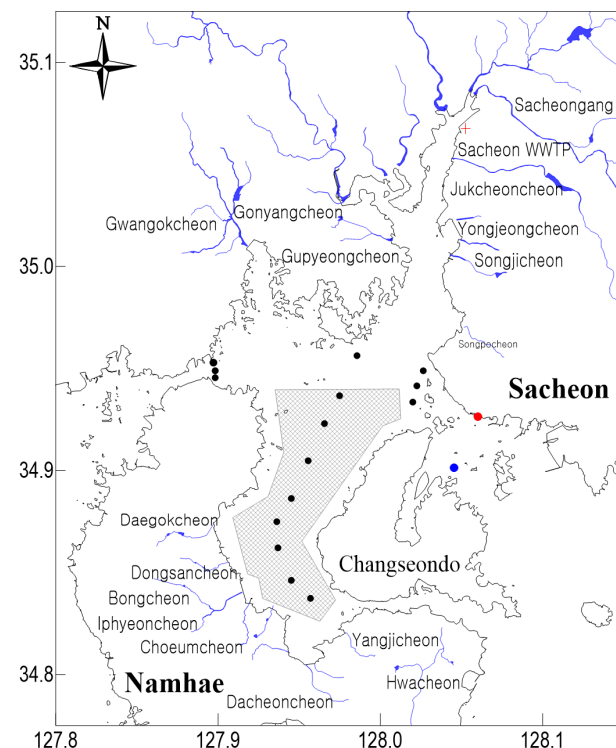


Fig. 3. Gangjin Bay (Namhae, South Korea) showing monitoring stations and boundary for residence time calculation (check box, designated shellfish growing area for export; black circle, floating buoy; blue circle, water current measurement; red circle, tidal gauge).

해석할 수 있으며 통계적인 처리가 가능하다(Suh, 2006; Suh and Lee, 2011).

계산 조건

남해 강진만의 체류시간 계산을 위해 강진만을 비롯하여 광양만을 포함한 해역을 대상으로 모델을 구성하였다(Fig. 1). 격자의 크기는 104.4-870.9 m로 가변격자를 적용하였으며 사용된 격자의 수는 총 4,728개이다. 수직으로는 5개층으로 구성하고 계산시간 간격은 1초이며 입자추적모델의 모의 기간은 50일로

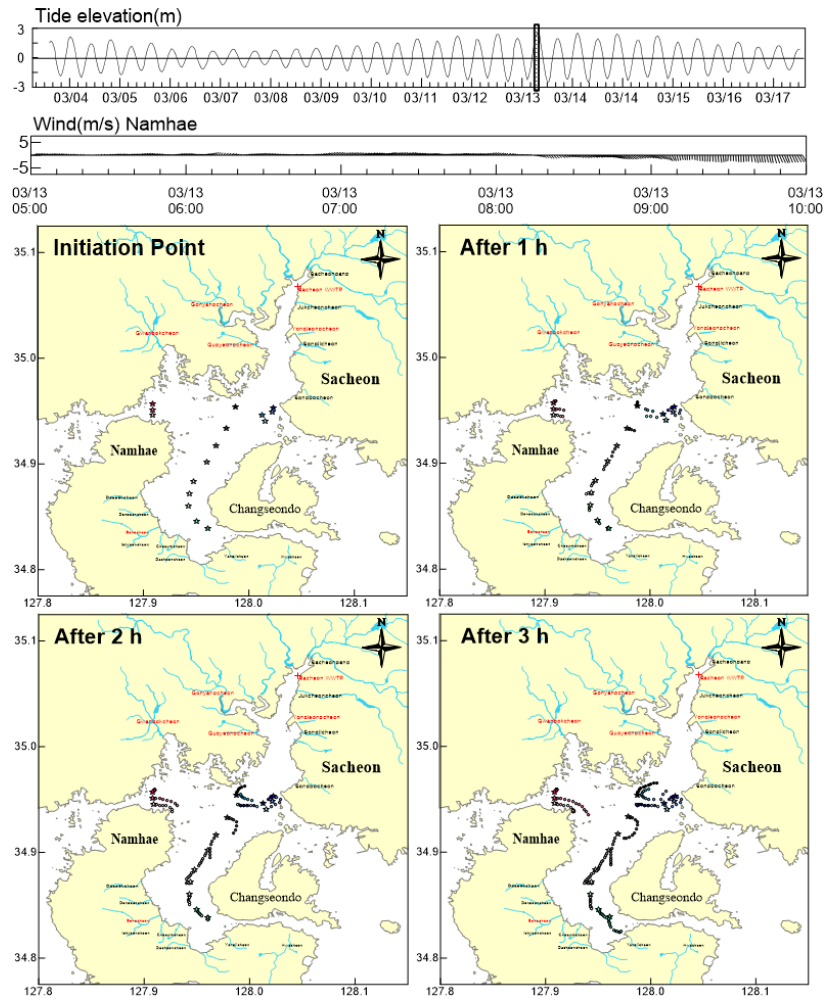


Fig. 4. Lagrangian trajectories of the floating buoys with tide elevation and wind vectors.

설정하였다. 모델의 개방경계에는 해양조사원에서 제공하는 4개 분조(M_2 , S_2 , O_1 , K_1)의 진폭과 위상값을 입력하였으며 바람은 없는 것으로 가정하였다.

관측된 하천유량을 검증자료로 활용하여 유역모델을 통해 남해 강진만으로 유입되는 담수유입량을 계산하였다(NIFS, 2016). 유역모델을 통해 계산된 하천은 총 54개이며 해수유동 모델에 전체 하천을 고려하였다. 계산된 담수유입량을 토대로 갈수기, 평수기, 풍수기로 설정하였다(Fig. 2). 이를 통해 담수유입량의 많고 적음에 따른 표층과 저층의 체류시간 변화 정도를 정량적으로 비교하였다.

본 연구에서 체류시간은 방류된 입자가 최초로 경계를 벗어난 시점으로 정의하였으며 Fig. 1의 경계 내에 격자당 1개씩 총 2,841개의 입자를 동시에 방류하여 입자추적모델을 모의하였다(Park et al., 2011b; Kim et al., 2020). 방류된 입자는 해수의 흐름에 따라 이동하며 30분 간격으로 위치정보가 저장되도록 설정하였다. 입자추적모델의 모의에서 입자의 거동 특성과 해

역 내 체류시간은 방류시점에 따라 달라지므로 각기 다른 시점에 방류한 입자의 체류시간을 평균한 평균체류시간을 계산하였다(Park et al., 2011b; Kim et al., 2020).

현장관측

수립된 모델의 검증을 위해 대방수로에서 유속과 유향을 관측하였으며 조위 검증은 해양조사원의 조위 자료(삼천포)를 이용하였다(Fig. 3). 또한, 입자추적모델 검증을 위해 표류부이 현장관측을 수행하였다. 2017년 3월 13일 06시부터 10시까지 대조기 창조시에 대상해역인 남해 강진만의 동, 서, 남쪽의 수로와 대부분의 하천이 유입되는 북쪽 해역의 경계 그리고 남해군 인근의 해역에 각각 표류부이를 투하하여 해수의 방향이 반대가 될 때까지 표류부이의 위치정보를 수집하였다. 표류부이 궤적 자료를 통해 각 수로에서 유입되는 해수가 어떻게 이동하는지를 파악하고 해역의 중앙부에서의 해수순환 특성을 파악하였다.

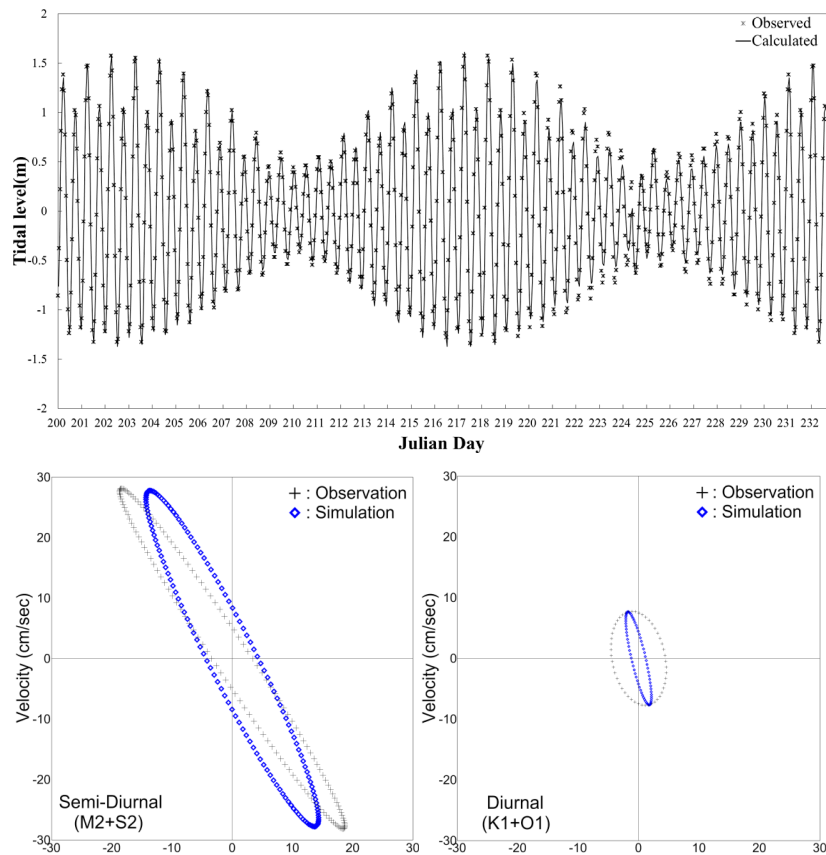


Fig. 5. A comparison between observed tidal level and current and calculated value.

결 과

표류부이궤적

2017년 3월 13일 대조기 창조시에 관측한 표류부이 궤적을 비롯하여 관측시기의 조시와 바람에 대한 정보는 Fig. 4와 같다. 현장관측 당시 대조기 창조로 유속이 강하게 형성되었으며 바람은 거의 없었다. 표류부이 관측 결과, 동쪽과 서쪽에서 방류한 부이는 해수의 흐름을 따라 해역의 중앙으로 이동하였으며 남쪽 수로에서 방류한 부이 역시 만 내측으로 이동하지만 그 거리는 비교적 짧게 나타났다. 해역의 중앙부에 방류한 부이는 방류 직후 남하하는 것으로 나타났는데, 이는 동쪽과 서쪽의 수로를 통해 유입된 해수가 중앙에서 수렴하여 남하한 결과로 생각할 수 있다. 또한, 남쪽의 수로를 통해 유입된 해수는 강진만 중앙해역의 해수순환에 영향을 미치지 못하는 것을 알 수 있다.

모델 검증

수립된 모델을 검증하기 위해 조위와 유속에 대하여 관측값과 모델에서 계산한 값을 비교하였다(Fig. 5). 모델 검증을 위해 RAAE (relative absolute average error)를 계산한 결과, 조위의

경우 2%이며 조류는 17%로 계산되었다. 조위는 10% 이내, 조류는 20% 이내일 때 모델의 재현성이 양호하다고 판단할 수 있다(Kim and Yoon, 2011). 또한 반일주조와 일주조 모두 유사한 조류타원을 보이고 있는 것을 확인할 수 있어 수립된 모델이 남해 강진만의 해수순환 특성을 잘 재현하고 있는 것으로 판단할 수 있었다. 입자추적모델 결과의 재현성을 확인하기 위해 관측된 부이 궤적을 입자추적모델 계산 결과와 비교하였다(Fig. 6). 이때, 구조물에 걸려 명확한 궤적을 얻을 수 없었던 부이의 궤적은 제외하였다. 부이의 궤적과 입자의 궤적을 비교한 결과 유사한 궤적을 나타내고 있는 것을 확인할 수 있다. 특히 남해와 창선도 사이의 해역에서 창조시 남하하는 흐름과 창선수로 인근에서 방류한 부이가 창조시에 동쪽으로 이동하는 것을 모델에서 잘 재현하고 있다. 이러한 결과는 세 개의 수로를 통해 동시에 해수가 유입하는 남해 강진만의 경우 내부에서 복잡한 해수순환이 나타날 것으로 예상할 수 있는데 본 연구에서 수립된 모델이 남해 강진만의 공간적인 해수순환 특성을 잘 재현하고 있다는 것을 의미한다.

해수유동 특성

계산된 남해 강진만의 해수순환 특성은 Fig. 7과 같다. 남해 강

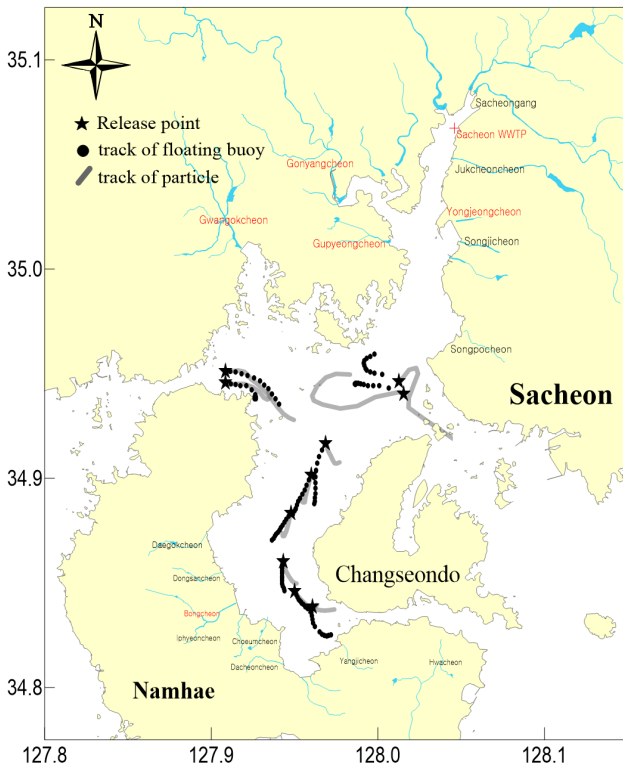


Fig. 6. A comparison between observed trajectories of floating buoys (left) and calculated particle track (right).

진만은 창조시 동쪽 경계인 대방수로와 서쪽 경계인 노량수로, 남쪽의 창선수로를 통해 동시에 해수가 유입하는 것으로 나타났다. 동-서에서 유입된 해수는 해역의 중앙에서 수렴하여 남하하며 남쪽의 창선수로를 통해 유입된 해수는 유입 직후 해역 중앙에서 남하하는 해수와 만나는 것을 알 수 있다. 이러한 해수 순환 구조로 인해 남해군 인근해역에서는 Fig. 4의 표류부이 궤적에서 알 수 있듯이 창조시 남하하는 흐름이 나타나며 남해군 인근의 해수는 거리상 가까운 창선수로보다 거리가 먼 노량수로를 통해 교환되기 쉬운 환경임을 알 수 있다. 이를 통해 남해군 인근 해수의 체류시간은 길 것으로 추측할 수 있다. 대방수로에서 유입한 해수 중 일부는 북쪽 해역으로 이동하는데 이를 통해 북쪽해역의 해수는 주로 대방수로를 통해 해수교환이 이루어지는 것을 알 수 있다.

평균체류시간 특성

담수유입에 따른 표층과 저층의 평균체류시간 공간분포는 Fig. 8, Fig. 9와 같다. 먼저 표층의 경우 평수기에 평균체류시간은 대부분의 해역에서 10일 내외로 계산되었으며 남해군 인근 해역에서 20일 이상으로 가장 긴 평균체류시간이 나타났다 (Fig. 8). 갈수기와 풍수기의 경우 중앙해역에서 평균체류시간의 변화는 크지 않았지만 남해군 인근에서 강수량이 증가함에

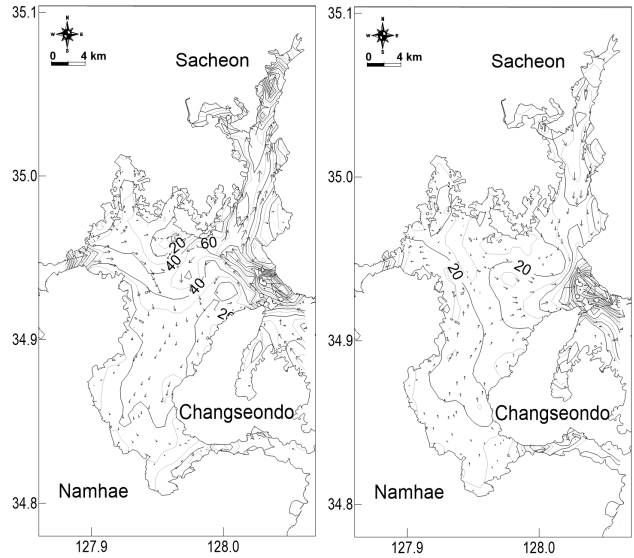


Fig. 7. Simulated maximum current vector field computed in Gangjin Bay during flood (left) and ebb (right) in spring tide conditions.

따라 평균체류시간이 감소하는 것으로 나타났다. 이러한 특징은 남해군 인근뿐만 아니라 하천 유입지점 부근에서 확인할 수 있다.

저층의 평균체류시간 계산 결과에서는 강진만 중앙해역에서 약 10일 내외로 표층과 유사한 평균체류시간이 계산되었지만 북쪽해역과 남해군 인근해역에서는 약 40일로 표층에 비해 2-4 배 이상 긴 평균체류시간이 계산되었다(Fig. 9). 표층에서 강수량에 따른 평균체류시간의 변화가 가장 뚜렷하게 나타난 남해군 인근 해역에서는 강수량이 증가함에 따라 저층의 평균체류시간 또한 감소하는 것으로 나타났다. 반면, 북쪽 해역에서는 강수량이 증가한 경우 저층의 평균체류시간이 증가하는 것으로 나타났다.

이러한 표층과 저층의 평균체류시간 결과는 육상기인 오염물질이 강진만으로 유입될 경우 표층에 비해 저층에서 더 긴 시간 동안 체류하는 것을 의미하며 입자 오염물질이 유입된 후 침강하면서 저층에 도달할 경우 부유상태의 오염물질보다 더욱 긴 시간 동안 해역 내에 체류할 수 있음을 시사한다.

강수량에 따른 공간적인 평균체류시간 변화를 정량적으로 파악하기 위한 풍수기와 갈수기의 평균체류시간 차(갈수기-풍수기)는 Fig. 10과 같다. 강수시 표층에서는 전체적으로 약 1.2일의 평균체류시간 증가하였으며 공간적인 평균체류시간의 변화는 크게 나타나지 않았다. 반면 저층에서는 담수유입에 의해 전체적으로 평균체류시간이 1.29일 감소하였는데 표층과 달리 평균체류시간 증감에 대한 공간적 차이가 뚜렷하게 나타났다. 특히 남해군 인근해역에서는 평균체류시간이 약 15일 가량 감소한 반면 강진만 북쪽 해역에서는 평균체류시간이 약 20일 가량

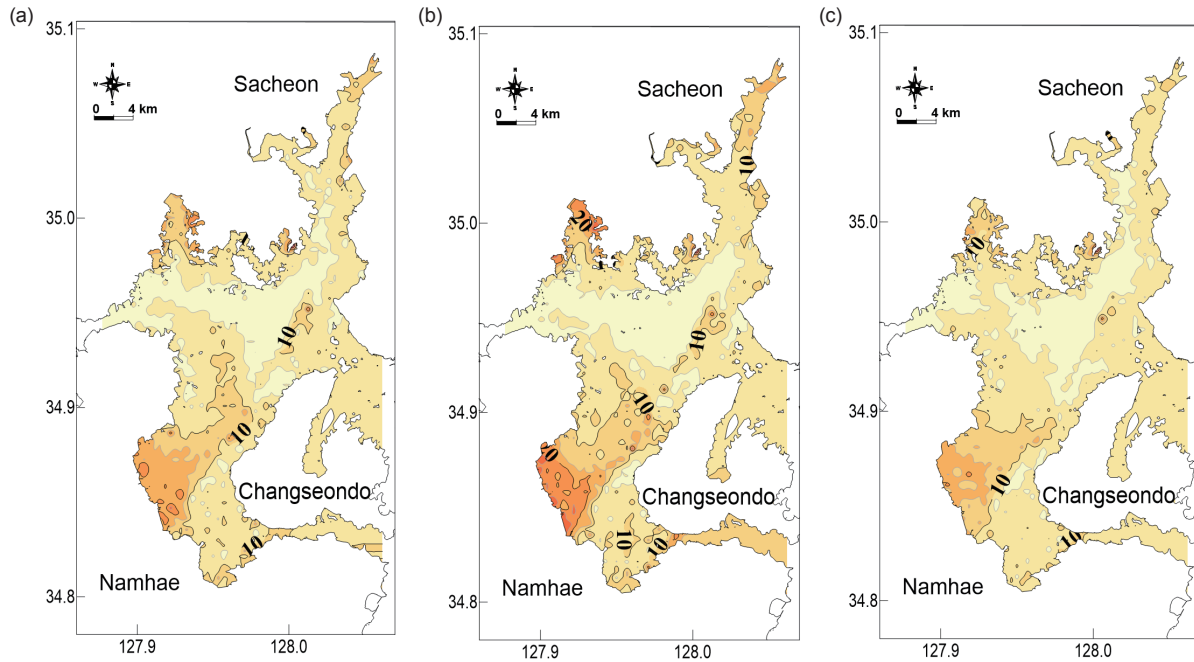


Fig. 8. Spatial distribution of averaged residence time of surface layer in Gangjin Bay during (a) normal, (b) rainy and (c) dry season.

증가하는 것으로 나타났다. 이는 집중 강우로 인해 담수와 함께 육상기인 오염물질이 강진만으로 유입될 경우 저층에서 체류시간의 공간적 차이가 커지는 것을 의미한다.

고찰

본 연구에서는 표류부이 현장관측 결과를 입자추적모델의 결과와 비교하였다(Fig. 6). 일반적으로 입자추적모델의 경우 해수유동모델을 구성하여 해역의 해수순환 특성을 재현하고 이를 토대로 가상의 입자를 방류하여 모의한다(Park et al., 2011b; Chung and Duyen, 2012; Smyth et al., 2016). 수립된 해수유동모델이 검증과정을 통해 해역의 해수순환 특성을 잘 재현하고 있다고 판단할지라도 이를 토대로 한 입자추적모델의 결과는 표류부이 현장관측 결과와 일치하지 않을 수 있다.

이러한 불일치의 이유는 다음과 같이 생각할 수 있다. 첫째, 해수유동모델 검증과정의 한계이다. 일반적으로 해수유동모델의 검증은 복수의 지점을 대상으로 관측한 조류 정보를 토대로 수행되며 이러한 검증을 근거로 수립된 모델이 해역의 해수순환 특성을 잘 재현하고 있다고 판단한다. 하지만 이는 복수의 검증 지점에 대한 검증일 뿐이며 이를 제외한 대부분의 해역은 여전히 모델 계산에 의한 추측으로 남아있다. 남해 강진만과 같이 복수의 수로를 통해 해수가 거의 동시에 유출입할 경우 내부의 해수순환 특성은 아주 복잡할 것으로 판단할 수 있으며 이를 검증하기 위해서는 많은 수의 검증 지점이 필요할 것이다. 하지만 실질적으로 이를 충족하는 것은 불가능에 가깝다. 또한, 입자추

적모델 결과의 정량적인 검증방법은 전무한 실정으로 이에 대한 후후 연구가 필요하다.

둘째, 입자추적모델의 한계이다. 앞서 설명한 바와 같이 입자추적모델에서 입자의 확산은 random walk method에 따라 계산된다. 이는 확률론적인 이송과정과 확률론적 확산과정에 따라 입자의 거동이 모의되며 입자추적모델의 결과는 특정 현상의 재현이 아닌 확률론적인 접근을 의미하는 것이다(Suh and Lee, 2011). 따라서 입자추적모델에서 계산된 입자의 궤적은 실제 표류부이 궤적과 다를 수 있지만 입자추적모델 상에서 입자의 수를 증가시키면 실제 관측 결과와 유사한 궤적이 나올 확률이 증가한다. 이러한 이유에도 불구하고 표류부이 현장관측 결과와 입자추적모델 계산 결과는 비교적 유사하게 나타났으며 (Fig. 6), 이는 수립된 모델이 강진만의 해수순환 특성을 비교적 잘 재현하고 있는 것을 의미한다.

남해 강진만은 굴, 피조개 등이 주로 생산되는 해역으로 5,290 ha가 수출용패류생산지정해역으로 지정되어있어 해역의 세균학적 수질에 영향을 미치는 육상기인 오염물질 유입에 대한 관심이 높아지고 있는 실정이다(Park et al., 2011b; Ha et al., 2013; Shin et al., 2017; Shin et al., 2018). 본 연구에서는 남해 강진만의 평균체류시간을 계산하고 담수유입에 따른 평균체류시간의 공간적인 변동 특성을 알아보았다. 평균체류시간 변화 양상은 표층과 저층에서 다른 양상이 나타났다(Fig. 8, Fig. 9, Fig. 10). 이러한 결과는 해역으로 유입된 육상기인 오염물질의 성상에 따라 다른 체류시간이 나타날 수 있음을 의미한다. 즉,

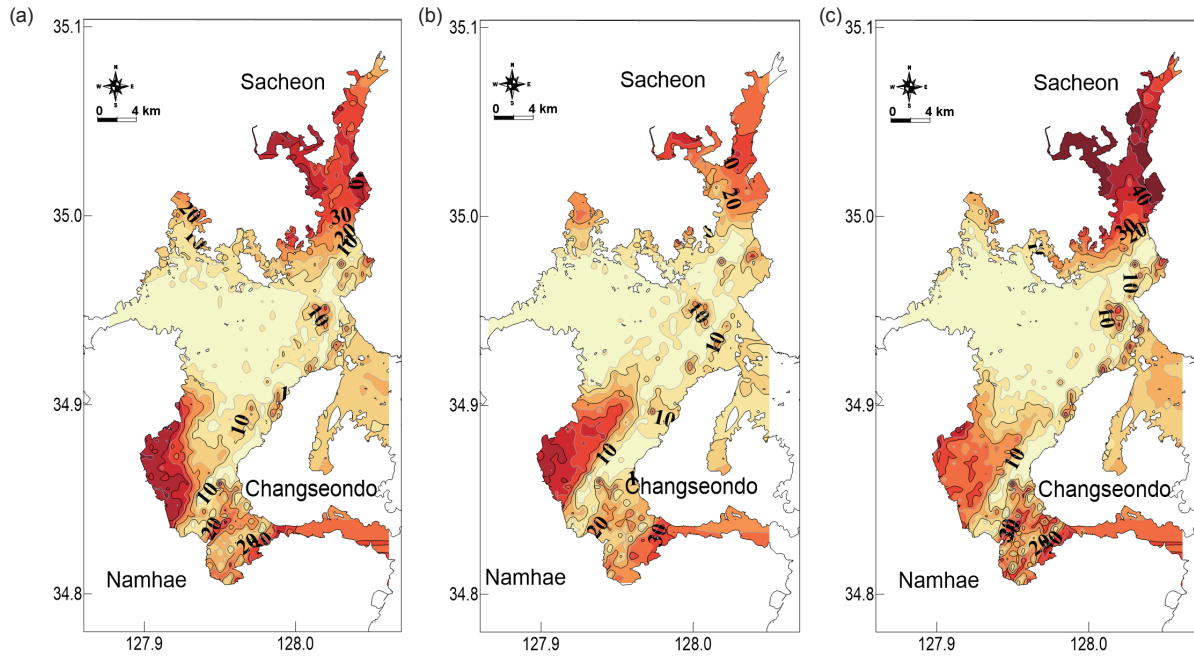


Fig. 9. Spatial distribution of averaged residence time of bottom layer in Gangjin Bay during (a) normal, (b) rainy and (c) dry season.

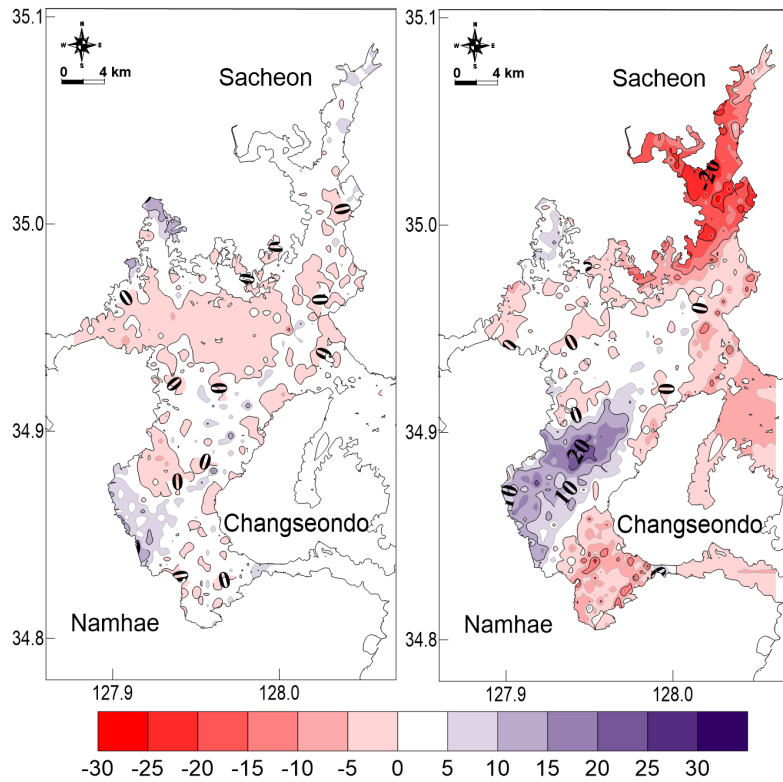


Fig. 10. Spatial distribution of the difference of averaged residence time between dry and rainy season at surface (left) and bottom (right) layer in Gangjin Bay.

오염물질의 비중이나 침강속도에 따라 육상기인 오염물질이 해역으로 유입될 경우 체류시간에 큰 차이가 발생할 수 있으며 특히 표층보다 저층으로 유입된 오염물질의 경우 강우에 따라 더 오랜 시간 체류하며 양식생물에 영향을 줄 수 있음을 의미한다.

본 연구에서는 해역 내에서 방류된 입자가 최초로 외경계를 벗어난 시점을 체류시간으로 정의하였다. 하지만, 물질의 체류시간과 영향시간(*influence time*)은 구분되며 물질의 해역 내 체류시간이 길다고 반드시 영향시간이 긴 것은 아니다(Delhez et al., 2014). 체류시간은 본 연구에서 말한 바와 같이 해역 내 입자가 최초로 외경계를 벗어난 시점으로 정의되며 이는 *lagrangian* 개념이다. 하지만, 영향시간은 *eulerian* 개념으로 한 지점에서의 물질 체류시간을 말하는 것으로 외부에서 유입되는 것을 포함한다(Delhez et al., 2014). 이를 구분하기 위해 영향시간은 *local residence time* (Abdelrhman, 2005), *local flushing time* (Jouon et al., 2006; Plus et al., 2009) 등의 개념을 사용하여 연구가 수행되고 있다. 따라서 해역 내 양식생물에 대한 육상기인 오염물질의 영향을 정량화하기 위해서는 이러한 영향시간에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

사 사

이 논문은 2021년도 국립수산물과학원 수산과학연구사업(R2021034)의 지원으로 수행되었습니다.

References

- Abdelrhman MA. 2005. Simplified modeling of flushing time and residence times in 42 embayments in New England, USA, with special attention to Greenwich Bay, Rhode Island. *Estuar Coast Shelf Sci* 62, 339-351. <http://doi.org/10.1016/j.ecss.2004.09.021>.
- Balachandran KK, Reddy GS, Revichandran C, Srinivas K, Vijayan PR and Thottam TJ. 2008. Modelling of tidal hydrodynamics for a tropical ecosystem with implications for pollutant dispersion (Cochin Estuary, Southwest India). *Ocean Dyn* 58, 259-273. <http://doi.org/10.1007/s10236-008-0153-6>.
- Chung DH and Duyun NTK. 2012. Sensitivity of lagrangian particle tracking based on a 3D numerical model. *J Mod Phys* 3, 1972-1978. <https://doi.org/10.4236/jmp.2012.312246>.
- Delhez EJM, Brye B, Brauwere A and Deleersnijder E. 2014. Residence time vs influence time. *J Mar Syst* 132, 185-195. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2013.12.005>.
- Ha KS, YOO HD, Shim KB, Kim JH, Lee TS, Kim PH, Lee HJ and Yu HS. 2013. The effects of inland pollution sources around the port of Jeokyang and Jangpo after rainfall events on bacteriological water quality in the Changseon area, Korea. *Korean J Fish Aquat Sci* 46, 160-167. <https://doi.org/10.5657/kfas.2013.0160>.
- Hamrick JM and Mills WB. 2000. Analysis of water temperature in Conowingo Pond as influenced by the peach bottom atomic power plant thermal discharge. *Eviron Sci Policy* 3, 197-209. [http://doi.org/10.1016/s1462-9011\(00\)00053-8](http://doi.org/10.1016/s1462-9011(00)00053-8).
- Jouon A, Douillet P, Ouillon S and Fraunie P. 2006. Calculations of hydrodynamic time parameters in a semi-opened coastal zone using a 3D hydrodynamic model. *Cont Shelf Res* 26, 1395-1415. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2005.11.014>.
- Kim JH, Park SE, Kim YM, Kim CS, Kang SC, Jung WS, Sim BR and Eom KH. 2020. Assessing average residence time as a physical descriptor for shellfish farming area in Jaran Bay, Korea. *J Environ Sci Int* 29, 273-282. <http://doi.org/10.5322/jesi.2020.29.3.273>.
- Kim TY and Yoon HS. 2011. Skill assessments for evaluating the performance of the hydrodynamic model. *J Korean Soc Mar Environ Energy* 14, 107-113. <https://doi.org/10.7846/JKOSMEE.2011.14.2.107>.
- Kim YJ and Yoon JS. 2009. A study on the behavior of floating debris and fresh water diffusion according to discharge of Namgang Dam. *J Ocean Eng Technol* 23, 37-46.
- Mee L. 2012. Between the devil and deep blue sea: the coastal zone in an era of globalization. *Estuar Coast Shelf Sci* 96, 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2010.02.013>.
- Monsen NE, Cloern JE, Lucas LV and Monismith SG. 2002. A comment on the use of flushing time, residence time, and age as transport time scales. *Limnol Oceanogr* 47, 1545-1553. <https://doi.org/10.4319/lo.2002.47.5.1545>.
- NIFS (National Institute of Fisheries Science). 2016. Watershed modeling for land pollution management in Gangjin Bay. Research Report 90, NIFS, Busan, Korea, 5-77.
- Park KBW, Jo MR, Lee HJ, Kwon JY, Son KT and Lee TS. 2011a. Evaluation of the effect of the discharged water from Bong stream after rainfall events on the bacterial water quality in Gangjinman, Korea. *Korean J Fish Aquatic Sci* 44, 622-629. <https://doi.org/10.5657/kfas.2011.0622>.
- Park SE, Lee WC, Hong SJ, Kim HC and Kim JH. 2011b. Variation in residence time and water exchange rate by release time of pollutants over a tidal cycle in Masan Bay. *J Korean Soc Mar Environ Energy* 14, 249-256. <https://doi.org/10.7846/jkosmee.2011.14.4.249>.
- Plus M, Dumas F, Stanisiere JY and Maurer D. 2009. Hydrodynamic characterization of the Arcachon Bay, using model-derived descriptors. *Cont Shelf Res* 29, 1008-1013. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2008.12.016>.
- Shin SB, Ha, KS, Lee KJ, Jung SH, Lee JH, Oh EG, Kim YK and Lee HJ. 2017. Assessment of sanitary safety of the oyster *Crassostrea gigas*, Short neck clam *Ruditapes philippinarum* and small ark shell *Scapharca subcrenata* in Gangjin Bay, Korea. *Korean J Malacol*, 33, 275-283. <https://doi.org/10.9710/kjm.2017.33.4.275>.
- Shin SB, Lim CW, Lee JH and Jung SH. 2018. Evaluation of inland pollution sources impact in the Gangjin Bay, Korea. *J Kor Soc Fish Mar Edu* 30, 2241-2248.

- Smyth D, Kregting L, Elsaber B, Kennedy R and Roberts D. 2016. Using particle dispersal models to assist in the conservation and recovery of the overexploited native oyster *Ostrea edulis* in an enclosed sea lough. *J Sea Res* 108, 50-59. <https://doi.org/10.1016/j.seares.2015.12.009>.
- Suh SW. 2006. A hybrid approach to particle tracking and Eulerian-Lagrangian models in the simulation of coastal dispersion. *Environ Model Softw* 21, 234-242. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2004.04.015>.
- Suh SW and Lee HY. 2011. Analysis of hydrodynamic change around the saemangeum area using a particle tracking method. *J Korean Soc Coast Ocean Eng* 23, 442-450. <https://doi.org/10.9765/kscoe.2011.23.6.442>.
- US FDA (Food and Drug Administration). 2017. National shellfish sanitation program, guide for the control of molluscan shellfish: 2017 Revision. Retrieved from <https://www.fda.gov/media/117080/download> on Jun 23, 2021.