

ORIGINAL ARTICLE

자란만 패류양식해역의 물리환경 설명을 위한 평균체류시간 산정

김진호 · 박성은* · 김영민 · 김청숙 · 강성찬 · 정우성 · 심보람 · 엄기혁

국립수산과학원 어장환경과

Assessing Average Residence Time as a Physical Descriptor for Shellfish Farming Areas in Jaran Bay, Korea

Jin Ho Kim, Sung-Eun Park*, Youngmin Kim, Chung Sook Kim, Sungchan Kang,
Woo-Sung Jung, Bo-Ram Sim, Ki-Hyuk Eom

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

Abstract

Residence time is defined as the time taken for a material in a system to leave the system. The residence time characteristics in shellfish aquaculture determine the dispersion of excretion from aquaculture farms, along with the supply of food by seawater exchange. In this study, we estimated the spatial distribution of average residence time in the shellfish farming area using a particle tracking model. As a result, a relatively short average residence time of about 20 days or less was calculated in most areas, but an average residence time of more than 40 days was calculated in the inner areas. Relatively long average residence times were calculated along the west coast compared to the east coast, with the longest average residence time of more than 50 days in the northwestern areas. It can be inferred that the disturbance of the benthic ecosystem caused by shellfish farms is likely to be large because of the relatively weak dispersion of excrement from shellfish farms located on the west coast, especially in the northwest region. This distribution of average residence time is important for understanding the potential effects of seawater exchange on the environmental sustainability of shellfish farms, along with the seawater circulation characteristics of Jaran Bay.

Key words : Residence time, Particle tracking model, Jaran Bay, Shellfish farm

1. 서론

연안역에 유입된 물질들은 해수를 매개체로 이동하므로 물질수송과정을 파악하기 위해서는 해역별로 국지적 해수순환을 이해하는 것이 필수적이다(Monsen et al., 2002). 해수순환 특성은 물질수송시간의 공간적 차이를

만들며 이로 인해 영양염 공급, 식물플랑크톤의 성장, 연안으로 유입된 오염물질의 거동과 생태계에 미치는 영향 등 생지화학적 과정에서도 공간적인 차이가 발생한다(Choi and Lee, 2004; Wan et al., 2013). 생지화학적 과정의 공간적인 차이를 설명하기 위해 다양한 연구에서 물질수송시간(transport time scale) 개념을 사용하였다

Received 30 December, 2019; Revised 28 February, 2020;

Accepted 13 March, 2020

*Corresponding author: Sung-Eun Park, Marine Environment Research Division, National Institute of Fisheries Science, Busan 46083, Korea

Phone: +82-51-720-2521

E-mail: separk04@korea.kr

The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.

© 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.

(Delhez et al., 2004; Kargi and Uygur, 2004; Guyonnet et al., 2005; Gibbs, 2007; Wan et al., 2013).

물질수송시간을 표현하는 용어로는 체류시간(residence time), 교체시간(flushing time), age가 대표적으로 사용되는데(Zimmerman, 1976; Monsen et al., 2002; Delhez et al., 2004; Park et al., 2009), 이 중 체류시간과 age는 지역적인 물질수송시간을 나타내는 개념으로 생지화학 과정의 공간적인 이질성에 대한 간접적인 정보를 제공할 수 있다(Zimmerman, 1976; Monsen et al., 2002; Park et al., 2009). 체류시간은 임의의 경계 내에서 각 영역에 위치한 물질이 해역 내에서 체류하는 시간을 의미하는 것으로 체류시간의 공간분포를 통해 각 해역에서 발생하는 물질의 체류시간이나 지역적인 해수교환 정도를 알 수 있다.

패류양식해역에서 체류시간의 공간분포 특성은 물질의 장기거동 특성에 대한 정보 외에도 양식패류의 성장률에 대한 정보를 제공할 수 있다. 패류 성장속도는 공간적으로 일정하지 않으며 이는 체류시간의 공간적 차이와 관련성이 높은 것으로 알려져 있다(Prins et al., 1998; Guyonnet et al., 2005; Prins and Escaravage, 2005; Gibbs, 2007; Kim et al., 2019). 해역의 체류시간이 길수록 패류는 동일한 해수 내의 먹이물질을 여과할 기회를 더 많이 갖게 되지만 해수교환을 통한 외부로부터의 먹이공급이 원활하지 않아 결과적으로 성장률은 감소한다(Powell et al., 2012). 특히 과도한 입식으로 먹이경쟁이 강화되고 부족한 먹이로 인해 성장지연이 발생하는 해역일수록 체류시간과 패류 성장률의 상관성은 높게 나타날 수 있다.

이와 더불어 해역의 체류시간 특성은 패류양식장에 의한 저서생태계 교란의 정도에 영향을 준다. 체류시간이 긴 해역에서는 해수교환에 의해 패류 양식장에서 발생하는 유기물의 확산이 잘 이루어지지 않으며 이로 인해 저서생태계의 유기물 부하가 증가한다(Mitchell, 2006). 따라서 해역의 체류시간 공간분포 특성을 통해 패류양식장에 의한 저서생태계 교란 정도를 간접적으로 파악할 수 있다(Kasper et al., 1985; Stenton-Dozey et al., 2001). 본 연구에서는 패류양식해역의 양식생물 성장과 양식환경 등 생지화학 과정의 공간적 불균형을 설명하기 위해 입자추적모델을 이용하여 자란만 패류양식해역의 체류시간 공간분포를 계산하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 사용모델

자란만의 물질체류시간을 계산하기 위해 Environmental Fluid Dynamics Code(EFDC)(Hamrick, 1992)를 사용하였다. EFDC는 Virginia Institute of Marine Science에서 개발되었으며 3차원 수리해석 및 유사와 온배수의 거동해석 등 다양한 분야에 적용 가능하다. Dynamic Solution사의 Craig(2009)에 의해 전처리와 후처리 기능이 추가되었다. EFDC에는 particle tracking module이 포함되어 있으며 이를 이용해 수립된 해역에 가상의 입자를 방류하여 해수의 흐름에 따른 이동 및 확산 모의가 가능하다. 입자물질의 확산은 이류에 의한 이동과 비교하면 아주 작지만, random walk method는 time step마다 각 입자의 초기위치를 다양하게 만들며 여기에 이류에 의한 이동이 더해져 입자들의 확산을 더욱 가속하는 역할을 한다(Chung and Duyen, 2012). Random walk를 이용한 입자추적 모의는 유속이 강한 해역에서 이류(advection)향을 계산할 때 발생하는 수치적 확산이 나타나지 않는다(Suh, 2006). 또한, 입자추적계산에 적용된 Runge-Kutta법에 의해 계산과정에서 발생하는 오차와 격자의 이산화(discretization)시 발생하는 오차가 작아 계산의 정확성과 효율성을 높일 수 있다.

2.2. 모델 구성

모델의 영역은 자란만을 비롯하여 고성만, 통영 연안, 사천만을 포함하며 동서방향 약 50 km, 남북방향 약 43 km, 총 격자수는 13,589개, 격자 크기는 80~1,700 m 범위의 가변격자로 구성하였다(Fig. 1). 모델의 계산 시간 간격은 1초, 입자추적모델의 모의 기간은 50일로 설정하였다. 모델의 개방경계는 남쪽에 위치한 격자로 4대 분조 값을 보간하여 해당 격자에 각각 진폭과 위상을 입력하였다. 기상조건은 기상청의 대기압, 일사량 자료를 사용하였고 바람은 없는 것으로 가정하였다.

2.3. 평균체류시간 계산

본 연구에서는 자란만에서 Zimmerman(1976), Monsen et al.(2002), Park et al.(2009)이 제시한 평균체류시간의 정의에 따라 체류시간을 계산하였다. 체류시간은 만 내의 입자가 경계를 최초로 벗어나기까지 소요된 시간으로, 경계로부터 거리와 해수순환 특성에 의해 결정된다.

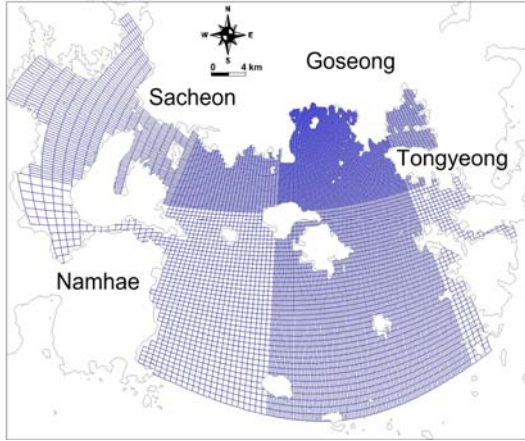


Fig. 1. Environmental Fluid Dynamic Code (EFDC) model domain for Jaran Bay.

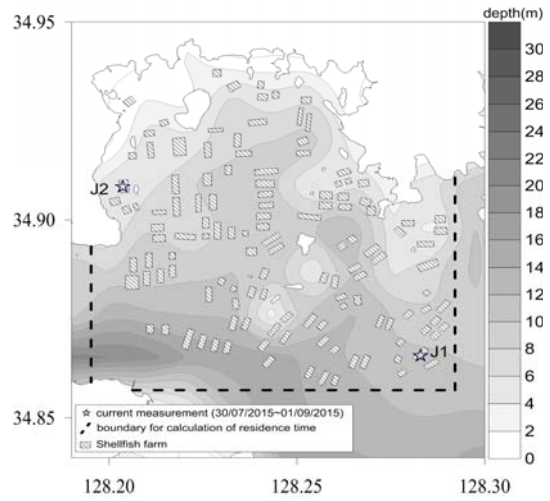


Fig. 2. Jaran Bay(Goseong, South Korea) showing the bathymetry and location of shellfish farms and monitoring stations used in the numerical model.

체류시간 계산을 위해 방류된 입자는 오직 해수의 흐름에 의해 이동하게 되며 입자의 이동은 최초에 방류된 지점의 수괴 이동을 의미한다(Zimmerman, 1976; Monsen et al., 2002; Delhez et al., 2004). 입자추적모델에서는 설정된 경계 내 격자마다 다섯 개의 입자를 방류하여 해수의 흐름에 따라 이동하는 각 입자의 위치정보를 시간에 따라 저장하였다. 본 연구에서는 사량도 북쪽 해역과 고성만 입구의 협수로를 포함하는 영역에 대하여 입의의 경계(점선)를 설정하여 체류시간을 계산하였다(Fig. 2). 방류 시점에 따라 입자의 체류시간은 크게 달라지므로 입자의 방류시기를 달리하여 대조기와 소조기의 고조, 저조, 창조, 낙조 등 각각 4회에 걸쳐 모의한 후 각 입자별 체류시간을 평균한 평균체류시간을 계산하였다(Park et al., 2009).

2.4. 현장관측

해수유동모델의 검증을 위해 Fig. 2의 J1과 J2 지점에서 조위와 조류 관측을 수행하였다. 조위와 조류 관측은 2015년 7월 30일부터 9월 1일까지 총 33일 동안 수행되었으며, 관측 시간 간격은 10분으로 설정하였다. 관측 자료는 조석성분과 비조석성분으로 조화분해한 후 조석성분과 모델의 계산결과를 비교하여 모델의 재현성을 검토하였다.

3. 수치모의 결과

3.1. 모델 검증

자란만 외측 지점(J1)과 입구 지점(J2)의 조위와 조류에 대하여 관측값과 계산값을 비교하였다(Fig 3). 조위는 J1과 J2 지점 모두 계산값이 관측값과 유사하였다. 유향 유속의 경우, J1 지점에서는 u와 v 성분 모두 계산값이 관측값에 비해 다소 크게 나타났으며 J2 지점에서는 동서방향의 흐름인 u성분이 강하게 형성되었다. 모델의 검증은 RAAE (Relative Absolute Average Error)를 계산하였으며, 조위의 경우 RAAE가 10% 이하, 조류의 경우 20% 이하일 때 모델이 해역의 해수순환 특성을 잘 재현하고 있는 것으로 판단할 수 있다(Marechal, 2004; Kim and Yoon, 2011). RAAE 계산 결과, 조위는 2.4%, 조류는 17.6%(J1)와 19.8%(J2)로 모델이 두 지점의 유속 및 유향을 잘 재현하고 있는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 본 연구에서 수립된 모델이 자란만의 물리환경 특성을 잘 재현하고 있는 것으로 판단하였다.

3.2. 자란만의 해수순환 특성

수립된 해수유동모델을 통해 계산된 자란만의 창조와 낙조의 유속 분포는 Fig. 4와 같다. 창조시 남동쪽 외해로부터 해수가 유입되어 대부분의 해수가 사량도 북쪽

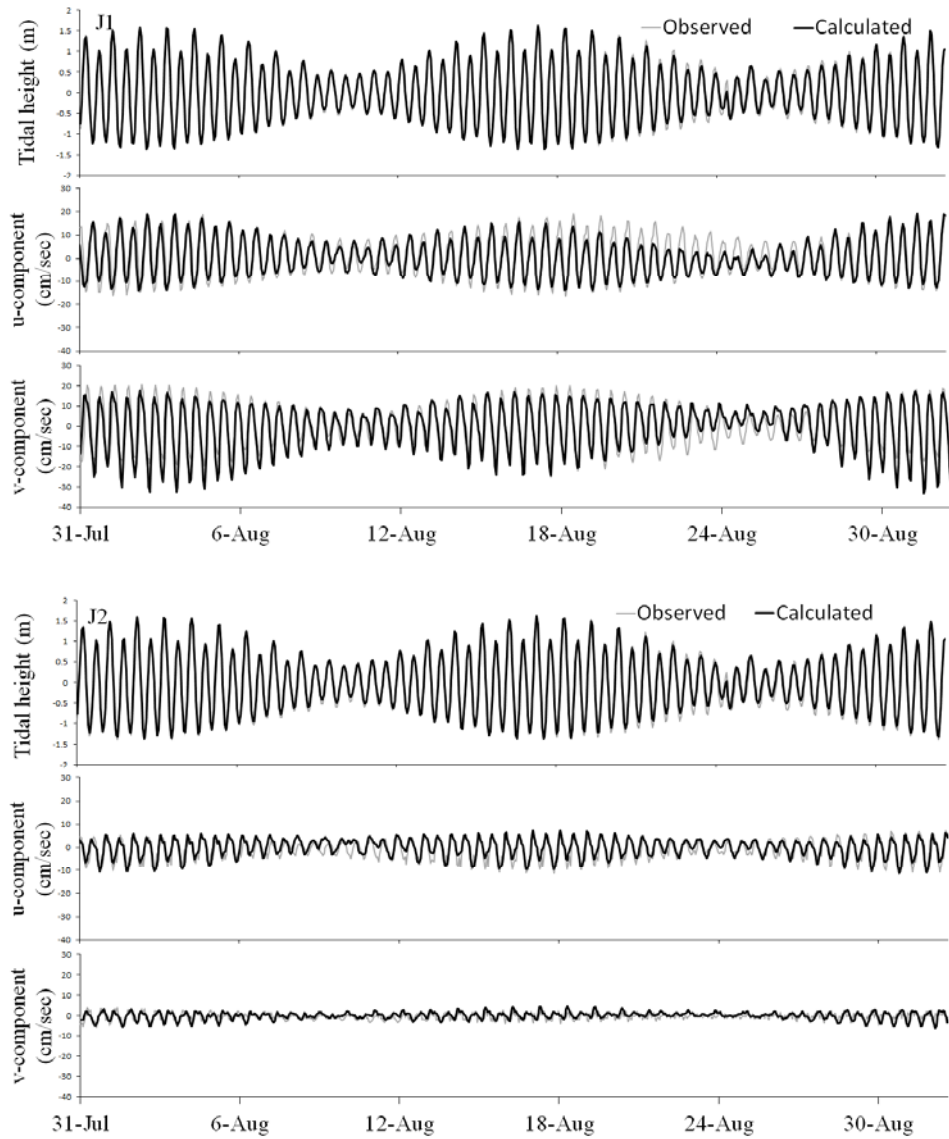


Fig. 3. Calculated and observed filtered tidal height and current component(u, v) at J1 and J2 station in Jaran Bay from 31 July 2015 to 1 September 2015 (Julian Day 33).

해역을 통해 이동하며 이 중 일부가 자란만 내부로 유입되어 북서 내만을 향해 이동한다. 자란만의 남동쪽 외해에서 20 cm/sec의 강한 유속이 형성되고 북서쪽 내만에서는 5 cm/sec 이하로 유속이 약하게 나타났다. 자란만의 서쪽 연안에 비해 동쪽 연안에서 상대적으로 강한 유속이 형성되고 있다. 이를 통해 자란만 해역 중 북서 내만

에서 해수교환이 잘 일어나지 않아 평균체류시간이 가장 길며 동쪽에 비해 서쪽 해역의 평균체류시간이 길 것으로 추정된다.

3.3. 입자추적모델 모의결과

평균체류시간 계산을 위해 모의한 8회의 입자추적

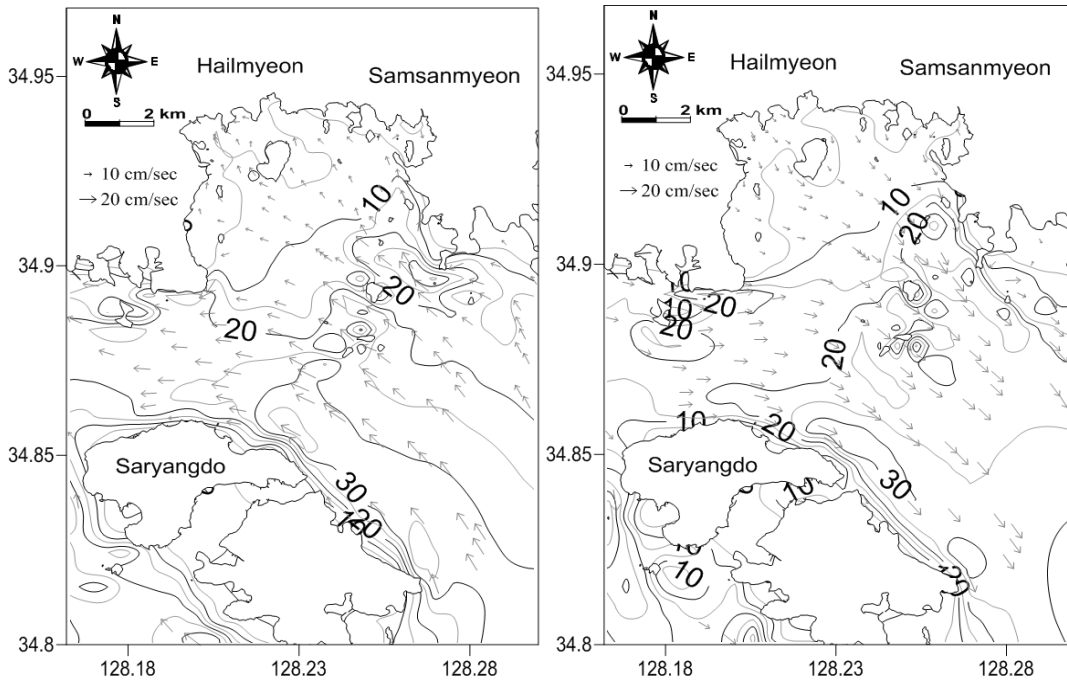


Fig. 4. Spatial distribution of the maximum current vectors computed in Jaran Bay during flood (left) and ebb (right) in spring tide conditions.

모델 결과 중 대조기 낙조시에 입자를 방류한 결과는 Fig. 5와 같다. 3개의 영역으로 나누어 입자의 색을 다르게 표현하였으며 입자의 초기위치와 해수 흐름에 따라 10일, 20일, 30일 이동한 후의 위치를 보여준다. 10일 동안 사량도를 비롯하여 자란만의 남동쪽에 위치한 통영 연안까지 입자가 확산되며 이후 지속적인 확산이 일어나면서 자란만 내 입자의 수가 감소하는 것을 확인할 수 있다. 하지만 입자 방류 후 30일이 경과하였음에도 불구하고 여전히 북쪽의 내만과 서쪽 연안을 따라 다수의 입자가 잔류하고 있는 것을 확인할 수 있다. 이는 Fig. 4에서 알 수 있듯이 동쪽 연안을 따라 상대적으로 강한 흐름이 형성되어 해수의 교환이 활발히 일어나 내만에서 방류된 입자가 빠르게 외해로 빠져나가는 데 반해 서쪽 연안에서는 해수의 흐름이 약하기 때문에 발생한 결과로 해석할 수 있다. 30일 이후까지 자란만 내에 잔류하는 입자 중 북서 해역에서 방류된 입자(빨강)가 다수인 것을 확인할 수 있으며 이는 해당 해역의 해수교환이 약해 물질의 확산이 잘 이루어지지 않는 것을 뜻한다. 또한, 외해에서 방

류된 입자(노랑)도 다수 존재하는 것을 확인할 수 있는데 이는 창조류에 의해 내만으로 이동하였다가 외해로 유출되지 못하고 내만에 체류한 것으로 북서 내만으로 유입된 물질의 경우 유출보다는 집적되기 쉬운 물리적 환경임을 의미한다. 이러한 결과를 통해 자란만의 북동과 남서를 가로지르는 내해에서 평균체류시간이 긴 것으로 나타났다며 특히 북서 내만에서 가장 긴 평균체류시간이 계산될 것으로 추측할 수 있다.

3.4. 평균체류시간 계산 결과

대조기와 소조기에 계산된 평균체류시간 공간분포는 Fig. 6과 같다. 두 시기 모두 외해에서 평균체류시간이 짧게 나타났으며 내만으로 갈수록 증가하는 경향이 나타나 내만에서는 40일 이상의 긴 평균체류시간이 나타났다. 소조기에 비해 대조기의 경우 남쪽의 경계 부근에서 상대적으로 긴 평균체류시간이 계산된 반면 내만에서는 짧은 평균체류시간이 나타났다. 이러한 결과는 방류시기에 따라 입자의 초기 이동 거리에서 큰 차이가 발생해 나타난 결과로 판단된다. 낙조시 방류된 입자의 경우 빠르게

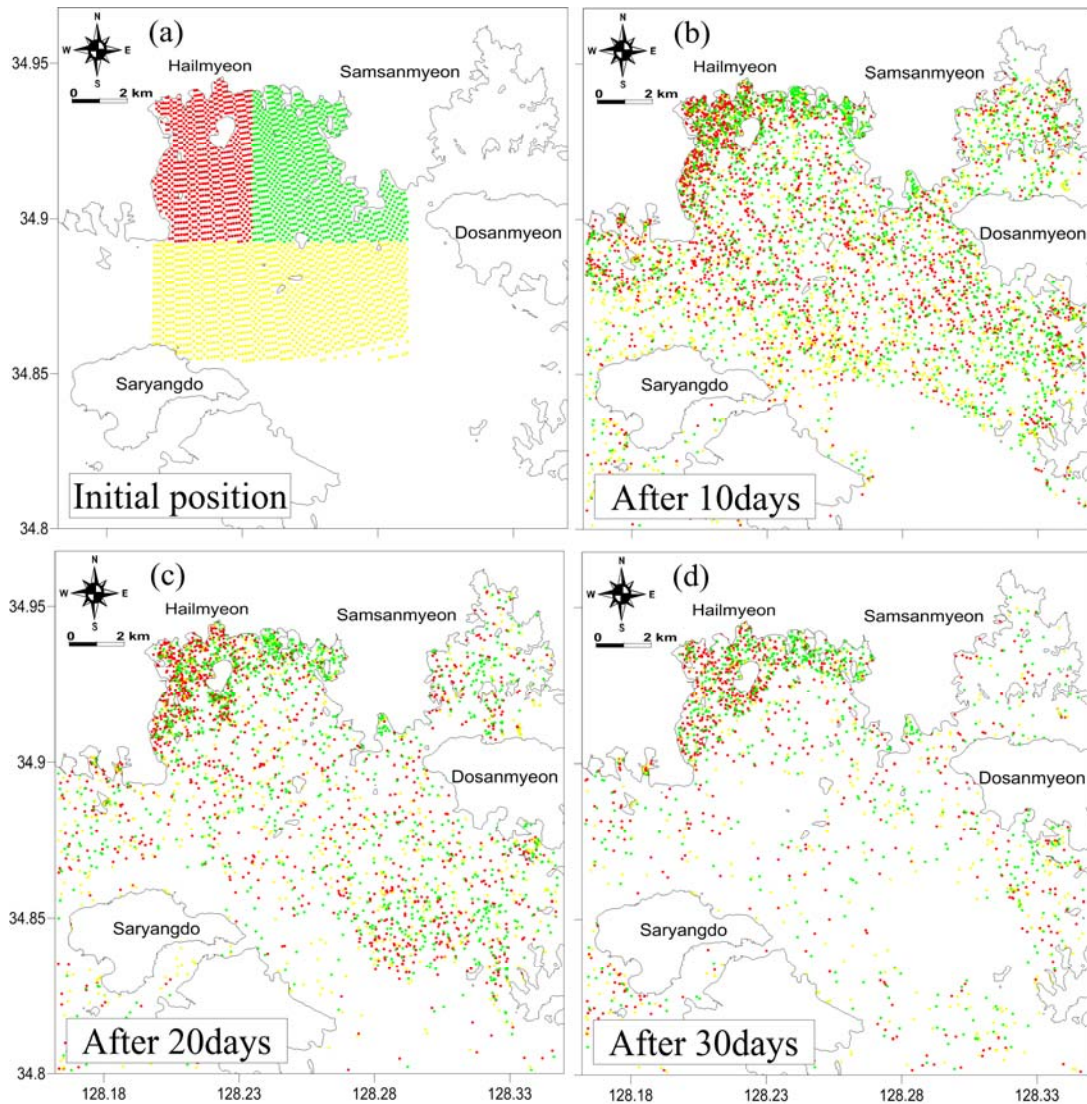


Fig. 5. Snapshot of the mixing of the volume of water from 3 areas (red, green, yellow). The initial position of the 3 areas is shown by (a). The subsequent dispersion pattern is illustrated in (b) after 10 days, (c) after 20 days, (d) after 30 days.

경계를 벗어날 수 있는 반면 창조시에는 내만을 향해 입자가 이동하게 되어 평균체류시간이 길어지게 된다. 대조기와 소조기의 평균체류시간 차이를 나타낸 Fig. 7에서 외해수가 내만으로 유입되는 주요 경로를 따라 대조기에 평균체류시간의 차이가 크게 나타난 것을 알 수 있다. 대조기의 창조시에 유속이 상대적으로 강해 같은 시

간동안 입자가 더 먼 거리를 이동하게 되어 방류된 입자가 내만으로 유입하게 되며 이로 인해 평균체류시간이 증가되어 발생한 결과로 해석할 수 있다. 하지만 내만의 경우 대조기에 외해에서 다량의 해수가 유입되어 해수의 교환이 상대적으로 활발해져 평균체류시간이 감소하게 되는 것으로 해석할 수 있다.

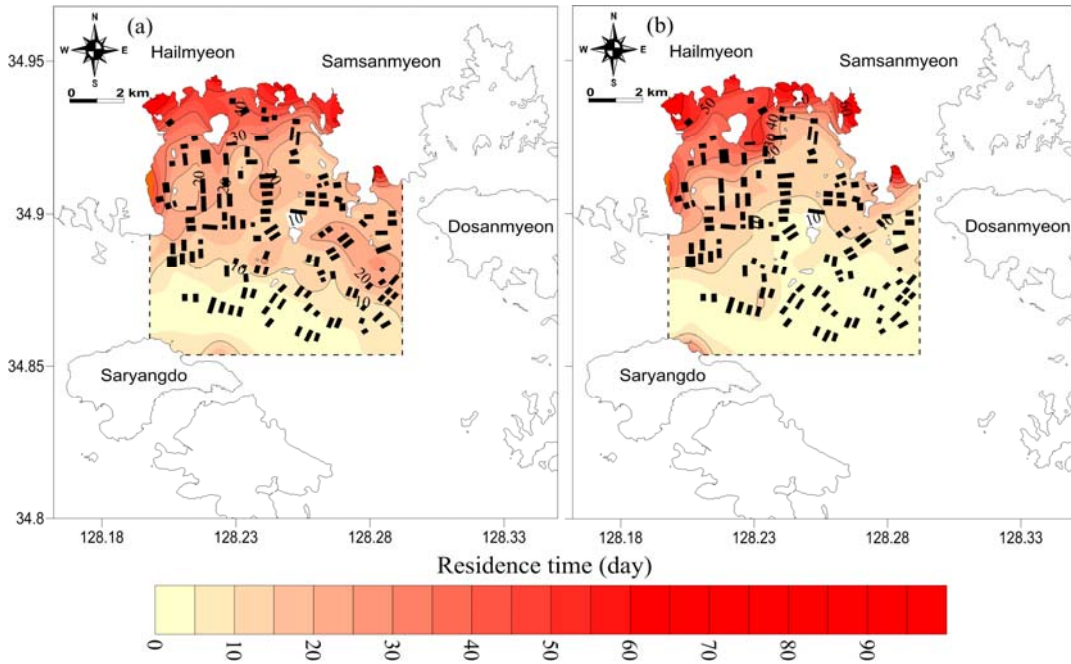


Fig. 6. Spatial distribution of averaged residence time during (a) spring tide and (b) neap tide showing computed corange lines.

대조기와 소조기의 모의 결과를 평균한 평균체류시간 공간분포는 Fig. 8과 같다. 외해에서 짧으며 북서내만으로 갈수록 평균체류시간이 길어지는 것을 알 수 있다. 자란만의 북동에서 남서쪽 해역을 가로지르는 20일 선을 기준으로 평균체류시간의 공간분포가 안과 밖으로 구분되는 것을 확인할 수 있다. 이는 Fig. 4의 자란만의 해수순환 특성에서 확인할 수 있듯이 경계부근에서 해수가 남동-북서 방향으로 유·출입하며 이로 인해 Fig. 5와 같이 북서내만에서 입자의 확산이 잘 이루어지지 않은 결과로 생각할 수 있다. 이로 인해 경계에서 유사한 거리에 있지만 자란만의 동쪽 연안의 평균체류시간은 15일로 서쪽 연안의 30일에 비해 짧으며 북서내만에서는 50일 이상의 긴 평균체류시간이 나타났다. 이러한 결과는 하천이나 양식장을 통해 자란만으로 오염물질이 유입될 경우 유입지점에 따라 평균체류시간이 공간적으로 다르며 이로 인해 오염물질에 노출되는 시간도 달라짐을 의미한다.

동-서 경계 해역의 경우 경계에 인접함에도 불구하고 10일 이상의 평균체류시간이 계산되는 것을 확인할 수 있다. 이는 Fig. 4에서 알 수 있듯이 자란만 외해의 경우

동-서 방향의 흐름이 형성되며 입자의 방류 시점에 따라 방류 직후 경계를 벗어날 수 있지만 흐름이 반대인 경우 오히려 해역의 중앙으로 이동하여 평균체류시간이 증가하게 된다. 본 연구에서는 8번의 서로 다른 방류시기를 모의하여 평균한 체류시간을 계산하고 있으며 이러한 계산방법으로 인해 평균체류시간이 증가한 것으로 판단된다.

본 연구와 동일한 계산방법에 의해 산정된 마산만, 거제만과 가막만의 평균체류시간에 비해 자란만의 평균체류시간은 비교적 짧은 것으로 나타났다(Park et al., 2009; Kim et al., 2016a; Kim et al., 2016b). 이는 다른 해역에 비해 자란만의 입구가 넓고 외해의 유속이 강하게 형성되어 창·낙조시에 경계면을 통해 다량의 해수가 유·출입하며 이로 인해 해수 교환이 활발하게 이루어지기 때문으로 판단된다.

일반적으로 자란만과 같은 패류양식장에서는 양식패류의 배설물은 침강하여 저서생태계에 영향을 미친다(Dittmann, 1990; Rangarsson and Raffaelli, 1999; Hyun et al., 2013). 하지만 해수교환이 활발한 해역에서

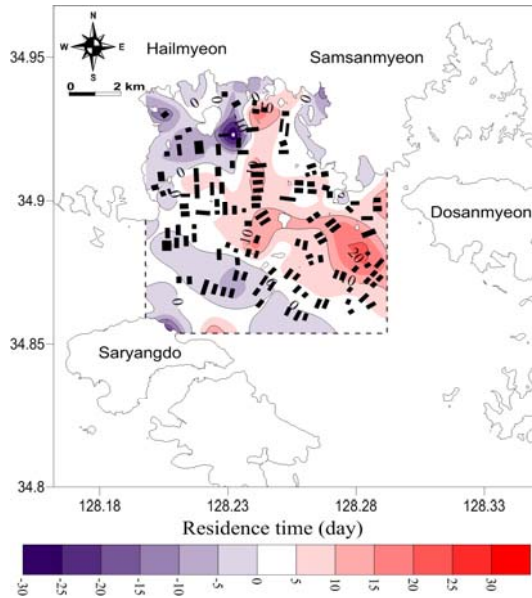


Fig. 7. Spatial distribution for difference of averaged residence time between spring tide and neap tide (spring tide - neap tide).

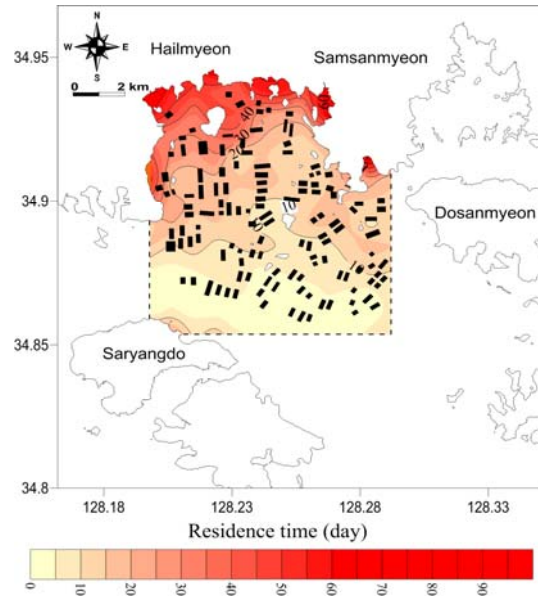


Fig. 8. Spatial distribution of averaged residence time of 8 cases in Jaran Bay.

는 침강하는 유기물의 확산범위가 넓어져 저서생태계에 대한 교란이 감소하게 된다(Kasper et al., 1985; Stenton-Dozey et al., 2001). 패류양식장이 밀집되어 있는 고성만, 거제한산만, 진해만과 비교해보면 퇴적물의 TOC 값이 상대적으로 낮으며 저서생물의 종풍부도와 다양도가 높게 나타나 다른 양식해역에 비해 패류양식장에 의한 퇴적물 교란이 상대적으로 작은 것을 알 수 있다(Cho et al., 2013). 이는 다른 만에 비해 자란만의 평균체류시간이 상대적으로 짧아 해수의 교환이 활발히 이루어지며 이로 인해 패류양식장에서 발생하는 유기물 부하의 확산이 잘 이루어지는 것으로 생각할 수 있다(Mitchell, 2006). Cho et al.(2013)의 연구에 의하면 자란만 해역 내에서도 북서해역의 저서환경이 다른 해역에 비해 비교적 악화되어 있는 것을 알 수 있다. 이는 Fig. 8에서 확인할 수 있듯이 자란만의 경우 북서쪽 내만을 제외한 대부분 해역의 평균체류시간이 짧게 나타나 주변 해수와 교환이 활발하게 이루어지는 것으로 판단할 수 있다. 결과적으로 평균체류시간의 공간분포 특성을 통해 패류양식장이 주변 저서환경에 미치는 영향을 간접

적으로 판단할 수 있었다.

4. 결론

본 연구에서는 입자추적모델을 이용하여 자란만 패류양식해역의 평균체류시간 공간분포를 추산하였다. 수치모의를 통해 대상해역인 자란만은 대부분의 해역에서 비교적 강한 해수의 흐름이 형성되며 남동쪽 외해에서 해수가 유입되어 자란만 내부의 해수와 교환되는 것을 알 수 있었다. 입자추적모델 모의를 통해 내만에서 방류된 입자 중 상당수가 30일이 지난 시점에도 내만에서 체류하고 있는 것을 알 수 있었으며 이러한 현상은 동쪽에 비해 서쪽 연안을 따라 두드러지게 나타났다. 대조기와 소조기의 평균체류시간 계산 결과, 입자의 방류시기에 따라 공간적으로 다른 경향이 나타났는데 이는 방류 초기의 해수흐름에 따라 단면통과 유량과 방향이 결정되어 입자의 해역 내 평균체류시간이 크게 변화됨을 의미한다. 평균체류시간 공간분포는 전체적으로 20일 내외로 비교적 짧게 나타났으며 북서와 남동으로 평균체류시간의 공간분포가 구분되었다. 이로 인해 북서 내만에서 50일 이

상으로 가장 긴 평균체류시간이 계산되었으며, 동쪽 연안에 비해 서쪽 연안의 평균체류시간이 비교적 길게 나타났다. 이러한 결과는 자란만 내에서 발생한 물질의 해역 내 평균체류시간이 공간적으로 큰 차이가 발생할 수 있는 것을 의미한다. 이는 자란만과 같이 패류양식장에서 발생하는 오염물질의 유입이 있는 경우 유입지점별로 오염물질의 평균체류시간이 다르며 생태계에 미치는 영향 또한 차이가 발생할 수 있음을 의미한다. 즉, 대상해역인 자란만의 경우 북서 내만에 위치한 양식장에서 발생한 양식 패류 배설물의 확산이 잘 이루어지지 않으며 이로 인해 저서환경에 대한 영향이 클 것으로 판단된다. 추후, 바람에 따른 평균체류시간의 변화 양상과 패류양식해역에서 평균체류시간이 패류양식장의 환경적인 지속가능성에 미치는 영향에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2020년도 국립수산과학원 수산과학연구소 사업(R2020050)의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCE

Cho, Y. S., Lee, W. C., Kim, J. B., Hong, S. J., Kim, H. C., Kim, C. S., 2013, Establishment of environmental assessment using sediment total organic carbon and macrobenthic polychaete community in shellfish farms, 19(5), 430-438.

Choi, K. W., Lee, J. H. W., 2004, Numerical determination of flushing time for stratified water bodies, *Journal of Marine System*, 50(3-4), 263-281.

Chung, D. H., Duyen, N. T. K., 2012, Sensitivity of lagrangian particle tracking based on a 3D numerical model, *Journal of Modern Physics*, 3, 1972-1978.

Craig, P. M., 2009, Implementation of a Lagrangian particle tracking sub-model for the environmental fluid dynamics code, Dynamic Solutions-International, LLC, Knoxville, TN, USA.

Delhez, E. J. M., Heemink, A.W., Deleersnijder, E., 2004, Residence time in a semi-enclosed domain from the solution of an adjoint problem, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 61, 691-702.

Ernst, W., Jackman, P., Doe, K., Page, F., Julien, G., Mackay, K., Sutherland, T., 2001, Dispersion and toxicity to non-target aquatic organisms of pesticides used to Treat sea lice on salmon in net pen enclosure, *Marine Pollution Bulletin*, 42(6), 432-443.

Gibbs, M. T., 2007, Sustainability performance indicators for suspended bivalve aquaculture activities, *Ecological Indicator*, 7, 94-107.

Guyondet, T., Koutitonsky, V. G., Roy, S., 2005, Effects of water renewal estimates on the oyster aquaculture potential of an inshore area, *Journal of Marine System*, 58, 35-51.

Hamrick, J. M., 1992, A Three-dimensional environmental fluid dynamics computer code: Theoretical and computational aspects. The College of William and Mary, VIMS, Special report 317.

Jung, M. J., Peak, J. Y., Yi, J. H., 2018, Economic analysis based on estimation of optimal facilities of oyster aquaculture in Jaran Bay, *Journal of Fisheries Business Administration*, 49(4), 99-108.

Kasper, H. F., Gillespie, P. A., Boyer, I. C., MacKenzie, A. L., 1985, Effects of mussel aquaculture on the nitrogen cycle and benthic communities in Kenepuru Sound, Marlborough Sound, New Zealand, *Marine Biology*, 85(2), 127-136.

Kenov, I. A., Garcia, A. C., Neves, R., 2012, Residence time of water in the Mondego estuary (Portugal), *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 106, 13-22.

Kim, J. H., Hong, S. J., Lee, W. C., Kim, H. C., Eom, K. H., Jung, W. S., Kim, D. M., 2019, Estimation of the effect of flushing time on oyster aquaculture potential in Jaran Bay, *Ocean Science Journal*, 54, 559-571.

Kim, J. H., Hong, S. J., Lee, W. C., Kim, J. B., Kim, H. C., Kim, D. M., 2016a, Estimation on average residence time of particulate matters in Geoje Bay using particle tracking model, *Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safty*, 22(1), 20-26.

Kim, J. H., Lee, W. C., Hong, S. J., Park, J. H., Kim, C. S., Jung, W. S., Kim, D. M., 2016b, A Study on temporal-spatial water exchange characteristics in Gamak Bay using a method for calculating residence time and flushing time, *Journal of Environmental Science International*, 25(8), 1087-1095.

Kim, T. Y., Yoon, H. S., 2011, Skill assessments for evaluating the performance of the hydrodynamic model, *Journal of the Korean Society for Marine*

- Environmental Engineering, 14(2), 107-113.
- Kimmerer, W. J., Gross, E. S., MaxWilliams, M. L., 2014, Tidal migration and retention of estuarine zooplankton investigated using a particle-tracking model, *Limnology and Oceanography*, 59, 901-916.
- Li, Y., Feng, H., Zhang, H., Sun, J., Yuan, D., Guo, L., Nie, J., Du, J., 2019, Hydrodynamics and water circulation in the New York/New Jersey Harbor: A study from the perspective of water age, *Journal of Marine Systems*, 199, 1-14.
- Marechal, D., 2004, A Soil-based approach to rainfall-runoff modeling in ungauged catchments for England and Wales, Ph.D Thesis, Cranfield University, Silsoe, England.
- Mitchell, I. M., 2006, In situ biodeposition rates of pacific oysters (*Crassostrea gigas*) on a marine farm in Southern Tasmania (Australia), *Aquaculture*, 257, 194-203.
- Monsen, N. E., Cloern, J. E., Lucas, L. V., Monismith, S. G., 2002, A Comment on the use of flushing time, residence time, and age as transport time scales, *Limnology and Oceanography*, 47(5), 1545-1553.
- NIFS, 2014, Estimation of carrying capacity - Gamak Bay, Geoje-Hansan Bay, 393.
- Park, S. E., Hong, S. J., Lee, W. C., 2009, Calculating average residence time distribution using a particle tracking model, *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 23(2), 47-52.
- Stenton-Dozey, J., Probyn, T., Busby, A., 2001, Impact of mussel (*Mytilus galloprovincialis*) raft-culture on benthic macrofauna, in situ oxygen uptake, and nutrient fluxes in Saldanha Bay, South Africa, *Canadian Journal of Fisheries Aquatic Science*, 58, 1021-1031.
- Zimmerman, J. T. F., 1976, Mixing and flushing of tidal embayments in the Western Dutch Wadden Sea, Part I: distribution of salinity and calculation of mixing time scales, *Netherlands Journal of Sea Research*, 10, 149-191.
-
- Scientific researcher. Jin-Ho Kim
Marine Environment Research Division, National Institute of Fisheries Science
tool20@naver.com
 - Scientific officer. Sung-Eun Park
Marine Environment Research Division, National Institute of Fisheries Science
separk04@korea.kr
 - Scientific researcher. Young-Min Kim
Marine Environment Research Division, National Institute of Fisheries Science
ym91206@naver.com
 - Scientific researcher. Chung-Sook Kim
Marine Environment Research Division, National Institute of Fisheries Science
matiz4070@naver.com
 - Scientific researcher. Sung-Chan Kang
Marine Environment Research Division, National Institute of Fisheries Science
sckang85@naver.com
 - Scientific researcher. Woo-Sung Jung
Marine Environment Research Division, National Institute of Fisheries Science
sea_jws@naver.com
 - Scientific researcher. Bo-Ram Sim
Marine Environment Research Division, National Institute of Fisheries Science
qhfk3465@gmail.com
 - Senior scientific manager. Ki-Hyuk Eom
Marine Environment Research Division, National Institute of Fisheries Science
ekh4465@nifs.go.kr