

염수썰기의 형상과 경계층의 구조적 특성

The Form of Saltwater Wedge and Structural Characteristics of Interfacial Layer

신현호*, 류시완**, 김영도***, 서일원****

Hyunho Shin, Siwan Lyu, Young Do Kim, Il Won Seo

요 지

본 연구에서는 하구 유입 하천에서 발생하는 염수썰기의 형상 및 거동특성을 구명하기 위하여 정상상태 염수썰기 실험을 수행하였다. 길이에 비해 상대적으로 폭이 좁은 개수로의 상류부분에는 담수를 지속적으로 공급할 수 있는 담수공급장치를 설치하였고, 정상상태의 염수썰기를 발생시키기 위하여 염수수조 측면에 지속적으로 염수를 공급할 수 있는 염수공급수조를 설치하였다. 실험조건은 담수 방류량과 이층류의 밀도차의 영향을 고려한 밀도프루드수(densimetric Froude number)를 기준으로 선정하였다. 실험결과 각 케이스별 염수썰기의 형상은 중앙부에서 약간의 산포된 양상을 제외하고는 거의 선형을 이루는 것으로 관찰되었다. 경계층의 형상과 두께는 이층류의 농도장을 측정하고 밀도변동성분을 고려한 표준편차를 통하여 산정하였다. 그리고 염수썰기의 선단부에 해당하는 리차드슨수와 경계층 두께와의 비교 등을 통해서 경계층의 양상을 파악하였다.

핵심용어 : 염수썰기, 밀도프루드수, 경계층, 리차드슨수

1. 서론

연안 해역에 위치한 하구는 외해와 연결되어 해류의 순환이 있으면서 하천의 담수가 유입되는 곳을 말한다. 그리고 하구는 여러 동물의 서식처를 제공하고 초기 문명의 발상지로서, 근대에 와서는 자연 발생적인 항구로서의 역할을 수행하였고 중공업 발전의 기반 및 풍부한 해산물 공급처로서의 역할과 각종 오염물의 자연처리장 역할을 담당해왔다. 그러나 하구로부터 유입되는 염수 때문에 인근의 수질과 농경지에 피해를 발생시키고 있으며, 이러한 피해를 감소시키기 위해 하구언과 같은 인공 구조물을 설치하였으나 급격한 자연환경의 변화로 예측하기 어려운 피해가 발생하고 있는 실정이다. 특히 약 혼합형 하구에서 발생하는 대표적인 현상인 염수썰기 현상을 수공학적인 목적에 따라 적절히 제어할 필요성이 대두되고 있다(Fisher *et al.*, 1979).

2. 이론적 배경

하천에서 유입되는 담수의 유량이 크고 조석류의 영향이 작을 때 상부와 하부층 사이에는 확연한 염도차가 나타나게 된다. 실제 현상에서는 상부와 하부층의 마찰과 밀도차로 인하여 썰기형상의 염수침입(wedge-shaped intrusion)이 발생하게 된다. 경계층 부근을 제외하면 상부층과 하부층에서의 염도분포는 일

* 정회원 · 한국수자원공사 수자원연구원 공동연구원 · E-mail : minilite13@gmail.com
** 정회원 · 창원대학교 토목공학과 조교수 · E-mail : siwan@changwon.ac.kr
*** 정회원 · 인제대학교 환경공학과 조교수 · E-mail : ydkim@inje.ac.kr
**** 정회원 · 서울대학교 건설환경공학부 교수 · E-mail : seoilwon@snu.ac.kr

정하게 되고 상·하층 간의 염도차는 일반적으로 20 %정도이다. 이와 같은 조건에서 염수가 담수의 하부로 침입하여 썸기형상을 띠는 현상을 염수썸기 현상이라고 한다.

염수썸기의 거동을 지배하는 인자는 유입 하천수의 유량, 조석류, 지형, 바람 등이 있다. 염수썸기의 거동은 자연현상인 만큼 비정상적 거동을 보이므로, 그 현상을 정확히 이해하기 위해서는 경계면 상의 수직적인 거동에 대한 이해가 필수적이다. 염수썸기 현상의 특징은 경계면에서의 밀도차이가 난류의 수직운동을 저해한다는 것이다. 이로 인해 경계면을 통한 수직혼합이 적게 일어나게 된다. 그러나 하부층과 비교하여 상대적으로 상부층의 유속이 일정한 범위를 넘어서게 되면, 상부층에서 하부층으로의 염수의 운송은 전혀 없고 하부층만 상부층으로 올라가게 되는 일방향 과정(one-way process)이 일어나게 된다. 성층화된 유체 내의 난류는 하상마찰, 경계면 내부파의 거동 그리고 전단불안정(shear instability)으로 야기되는 경계면의 연행 등으로 인하여 발생하게 된다.

3. 실험장치 및 방법

본 실험에 사용된 수로는 상대적으로 폭이 좁고 길이가 길며 아크릴제의 개수로로서, 담수를 공급하는 수조는 수두차를 이용하여 일정하게 담수를 공급하고 있고, 염수를 공급하는 수조는 염수수조의 측면에서 일정하게 염수를 공급한다. 주수로에는 유입담수의 흐름 안정화를 위해 일정한 간격으로 정류판을 설치해 방류량이 적을 때도 유입되는 담수가 수로 바닥에 잘 퍼질 수 있게 하였다. 주수로와 염수수조의 연결부에는 단면 급확대에 따른 국소류 효과가 발생하기 때문에 연결부에 저판을 설치해 그 효과를 피하고자 하였다. 그리고 염수공급수조에서 염수가 공급이 될 때 다공성의 막을 설치하여 유량이 공급될 때 흐름이 교란되는 것을 피하고자 하였다. 아래의 그림 1과 그림 2는 각각 실험수로의 평면도와 장치구성을 보여준다.

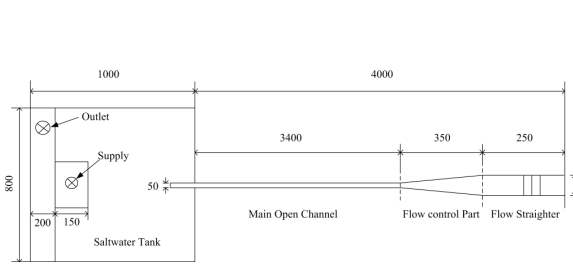


그림 1 실험수로 평면도(단위: mm)

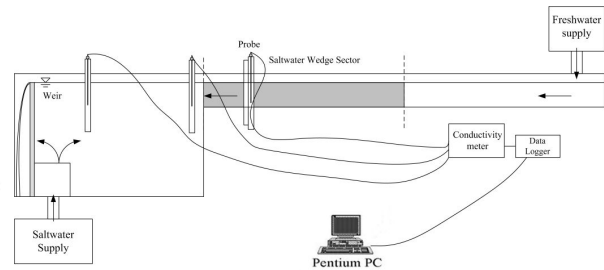


그림 2 썸기 실험 모식도

표 1 실험조건

| Run | $Q_0(l/s)$ | $h(m)$ | σ | Re | Fr_d | Run | $Q_0(l/s)$ | $h(m)$ | σ | Re | Fr_d |
|-----|------------|--------|----------|--------|--------|-----|------------|--------|----------|--------|--------|
| 1 | 0.04 | 0.04 | 0.0291 | 712.3 | 0.190 | 6 | 0.02 | 0.038 | 0.0244 | 435.1 | 0.137 |
| 2 | 0.14 | 0.073 | 0.0291 | 2368.4 | 0.256 | 7 | 0.19 | 0.102 | 0.0196 | 3252.6 | 0.260 |
| 3 | 0.14 | 0.065 | 0.0385 | 2368.4 | 0.265 | 8 | 0.19 | 0.036 | 0.0244 | 491.2 | 0.168 |
| 4 | 0.03 | 0.033 | 0.0385 | 601.8 | 0.186 | 9 | 0.06 | 0.041 | 0.0385 | 987.7 | 0.221 |
| 5 | 0.17 | 0.096 | 0.0196 | 2921.1 | 0.255 | | | | | | |

본 실험에서는 식(1)과 (2)에 제시된 바와 같이 담수방류량과 담수와 염수의 밀도차를 고려한 밀도프루드수를 기준으로 실험조건을 결정하였다.

$$Fr_d = \frac{Q_0}{A\sqrt{g\delta l}} \quad (1)$$

$$\sigma = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_1} \quad (2)$$

여기서 Q_0 는 담수 방류량, ρ_1 과 ρ_2 는 각각 담수와 염수의 밀도이다. 그리고 특성길이 L 은 대상단면에서의 담수의 상층 수심이다. 그리고 담수와 염수의 차이를 명확히 하기 위해서 염수에 메틸렌 블루용액을 첨가하였다. 실험조건은 표 1에 제시된 바와 같다.

4. 실험결과

환경 수리학적인 측면에서 실제 하구에서 발생하는 대표적 현상인 염수췌기의 형상 및 특성을 예측하는 것은 매우 중요하다. 하구역에서 발생하는 염수췌기의 대부분은 유입되는 하천과 염수의 밀도경사 때문에 생기는 것이지만 다른 여러 가지 요인이 존재할 수 있다. 예를 들면 하구역에 불어오는 바람, 연안해역의 조석류, 하구부근 지역의 지하수 개발 등이 대표적인 예이다. 그리고 염수 췌기는 이러한 인자들에서 의해서 시간적으로 변화하는 비정상상태이므로 이러한 인자들을 양호하게 고려할 수 있는 범용적인 예측모델의 개발이 필요하다. 하지만 하구조건 또는 하천유량의 시간적 변화가 대단히 긴 주기를 가진 근사적인 정상상태를 가정하고 그것에 의해 얻어진 염수췌기의 거동에 관한 해석 결과는 실용적인 면에서도 유효하게 사용될 수 있다(이문옥, 1990). 향후 수행될 비정상상태 염수 췌기 형상의 실험결과와 비교 및 분석을 위해서 수행한 정상적 염수췌기의 형상에 관한 실험결과를 아래의 그림 4.1에 나타내었다. 그림 3은 염수췌기 형상에 관한 그래프로서 횡축은 염수췌기 길이 L 에 대해서 하구로부터의 거리 x 를 무차원화 한 것 이며, 종축은 췌기 형성 대상구간의 하구부에 해당하는 염수심 H_{sa} 에 대해서 일정한 간격을 둔 염수심 H_s 를 무차원화한 것이다.

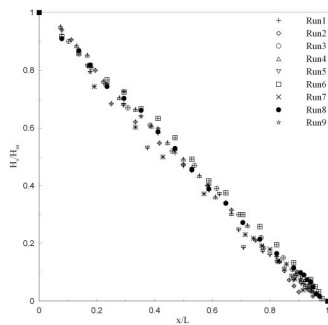


그림 3 염수췌기 형상

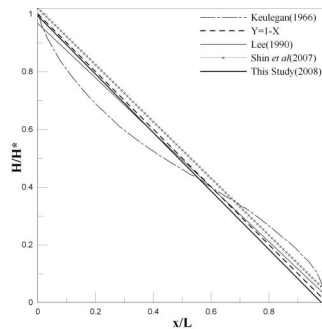


그림 4 염수췌기 형상비교

그림 3에서 도시된 바와 같이 염수췌기의 형상은 약간의 산포도를 보이고 있지만 췌기의 중앙부를 제외하고는 선형을 보이고 있으며 아래와 같은 형상함수를 도출하였다.

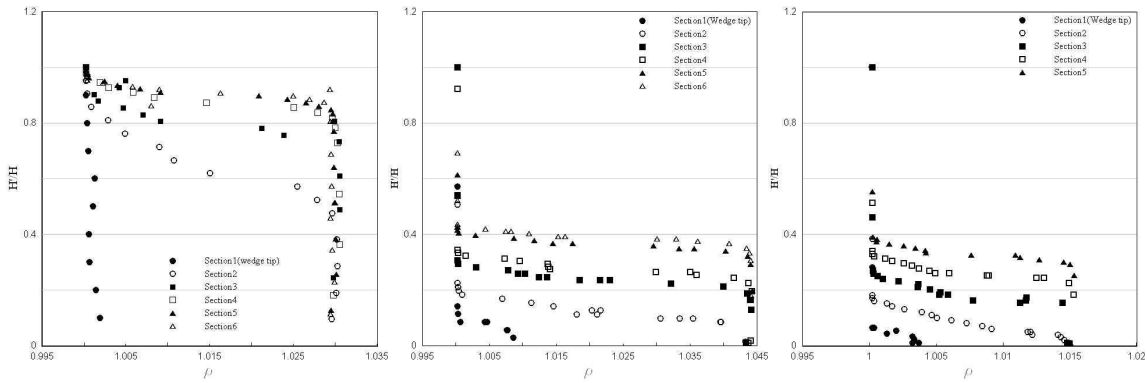
$$\frac{H_s}{H_{sa}} = 0.993 - 1.012\left(\frac{x}{L}\right) \quad (3)$$

$$\frac{H_s}{H_{sa}} = a - b\left(\frac{x}{L}\right) \quad (4)$$

그림 4는 본 실험의 염수췌기 형상을 Keulegan(1966)과 이문옥(1990), 그리고 올해 수행된 실험들과 비교한 그래프이다. 점선은 식(4)의 a 와 b 의 값이 1이 되는 경우이며, Keulegan의 결과와 이문옥의 결과는 $x/L=0.6$, 즉 췌기장의 60%가 되는 점에서 직선형과 교차하나, 본 연구는 직선부와 교차하지 않으면서 Keulegan의 결과와는 췌기장의 약 55%, 그리고 이문옥의 결과와 췌기장의 약 35%에서 교차한다. 또한 본 실험 결과와 이문옥의 결과를 비교한 염수췌기의 형상이 직선에 가까우나 Keulegan의 결과는 비선형성이 보다 강하다. 이러한 형상의 차이는 본 실험과 이문옥의 실험은 경사수로에서 수행되었고 Keulegan의 실험은 평면수로에서 실험이 수행되어 흐름조건 등이 서로 상이함에 기인하는 것으로 사료된다.

경계층을 측정하기 위해 본 실험에서는 전도율계와 데이터 로거를 사용하였다. 실험조건별로 염수췌기의

거동을 비교하기 위해 선단의 위치에 따른 총 6개의 단면에 대해 측정하였다. 각각의 단면을 측정된 결과 그림 5에 도시된 바와 같이 염수층의 선단부를 제외한 단면에서 밀도 분포가 이층류의 분포를 잘 따르고 있는 것으로 확인되었다. 성층화된 유체 내에서 경계층의 두께를 파악하는 것은 경계층의 거동을 이해하기에 필수적인 요소이다. 본 실험에서는 경계층의 두께를 판단하기 위해 밀도변동성분 분포를 활용하였으며, 안정층과 천이층의 구분을 위해 일정 수준 이하의 밀도변동성분이 연속될 때 해당구간을 안정층으로 판단하였다. 아래의 그림 6에서 굵은 선으로 표시한 부분이 경계층이다.

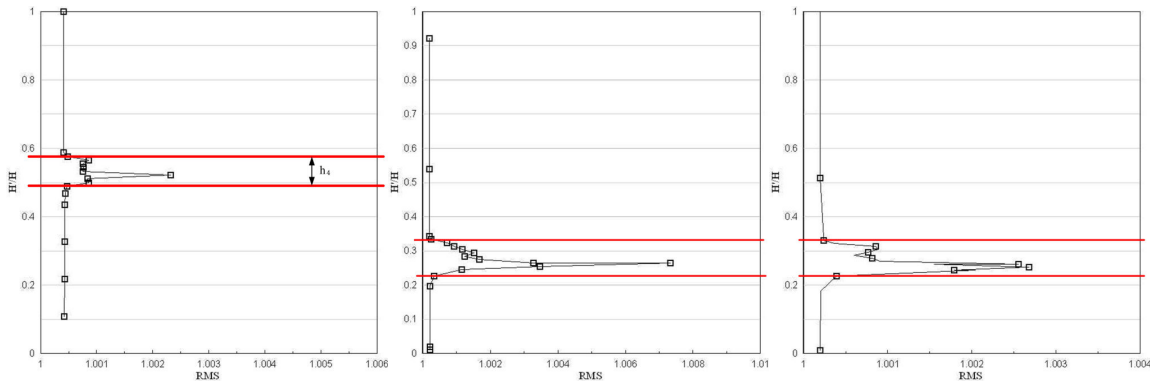


(a)RUN1

(b)RUN3

(c)RUN6

그림 5 밀도분포



(a)RUN1

(b)RUN3

(c)RUN6

그림 6 밀도변동성분분포

이층류 경계면의 불안정은 전단불안정(shear instability)에 의해서 발생한다. 이것은 경계면에 있어서 하천수의 유속이나 담수와 해수 사이에 밀도변화에 의하여 규정되는 리차드슨수와 관련이 있다. 경계층의 두께를 결정하는 방법에는 여러 가지가 있지만 상대적으로 밀도가 낮은 담수층의 유속이 빨라지면 리차드슨수가 감소하게 되고 혼합을 일으키려고 하는 힘이 커지게 된다. 하지만 경계층의 두께를 결정하는 요인은 담수의 유속뿐만이 아니라 담수와 해수간의 밀도차이에 그 원인을 둘 수도 있다. 그림 7은 선단부근의 리차드슨수에 따른 경계층의 두께관계를 도시하고 있다. 리차드슨수가 증가하게 되면 담수에 의한 혼합이 적게 일어나 경계층의 두께가 얇아져야 하지만 그림 7에 도시한 바와 같이 일정한 형태로 증가하고 있음을 알 수 있다. 이를 통하여 담수의 유속 뿐만 아니라 담수와 해수의 밀도차도 경계층의 두께 결정에 영향을 미치는 것으로 판단할 수 있다. 그림 8은 밀도프루드수에 따른 경계층의 두께변화를 도시하고 있다. 밀도프루드수가 증가하면 담수와 해수간의 밀도차가 커지거나, 담수의 관성력이 감소해 경계층의 두께가 얇아지며 실험결과는 이러한 경향을 잘 반영하는 것으로 관찰되었다. 그림 9는 리차드슨수와 경계층의 위치관계로써 이문옥(1990)의 실험결과와 비교를 한 것이다. 리차드슨수가 증가하게 되면 혼합을 일으키려고 하는 힘이 약해져 성층은 안

정화되고 경계층이 보다 아래쪽으로 치우쳐 형성되는데, 실험결과는 이러한 경향을 잘 나타내는 것으로 관찰되었다.

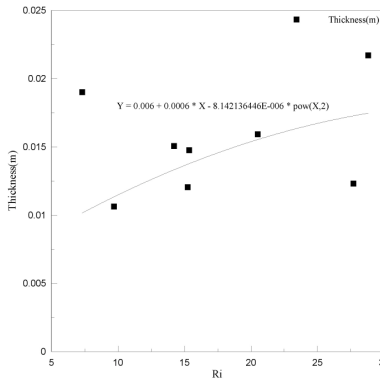


그림 7 리차드슨 수와 경계층 두께와의 관계

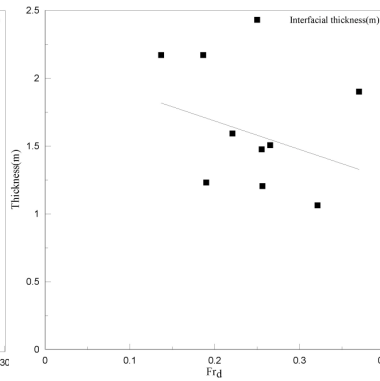


그림 8 밀도프루드수에 따른 경계층의 두께

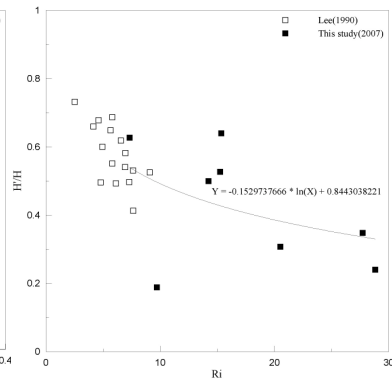


그림 9 리차드슨 수와 경계층 위치와의 관계

이층류에 경계면 거동을 명확히 규명하기 위해서는 단면에 대한 유속분포자료가 필수적이다. 본 연구에서는 단면평균유속을 사용하여 리차드슨수를 산정했으며, 이는 담수의 배수효과를 고려하지 못한 유속이다. 추후 경계면의 거동을 명확히 구명하기 위해 대상단면의 유속을 측정하고 유속분포를 산출하여 경계면의 거동을 구명해야 할 것이다. 전술한 바와 같이 염수쟁기는 자연현상인 까닭에 조석류와 바람 등의 외부 조건에 의해서 시간적으로 변화하는 비정상 상태의 현상이다. 향후 다양한 인자를 고려한 비정상 염수쟁기에 대한 연구가 이루어져야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 특정기초 연구비 지원(과제번호: R01-2006-000-11027-0; 과제명: 연안수질환경 개선을 위한 하천-해양 통합 해석기술 개발)으로 수행되었습니다.

참고 문헌

1. 이문옥(1990). 정상 염수쟁기의 형상과 흐름장의 물리적 특성, *Journal of Oceanological Society of Korea* 25(2). 62-73
2. Fischer, H.B., List, E.J., Koh, R.C.Y., Imberger, J., and Brooks, N.H.(1979) *Mixing in Inland and Coastal Waters*, Academic Press, New York, N.Y..
3. Keulegan, G.H.(1966) The Mechanism of Arrested Saline Water, *Estuary and Coastline Hydrodynamics*, Ed. by Ippen, A.T., McGraw-Hill Book Company, N.Y.. 546-574
4. Lewis, R.(1997) *Dispersion in Estuaries and Coastal Waters*, Wiley, New York, N.Y..