

# 3차원 수치모형을 이용한 정상염수썰기현상 해석 Analysis of Saline Wedge Using 3D Numerical Model

이경수\*, 광성현\*\*, 류시완\*\*\*

Lee, Kyungsu / Kwak, Sunghyun / Lyu, Siwan

## 요 지

하구역에서의 대표적인 수리특성인 염수썰기현상에 대한 정확한 이해는 하구역 수질 및 환경관리 측면에서 필수적인 사항이다. 본 연구에서는 정상염수썰기 경계층 거동에 대한 실험적 연구결과와 3차원 전산유체역학 프로그램인 FLOW-3D를 이용한 수치모의 결과를 비교해봄으로써 염수썰기현상에 대한 3차원 수치모형의 적용성을 살펴보았다. FLOW-3D를 이용하여 실험장치의 수로구간을 구성하고 경계조건으로 염수의 수위와 담수의 유량을 입력하였으며 밀도차를 두어 이층류가 발생하도록 모의하였다. 모의결과를 통해 시간평균농도와 표준편차를 무차원화하여 단면별 연직분포를 알아보고 각 단면을 중첩하여 경계층의 거동을 살펴보았으며 염수썰기길이와 염수심을 무차원화하여 밀도프루드수의 변화에 따른 염수썰기형상을 살펴보았다. 그리고 각 결과를 기 수행된 실험결과와 비교해 보았다.

**핵심용어** : 하구, FLOW-3D, 염수썰기

## 1. 서론

최근 부족한 산업 용지 확보와 관광 시설 공간 확충을 위해서 대규모 해안 개발과 함께 하구의 이용도가 많아지고 있다. 이러한 하구는 경제학적인 가치뿐만 아니라 다양한 동·식물의 서식지로서 생태학적, 사회적으로도 중요한 지역이다. 하구는 하천의 담수와 바다의 해수가 교차하는 지점으로서 밀도차이가 있는 두 수괴는 역학적으로 평형하려 한다. 밀도가 큰 해수는 밀도가 작은 담수 아래로 가라앉아 하상을 따라서 상류로 침입하고 담수는 그 상층을 흘러 해면상으로 퍼지는 하구밀도류가 생긴다. 하구밀도류의 유동형태는 담수와 염수의 혼합 강약에 따라 약·완·강 혼합형의 세 가지로 분류된다. 이중 약혼합형에서는 해수가 하도내로 썰기형태로 침입하게 되는데 이러한 밀도류를 염수썰기라 한다. 염수썰기현상은 하구역 수질 및 환경관리 측면에서 그 수리특성을 반드시 파악할 필요가 있다.

수리현상연구는 일반적으로 수리모형실험과 수치해석을 통하여 실시하게 되는데, 수리모형실험은 모형제작을 위한 비용과 시간이 많이 소요되고 다양한 조건에 대해 모의하기 어려우며 상사법칙의 오류가 발생할 수 있는 단점을 가지고 있다. 한편, 수치해석은 모형실험과 비교하여 적은 비용과 짧은 시간에 다양한 조건을 모의할 수 있는 장점이 있으나 결과의 신뢰성을 확보하기 위한 보정과 검정이 필요하다는 단점이 있다.

본 연구에서는 류시완 등(2009)이 수행한 정상염수썰기 경계층 거동에 대한 실험적 연구결과와 3차원 전산유체역학 프로그램인 FLOW-3D를 이용한 수치모의 결과를 비교하여 염수썰기현상에 대한 3차원 수치모형의 적용성을 살펴보고자 하였다.

## 2. 본론

\* 정회원 · 창원대학교 공과대학 토목공학과 석사과정 · E-mail : kidhan@lycos.co.kr  
\*\* 정회원 · 창원대학교 공과대학 토목공학과 석사과정 · E-mail : greatddk@nate.com  
\*\*\* 정회원 · 창원대학교 공과대학 토목공학과 부교수 · E-mail : siwan@changwon.ac.kr

## 2.1 모형구축

FLOW-3D는 연속방정식, 3차원 Navier-Stokes 방정식, 에너지 방정식을 이용하여 압축·비압축성 유체, 정상·비정상 및 층류·난류 유동 등 여러 수리현상에 대해 모의가 가능한 3차원 난류모형이다. 자유표면 해석을 위해 VOF(Volume of Fluid)방법을 사용하며, FAVOR(Fractional Area/ Volume Obstacle Representation)방법을 이용하여 보다 정확한 곡면 표현이 가능하다. 또한 유체의 난류 유동에 대하여 k-ε 모형, RNG(Renormalized Group)모형 등 5개 모형을 제공하고 있는데 그 중 k-ε 모형을 적용하였다.

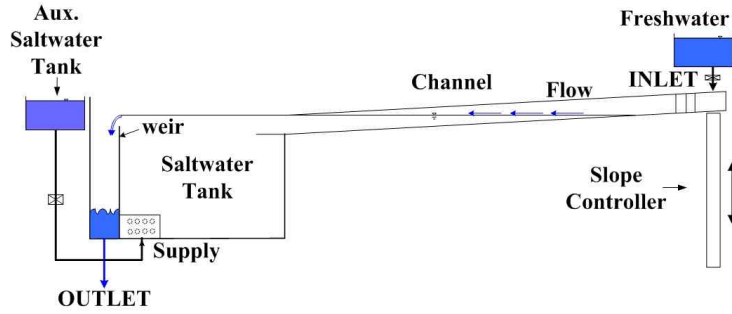


Fig. 1 실험장치

류시완(2009) 등의 실험에서 사용된 실험 장치는 길이 5m, 폭 0.1m의 상대적으로 폭이 좁고 길이가 긴 개수로 형태로 담수는 고수조를 통해 일정하게 공급되는 유량이 개수로 형태로 흐르도록 하였고, 염수는 보조 염수수조를 가동하여 수두차를 이용하여 일정한 염수를 공급하도록 하였다. 본 연구에서는 실험장치 중 수로부분을 모의영역으로 하여 실시하였다. Auto-CAD를 이용하여 수로에 대한 STL파일을 생성하고 격자는 길이와 폭을 고려하여 총 33,600개로 구성하였으며 수위, 유량 및 밀도를 경계조건으로 입력하였다.

염수층기의 거동을 지배하는 인자는 다양하지만 류시완(2009) 등은 담수의 방류량과 이층류의 밀도차이를 동시에 고려 할 수 있는 밀도프루드수(densimetric Froude number,  $F_{rd}$ )를 기준으로 5개의 실험조건을 결정하였다. 여기서,  $Q_o$ 는 담수유량(m<sup>3</sup>/s),  $l$ 과  $\rho_2$ 는 각각 담수와 해수의 밀도이다. 그리고 특성길이  $l$ 은 검토단면에 해당하는 담수의 상층수심이다.

$$F_{rd} = \frac{Q_o}{A \times g \times \sigma \times l}, \quad (\sigma = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_1})$$

FLOW-3D에서는 밀도를 경계조건으로 입력하며, 수로의 폭이 좁아 SI단위계 대신 CGS단위계를 사용하였다. 그에 따라 환산한 모의조건은 Table. 1과 같다.

Table. 1 모의조건

Case	$Q_o$ (cm <sup>3</sup> /s)	$Z$ (cm)	$\rho$	$F_{rd}$
F0.37C	66.7	7.0	1.019070	0.37
F0.48C	150.0	8.6	1.012920	0.48
F0.51C	200.0	9.9	1.006769	0.51
F0.58C	400.0	12.8	1.006000	0.58
F0.66C	416.7	17.7	1.000618	0.66

## 2.2 모의결과

이층류는 수심에 따라 평균밀도가 변화하는 층은 상층과 하층, 상층과 하층사이에서 밀도의 기울기가 선형적으로 변화 하는 천이층으로 구분된다. 기 실험된 결과에서는 경계층을 측정하기 위해서 염수짜기 길이에 대해 하구부(s01)에서 염수짜기 선단(S10)까지 동일 간격으로 나눈 각 단면별 수심에 따른 농도분포 측정을 수행한 결과와 수치모형에서 얻은 각 단면별 밀도 분포를 비교해 보았다. 수치모형에서 나온 결과는 밀도 분포이므로 실험결과와 비교를 위해서는 밀도를 농도로 환산하여 분석하였다. 결과를 분석하는데 사용된 변수들은 Fig.2에서 보여주고 있다.

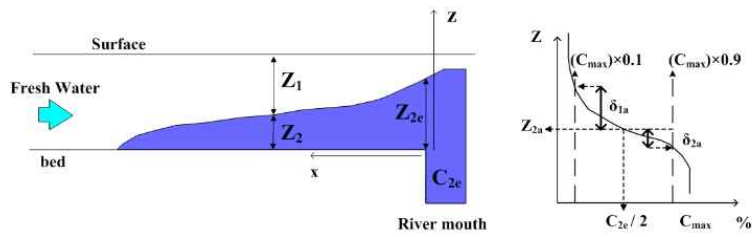


Fig. 2 사용기호

Fig. 3은 실험과 모의 결과를 각 케이스별 10개 단면에서의 수심과 농도를 무차원 시켜 도시한 결과이다. 결과에서 보는 바와 같이 수치 모의 결과와 실험결과 모두 수심에 따라 농도가 변하지 않는 상·하층, 농도가 수심에 따라 선형적으로 변하는 천이층이 뚜렷하게 보이므로 이층류 거동이 잘 나타남을 알 수 있었다. 그리고 실험과 모의결과 모두 밀도프루드수가 증가함에 따라 농도가 변하는 천이층의 위치가 점차 낮아짐을 알 수 있다.

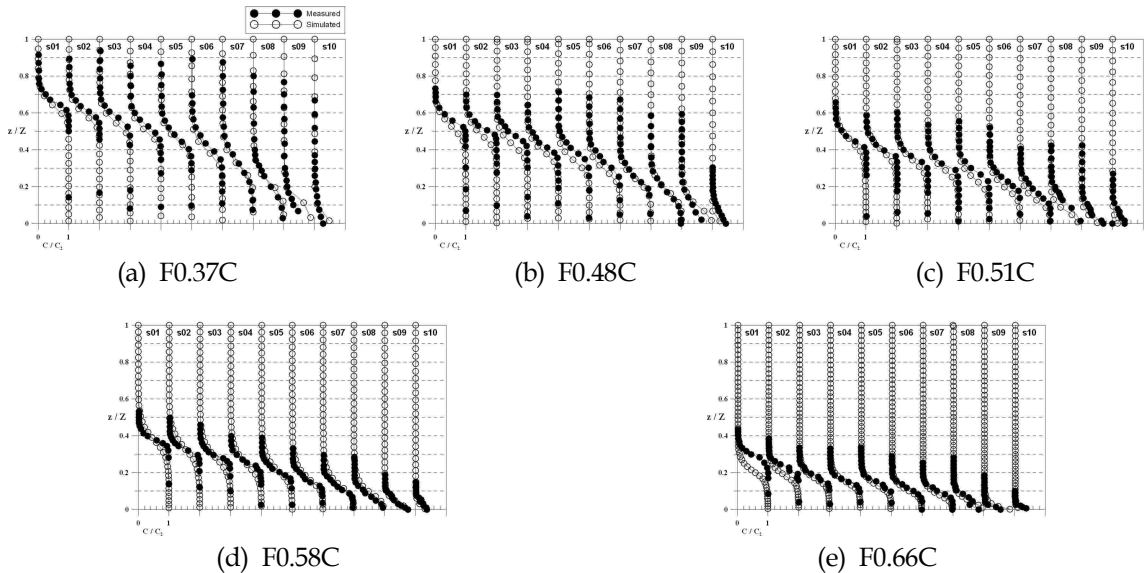


Fig. 3 연직농도 분포

염수짜기의 계면형상을 해석하려면 지배 단면에서의 경계층 두께의 산정이 필요하다. 실험과 본 연구에서는 하구부의 농도를 기준으로 10~90%의 농도를 가지는 지점을 경계층으로 산정하였다. Fig. 4는 경계층

두께를 중간농도의 수심으로 무차원화 시킨 것이다. 상층, 하층 0.5가 되는 지점은 합하게 되면 1이 되어 중간농도의 수심이 되므로 혼합층으로 판단하여 염수쇄기 선단 및 길이결정에 중요한 요인이 된다. (a), (b), (c)에서는 실험과 모의 값이 비교적 일치하나 밀도프루드수가 증가함에 따라 모의에서의 염수쇄기가 짧아지는 것을 알 수 있다.

Fig. 5에서 실험치의 상·하층경계층두께비가 모의치보다 변화폭이 크지만 두 결과 모두 담수와 염수가 혼합하는 경계의 중심일 것이라 생각할 수 있는 중간농도 지점을 기준으로 보면 실험과 모의 결과 모두 상층 경계층이 하층경계층보다 더 두꺼운 것을 볼 수 있다.

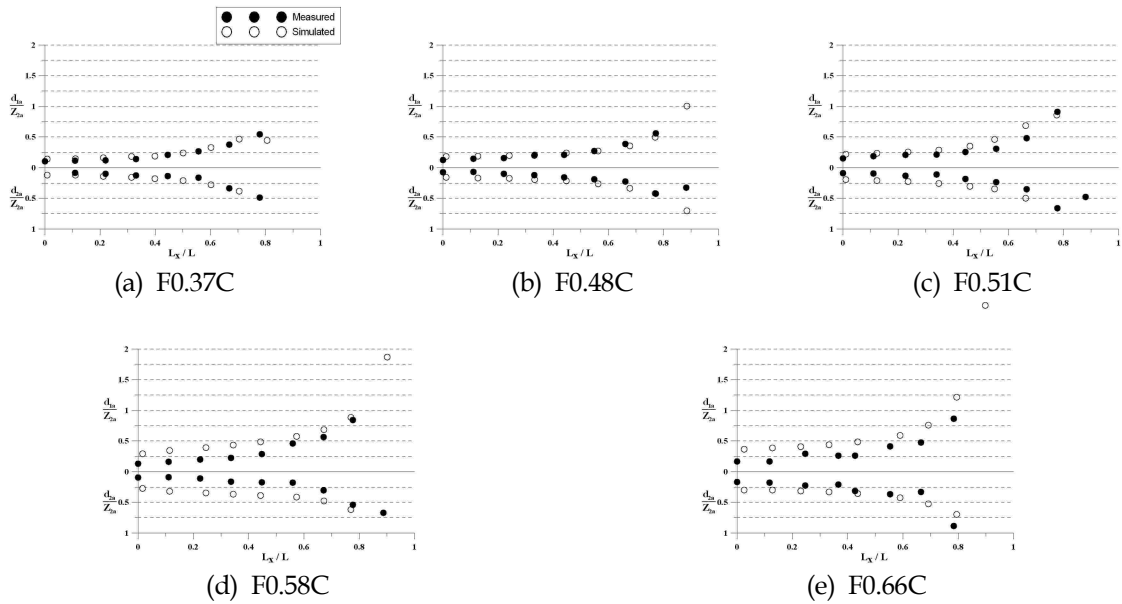


Fig. 4 무차원 경계층 두께



Fig. 5 경계층 상·하부 영역의 두께 비

밀도프루드수의 변화에 따른 염수쇄기 형상의 양상을 살펴보기 위해 하구부의 염수심  $Z_{2a}$ 에 대해서 대상구 간의 염수심  $Z_{2ae}$ 를 무차원화 한 Fig. 6에서 관찰할 수 있다. Fig. 7은 하구에서 선단까지의 직선 형태를 기준으로 각 케이스별 염수쇄기 형상의 차이를 도시한 것이다. 실험결과에서는 이문옥(1990)에서 저술한 하구에서  $x/L$  값이 약 0.4가 되는 지점에서 변곡점이 나타나지만 모의결과에서는 차이가 있었다.



Fig. 6 염수쇄기 형상

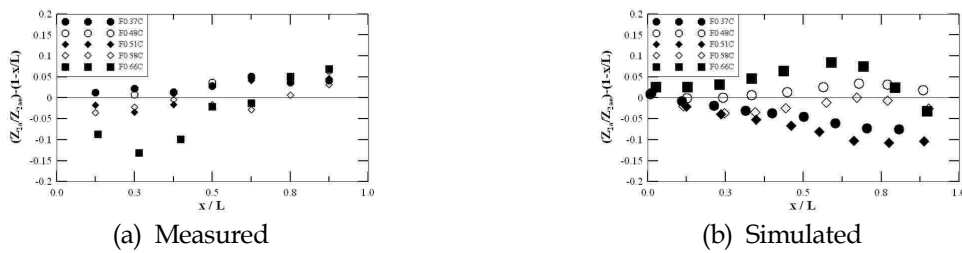


Fig. 7 염수쇄기 형상의 편차

### 3. 결론

본 연구에서는 정상염수쇄기현상에 대한 FLOW-3D의 적용가능성을 알아보기 위하여 류시완 등(2009)의 실험결과와 동일한 조건으로 모의를 수행하였다. 경계층의 두께와 경계층 혼합양상은 실험결과와 비교할 때 유사하게 모의되는 것을 관찰할 수 있으나, 경계층 내에서의 밀도분포 및 전체 염수쇄기의 형상 등 거시적 거동양상의 모의에 있어서는 실험결과와 일정 정도 차이를 보이는 것으로 모의되었다. 이는 모의에 적용한 난류모형의 종류에 따른 난류특성 모의 결과의 차이에 기인하는 것으로 판단된다. 따라서 정확한 난류거동 모의를 위하여 난류모형의 선정 및 관련 매개변수의 신중한 선택이 필요할 것으로 사료되는 바이다. 향후 실험에서 구하지 못한 유속장을 수치모의를 통해 산정하여 농도장과 유속장을 함께 고려한 경계층 난류운동분석도 가능할 것으로 보인다. 또한 실제하구에서의 염수쇄기 거동은 조석영향에 큰 영향을 받으므로 조석을 고려한 비정상 거동에 대한 적용성 검토 또한 수행되어져야 할 것이다.

### 참고 문헌

1. 류시완, 김영도, 최재훈, 서일원, 권재현 (2009), 정상염수쇄기 경계층 거동에 대한 실험적 연구, 상하수도학회지, Vol.23, No.6
2. 신현호 (2008), 정상 염수쇄기 거동특성에 관한 실험적 연구, 공학석사학위 논문 창원대학교
3. 이문옥 (1990), 정상 염수쇄기의 형상과 흐름장의 물리적 특성, J.Oceanological Society of Korea, 25, pp. 62-73
4. 임지현 (2010), FLOW-3D 모형을 이용한 녹산수문 주변 염도 예측, 공학석사학위논문 경성대학교
5. Fischer, H.B., Koh, Imberger, J., Brooks, N. H. (1979), Mixing in Inland and Coastal Waters, Academic Press, Inc.