

## 담수 확산에 미치는 바람과 해저 지형의 영향

### Wind and Bathymetry Effects on the Fresh Water Plume Structures

이정우<sup>†</sup> · 윤상린 · 오혜철

Jungwoo Lee<sup>†</sup> · Sang-leen Yun · Hye-cheol Oh

한국건설기술연구원 환경연구실

Environmental Engineering Research Division, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

(Received October 8, 2014; Revised October 28, 2014; Accepted October 30, 2014)

**Abstract :** The structures of fresh water plume depending on estuarine geometries and wind directions (upwelling, onshore, downwelling, and offshore winds) were studied using the Regional Ocean Modeling System (ROMS). Four idealized estuaries, which are different in bathymetry, were considered. The results showed that the fresh water plume was restricted close to the shore line where a river was connected to the sloping shelf rather than the flat shelf due to the fast momentum exchanges from x, y to z momentums on the sloping shelf. Mild upwelling and offshore winds ( $|\tau_w|=0.01Pa$ ) enhanced stratification on the contrast to previous studies which showed that winds destroyed stratification by enhanced vertical mixing. However, downwelling and onshore winds had similar effects on the vertical structure of the fresh water plume as in previous studies enhancing vertical mixing. The plume was confined above the underneath submarine channel, thus the plume path was directly affected by the direction of the submarine channel on the shelf.

**Key Words :** Plume, Estuary, Wind Effect, Bathymetric Effect, Regional Ocean Modeling System (ROMS)

**요약 :** 강어귀의 기하학적 특징과 바람의 방향(upwelling, onshore, downwelling, and offshore winds)에 의한 담수 확산의 변화에 대하여 3차원 해양 순환 모델인 Regional Ocean Modeling System (ROMS)을 이용하여 연구하였다. 총 4개의 입구의 강어귀를 가정하였으며, 담수가 수심이 깊어지는 바다(sloping shelf)에 진입했을 경우가 편평한 바다(flat shelf)에 진입한 경우에 비해 빠른 x, y 운동량(momentum)의 상실과 상대적으로 강한 Coriolis 효과로 인하여 외해로의 담수 확산이 제한되는 것으로 연구되었다. 바람은 수직혼합을 촉진시켜 성층현상을 파괴한다는 기존 연구에 반해 약용승풍(mild upwelling winds)과 외해풍(offshore winds)의 경우( $|\tau_w|=0.01Pa$ ) 성층현상을 촉진시키는 것으로 연구되었다. 이와는 반대로 침강풍(downwelling winds)과 연안풍(onshore winds)의 경우 기존 연구와 같이 성층을 파괴하는 것으로 연구되었다. 해저 물길(submarine channel)은 담수 확산에 직접적인 영향을 주며 물길의 방향 또는 폭 등과 같은 해저 물길의 기하학적 특징에 의해 담수의 확산 정도가 달라지는 것으로 연구되었다. 또한 해저 물길은 담수 확산을 해저 물길의 상층부로 강하게 제한하는 것으로 연구되었다.

**주제어 :** 담수 확산, 강어귀, 바람의 영향, 지형의 영향, ROMS

## 1. 서론

강어귀(estuary)에서 일어나는 담수플룸(freshwater plume or river plume) 확산은 다양한 해양 물리 현상 중 오염원의 이동 확산과 밀접한 관련이 있어 많은 연구가 진행되어 왔다. 특히 다수의 연구가 담수 확산의 구조적 특징에 대해 이루어 졌다.<sup>1-4)</sup> 특히 Garvine은 강어귀에서 발생하는 담수 확산을 강의 크기와 관련하여 연구하였으며,<sup>2)</sup> 이를 통해 Kelvin number  $Ke(Ke = B/R_1$ , 여기서 B는 강의 폭,  $R_1$ 은 internal Rossby Radius ( $R_1 = \sqrt{g'h}/f$ )를 적용하여 fresh water plume을  $Ke \gg 1$  인 경우와  $Ke \ll 1$  인 경우로 나누어 구분하였다. 그러나 그의 연구는 담수 확산이 Coriolis effects에 어느 정도 영향을 받는지에 대한 개괄적인 정보를 주기는 하지만 강어귀의 기하학적 특징에 대한 담수 확산의 영향에 대해서는 논의할 수 없다.

강어귀는 지형학적 특징으로 인해 담수의 영향을 지배적으로 받는 강과 해수의 영향을 지배적으로 받는 연안해안

(shelf)이 만나는 곳이다. 따라서 담수 확산은 강과 연안해안 두 개의 지형의 특징에 따라 영향을 받을 수밖에 없다. 그러나 많은 연구자들이 강의 기하학적 영향을 배제하고 해양에서의 담수 확산에 중점을 둔 연구를 진행하였다. 특히 수치 모델을 이용한 담수 확산 모의를 위해 많은 연구자가 단순한 구조의 사각형 모양의 강이 바다에 연결되는 것으로 가정한 연구를 진행하거나,<sup>5-8)</sup> 또는 해안에 점원으로써(point source) 존재하는 것을 가정한 연구를 하였다.<sup>9-11)</sup> 이러한 이유로 본 연구에서는 기존 연구에 더하여 다른 종류의 기하학적 형태를 갖는 강뿐만 아니라 바다의 기하학적 특징에 따른 담수 확산이 받는 영향을 연구하고자 하였다. 특히 바다의 기하학적 특징을 연구하기 위해 본 연구에서는 해저 물길(submarine channel)이 바다에 존재하는 경우에 대한 담수의 확산 반응을 연구하였다. 해저 물길이 해수 순환에 미치는 영향에 대해서는 Weaver<sup>12)</sup>의 연구가 있으나 그들의 연구에서는 해저 물길이 강과 일직선이 되는 방향으로 유지된 경우에 국한된 연구를 하였으며, 본 연구

<sup>†</sup> Corresponding author E-mail: jungwoo33@kict.re.kr Tel: 031-995-0892 FAX: 031-910-0291

는 해저 물길에 방향성을 부여함으로써 기존 연구와는 다르다고 할 수 있다.

담수 확산에 영향을 미치는 다양한 요소 중의 하나로 바람을 들 수 있다. 담수 확산에 대한 바람의 영향은 주로 강 내부 또는 바다로 나뉘어 연구되어왔다. 즉 한 개의 연결된 환경이 아닌 각각의 독립된 환경에 대해 연구되어왔다. 예를 들어 Scully<sup>13)</sup>는 York River 내부에서의 담수 확산에 대해 연구하였으며, 그는 바람이 성층현상을 강화시키는 것을 발견했다. 이는 이전 연구자들이 발견한 바람은 성층현상을 파괴한다는 것에 반하는 연구 결과였다.<sup>14-16)</sup> 그러나 이러한 연구는 위에서 언급한 바와 같이 강어귀를 하나의 시스템으로 연결하여 연구했다기보다는 강과 바다 각각에 대해 연구한 경우이다. 따라서 본 연구에서는 강어귀에서의 담수 확산에 연구의 초점을 맞추었으며, 강과 바다를 하나의 시스템으로 연결하여 연구하였다. 바람은 4개의 방향(upwelling, onshore, downwelling, and offshore winds)에 대해 강어귀로 부는 것을 가정한 연구를 진행하였다.

## 2. 연구방법

강어귀에서 담수 확산에 미치는 바람과 해저 지형의 영향을 연구하기 위해 본 연구에서는 3차원 해양 순환 모델인 the regional ocean modeling system (ROMS)를 이용하였다. 4개의 서로 다른 지형을 가진 강어귀가 본 연구를 위해 인위적으로 구성되었으며 그들은 다음과 같다: (1) 직사각형의 횡단면을 갖는 강이 수심이 일정한 (또는 편평한) 바다를(flat shelf) 만나는 경우, (2) 직사각형의 횡단면을 갖는 강이 수심이 변하는 바다를(sloping shelf) 만나는 경우, (3) 삼각형의 횡단면을 갖는 강이 수심이 변하는 바다를 만나는 경우, 그리고 (4) 포물선 모양의 횡단면을 갖는 강이 수심이 일정한 바다를 만나며 바다에 해저 수로(submarine channel)가 존재하는 경우. 모의시험을 위하여 영역 내 강의 지형은 강폭 20 km 그리고 강의 길이를 100 km로 설정하였다. 이는 강 상류에서 유입되는 담수의 영향으로부터

Table 1. Description of the model domain

Case #	Channel-shape	B (km)	H (m) / Wall depth (m)	Shelf slope
1	Rectangular	20	10 / 10	Flat
2	Rectangular	20	10 / 10	Sloping (0.001)
3	Triangular	20	15 / 5	Sloping (0.001)
4	Parabolic	20	20 / 10	Flat (downshelf-turning)

담수 확산이 직접적인 영향을 받지 않게 하기 위함이다. 또한 바다 경계면(offshore boundary)은 강어귀로부터 100 km 떨어지게 구성하였으며, 이는 강어귀에서의 담수 확산이 외해에서의 조위변화에 대해 직접적인 영향을 받지 않게 하기 위함이다. 위에서 제시한 4개의 지형에 대해 Table 1과 Fig. 1에 설명하였다. 모델 격자의 크기는 한 변의 길이가 최대 500 m를 넘지 않게 구성하였으며 이는 Drijhout와 Lindow가 제시한 ‘모델 격자의 크기는 내부 Rossby 반경(internal Rossby radius)의 1/3이 넘지 않아야 된다’라는<sup>17,18)</sup> 기준에 부합하기 위함이다.

지배방정식 내의 운동량(momentum)과 염분 식 내의 수직 확산 항에 대해서는 Mellor-Yamada level-2.5 turbulence closure model을 이용하였다. 바닥 저항은 logarithmic bottom roughness를 사용하였으며 roughness height는 2 cm를 사용하였고, 강의 측면 저항은 없는 것으로 가정하였다. 편향력(Coriolis effects)의 영향을 고려하기 위해 Coriolis parameter는 위도 30°N에 해당하는  $7.25 \times 10^{-5}/s$ 를 사용하였으며 beta effect는 없는 것으로 가정하였다.

모델의 초기 조건으로는 20°C와 35 g/kg의 염분을 함유한 바닷물이 모델 영역(computational domain) 전체에 움직이지 않는 상태로 차 있으며, 같은 온도의 담수가 단위 면적당 2 cm/s로 강 상류로부터 유입되는 것을 가정하였다. 외해 경계조건으로는 0.5 m의 조차와(tidal amplitude) 12시간의 조석 주기를 갖는(S<sub>2</sub> tide) 조석 변화를 가정하고 모델에 적용하였다. 모델의 북쪽과 남쪽 경계조건으로는 자유 수면과 염분에 대해 각각의 구배를 0으로 적용하였다(zero

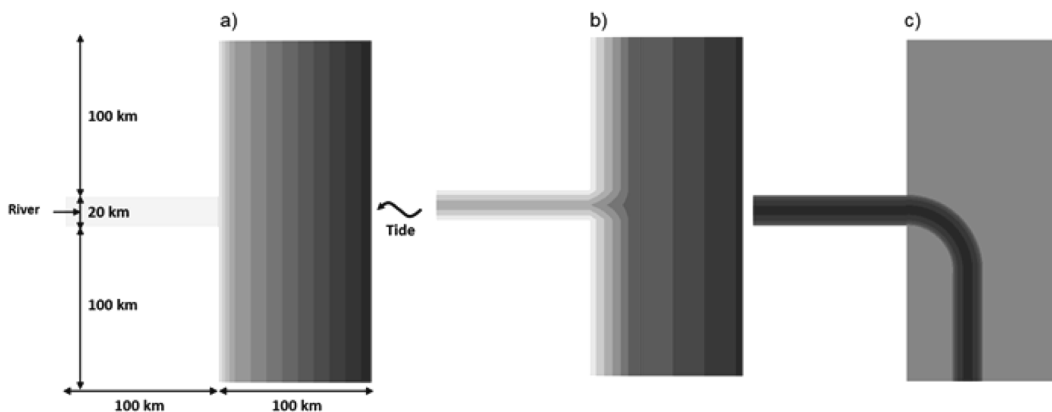


Fig. 1. Model domains and bathymetries. a) The rectangular channel with a sloping shelf (Case 2), b) the triangular channel with a sloping shelf (Case 3), and c) the parabolic channel with a downshelf turning submarine channel. The bathymetry for the Case 1 is exactly same as Case 2 except it has a flat shelf.

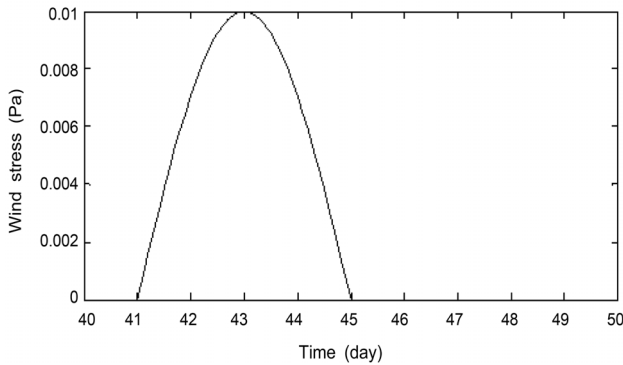


Fig. 2. Applied wind stress in time.

gradient condition). 안정적인 모델 실행을 위해 6초의 barotropic time step (external mode, 2D)과 60초의 baroclinic time step (internal mode, 3D)를 사용하였다. 모델 실행 결과 40일 이후에는 quasi-steady state에 도달하는 것으로 나타났다. 따라서 바람의 영향을 고려한 연구는 40일 이후에 적용하였다. 담수 확산에 미치는 바람의 영향을 연구하기 위해  $|\tau_w| = 0.01 Pa$ 의 약한 바람이 4개의 방향(upwelling, on-shore, downwelling, and offshore winds)에서 부는 것을 가정하였다. 바람은 8시간 주기를 갖는 것으로 가정하였으며 (the ideal sinusoidal wind), quasi-steady state에 도달한 이후 2틀째 되는 날부터 4일간(41일~45일) 각각의 방향에서 부는 것으로 가정하였다(Fig. 2). 따라서 본 연구에서는 Table 1에서 제시된 4개의 지형적 특징에 바람의 영향이 없는 경우와 각각 4방향의 바람을 적용한 경우로 총 20개의 시나리오를 구성하였다: Case 1~4, Case 1a~1d, Case 2a~2d, Case 3a~3d, Case 4a~4d.

### 3. 결과 및 고찰

각각의 시나리오에는 모두 단위면적당 동일한 담수가 유입되며( $2 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^2$ ), 동일한 외해 경계조건을 갖는다. 몇몇 이전 연구에서는<sup>1,3,11)</sup> Coriolis 방향과 반대되는 방향으로 확산되는 plume형태를(즉, plume의 upshelf intrusion) 방지하기 위해 upshelf boundary에 downshelf 방향으로 인위적인 유속을 주기도 하였다. 그러나 이러한 방법은 담수 확산에 대한 지형의 영향을 순수하게 반영하기 어렵기 때문에 본 연구에서는 고려하지 않았다. 따라서 본 연구에서 담수 확산이 Coriolis 방향으로 확산되는 것은 순수하게 Coriolis 영향에 의한 것임을 밝힌다.

#### 3.1. 지형의 영향(no wind condition)

바람의 불지 않는 상태에서의 각각의 지형에 대한 담수 확산의 결과는 Fig. 3과 같다. Fig. 3은 위에서 볼 때의 염분장에 대한 등밀도선(鹽度線)의 top view of iso-surfaces of salinity) 나타내며, 각각의 색은 20, 25, 30, 그리고 34 g/kg의 염분장을 나타낸다. 각각의 그림은 (Fig. 3(a)~(d)) Table 1에서

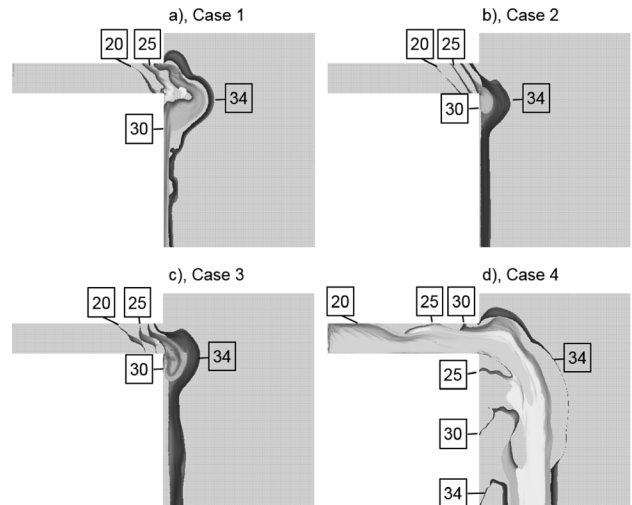


Fig. 3. The top view of iso-surfaces of salinity of 20, 25, 30, and 34 g/kg for 4 bathymetry cases: a) rectangular and flat shelf, b) rectangular and sloping shelf, c) triangular and sloping shelf, and d) parabola and down-shelf turning channel cases. These are the results of no wind condition.

제시한 Cases 1~4에 해당한다. 먼저 각각의 시나리오는 Coriolis effects에 의해 plume진행방향의 오른쪽으로 확산되는 동일성 이외에는 모두 다른 형태의 담수 확산 형태를 갖는 것을 알 수 있다.

첫 번째 시나리오의 경우(Case 1, Fig. 3(a)) 담수가 바다를 만났을 경우 Coriolis 방향으로 치우친 종 모양의 plume 형태를 갖는 것을 확인할 수 있었다. 또한 Coriolis 방향과 반대방향으로 어느 정도의 upshelf intrusion이 발생함을 알 수 있다. 이는 대부분의 연구자들이 모델에서 기피하는 현상으로써 많은 연구자들이 이러한 현상을 방지하기 위해 앞에서 제시한 ambient current를 downshelf 방향으로 추가하기도 한다. 그러나 본 연구에서 발생한 upshelf intrusion은 강어귀에서 발생하는 geostrophic adjustment에 의한 것으로서<sup>10)</sup> 담수 확산의 한 형태로 봐야 할 것이다. Case 1에 비해(직사각형의 강이 flat shelf를 만났을 때) Case 2의 경우(직사각형 형태의 강이 sloping shelf를 만났을 때) 바다에서의 지형적 영향으로 외해로의 담수 확산이 연안 해안으로 제한되는 것으로 모의되었다. 이는 강이 sloping shelf를 만났을 때 along-estuary momentum이 빠르게 약화되기 때문이며, Coriolis effects가 Case 2가 Case 1에 비해 상대적으로 크기 때문이다.<sup>19)</sup> 따라서 강이 sloping shelf를 만났을 경우 그렇지 않은 경우에 비해 담수 확산이 진행방향의 오른쪽으로 빠르게 확산된다고 할 수 있다. 또한 Case 2의 경우 Case 1에서 보였던 upshelf intrusion이 발생하지 않는 것으로 모의되었는데, 이는 강어귀에서의 수심이 깊어질수록 upshelf coastal plume propagation이 제한된다는 Garvine의 연구와<sup>20)</sup> 같은 결과라고 할 수 있다.

Case 3이(삼각형 형태의 횡단면을 갖는 강이 바다를 만났을 경우) Case 2와의 차이점은 외해로의 담수 확산이

Case 3가 더 크다는 것이다. Case 2와 Case 3의 경우 담수 확산 면적은 각각 20.5 km와 24.5 km로 Case 3이 크게 나타났다. 이러한 차이는 강어귀에서 유속장의 차이에 기인한다. 삼각형 형태의 강은 기하학적 영향으로 가장 빠른 유속이 삼각형의 중심 부분에 형성된다(0.45 m/s at the mid-channel in Case 3). 그러나 이에 비해 사각형 형태의 강은 삼각형 형태의 강에 비해 단면적 전체에 유속이 고르게 분포하는 형태를 갖는다(0.2 m/s at the midchannel in Case 2). 따라서 강의 기하학적 형태의 차이는 유속장의 형태에 영향을 주고, 강어귀에서의 유속장의 차이는 바다에서의 담수 확산에 영향을 준다.

강의 지형이 바다에까지 유지되는 경우, 즉 Case 4의 경우 담수 확산의 형태가 다른 시나리오에 비해 매우 다른 형태를 갖는 것으로 연구되었다. 해저에 물길(submarine channel)이 존재할 경우 강으로부터 기인하는 담수는 이 물길을 따라 이동함을 알 수 있다. 따라서 해저 물길의 방향에 따라 또는 해저 물길의 깊이에 따라 담수 확산은 영향을 받을 수 있는 것으로 연구되었다. 또한 해저 물길이 존재할 경우 그리고 해저 물길이 강어귀에 연결되었을 경우 그렇지 않은 경우에 비해 바닷물이 강 상류로 빠르고 강하게 확산되는 것을 알 수 있다. 따라서 해저 물길이 존재할 경우 그렇지 않은 경우에 비해 salt intrusion에 의한 성층 현상이 강하게 발생할 수 있음을 나타낸다. 이러한 해저 물길은 비단 담수의 확산뿐만 아니라 오염원의 이동에도 크게 영향을 미칠 것으로 판단되기에 향후 진행되는 강어귀 연구에 중요한 요소로 판단된다.

### 3.2. 바람의 영향(Case 1a~Case 4d)

만약 Case 1의 지형에 upwelling favorable winds가 불면 바람이 불지 않을 때에 비해 수직적으로 분포하던 염분장의 형태가 수평적으로 바뀌며 담수 확산이 외해로 더 발달하는 것을 알 수 있다(Fig. 3(a) vs. 4(a)). 이는 upwelling wind가 불 경우 주로 해수면으로 확산되는 담수가 외해로 빠르게 전달되며, 또한 upwelling 현상으로 인해 특히 downshelf의 해안에서 염분 농도가 증가함을 의미한다. 이러한 현상을 통해 upwelling wind가 발생했을 경우 강의 상류에서 발생한 현상이 외해로 빠르게 전달되며 성층현상이 가속화 되어 수직 혼합이 제한되는 것을 알 수 있다. 만약 onshore wind가 발생할 경우 바람이 없을 때에 비해 downshelf에서 수직혼합이 상대적으로 강하게 일어나며 이에 따라 downshelf에서의 성층이 파괴되는 것을 알 수 있다(Fig. 3(a) vs. 4(b)). 이에 반해 upshelf에서는 바람이 없을 때에 비해 성층 현상이 발달하는 것으로 모의되었다. 바람이 없을 때 강어귀에서 밀도 차에 의해 발생하는 성층현상은 downshelf wind가 불 때 가장 크게 파괴되는 것으로 연구되었다(Fig. 3(a) vs. 4(c)). 이는 downwelling wind의 특성과 Ekman transport의 영향에 기인한다고 할 수 있다. 강물 진행 방향인 offshore wind가 불 때는 전체적으로 수직 방향으

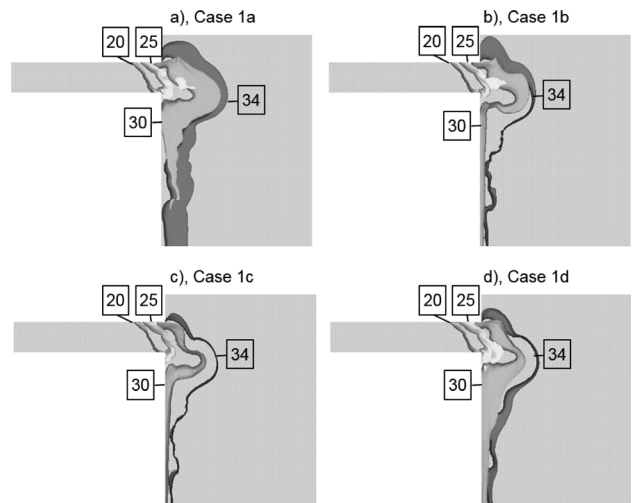


Fig. 4. Plume structures for Case 1: a) upwelling, b) onshore, c) downwelling, and d) offshore winds cases.

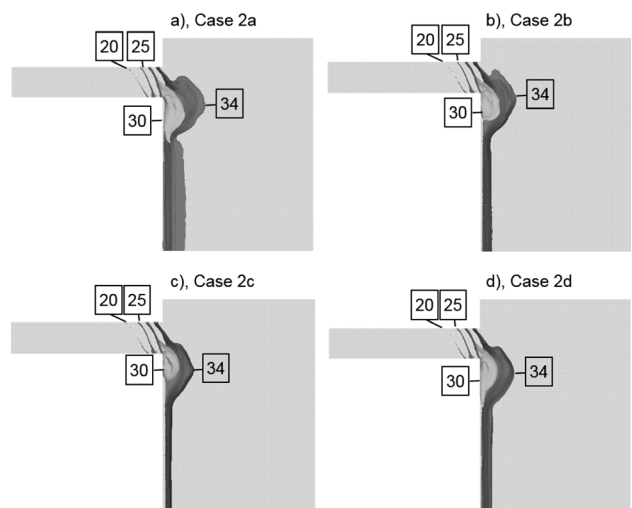


Fig. 5. Plume structures for Case 2: a) upwelling, b) onshore, c) downwelling, and d) offshore winds cases.

로의 salinity gradient가 발달하는 것으로 모의되었다(Fig. 3(a) vs. 4(d)).

편평한 연안해안(Case 1) 또는 점점 수심이 깊어지는 특징을 갖는 해안(Case 2)에 대한 바람의 영향은 바람이 담수 확산에 미치는 영향의 정도라고 할 수 있다. 강이 sloping shelf를 만났을 경우는 x, y momentum 향에 비해 z momentum 향이 상대적으로 큰 수체에 진입함으로써 강에서 갖고 있던 x, y momentum이 상대적으로 빠르게 약화된다.<sup>19)</sup> 따라서 수심이 갑자기 변하는 지역에서는 수심 변화 방향으로의 혼합이 상대적으로 잘 일어나지 않는 현상이 발생한다(Csanady; Wright).<sup>21-23)</sup> 이러한 이유로 본 연구에서도 Case 2의 경우 Case 1에 비해 바람의 영향에 의한 담수 확산의 정도가 약하게 나타나고 있다(Fig. 4 vs. 5).

강의 기하학적 영향 또한 동일한 바람 조건에서도 담수 확산에 영향을 미치는 것으로 연구되었다. Upwelling wind가 부는 상황에서 강의 횡단면이 사각형일 때보다(Cases 1

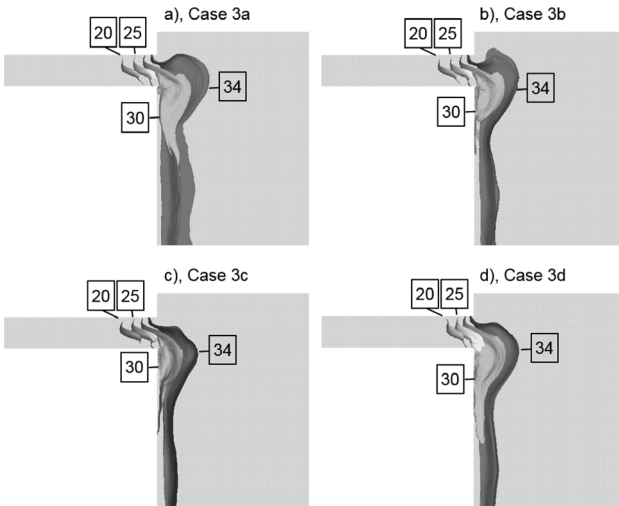


Fig. 6. Plume structures for Case 3: a) upwelling, b) onshore, c) downwelling, and d) offshore winds cases.

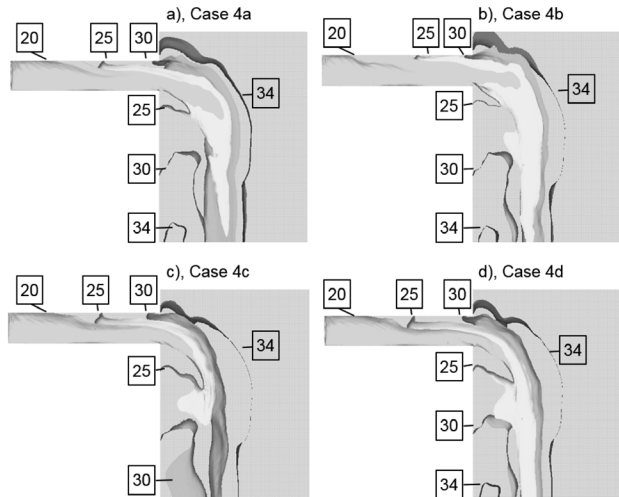


Fig. 7. Plume structures for Case 4: a) upwelling, b) onshore, c) downwelling, and d) offshore winds cases.

and 2) 강의 횡단면이 삼각형일 때(Case 3) downshelf로의 담수 확산이 강하게 일어나는 것으로 모의되었다(Fig. 6). 이러한 현상은 위에서 설명한 바와 같이 강의 기하학적 모양에 따라 강 횡단면에서의 유속장의 형태가 다르게 나타나기 때문이며, 강의 횡단면 중 가장 깊은 지형인 강의 중앙(thalweg)으로의 salt intrusion이 강하게 일어나기 때문인 것으로 판단된다. 이런 salt intrusion은 upwelling wind에 의한 Ekman transport와의 균형을 맞추기 위해 일어나며, 강한 salt intrusion은 상대적으로 강한 담수 확산을 야기한다. 따라서 삼각형 형태의 강의 존재는 사각형 형태의 강에 비해 담수 확산에 대해 상대적으로 바람에 민감하게 작용한다고 할 수 있다.

바다의 하상에 존재하는 submarine channel은 물의 흐름을 submarine channel 안으로 강하게 제한하는 것으로 연구되었다. 이런 현상은 submarine channel의 양 가장자리에서 (또는 경계면에서) 강한 유속 경사(velocity gradient)를 형

성한다. 일반적으로 강한 velocity gradient는 혼합을 강화하기 때문에 확산을 촉진시키는 것으로 알려져 있다. 그러나 Lee and Valle-Levinson은<sup>24)</sup> 강한 velocity gradient는 두 수층간 확산을 방지하는 기능도 있음을 밝힌 바 있다. 이런 현상은 submarine channel이 존재할 때 발생하며, 이에 따라 본 연구에서는 submarine channel이 존재할 때 담수 확산도 바람의 영향을 덜 받는 것으로 본 연구에서 연구되었다(Fig. 7). 특히 upwelling winds가 불 때 외해로의 담수 확산정도는 submarine channel이 없는 경우에 비해 거의 변화가 없음을 알 수 있었다.

#### 4. 결론

강어귀에서 발생하는 담수 확산에 대해 본 연구는 4개의 기하학적으로 서로 다른 형태의 강어귀를 구성하여, 바람의 방향이 각각의 강어귀에 대한 담수 확산 정도에 미치는 영향을 연구하였다. 본 연구에서는 3차원 해양 순환 모델인 ROMS를 사용하였으며 강의 경계조건과 외해의 경계조건을 동일하게 유지하고 각각의 경우에 대해 연구하였다. 먼저 강이 편평한 바다와 연결되어 있을 경우 그렇지 않은 경우에 비해 상대적으로 넓은 담수 확산이 일어나는 것으로 연구되었다. 이 결과는 Newton's first law인 'the law of inertia'와 직접적인 연관이 있다. 담수가 sloping shelf를 만났을 경우 상대적으로 z momentum이 강한 지역과 만남으로 인해 담수 확산에 필요한 x, y momentum을 빠르게 상실한다. 따라서 flat shelf와 만났을 때 보다 상대적으로 Coriolis effects를 빠르게 받게 되며, 이는 downshelf로의 담수 확산을 촉진시킨다. 따라서 강이 flat shelf를 만났을 경우가 sloping shelf를 만났을 경우 보다 외해로 넓게 담수 확산이 일어나게 된다. 또한 담수 확산의 모양 또한 강이 flat shelf를 만났을 때 Coriolis effects로부터 상대적으로 자유롭기 때문에 반구형태(radial shape)를 갖는다.

Upwelling winds는 담수의 표층 확산을 촉진시키며, 이는 성층현상을 강화시키는 것으로 연구되었다. 이런 현상은 바람이 수직 확산을 촉진시킴으로써 성층현상을 파괴한다는 연구와 반대되며 미국의 York River estuary에서 Scully<sup>13)</sup>가 연구한 결과와 일치한다고 할 수 있다. 이는 바람의 세기와 연관되어 있을 것으로 판단되며 향후 바람의 세기와 성층현상과의 상관관계에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다. 이와는 반대로 downwelling winds는 수심방향으로 유사한 담수 확산을 일으켜 성층현상을 약화시키는 것으로 연구되었다. Upwelling 또는 downwelling winds에 의한 salt intrusion은 강 내부보다는 해안에서 강하게 일어나는 것으로 연구되었으며, 이는 강에서는 담수화의 혼합 현상과 바람에 의한 혼합에 의해 salt intrusion이 제한되기 때문인 것으로 판단된다. Offshore winds와 onshore winds는 upwelling winds와 downwelling winds와 유사하게 담수 확산에 영향을 주는 것으로 연구되었으며, 그 강도는 상대적으로 약하

게 나타나는 것으로 연구 되었다.

해저에 물길이 존재할 경우 이 물길은 담수 확산에 직접적인 영향을 주는 것으로 모의되었다. 또한 물길의 존재는 바람에 의한 담수 확산의 영향을 약화시키며 대부분의 담수 확산을 물길의 상층부에 제한하는 것으로 연구되었다. 이러한 현상은 향후 오염물질의 이동 및 확산과 부유사 이동에 관한 연구 등 다양한 연구에 해저 물길이 반드시 고려되어야 함을 나타낸다. 그러나 본 연구에서는 해저 물길과 전체 수심과의 상관관계에 대한 연구가 진행되지 않아 향후 해저 물길의 담수 확산에 미치는 영향에 대해 이에 대한 연구가 추가로 진행되어야 할 것으로 판단된다.

### Acknowledgement

본 연구는 한국건설기술연구원 2014년 주요사업(2014-0214-1-1)의 연구비로 수행되었으며 이에 감사합니다.

KSEE

### Reference

- Garvine, R. W., "Estuary Plumes and Fronts in Shelf Waters: A Layer Model," *J. Phys. Oceanogr.*, **17**(11), 1877~1896(1987).
- Garvine, R. W., "A dynamical system for classifying buoyant coastal discharges," *Cont. Shelf Res.*, **15**(13), 1585~1596 (1995).
- O'Donnell, J., "The Formation and Fate of a River Plume: A Numerical Model," *J. Phys. Oceanogr.*, **20**, 551~569 (1990).
- Kourafalou, V. H., Oey, L.-Y., Wang, J. D. and Lee, T. N., "The fate of river discharge on the continental shelf I. Modeling the river plume and the inner shelf coastal current," *J. Geophys. Res.*, **101**(C2), 3415~3434(1996).
- Chao, S.-Y. and Boicourt, W. C., "Onset of Estuarine Plumes," *J. Phys. Oceanogr.*, **16**(12), 2137~2149(1986).
- Chao, S.-Y., "River-Forced Estuarine Plumes," *J. Phys. Oceanogr.*, **18**(1), 72~88(1988).
- Chao, S.-Y., "Wind-Driven Motion of Estuarine Plumes," *J. Phys. Oceanogr.*, **18**(8), 1144~1166(1988).
- Oey, L.-Y. and Mellor, G. L., "Subtidal Variability of Estuarine Outflow, Plume, and Coastal Current: A Model Study," *J. Phys. Oceanogr.*, **23**, 164~171(1993).
- Csanady, G. T., "Circulation Induced by River Inflow in Well Mixed Water over a Sloping Continental Shelf," *J. Phys. Oceanogr.*, **14**(11), 1703~1711(1984).
- Chapman, D. C. and Lentz, S. J., "Trapping of a Coastal Density Front by the Bottom Boundary Layer," *J. Phys. Oceanogr.*, **24**(7), 1464~1479(1994).
- Yankovsky, A. E. and Chapman, D. C., "A Simple Theory for the Fate of Buoyant Coastal Discharges," *J. Phys. Oceanogr.*, **27**(7), 1386~1401(1997).
- Weaver, A. J. and Hsieh, W. W., "The Influence of Buoyancy Flux from Estuaries on Continental Shelf Circulation," *J. Phys. Oceanogr.*, **17**(11), 2127~2140(1987).
- Scully, M. E., Friedrichs, C. and Brubaker, J., "Control of estuarine stratification and mixing by wind-induced straining of the estuarine density field," *Estuaries*, **28**(3), 321~326 (2005).
- Simpson, J. H., Brown, J., Matthews, J. and Allen, G., "Tidal straining, density currents, and stirring in the control of estuarine stratification," *Estuaries*, **13**(2), 125~132(1990).
- Simpson, J. H., Sharples, J. and Rippeth, T. P., "A prescriptive model of stratification induced by freshwater runoff," *Estuarine, Coastal Shelf Sci.*, **33**(1), 23~35(1991).
- Sharples, J., Simpson, J. H. and Brubaker, J. M., "Observations and Modelling of Periodic Stratification in the Upper York River Estuary, Virginia," *Estuarine, Coastal Shelf Sci.*, **38**(3), 301~312(1994).
- Drijfhout, S. S., "Eddy-genesis and the related heat transport: a parameter study, in Mesoscale/synoptic Coherent Structures in Geophysical Turbulence," *Elsevier*, **50**, 245~263(1989).
- Lindow, H., "Experimentelle Simulationen windangeregter dynamischer Muster in hochauflösenden numerischen Modellen," Institut für Ostseeforschung Warnemünde(1996).
- Lee, J. and Valle-Levinson, A., "Influence of bathymetry on hydrography and circulation at the region between an estuary mouth and the adjacent continental shelf," *Cont. Shelf Res.*, **41**, 77~91(2012).
- Garvine, R. W., "The impact of model configuration in studies of buoyant coastal discharge," *J. Mar. Res.*, **59**, 193~225(2001).
- Csanady, G. T. and Shaw, P. T., "The "Insulating" Effect of a Steep Continental Slope," *J. Geophys. Res.*, **88**(C12), 7519~7524(1983).
- Wright, D. G., "On Quasi-Steady Shelf Circulation Driven by Along-Shelf Wind Stress and Open-Ocean Pressure Gradients," *J. Phys. Oceanogr.*, **16**, 1712~1714(1986).
- Wright, D. G., "On the Alongshelf Evolution of an Idealized Density Front," *J. Phys. Oceanogr.*, **19**, 532~541(1989).
- Lee, J. and Valle-Levinson, A., "Bathymetric effects on estuarine plume dynamics," *J. Geophys. Res. Oceans*, **118**(4), 1969~1981(2013).