

# 정상 염수쐐기 거동 특성에 대한 실험적 연구

## Experimental Investigation on Behaviour of Arrested Saline Wedge

신현호\*, 류시완\*\*, 김영도\*\*\*, 서일원\*\*\*\*  
Hyunho Shin, Siwan Lyu, Young Do Kim, Il won Seo

### 요    지

최근 들어 하구의 이용도가 높아져 감에 따라 용수 취수, 염해 방지공, 하도 계획, 수질 개선 등의 문제와 관련하여 하도 내로 침입하는 염수쐐기를 적절히 제어해야 될 필요성이 대두되고 있다. 이를 위해 염수쐐기의 형태와 거동특성을 정확하게 예측하고 내부유동 구조를 구명하는 것이 필요하다.

염수쐐기의 수리학적 특성에 관한 국내외 연구는 미흡한 실정이다. 국내에서는 하구에서의 유동장 해석을 위한 연구와 염수침입 현상과 반대로 담수 유출이 해양환경에 미치는 영향에 관한 해양공학적 연구가 주로 수행되었다. 국외에서는 1950년대 초반에 하구에서의 염도 혼합양상과 확산계수의 결정 및 수학적 모형에서 각 항들의 상대적 중요성 평가와 같은 기초적인 연구가 수행되었으며, 1970년대에 컴퓨터의 급속한 발전에 힘입어 다양한 수치적 기법이 개발되어 폭이 좁고 성층화된 하구에서의 수치계산이 수행되었다.

본 연구에서는 정상 염수쐐기의 형태 및 거동특성을 파악하기 위하여 수리실험을 수행하였다. 실험은 염수수조, 담수유입부, 수로부로 구성된 실험수로에서 수행되었으며, 염수와 담수간의 밀도차에 근거하여 실험 조건을 설정하였다. 실험을 통하여 밀도차와 담수유입량에 따라 염수쐐기의 형태 및 거동특성이 지배됨을 관찰할 수 있었다.

**핵심용어 :** 약 혼합형 하구, 염수쐐기, 성층화

### 1. 서 론

연안 해역은 다양한 환경으로 구성되어 있어 생태적 가치뿐만 아니라, 거주, 생산, 관광, 레저 활동이 집중되는 사회·경제적 중요성이 매우 높은 공간이다. 이러한 연안 해역에 위치한 하구(Estuary)는 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 염수쐐기 현상을 수공학적인 목적에 따라 적절히 제어할 필요성이 대두되고 있다(Fisher *et al*, 1979).

염수쐐기의 수리학적 특성에 관한 국내외 연구는 미흡한 실정이다. 국내에서는 하구에서의 유동장 해석을 위한 연구와 염수침입 현상과 반대로 담수 유출이 해양환경에 미치는 영향에 관한 해양 공학적 연구가 주로 수행되었다. 국외에서는 1950년대 초반에 하구에서의 염도 혼합양상과 확산계수의 결정 및 수학적 모형에서

\* 정회원 창원대학교 토목공학과 대학원 석사과정 E-mail : johnny13@changwon.ac.kr

\*\* 정회원 창원대학교 토목공학과 조교수 E-mail : siwan@changwon.ac.kr

\*\*\* 정회원 인제대학교 환경공학과 조교수 E-mail : ydkim@inje.ac.kr

\*\*\*\* 정회원 서울대학교 지구환경시스템공학부 교수 E-mail : seoilwon@snu.ac.kr

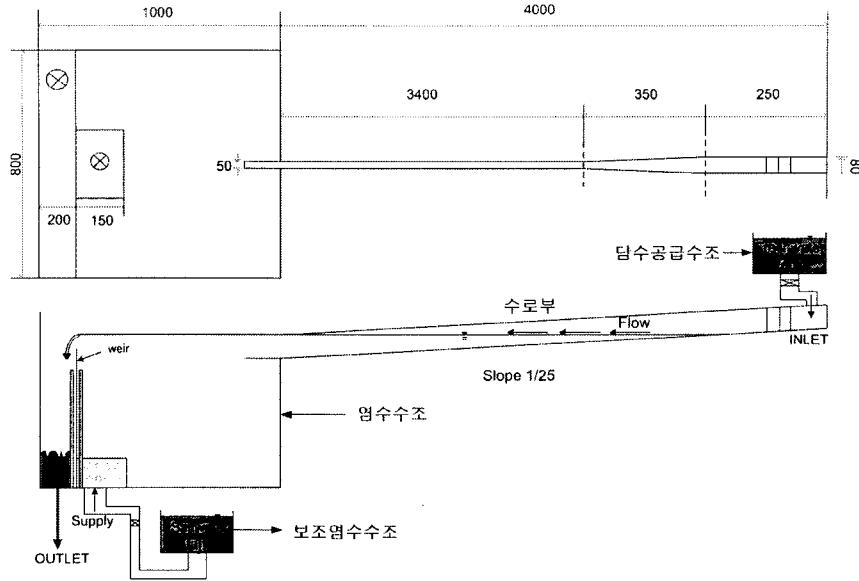


그림 1 실험장치(unit: mm)

각 항들의 상대적 중요성 평가와 같은 기초적인 연구가 수행되었으며, 1970년대에 컴퓨터의 급속한 발전에 힘입어 보다 많은 수치적 기법이 개발되어 폭이 좁고 성층화 된 하구에서의 수치계산이 수행되었다. 현재까지의  $x-z$ 방향에 관한 연구는 운동량방정식의 이송항을 제외하고 해석을 한 연구가 대부분이며, 자유수면의 계산을 위해 최상위층을 따로 계산하거나 수심방향 유속분포를 power-law에 의해 계산하고 이를 이용하여 염도의 이송-확산방정식을 해석한 연구가 있다.

본 연구에서는 실제의 하구 유입 하천에서 발생하는 염수쐐기의 형상 및 그 길이를 예측하기 위한 정성적 모델의 구축을 위해 정상 염수쐐기 실험을 수행하고 염수쐐기가 존재하는 흐름장에 있어서의 유속 및 경계면 층의 형상, 염수쐐기 형상 및 염수쐐기의 지배인자등의 특징을 살펴보고자 한다.

## 2. 실험장치 및 실험조건

실험장치의 개요를 그림 1에 나타낸다. 수로 기울기가 1/25이고 아크릴제의 장방형 개수로를 해역에 상당하는 아크릴제 염수 수조에 연결한 것을 사용한다. 수로부는 길이 400 cm, 폭 5 cm, 높이 200 cm이고 염수 수조는 길이 100 cm, 폭 80 cm, 높이 55 cm이면서 수로가 수조의 중앙에 연결되어 있다. 하구에서의 수심급 증에 의한 국소류 효과를 피하기 위하여 하구로부터 외측 12 cm까지 수로부와 동일한 기울기로 저판을 설치하였다.

염수쐐기의 선단 및 경계면의 위치를 일정하게 유지시키고 정상상태를 만들기 위하여 염수수조의 하류단 부분에 보조탱크를 연결하여 염수보급을 행하였으며 염수의 보급이 흐름에 크게 영향을 미치지 않게 하기 위해 보급부에 길이 15 cm, 폭 20 cm, 높이 15 cm의 다공성 막을 설치하였다.

담수가 유입하는 수로의 상류부에는 염수쐐기가 형성되는 구간에 흐름의 안정화를 위해서 유입부에 다공성 판과 단면이 축소하는 흐름 조절부를 두었으며 염수 수조의 웨어부분은 이후 수위 변동을 조절할 수 있게 아크릴제로 흠을 만들어 제작하였다. 그리고 염수의 염도를 측정하기 위해 전도율계(YSI85)를 사용하였으며, 측정 전 표준용액을 사용하여 계기에 대한 검정을 수행하였다.

실험조건은 표 1에 제시된 바와 같다.  $H_0$ 는 상류단의 수심,  $Q_0$ 는 담수의 유량,  $V_0$ 는 유속을 나타낸다. 그리고  $\sigma$ 는 염수와 담수의 평균밀도에 대한 밀도 차이의 비로 무차원화 시킨 값이다.

표 1 실험 조건

Run	$H_o(\text{cm})$	$Q_o(\text{l/s})$	$V_o(\text{cm/s})$	$\sigma$	Reynolds No., $Re$	Densimetric Froude No., $F_d$
1	0.5	0.2	26.67	0.029	1042	1.11
2	0.5	0.2	26.67	0.039	1042	0.96
3	0.5	0.2	26.67	0.044	1042	0.91
4	0.6	0.3	33.33	0.034	1542	1.27
5	0.8	0.5	41.67	0.034	2510	1.60
6	1	0.7	46.67	0.034	3432	1.78
7	1.2	0.9	50.00	0.034	4412	1.90

### 3. 결과 분석

서론에서 언급한 바와 같이 연안해역의 중요성과 관련하여 실제 하구에서 발생하는 대표적 현상인 염수쐐기의 형상 및 특성을 예측하는 것은 환경수리학적인 측면에서 매우 중요하다. 하구역에서 발생하는 염수쐐기의 대부분은 유입되는 하천과 염수의 밀도경사 때문에 생기는 것이지만 다른 여러 가지 요인이 존재할 수 있다. 예를 들면 하구역에 불어오는 바람, 연안해역의 조석, 하구부근 지역의 지하수 개발등이 대표적인 예이다. 그리고 염수쐐기는 이러한 인자들에 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 염수쐐기의 거동에 관한 해석 결과는 실용면에서도 유효하게 사용될 수 있다(이문옥, 1990). 향후 수행될 비정상상태 염수쐐기 형상의 실험결과와 비교 및 분석을 위해서 수행한 정상적 염수쐐기의 형상에 관한 실험결과를 아래의 그림 2와 그림 3에 나타내었다. 그림 2는 염수쐐기 형상에 관한 그래프로서, 횡축은 염수쐐기 길이  $L$ 에 대해서 하구로부터의 거리  $x$ 를 무차원화 한 것이며, 종축은 쐐기 형성 대상구간의 하구부에 해당하는 염수심  $H^*$ 에 대해서 일정한 간격을 둔 염수심  $H$ 를 무차원화한 것이다. 이를 통하여 염수쐐기의 형상은 흐름의 Reynolds수와는 독립적인 관계임을 알 수 있다. 이는 Keulegan(1966)과 이문옥(1990)이 실험을 통해 관찰한 결과와 동일하다. 약간의 산포도를 보이고 있지만 선단부근의 일부를 제외하고는 거의 직선형이다. 그림 2에 도시된 바와 같이 본 연구에서 수행된 실험결과, 실험자료를 통해 염수쐐기 형상을 표현하는 직선식을 아래 식과 같이 도출하였다..

$$\frac{H}{H^*} = 1.012 - 0.984 \left( \frac{x}{L} \right) \quad (1)$$

$$\frac{H}{H^*} = a - b \left( \frac{x}{L} \right) \quad (2)$$

그림 3은 염수쐐기의 형상을 Keulegan(1966)과 이문옥(1990)의 실험 결과와 비교한 것이다. 점선은 식(2)의  $a$ 와  $b$ 의 값이 1이 되는 경우이며, Keulegan의 결과와 이문옥의 결과는  $x/L = 0.6$ , 즉 쐐기장의 60%가 되는 점에서 직선형과 교차하나, 본 연구는  $x/L = 0.7$ , 즉 쐐기장의 70%가 되는 점에서 직선형과 교차한다. 또한 본 실험 결과와 이문옥의 결과를 비교한 염수쐐기의 형상이 직선에 가까우나 Keulegan의 결과는 비선형성이 보다 강하다. 이러한 형상의 차이는 본 실험과 이문옥의 실험은 경사수로에서 수행되었고 Keulegan의 실험은 평면수로에서 수행되었기에, 흐름 조건 등이 서로 상이함에 기인하는 것으로 사료되는 바이다.

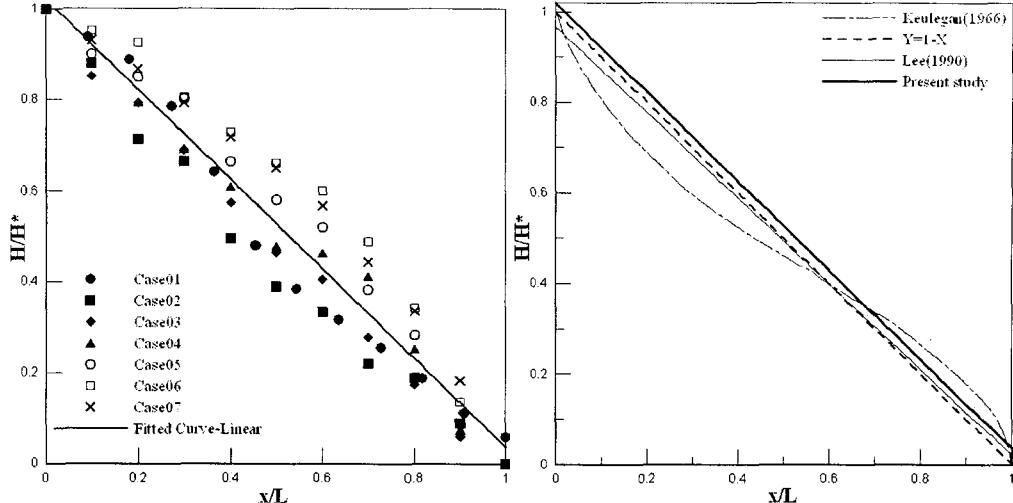


그림 2 염수쐐기 형상

그림 3 염수쐐기 비교

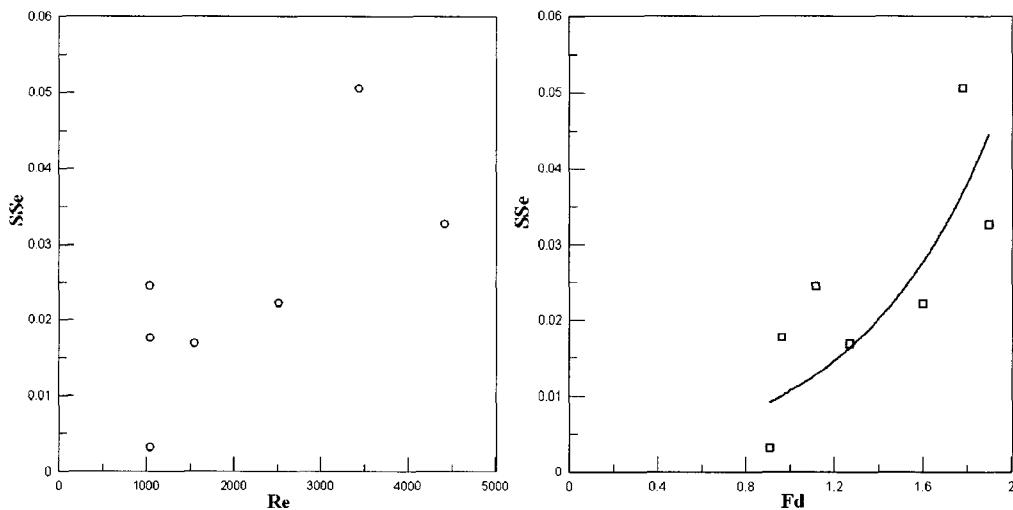


그림 4 Reynolds수에 따른 잔차합

그림 5 밀도Froude수에 따른 잔차합

그림 4는 Reynolds수와 밀도 Froude수에 대한 각 Case별 잔차의 합을 구해본 것이다. 염수쐐기의 형상은 앞에서 언급한 바와 같이 Reynolds수와는 독립적인 관계임을 알 수 있었다. 하지만 밀도 Froude수에 따른 잔차의 합 분포는 밀도 Froude수가 증가함에 따라 지수함수 형태로 비선형성이 강해짐을 알 수 있다. 하지만 수행된 실험 케이스가 많지 않고 실험조건이 제한적이기에 향후 다양한 조건들에 대한 추가적인 연구가 수행되어야 하는 것으로 판단된다.

### 3. 결론 및 향후 계획

본 연구에서는 정상 염수쐐기의 형상 및 물리적 특성을 알아보기 위하여 수리실험을 수행하였고 염수쐐기의 형상은 Reynolds수와는 독립적인 관계이고 밀도 Froude수에 대해서는 그 결과 지수함수 형태로 비선형성이 강해지는 것으로 관찰되었다.

평면 수로에서 실험을 수행한 Keulegan의 결과와는 달리 염수쐐기의 형상은 직선형에 가까웠으며 이는

수로 기울기로 인한 염수쐐기 거동특성에 의한 것으로 판단된다.

실제의 자연현상은 본 실험에서의 조건과 달리 여러 가지 요인들이 작용하여 염수쐐기의 거동은 비정상적 거동특성을 나타낸다. 따라서 향후 비정상상태의 염수쐐기에 관한 수리실험이 수행되어야 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.

### 참고문헌

1. 이문옥(1990) "정상 염수쐐기의 형상과 흐름장의 물리적 특성" *The Journal of the Oceanotogical Society of Korea* Vol. 25, No. 2, pp. 62-73
2. Roy Lewis(1997), *Dispersion in Estuaries and Coastal Waters*.
3. Fischer.H.B, Koh.R.C.Y, Brooks.N.H and Imberger.J(1999) *Mixing in inland and coastal waters*.
4. Keulegan(1966) "The Mechanism of Arrested Saline Water" *Estuary and Coastline Hydrodynamics* pp. 546-574.Ed. by A.T. Ippen, McGraw-Hill Book Company, NY.