

Original Article

## 자란만 패류양식해역으로 유입하는 육상기인 오염물질의 시·공간적 확산 특성 : 추적자 기반 water age 적용

김진호<sup>1</sup> · 박성은<sup>2,†</sup> · 김형철<sup>2</sup> · 홍석진<sup>3</sup> · 이원찬<sup>4</sup>

<sup>1</sup>국립수산과학원 어장환경과 연구원

<sup>2</sup>국립수산과학원 어장환경과 연구사

<sup>3</sup>국립수산과학원 갯벌연구센터 연구사

<sup>4</sup>국립수산과학원 어장환경과 과장

# Spatiotemporal Characteristics of Anthropogenic Pollutant Dispersion Near Shellfish Growing Area in Jaran Bay: A Tracer-based Water Age Approach

Jin Ho Kim<sup>1</sup>, Sung Eun Park<sup>2,†</sup>, Hyung Chul Kim<sup>2</sup>, Sokjin Hong<sup>3</sup>, and Won-Chan Lee<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Scientific researcher, Marine Environment Research Division, National Institute of Fisheries Science, Busan 46083, Korea

<sup>2</sup>Scientific officer, Marine Environment Research Division, National Institute of Fisheries Science, Busan 46083, Korea

<sup>3</sup>Scientific officer, Tidal Flat Research Institute, National Institute of Fisheries Science, Gunsan 54001, Korea

<sup>4</sup>Director, Marine Environment Research Division, National Institute of Fisheries Science, Busan 46083, Korea

### 요 약

자란만과 같은 패류양식 지정해역에서 점·비점 오염원을 통해 병원성 세균이나 입자성 유해물질 등의 오염물질이 유입된다면 양식 패류의 성장이나 생존뿐만 아니라 이러한 양식 패류를 섭취하는 사람들의 건강에도 악영향을 미치게 된다. 따라서 패류양식 해역의 육상기인 오염물질에 대한 관리의 중요성은 매우 중요하다. 본 연구에서는 입자추적모델을 이용하여 자란만의 육상기인 오염물질의 확산을 모의하고 물질수송시간 중 age를 계산하여 오염물질의 시간에 따른 확산 특성을 추정하였다. 조석주기에 따라 입자방류 시점을 달리하여 8회에 걸쳐 입자 확산을 모의하였으며, 이를 평균하여 각 입자의 age를 계산하였다. 계산된 age는 자란만의 서쪽 연안을 따라 15일 이상의 긴 age가 계산된 반면, 동쪽 연안에서 5일 이하로 짧았으며 중앙해역에서는 10일 이상으로 나타났다. 이러한 결과는 바람과 같은 외력이 없는 경우, 북쪽의 하천을 통해 유입된 육상기인 오염물질이 자란만의 서쪽보다 동쪽 연안을 따라 확산되기 쉬운 것을 의미한다. Age 계산 결과는 자란만 패류양식장의 위생학적 관리에 있어서 동쪽 연안에 위치한 오염원과 양식장에 대한 중점 관리의 근거로 활용될 수 있을 것이다.

**Abstract** – The inflow of pollutants such as pathogenic bacteria or particulate pollutants through point and non-point sources in shellfish designated areas such as Jaran Bay affects not only the growth of shellfish but also the health of those who consume these shellfish. Therefore, the management of anthropogenic pollutants in shellfish farming is very important. In this study, we simulated the dispersion of anthropogenic pollutants using a particle tracking model and estimated the dispersion characteristics over time by calculating the age. The particle dispersion was simulated 8 times with different release times according to the tidal cycle, and the average age of each particle was calculated. The calculated age was longer than 15 days along the west coast of Jaran Bay, while it was shorter than 5 days on the west coast and more than 10 days in the central sea. These results indicate that, in the absence of external forces such as wind, pollutants from the land through rivers in the north, are more likely to spread along the east coast than in the west coast of the bay. The results of this age calculation can be used as a basis for the intensive management of pollutants located on the east coast in the hygienic management of shellfish farms.

**Keywords:** Age(연령), Particle tracking model(입자추적모델), Jaran Bay(자란만), Anthropogenic pollutant(육상기인 오염물질), Shellfish farm(패류양식장)

<sup>†</sup>Corresponding author: [separk04@korea.kr](mailto:separk04@korea.kr)

## 1. 서 론

연안해역은 육지와 인접하여 인간활동으로 인한 점·비점원의 형태로 다양한 오염물질이 유입되므로 육상기인 오염물질에 매우 취약하다(Carpenter *et al.*[1998]; Bilgili *et al.*[2005]; Mee[2012]). 대규모 패류양식장들은 이러한 연안해역에 집중적으로 배치되어 운영되고 있으며 병원성 세균이나 부유사 등과 같은 입자성 오염물질이 유입될 경우 패류를 섭취하는 사람들의 건강에도 악영향을 미치게 된다. 따라서 패류양식 해역의 위생학적 관리를 위해서는 육상기인 오염물질의 거동 특성을 파악하는 것이 매우 중요하다. 연안해역으로 유입된 육상기인 오염물질의 거동은 오염물질의 성질과 함께 해역의 물리환경 특성에 따른 물질수송시간(transport time scale)에 의해 결정된다(Boynton *et al.*[1995]; Shen and Wang [2007]). 따라서 육상기인 오염물질의 확산 특성에 대한 연구를 위해서는 해역의 물질수송시간에 대한 연구가 필수적이다(Shen and Wang[2007]; Balachandran *et al.*[2008]; Liu *et al.*[2011]).

연안의 물질수송시간(transport time scale)에는 연령(age), 체류시간(residence time), 교체시간(flushing time), renewal time, transit time 등 다양한 개념이 사용되고 있다(Zimmerman[1976]; Takeoka [1984]; England[1995]; Delhez *et al.*[1999]; Deleersnijder *et al.*[2001]; Shen and Lin[2006]; Shen and Wang[2007]; Liu *et al.*[2011]; Salama and Rabe[2013]; Smyth *et al.*[2016]). 이 중 age는 source로부터 유입된 물질이 시스템 내에서 보낸 시간으로 정의되는데 유입지점(source)으로부터 임의의 지점에 물질이 도달하기까지 소요된 시간을 의미한다. 이는 시스템 내의 물질이 경계를 벗어나기까지 소요된 시간을 의미하는 체류시간과는 구분되는 개념으로(Zimmerman[1976]; Monsen *et al.*[2002]), 하천과 같은 점오염원을 통해 유입되는 오염물질의 확산을 설명하기 적합한 물질수송시간 개념이다(Bolin and Rodhe[1973]).

Age를 계산하기 위한 방법에는 추적자(Ernst *et al.*[2001]; Lugo-Fernandez *et al.*[2001]; Wells *et al.*[2011]; Jang *et al.*[2014])를 방류하여 그 궤적을 관측하는 방법과 입자추적모델을 이용하여 오염물질의 거동을 모의하는 방법(Perianez and Elliot[2002]; Salama and Rabe[2013]; Smyth *et al.*[2016])이 있다. 추적자를 이용한 방법은 대상해역에서 실제의 해수흐름에 따른 이동과 확산을 직접적으로 관측하는 것으로 높은 신뢰성을 확보할 수 있는 장점이 있지만, 일반화를 위해 많은 수의 부이나 고농도의 염료를 반복적으로 방류해야 하며 여기에는 많은 인력과 비용이 필요한 단점이 있다. 또한, 자란만과 같이 패류를 양식하는 해역에서는 추적자로 염료를 방류하는 것은 매우 민감한 일로 현장관측을 수행하기 쉽지 않으며 바람이나 담수유입과 같은 외력을 배제할 수도 없다. 따라서 육상기인 오염물질의 확산 특성을 연구하기 위해서는 모델을 통해 해역의 해수순환 특성을 재현한 후 가상의 입자를 방류하는 입자추적모델 방법이 가장 효율적인 방법이 될 수 있다(Suh[2006]).

본 연구에서는 입자추적모델을 이용하여 패류양식해역인 자란만으로 하천을 통해 유입하는 육상기인 오염물질의 age를 계산하여

하천을 통해 유입된 오염물질이 패류양식해역 내측으로 확산되는 수송시간 특성을 정량적으로 파악하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1 사용 모델

육상기인 오염물질의 age를 계산하기 위해서 EFDC(Hamrick [1992])를 사용하였다. EFDC에는 particle tracking module이 포함되어 있으며 이를 이용해 수립된 해역에서 가상의 입자를 방류하여 해수의 흐름에 따른 이동 및 확산 모의를 할 수 있다. 방류된 각각의 입자는 지정된 시간마다 위치정보가 저장되며, 입자에 서로 다른 침강속도를 입력하여 모의하는 것이 가능하다. 이러한 particle tracking module는 해역의 물리환경 특성 연구, 오염물질 및 병원성 세균, 유출유 및 유생의 확산 모의 등 다양한 연구에 활용된다(Perianez and Elliot[2002]; Salama and Rabe[2013]; Kimmerer *et al.*[2014]; Lemagie and Lerczak[2015]; Smyth *et al.*[2016]). 입자의 확산에는 random walk method가 사용된다. 입자물질의 확산은 이류에 의한 이동과 비교하면 아주 작지만, random walk method는 time step 마다 각 입자의 초기위치를 다양하게 만들며 여기에 이류에 의한 이동이 더해져 입자들의 확산을 더욱 가속하는 역할을 한다(Chung and Duyen[2012]). Random walk method에 의한 입자추적 모형은 유속이 큰 해역에서 모의할 경우 Eulerian 방법으로 이송(advection)향을 계산할 때 발생하는 수치적 확산이 나타나지 않는 장점이 있다(Suh[2006]). 또한, EFDC의 입자추적모델에 적용된 Runge-Kutta법에 의해 계산과정에서 발생하는 오차와 격자의 이산화(discretization)시 발생하는 오차가 작아 계산의 정확성과 효율성을 확보할 수 있다.

### 2.2 수치모형 적용

본 연구에서는 자란만 패류양식장의 환경적 지속가능성에 미치는 교체시간(flushing time)의 영향에 대한 선행연구(Kim *et al.*[2019])와 동일한 모델을 적용하여 육상기인 오염물질 확산을 모의하였다. 모델은 동서방향으로 약 50 km, 남북방향으로 약 43 km로 자란만, 고성만, 사천만과 통영연안이 포함되는 영역으로 구성하였다(Fig. 1). 총 격자수는 13,589개이며 격자의 크기는 80~1,700 m로 가변격자를 구성하였다. 수직으로는 5개의 층으로 구성하였으며 모델의 계산시간 간격은 1초, 모의 기간은 50일로 설정하였다(Table 1). 구성된 모델격자에서 개방경계는 남쪽에 위치한 격자로 해양조사원(www.khoa.go.kr)에서 제공하는 기본수준점의 4개 분조 값을 보간하여 해당 격자에 각각 진폭과 위상을 입력하였다. 시뮬레이션 기간 동안의 기상조건은 기상청(www.kma.go.kr)에서 대기압, 일사량 등을 수집하여 적용하였으며 바람은 없는 것으로 가정하였다. 본 연구는 하천 유량이 많은 하계 시기의 육상기인 오염물질의 확산을 모의하는 연구로 2016년 7월에 관측된 하천의 유량을 입력하였으며(Table 2), 하천의 위치는 Fig. 2와 같다.

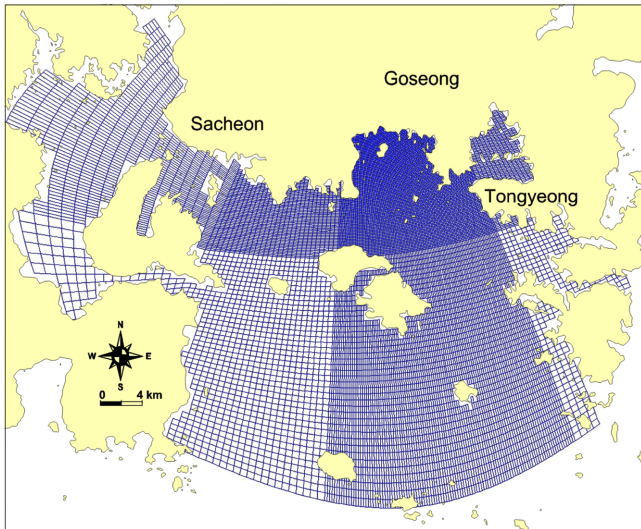


Fig. 1. Computational grid of the study area.

Table 1. Condition of calculation of model

Items	Experimental condition
The number of grid	13,589
Grid size	80~1,700 m
Vertical layers	5 layers
Calculation period	50 days
Time interval	1 sec

### 2.3 Age 계산

Delhez *et al.*[1999]는 수치모델을 이용하여 시·공간적으로 변화되는 age 계산을 위한 일반적인 방법을 제시하였다. 이는 추적자와 age의 농도를 기반으로 한 것으로 다음과 같이 정의된다.

$$\frac{\partial c(t, \vec{x})}{\partial t} + \nabla(u c(t, \vec{x}) - K \nabla c(t, \vec{x})) = 0$$

$$\frac{\partial c(t, \vec{x})}{\partial t} + \nabla(u \alpha(t, \vec{x}) - K \nabla \alpha(t, \vec{x})) = c(t, \vec{x})$$

여기서  $c$ 는 추적자의 농도이며,  $\alpha$ 는 age 농도,  $u$ 는 유속,  $K$ 는 diffusivity tensor,  $t$ 는 시간,  $\vec{x}$ 는 거리이다. 이를 통해 평균 age ' $\alpha$ '는 다음과 같이 계산된다.

$$\alpha(t, \vec{x}) = \frac{\alpha(t, \vec{x})}{c(t, \vec{x})}$$

육상기인 오염물질의 확산 특성은 물질의 유입 시점에 따라 달라지기 때문에 대조기와 소조기의 고조, 저조, 창조, 낙조시에 입자물질을 방류하여 각각의 age를 계산한 후 이를 평균하였다(Park *et al.*[2011]; Kim *et al.*[2016]). Fig. 2의 각 하천마다 5,000개의 입자를 동시에 방류하였으며, 입자의 위치는 30분마다 저장되도록 설정하였다. 방류된 입자가 격자에 최초로 도달한 시간을 age로 정의하였다. 이때 입자는 어떠한 속성도 없으며 해수의 흐름에 따라서만 이동·확산하는 것으로 설정하였다. 계산된 age는 하천에서 유입된 물질이 해당 지점에 도달하는 시간(day)을 나타낸 것으로 계산

Table 2. River discharges of Jaran Bay in July 2016

River	R1	R2	R3	R4	R5
Discharges (ton/sec)	0.0076	0.0336	0.0295	0.1008	0.0240

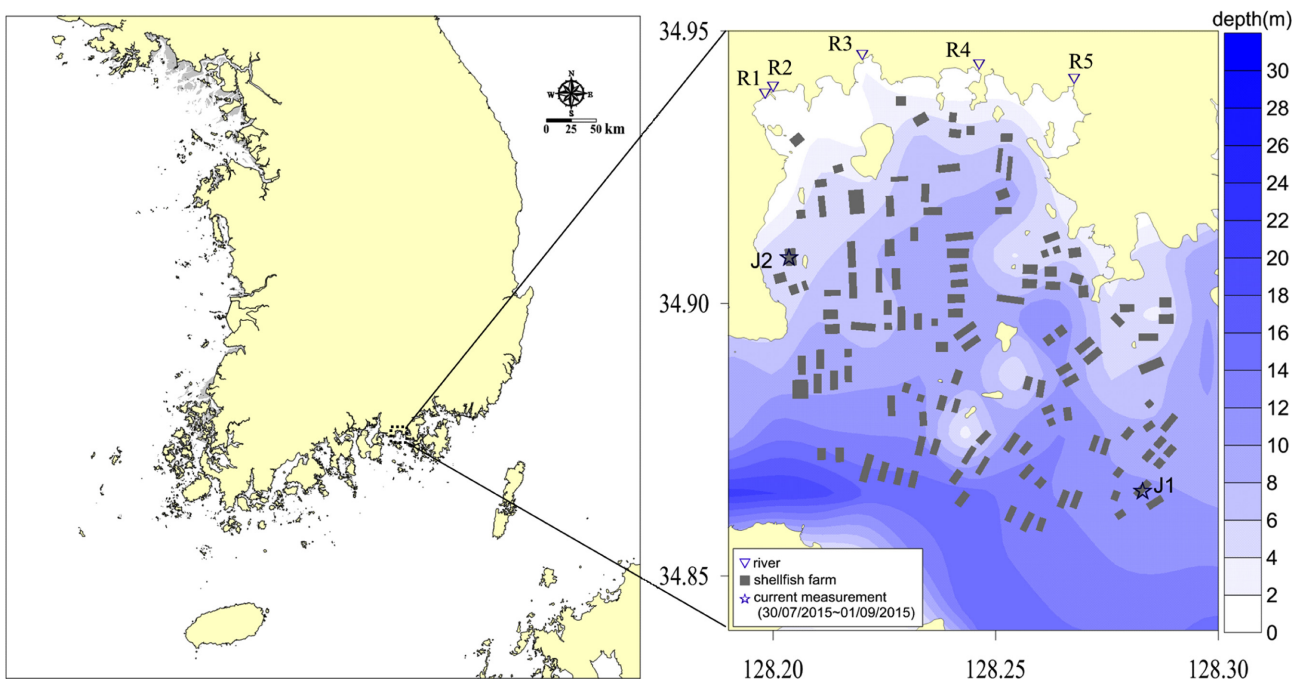


Fig. 2. Jaran Bay(Goseong, South Korea) showing the bathymetry and location of shellfish farms and monitoring stations used in the numerical model.

된 값이 작을수록 해당 지점에 도달하는 시간이 짧아지는 것을 의미하며 이는 해당 지점이 유입된 오염물질에 빠른 시간 안에 노출될 수 있음을 의미한다.

### 3. 수치모의 결과

#### 3.1 모델 검증

현장관측을 통해 Fig. 2의 두 지점에서 획득한 조위와 조류 정보를

모델에서 계산된 값과 비교하였다(Fig. 3, 4). 조위는 두 지점의 진폭과 위상이 유사한 것으로 계산되었다. 조류의 경우 J1에서 u와 v 성분 모두 큰 값이 계산된 반면, J2에서는 J1에 비해 다소 작은 값이 계산되었으며 u성분이 v성분에 비해 큰 것으로 계산되었다. 모델의 검증은 RAAE(relative absolute average error)를 계산하였으며, 조위는 10% 이하, 조류는 20% 이하일 때 모델의 재현성이 높은 것으로 판단할 수 있다(Marechal[2004]; Kim and Yoon[2011]). 검증 결과, 조위는 2.4%, 조류는 각각 17.6%(J1)와 19.8%(J2)로 나

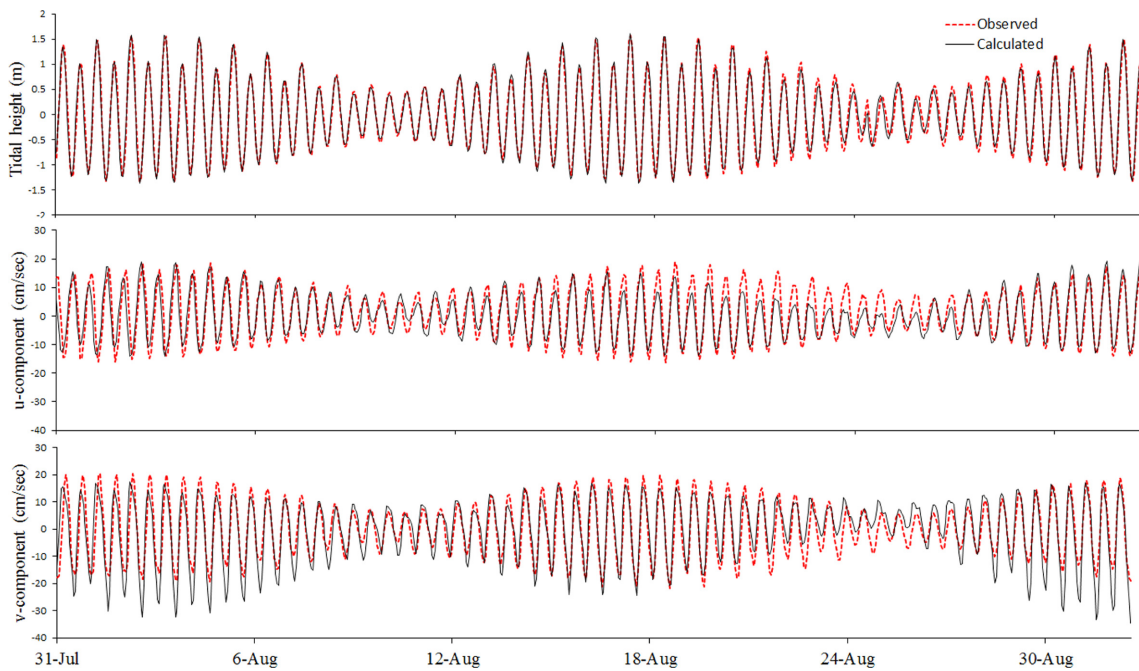


Fig. 3. Comparison between calculation and observation value of tidal height and current component (u, v) at station J1.

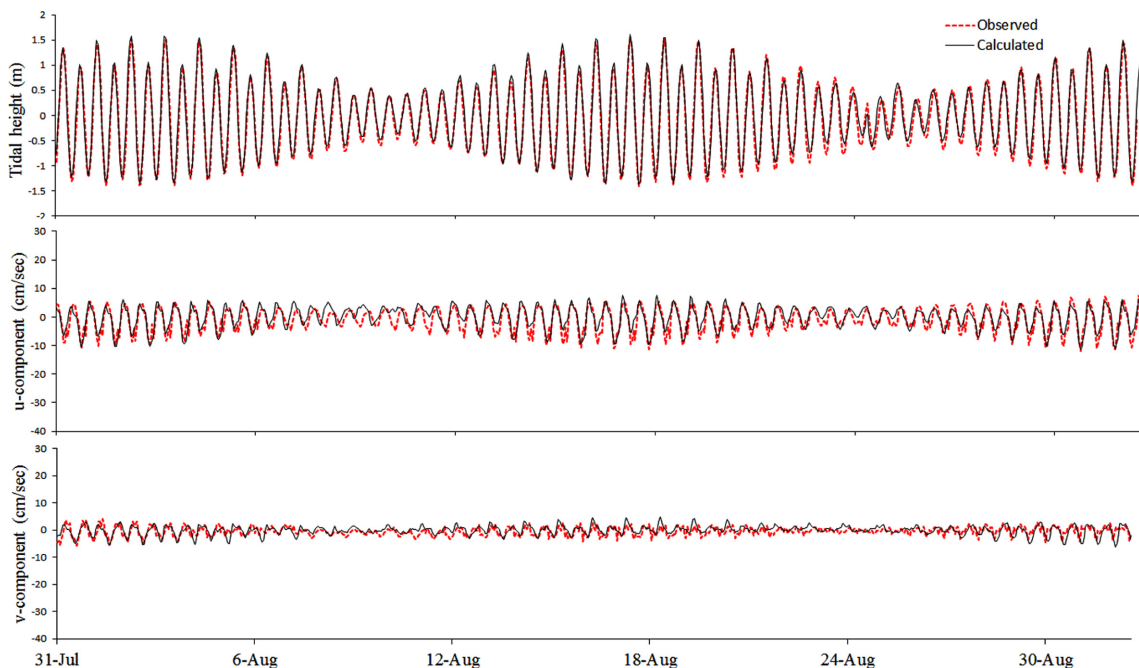


Fig. 4. Comparison between calculation and observation value of tidal height and current component (u, v) at station J2.

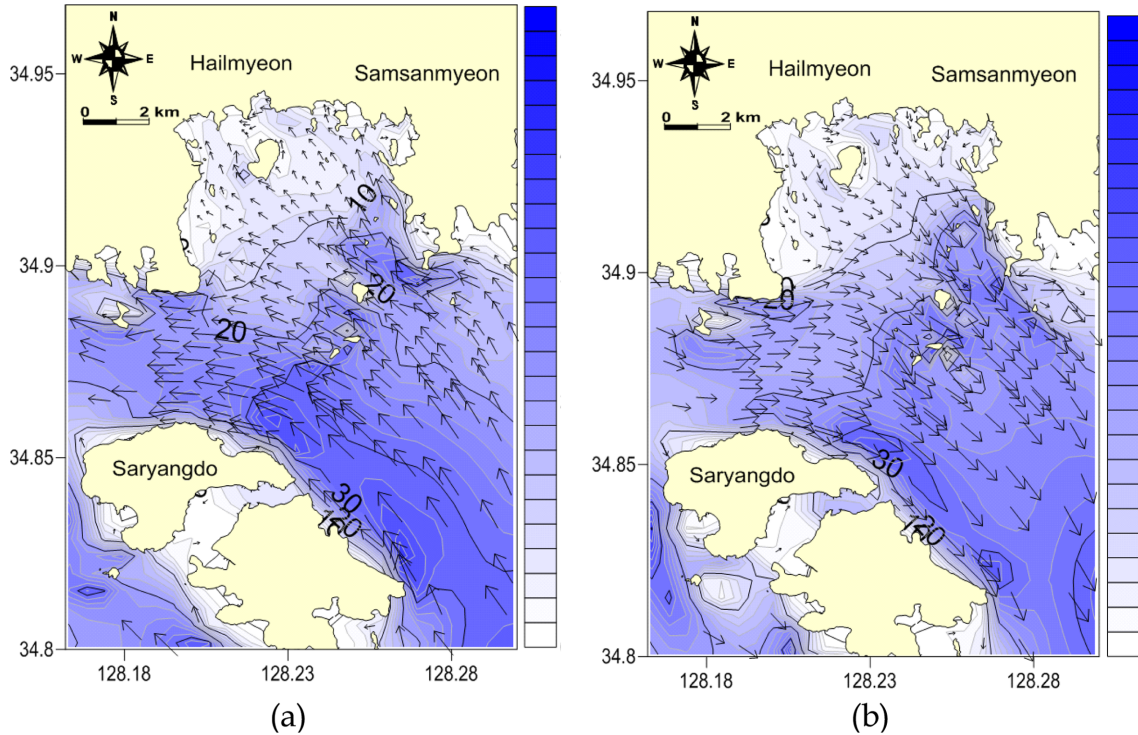


Fig. 5. Maximum current vectors computed in Jaran Bay during (a) flood and (b) ebb in spring tide conditions.

타났다. 이를 통해 수립된 모델이 자란만의 해수순환 특성을 잘 재현하고 있는 것으로 판단할 수 있었다.

### 3.2 자란만의 해수순환 특성

Fig. 5는 수립된 모델에서 계산한 자란만의 대조기의 창·낙조 해수순환 특성을 보여주고 있다. 대조기 창·낙조시에 사량도 북쪽 해역에서 20~30 cm/sec 내외의 흐름이 형성되며, 창조시에 남동쪽의 외해로부터 북서방향으로 해수가 진행하며 이 중 일부가 자란만 내로 유입한다. 자란만의 서쪽연안 유속은 약 4 cm/sec, 동쪽연안은 10 cm/sec로 서쪽에 비해 동쪽연안에서는 비교적 강한 흐름이 형성되는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 자란만의 북쪽에 위치한 하천을 통해 유입된 물질이 북서쪽의 내만에서는 해수의 소통이 원활하지 않아 장기간 체류하지만 북동쪽에서는 비교적 원활한 해수의 소통으로 인해 확산이 빠르게 이루어질 수 있는 환경임을 의미한다.

### 3.3 육상기인 오염물질의 age

자란만 해역으로 유입하는 주요하천을 통해 유입된 오염물질의 age를 계산하였다(Fig. 6). Age 계산 결과 자란만 서쪽 연안을 따라서 age가 15일 이상으로 나타나지만, 동쪽 연안에서는 5일 이하로 짧아 동-서간 거리 약 6 km 내에서 계산된 age 값은 10일 이상 차이를 보였다. 중앙해역에서는 10일 이상으로 나타났다. 이러한 결과는 자란만 북쪽의 하천들을 통해서 유입된 물질이 외해로 수송됨에 있어서 서쪽보다는 동쪽의 해안을 따라 수송되기 쉬운 환경임을 의미한다. 모델에서 계산한 조건과 같이 만약 바람이 없는

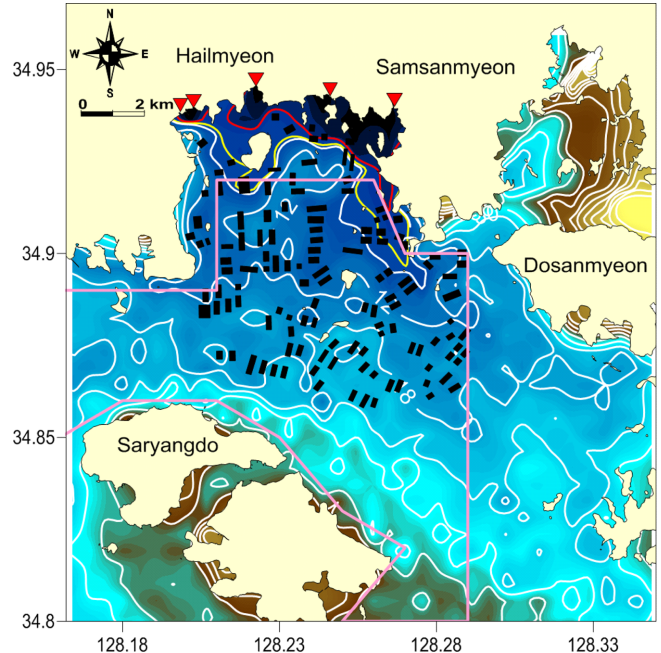


Fig. 6. Spatial distribution of averaged age of particle in Jaran Bay (red line : 3 days, yellow line : 5 days, pink line : designated shellfish growing area for export, black box : shellfish farm).

경우 하천을 통해 병원성 세균이나 부유성 오염물질이 자란만으로 유입되면 북동쪽 해역이 이들 오염물질에 쉽게 노출될 수 있는 것을 의미한다.

## 4. 고 찰

### 4.1 입자추적모델

연안의 물질 확산에 대한 연구에 있어서 Lagrangian 기반의 방법은 Eulerian 방법에 비해 수치적인 오류가 적고 입자를 추적하고 위치를 계산하는데 있어서 안정적인 장점이 있다(Suh[2006]). 본 연구에서 적용된 random walk method는 용존질량이 다수의 입자들 집합으로 구성되며 입자의 운동이 확정적인 이송 운동과 확률적인 확산 운동으로 구성되는 것으로 간주한다(Dimou and Adams[1993]). 이 때문에 입자 처리에 있어서 확률론적인 처리가 가능하다(Park et al.[2011]). 앞서 설명한 바와 같이 입자추적모델은 어떠한 성질도 없는 가상의 입자를 방류하여 각각의 입자가 해수의 흐름에 따라 이동하도록 각 입자의 위치를 계산한다(Suh and Lee[2011]). 만약 동일한 위치에 다수의 입자가 동시에 방류되면 모든 입자의 경로가 동일하게 계산되는 문제가 발생한다. 이러한 문제를 해결하기 위해 입자의 확산을 계산함에 있어서 임의의 수를 입력하여 강제적으로 다른 방향으로 확산이 이루어지게 하는데 이를 random walk method라 한다(Suh[2006]; Chung and Duyen[2012]). 이러한 방법

은 동일한 시간과 위치에서 방류된 입자들이 모두 다른 경로와 중점을 가지게 만들며 이를 통해 대상물질의 거동 특성에 대한 통계적인 분석이 가능하다(Park et al.[2009]). 따라서 방류할 입자의 수나 모델의 반복 횟수를 증가시키면 더욱 정확한 결과를 얻을 수 있다(Jung and Kim[2008]).

U.S. FDA(Food and Drug Administration)에서는 공중보건을 위해 이매패류 양식 지역에 대하여 분변성 대장균을 이용한 규제 제한과 모니터링 프로그램을 설정하고 있다(U.S. FDA[2017]). 이때 육상기인 오염원의 부하지점과 확산특성을 파악하기 위해서 염료를 이용하여 부하지점 별 거리에 따른 희석률을 파악하고 있다(Goblick et al.[2011]; U.S. FDA[2017]). 이때 부하지점을 기준으로 동심원을 이용하여 거리별 희석률을 표현하고 있는데 이러한 방법으로는 대상해역 해수순환의 공간적인 차이를 반영할 수 없다. 또한, 우리나라에서는 염료를 이용한 테스트를 엄격하게 규제하고 있어 현장관측을 하기에 적합하지 않다. 따라서 본 연구에서 제시한 입자추적모델을 이용한 age 계산 방법이 해역의 공간적인 해수순환 특성을 반영할 수 있어 육상기인 오염물질의 확산특성을 정량적으로 파악하기에 적합할 수 있다.

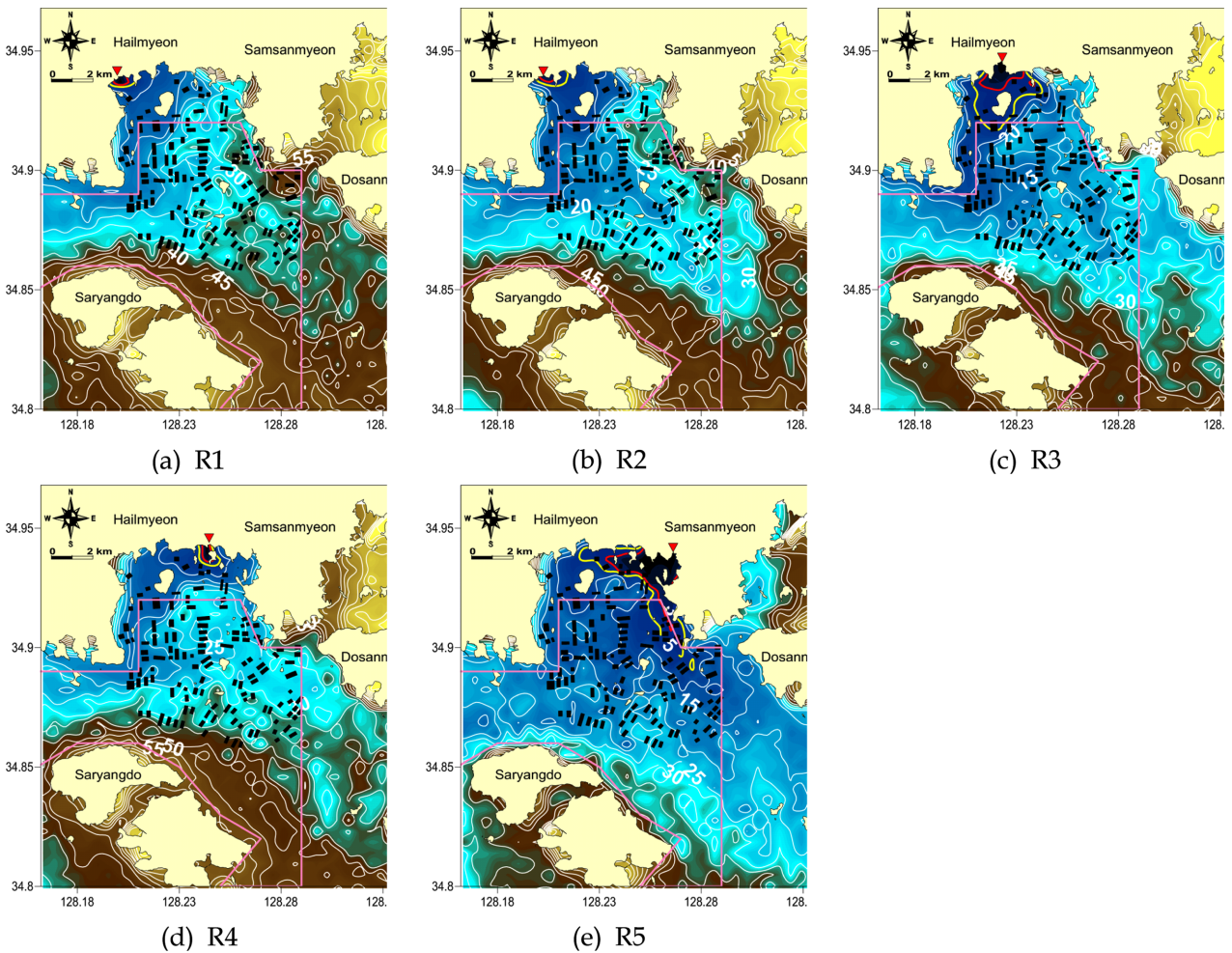


Fig. 7. Spatial distribution of age of anthropogenic pollutant from each rivers in Jaran Bay (red line : 3 days, yellow line : 5 days, pink line : designated shellfish growing area for export, black box : shellfish farm).

#### 4.2 분변계대장균 관측 결과와 비교

Shim *et al.*[2009]은 자란만 해역에서 하천을 통해 유입되는 분변계대장균수를 관측하여 자란만 패류생산해역의 위생학적 안전성을 평가한 바가 있다. 연구 결과에 따르면 분변계대장균수는 연안을 따라 높게 나타나며, 강수량이 많은 하계에 주로 자란만의 동쪽 연안을 따라 확산되는 것을 관측을 통해 밝힌바 있다. 이는 이번 연구에서 계산한 육상기인 오염물질의 age 공간분포와 일치하는 결과로 age 계산을 통해 육상기인 오염물질의 확산 범위를 정량적으로 판단할 수 있음을 시사한다.

대장균의 경우 일반적으로 해수 중에서 3일까지 생존하며 영양염의 유입이 있는 경우 생존기간은 더욱 증가할 수 있는 것으로 알려져 있다(Gerba and Mcleod[1976]). 본 연구에서 계산한 육상기인 오염물질의 age 결과는 바람이 없는 조건에서 유입된 물질이 3일 내에 수출용 패류생산 지정해역의 경계선까지 도달하지 않는 것으로 나타났다(Fig. 6). 하지만, 유입 5일 후에는 수출용 패류생산 지정해역의 북동쪽 해역까지 도달하는 것으로 나타났다. 만약 양식 굴이 출하되는 동계에 북풍계열의 바람이 지속적으로 형성된다면 북쪽의 하천을 통해 유입된 오염물질의 확산범위는 더욱 넓어질 것으로 판단할 수 있다. 또한, 본 연구에서 제시한 것과 같이 수출용 패류생산 지정해역 중 자란만의 동쪽 연안에 인접한 해역이 이러한 오염물질이 노출될 확률이 높을 것으로 추측할 수 있다.

#### 4.3 각 부하원별 age

Fig. 7은 각 하천별 age의 계산결과로 각 하천별 육상기인 오염원의 확산 특성을 알 수 있다. 이러한 결과는 앞서 설명한 바와 같이 특정 소해역에 나타나는 육상기인 오염물질의 유입지점에 대한 확률론적인 추측을 가능하게 한다. 즉, age 계산 결과 수출용 패류생산 지정해역 중 자란만의 동쪽 해역이 가장 취약할 수 있는 것으로 나타났으며(Fig. 6), 각 하천별 age 계산을 통해 동쪽에 위치한 R5 하천을 통해 유입되었을 것으로 추론할 수 있다(Fig. 7). 이러한 결과는 육상기인 오염물질 관리방안 수립시 관리대상을 전체 하천이 아닌 특정 하천이나 부하지점으로 한정할 수 있게 하며 패류양식해역의 효율적인 위생학적 관리 정책 수립에 기여할 것이다.

### 5. 결 론

본 연구에서는 입자추적모델을 이용하여 패류생산해역인 자란만으로 유입하는 육상기인 오염물질의 age를 계산하고 육상기인 오염물질의 패류생산해역 내 확산범위를 정량적으로 파악하였다. 계산된 age 값은 서쪽 연안에 비해 동쪽 연안을 따라 짧은 age가 계산되었다. 이는 자란만의 북쪽에 위치한 하천을 통해 유입된 오염물질이 서쪽 연안보다 동쪽 연안에서 빠르게 수송되는 것을 의미한다. 이는 동쪽해역이 짧은 시간 내에 육상기인 오염물질에 노출될 수 있는 환경이며 만약 하천을 통해 분변성 대장균이 유입될 경우 수출용패류생산지정해역의 북동쪽 해역에 영향을 미칠 수 있음을 의미한다. 또한, 각 하천 별 age의 결과를 근거로 자란만 북동쪽에

위치한 하천을 통해 유입된 오염물질의 확산범위가 가장 넓은 것으로 판단할 수 있다. 이는 향후 자란만 패류양식해역의 위생학적인 관리에 있어서 관리대상 우선 순위 하천을 선정할 경우 그 대상을 전체 부하원이 아닌 동쪽 연안에 위치한 부하원에 대한 집중관리의 과학적인 근거로 활용할 수 있을 것이다. 추후, 대상 오염물질을 특정하여 침강속도 등과 같은 정보를 반영한 확산범위 추산을 통해 오염물질에 따른 관리 정책을 수립할 수 있을 것이다.

### 후 기

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

### References

- [1] Balachandran, K.K., Reddy, G.S., Revichandran, C., Srinivas, K., Vijayan, P.R., Thottam, T.J., 2008, Modelling of tidal hydrodynamics for a tropical ecosystem with implications for pollutant dispersion (Cochin Estuary, Southwest India), *Ocean Dyn.*, 58, 259-273.
- [2] Bilgili, A., Proehl, J.A., Lynch, D.R., Smith, K.W., Swift, M.R., 2005, Estuary/ocean exchange and tidal mixing in a Gulf of marine estuary: A lagrangian modeling study, *Estuarine Coastal Shelf Sci.*, 65(4), 607-624.
- [3] Bolin, B., Rodhe, H., 1973, A note on the concepts of age distribution and transit time in natural reservoirs, *Tellus*, 25(1), 58-62.
- [4] Boynton, W.R., Garber, J.H., Summers, R., Kemp, W.M., 1995, Inputs, transformations, and transport of nitrogen and phosphorus in Chesapeake Bay and selected tributaries, *Estuaries*, 18, 285-314.
- [5] Carpenter, S.R., Caraco, N.F., Correll, D.L., Howarth, R.W., Sharpley, A.N., Smith, V.H., 1998, Nonpoint pollution of surface waters with phosphorus and nitrogen. *Ecol. Appl.*, 8(3), 559-568.
- [6] Chung, D.H., Duyen, N.T.K., 2012, Sensitivity of lagrangian particle tracking based on a 3D numerical model, *J. Mod. Phys.*, 3, 1972-1978.
- [7] Deleersnijder, E., Campin, J.M., Delhez, E.J.M., 2001, The concept of age in marine modelling I. Theory and preliminary model results, *J. Mar. Syst.*, 28, 229-267.
- [8] Delhez, E.J.M., Campin, J.M., Hirst, A.C., Deleersnijder E., 1999, Toward a general thoery of the age in ocean modelling, *Ocean Modell.*, 1(1), 17-27.
- [9] Dimou, K.N., Adams, E.E., 1993, A random-walk, particle tracking model for well-mixed estuaries and coastal waters, *Estuarine Coastal Shelf Sci.*, 37(1), 99-110.
- [10] England, M.H., 1995, The age of water and ventilation timescales in a global model, *J. Phys. Oceanogr.*, 25, 2756-2777.
- [11] 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, *Mar. Pollut. Bull.*, 42(6), 432-443.
- [12] Gerba, C.P., McLeod, J.S., 1976, Effect of sediments on the survival of *Escherichia coli* in marine waters, *Appl. Environ. Microbiol.*, 32(1), 114-120.
- [13] Goblick, G.N., Anbarchian, J.M., Woods, J., Ill, W.B., Calci, K., 2011, Evaluating the dilution of wastewater treatment plant effluent and viral impacts on shellfish growing areas in Mobile Bay, Alabama, *J. Shellfish Res.*, 30(3), 979-987.
- [14] 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.
- [15] Jang, S.W., Kim, D.H., Seong, K.T., Chung, Y.H., Yoon, H.J., 2014, Analysis of floating debris behaviour in the Nakdong River basin of the southern Korean peninsula using satellite location tracking buoys, *Mar. Pollut. Bull.*, 88(1-2), 275-283.
- [16] Jung, T.S., Kim, T.S., 2008, Prediction system of hydrodynamic circulation and freshwater dispersion in Mokpo coastal zone, *J. Korean Soc. Mar. Environ. Energy*, 11(1), 13-23.
- [17] Kim, J.H., Lee, W.C., Hong, S.J., Park, J.H., Kim, C.S., Jung, W.S., Kim, D.M., 2016, A study on temporal-spatial water exchange characteristics in Gamak Bay using a method for calculating residence time and flushing time, *J. Environ. Sci. Int.*, 25(8), 1087-1095.
- [18] 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 Sci. J.*, 54, 559-571.
- [19] Kim, T.Y., Yoon, H.S., 2011, Skill assessments for evaluating the performance of the hydrodynamic model, *J. Korean Soc. Mar. Environ. Energy*, 14(2), 107-113.
- [20] Kimmerer, W.J., Gross, E.S., MacWilliams, M.L., 2014, Tidal migration and retention of estuarine zooplankton investigated using a particle-tracking model, *Limnol. Oceanogr.*, 59(3), 901-916.
- [21] Lemagie, E.P., Lerczak, J.A., 2015, A comparison of bulk estuarine turnover timescales to particle tracking timescales using a model of the Yaquina Bay Estuary, *Estuaries Coasts*, 38, 1797-1814.
- [22] Liu, W.C., Chen W.B., Hsu, M.H., 2011, Using a three-dimensional particle-tracking model to estimate the residence time and age of water in a tidal estuary, *Comput. Geosci.*, 37(8), 1148-1161.
- [23] Lugo-Fernandez, A., Deslarzes, K.J.P., Price, J.M., Boland, G.S., Morin, M.V., 2001, Inferring probable dispersal of Flower Garden Banks Coral Larvae (Gulf of Mexico) using observed and simulated drifter trajectories, *Cont. Shelf Res.*, 21(1), 47-67.
- [24] Marechal, D., 2004, A soil-based approach to rainfall-runoff modeling in ungauged catchments for England and Wales, Ph.D Thesis, Cranfield University, 157.
- [25] Mee, L., 2012, Between the devil and deep blue sea: the coastal zone in an era of globalisation, *Estuarine Coastal Shelf Sci.*, 96(1), 1-8.
- [26] 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, *Limnol. Oceanogr.*, 47(5), 1545-1553.
- [27] Park, S. E., Hong, S. J., Lee, W. C., 2009, Calculating average residence time distribution using a particle tracking model, *J. Ocean Eng. Technol.*, 23(2), 47-52.
- [28] Park, S. E., Lee, W. C., Hong, S. J., Kim, H. C., Kim, J. H., 2011, Variation in residence time of pollutants over a tidal cycle in Masan Bay, *Korean Soc. Mar. Environ. Eng.*, 14(4), 249-256.
- [29] Perianez, R., Elliott, A.J., 2002, A particle-tracking method for simulating the dispersion of non-conservative radionuclides in coastal waters, *J. Environ. Radioact.*, 58(1), 13-33.
- [30] Salama, N.K.G., Rabe, B., 2013, Developing models for investigating the environmental transmission of disease-causing agent within open-cage salmon aquaculture, *Aquacult. Env. Interac.*, 4, 91-115.
- [31] Shen, J., Lin, J., 2006, Modeling study of the influences of tide and stratification on age of water in the tidal James River, *Estuarine Coastal Shelf Sci.*, 68(1-2), 101-112.
- [32] Shen, J., Wang, H., 2007, Determining the age of water and long-term transport timescale of the Chesapeake Bay, *Estuarine Coastal Shelf Sci.*, 74(4), 585-598.
- [33] Shim, K.B., Ha, K.S., Yoo, H.D., Kim, J.H., Lee, T.S., 2009, Evaluation of the bacteriological safety for the shellfish growing area in Jaranman·Saryangdo area, Korea, *Korean J. Fish. Aquat. Sci.*, 2009, 42(5), 442-448.
- [34] Smyth, D., Kregting, L., Elsaber, B., Kennedy, R., 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.
- [35] Suh, S.W., 2006, A hybrid approach to particle tracking and Eulerian-Lagrangian models in the simulation of coastal dispersion, *Environ. Modell. Software*, 21(2), 234-242.
- [36] Suh, S.W., Lee, H.Y., 2011, Analysis of hydrodynamic change around the Saemangeum area using a particle tracking method, *J. Korean Soc. Coast. Ocean Eng.*, 23(6), 442-450.
- [37] Takeoka, H., 1984, Fundamental concepts of exchange and transport time scales in a coastal sea, *Cont. Shelf Res.*, 3(3), 311-326.
- [38] U.S. Food and Drug Administration (FDA), 2017, National shellfish sanitation program, Guide for the control of molluscan shellfish: 2017 Revision.
- [39] Wells, M., Bailey, S.A., Ruddick, B., 2011, The dilution and dispersion of ballast water discharged into Goderich Harbor, *Mar. Pollut. Bull.*, 62(6), 1288-1296.
- [40] 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, *Neth. J. Sea Res.*, 10(2), 149-191.

---

Received 7 January 2020

Revised 5 February 2020

Accepted 13 February 2020