
바람영향하의 River plume에 따른 부유물체 확산 및 이동 연구

백성호, 박경주

해군사관학교

The study of moving and dissipation of floating mines due to wind forced river plume

Seongho Baek, · Kyeongju Park

Korea Naval Academy

E-mail : lorens@hanmail.net

요 약

본 논문에서는 강 하구 지역에 부유물체 유출시 물체의 이동과 확산 패턴을 파악하고자 plume의 생성과 변화, 외력에 대한 변동성을 연구하였다. 외력이 없는 경우 강수는 bulge와 alongshore current를 형성하며 연안을 따라 이동한다. Downwelling wind와 downcoast meanflow의 경우는 steady state와 동일한 패턴을 형성하나 수송은 강해져 연안을 따라 흐르는 물체의 이동과 확산속도가 증가할 것으로 예상된다. Upwelling wind가 부는 경우 Ekman transport에 의해 bulge가 연안으로부터 떨어져 45도 각도로 북서쪽으로 이동하는데 그 이동경로는 linear하며 바람의 세기로부터 독립적이다. 그리고 Bulge의 이동속도는 바람응력의 세기와 정비례한다. 따라서, 이 경우 부유물체의 upcoast로의 이동과 외해로의 확산이 예상된다.

ABSTRACT

To find out moving and dissipation patterns of laid floating object estuary this paper has focused on forming, changing and variation of the wind forced river plume. In steady state(without external force), river can be form a bulge and downcoast alongshore current on gently sloped continental shelf. Under the downwelling wind and downcoast meanflow those river plume's patterns are similar with the steady state case except enhancement of downcoast transportation. Under the upwelling wind condition bulge linearly move to the northwest with 45 angle due to Ekman transport. It's moving speed are linear with the strength of the wind stress but moving paths are independent of that. So, in this case, floating object will be dissipate to outside as move to the upcoast.

키워드

River plume, bulge, alongshore current

1. 서 론

담수와 해수가 만나는 강 하구에서의 부유물체의 이동과 확산에 대한 연구시 외력에 의해 영향을 받는 plume의 특성과 관련된 연구는 매우 드물다. 강하구 지점에 유출된 부유물체의 이동경로와 확산패턴은 해당구역에서 발생하는 담수와 해수간의 역학적 운동과 변화에 지배를 받는다. 따라서, 강수가 바다로 흘러들어갈 때 생성되는 plume과 buoyancy driven current에 대한 파악이 선행되어야만 한다. 이에 본 연구에서는 원하는

환경 구성과 외력의 적용이 자유로운 수치모델을 이용 하였다.

Plume은 시계방향으로 회전하는 흐름으로, 북반구에서 많은 량의 강수가 고밀도, 고염분의 해수가 있는 대륙사면으로 방출될 때 생성되는 bulge와 baroclinic boundary current로써 Kelvin-wave처럼 좁은 지역 안에서 연안을 따라 진행하는 alongshore current의 2개 부분으로 구분할 수 있으며, 바람의 영향을 크게 받는다(Garvine, 1987). 이런 plume에 대한 지금까지의 수치모델 연구는 짧은 기간 동안의 plume의 반응에 초점을 두고 진

행되어 왔다. 특히, 외력의 영향에 대한 연구는 미진하다. 2001년 Fong and Geyer는 upwelling wind event 동안의 river plume의 변화를 연구하였으나 역시 짧은 기간 동안 plume이 Ekman transport에 의해 offshore advection 현상을 보이는 것에 그쳤으며, Hetland(2005) 또한, 바람응력의 변화에 따른 plume의 반응에 대해 논하였으나 짧은 기간 동안 upwelling과 downwelling시 plume과 연안간의 접촉상태의 변화 정도만 언급하였다. 부유물체의 이동에 대한 이해를 위해서는 steady state, downwelling wind 그리고 upwelling wind시 plume의 생성과 소멸의 전 기간에 걸친 연구가 이루어져야 한다. 그리고, 부유물체의 확산 패턴과 변화를 알기 위해 along shore current의 변화성 파악이 필요하다. 또한, 바람에 따른 변화성의 비교분석이 요구된다.

이에 본 연구에서는 plume의 생성과 발달, 이동 및 소멸 과정을 고찰하고 upwelling wind시 나타나는 plume의 패턴을 통해 부유물체의 이동과 확산에 대한 기본이 되는 밑그림을 제시하고자 하였다.

II. Numerical setup

사용된 모델은 The Regional Ocean Model System version 2.1 (ROMS, Haidvogel et al., 2000)로 S-coordinate Rutgers University Model (SCRUM)을 기초로 하고 있는 국지적 해양에 적합한 model이다. 이 모델에서는 운동 방정식을 풀기위해 split-explicit time stepping scheme을 사용하며 수직적으로는 stretched terrain-folling coordinate의 discretized coordinate system을 이용한다. 수평 grid는 staggered Arakawa C-grid를 바탕으로 orthogonal curvilinear coordinate를 사용한다(Haidvogel and Beckmann, 1999). 또한, modular code design으로 다양한 advection scheme과 수직 mixing parameterization을 선택할 수 있는 장점을 지니고 있다.

1. Model setting

전체 domain은 사각육면체의 형태를 띠며, 중심은 해안에서 바다로 일정하게 깊어지는 균일한 경사의 갖는 대륙사면, 일직선 해안 그리고 강 하구로 구성되어 있다. 특히, 강 하구는 해안선과 수직을 이루는 구조이다. Domain 크기는 남북 300km, 동서 219km이다. 강 하구는 육지를 수평 방향으로 도려낸 형태로 길이 27km, 폭 11km, 최고 깊이 10m의 둥근 강바닥으로 하였다. 육지의 길이는 300km 폭 11 km, 해양의 길이 300km, 연안 폭 192km 이다. 바닥의 경사는 연안에서 최소 깊이 3m를 시작으로 대륙사면을 따라 1/2000의 비율로 증가하여 최대 깊이는 97m가 된다. 둥근 바닥 모양의 강의 channel 지형은 numerical noise를 억제함으로써 현재까지 사용되어 온 사각형의 각진 형태의 바닥보다 수치 해석적으로 더

적합한 해를 제공한다(그림 1).

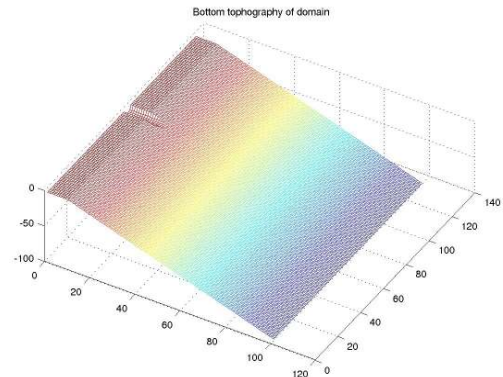


그림 1. Model domain

서쪽의 경계는 육지로 닫혀 있으나 그 외 경계면들은 open boundary condition을 적용, energy가 외부로 전파 되도록 하였다. 경계면 내부의 해는 orlanski radiation condition을, open boundary 근처 지역은 sponge layer를 적용하였다.

numerical grid는 강물이 흘러 나가는 부분의 주위는 다른 지역보다 높은 resolution을 적용하고 경계면은 낮게하여 정확한 plume의 관측과 경계면의 grid scale noise를 감소 시켰다(그림 2).

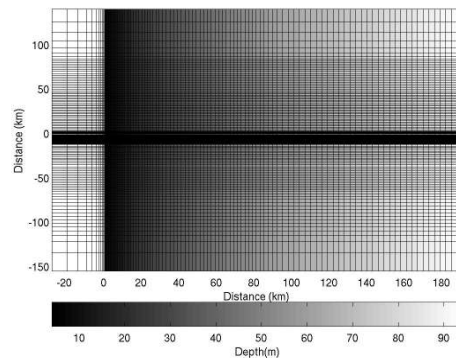


그림 2. Numerical grid

흐름이 없고 32‰ 해수로 채워진 상태의 초기 가정을 설정했다. 수온은 20°C 10m mixed layer로 부터 exponential하게 감소하여 바닥에서는 5°C가 된다. $f=10^{-4}s^{-1}$ 를 적용했다. 1000과 7000 $m^{-3}s^{-1}$ 의 담수($\rho=0$) flux가 강 하구에서 유입되고, 해안을 따라 남북으로 일정한 바람이 amplitude 0.1에서 $0.5 \times 10^{-4} m^2 s^{-2}$ 로 분다. 담수와 바람은 hyperbolic tangential 함수로 ramping time scale 4일과 3일로 ramp를 통해 적용된다. 전체 모델의 running time은 1~2달로 하였다.

III. 결 과

Steady state의 경우는 기존 연구결과와 동일하

였으며, Downwelling wind의 경우, plume이 연안 쪽으로 눌러지며 alongshore current가 강해진다.

Upwelling wind의 경우는 전체 표층수가 연안에 갇힌 jet flow처럼 북쪽으로 움직이며 Ekman transport에 의해 외해로 이동하게 되는데 Plume도 이 영향을 받아 시간이 갈수록 연안에서 떨어지게 되며, 외해로 움직이게 된다. 이 두 process가 남쪽으로 담수의 이동을 차단 한다(그림 3).

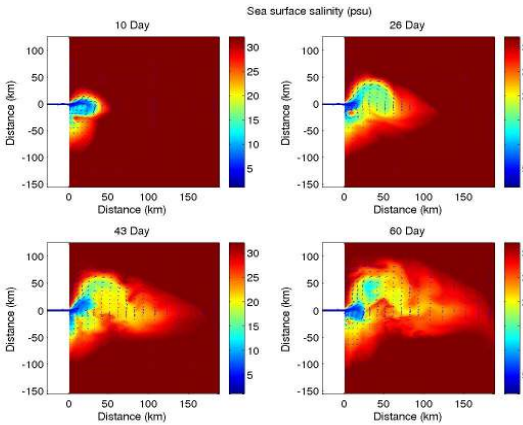


그림 3. Plume의 생성과 소멸(표층염분/2달)

여기서 부유물체의 이동 및 확산을 예측하기 위해서는 bulge와 alongshore current 중 더 많은 양의 담수를 포함하고 있어 plume의 구조를 결정하는데 중요한 bulge의 이동을 파악해야 한다.

Bulge가 연안에서 이탈한 정도와 이동 경로를 알아내기 위해서는 이를 추적할 수 있는 방법을 먼저 강구해야 한다. Horner-Devine et. al.(2007)는 bulge의 중심을 속도 profile의 zero-crossing point로 정의 하였으나 본 연구에서는 색다른 접근을 시도 하였다. Bulge도 eddy와 같이 회전 운동을 한다는 점을 고려하여 geostrophic balance에 초점을 두었다. Bulge의 수표면 중 가장 높게 솟아오는 지점을 bulge의 중심으로 선택 하였는데 이는 geostrophic balance에 근거한 합리적이고 적절한 정의로 시계방향으로 회전하는 bulge의 중심은 bulge내의 다른 지점보다 해수면이 높기 때문이다(그림 4).

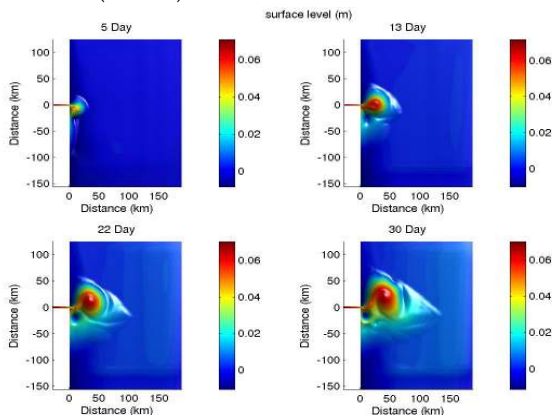


그림 4. Plume의 생성과 소멸(해수면 높이 1달)

중심점을 이용, bulge의 이동을 관찰한 결과, 초기 이동 pattern은 곡선의 형태를 떠나 시간이 지남에 따라 직선으로 바뀌고 45도 각도로 외해로 이동한다. 또한, 다양한 바람의 세기에도 불구하고 plume의 이동 경로는 바람응력의 강도와 무관하게 항상 동일하다(그림 5).

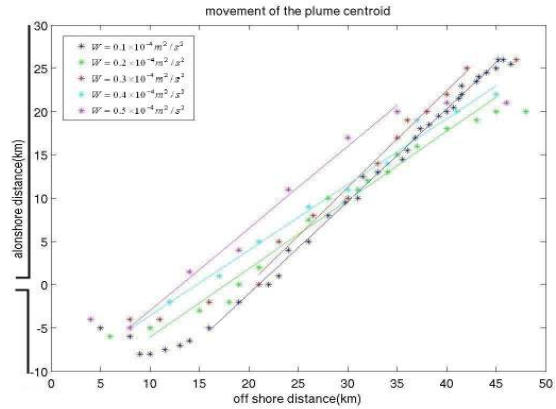


그림 5. Bulge의 중심 이동

Plume은 upper layer에 위치하고 Ekman transport에 의해 이동하므로 Ekman balance는 alongshore momentum의 주요 요소이다(Fong et al., 1997). 따라서, Bulge의 중심과 강 하구간의 거리 계산을 통해 bulge의 이동 속도를 Ekman 이론에 근거하여 계산할 수 있다. Upper layer 전반에 대한 연속방정식의 합은 $\int \nabla \cdot u dz = 0$ 로 $uh = 상수$ 가 된다. 이는 Ekman balance에 의해 plume이 일정한 두께를 유지한 상태로 연안으로부터 떨어져 외해로 어떤 속도를 가지고 이동하는 상태를 의미한다. plume의 이동 속도는 $u = \tau^x / \rho fh$ 이다. 이때 h 는 plume의 두께이고, ρ 는 upper layer에 위치한 plume의 평균밀도, τ^x 는 alongshore 방향의 바람응력이며, f 는 Coriolis parameter이다.

Ekman transport 속도인 예상치와 모델결과(simulation speed)는 서로 매우 비슷하였다. 약한 바람의 경우 모델로 계산한 plume의 이동속도는 예상 속도에 비해 느리나, 강한바람의 경우는 모델에서의 이동속도가 예상치를 앞선다. 이는 강한 바람에서 모델에 의해 계산된 plume의 두께, 즉, 수심이 critical depth보다 얇아져 이동 속도가 달라지는 원인으로 작용한다.

그림 6은 5단계의 바람응력에 따른 plume의 이동속도를 계산하고 예상 속도와 비교한 graph로 X축은 일을, Y축은 강하구 중심에서 북쪽방향 거리이다. 바람응력의 세기가 증가하면서 plume 이동속도의 fluctuation이 줄어들며 시간에 정비례하게 되고 증속이 일정하게 이루어짐을 알 수 있는데 이는 속도점이 평균선과 거의 일치하는 바람세기($0.4 \times 10^{-4} m^2 s^{-2}$) 이상은 plume이 위치한 upper layer 전체가 동시에 이동하기 때문이다.

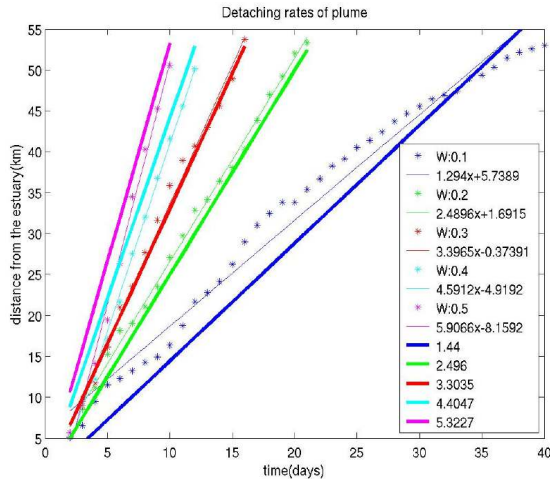


그림 6. 모델과 예상 이동속도간 비교 (실선 - 모델, 굵은선 - 예상)

또한, Plume의 이동속도는 바람응력과 linear한 관계로 바람응력의 세기가 증가함에 따라 plume의 이동속도가 정비례하여 증가 하였다.

IV. 결 론

완만한 대륙사면을 가진 해저지형에서 강수의 유입시 plume 현상에 의해 부유물체는 회전하는 bulge안에 머무르거나 연안을 따라 진행할 가능성이 크다. Background flow로써 alongshore current의 진행을 돕는 mean flow가 존재하는 경우 bulge가 연안쪽으로 늘리지며 타원형을 띄고 along shore flow가 강화 되었다. 따라서, 강하구에서 부유물체 유출시 일부는 bulge에 머무르나 다른 일부는 연안을 따라 이동하며 downcoast로 확산 될 것이며 downwelling wind가 부는 경우와 2가지가 같이 발생할 경우는 그 이동량과 속도가 더욱 증가할 것으로 판단된다. 부유물체가 연안을 따라 진행시 동·남해안 강하구의 남쪽 또는 서쪽에 위치한 항구에 대한 부유물체가 입출항시 피해를 줄수도 있을 것이다.

Upwelling wind의 경우는 바람응력 세기에 따른 차이는 있으나 공통적으로 alongshore current의 진행이 차단되어 연안으로의 이동이 제한되고 bulge로 대부분의 담수가 유입되므로 부유물체는 연안을 따라 이동치 못하고 강하구에 머무르다 연안에서부터 떨어져 Ekman layer처럼 두께의 변화 없이 45도 북서쪽으로 이동하는 bulge와 같이 이동할 것으로 예상된다. 이는 upwelling wind에 의해 유도되는 북쪽으로 향하는 연안의 jet flow가 bulge를 upcoast 방향으로 밀어내고 이와 동시에 Ekman transport에 의해 bulge가 외해로 수평이동 하기 때문이다.

이때, 모든 bulge는 바람응력의 세기와 무관하게 linear한 동일 경로로 이동한다. 또한, Bulge의 이동 속도는 바람응력의 세기에 비례하여 바람응

력이 증가함에 따라 bulge의 이동속도도 linear하게 증가한다.

약한 upwelling wind 일지라도 한달이상 지속하게 되면 bulge가 파괴되며 물체들은 random하게 외해로 확산하게 된다. 강한 바람의 경우는 그 세기에 따라 북서쪽으로의 이동 거리와 속도가 증가한다. 이 경우, 외해로의 확산은 이루어지나 연안을 따라 남쪽으로 이동하는 것은 완전히 차단되므로 plume의 시간에 따른 이동속도를 고려시 물체의 확장 정도를 기본적으로 예측할 수 있을 것이다.

실제 부유물체의 이동과 확산을 예측하기 위해서는 본 연구에서 파악한 mechanism을 근거로 지속적인 실험과 분석이 이루어져야 한다. 자연에서는 model에서처럼 한 방향으로만 바람이 장기간 지속되지도 그 세기가 일정하지도 않다. 따라서, 특정 주기를 가지고 방향과 세기가 변화하는 sinusoidal wind를 적용한 연구가 필요하다. 또한, 담수가 해수 속으로 침투하는 penetration의 변화성 연구와 실제 해저지형을 적용한 연구가 지속적으로 시행 되어야 한다.

참고문헌

[1] Fong, D. A., W. R. Geyer, and R. P. Signell, 1997: The wind-forced response of a buoyant coastal current: Observations of the western Gulf of Main plume. *J. Mar. Syst.*, 12, 69-81.
 [2] Garvine, R. W., 1987: Estuary plumes and fronts in shelf waters: A layer model. *J. Phys. Oceanogr.*, 17, 1877-1896.
 [3] Haidvogel, D. B., and A. Beckmann, 1999: Numerical Ocean Circulation Modeling. Imperial College Press.
 [4] Hetland, R. D., 2005: Relating river plume structure to vertical mixing. *J. Phys. Oceanogr.*, 35, 1667-1688
 [5] Horner-Devine, A. R., D. A. Fong, S. G. Monismith, and T. Maxworthy, 2007: Laboratory experiments simulating a coastal river inflow. *J. Fluid Mech.*