

낙동강 하구둑 염수침투의 거동에 관한 연구

Study on Behavior of Salinity Wedge at Nakdong River Barrage

박상길*, 김도훈**, 한종수***, 정상우****

Sang Kil Park, Do Hun Kim, Chong Soo Han, Sang Woo Jung

요 지

본 연구에서는 낙동강 하구둑의 수문을 완전히 개방한 경우로 상정하여 외해로부터 염수가 하천의 상류방향으로 침입해 가는 과정을 수치모의하였다. 본 연구의 목적은 염분 침투현상에 대해 모델링 및 과거 관측한 자료를 이용하여 낙동강 하구둑 상류로 침투되는 염수침투의 거동을 규명함으로써 낙동강 하구둑 상류지역의 기수역을 확보하고자 하는 것이다. 수치모의를 수행한 결과, 대상 영역 내에서 염수가 하구부를 시작으로 낙동강 상류방향으로 활발하게 침입하고 있음을 알 수 있었다. 각 경우의 결과로부터 밀도차에 의한 담수와 염수의 층 분할현상은 유입유량이 작을수록 더욱 강하게 나타나고 유입 유량이 클 경우 층분할 현상이 작아지며 좁은 영역에서 담수와 염수의 혼합이 이루어지고 있다는 것을 알 수 있다.

핵심용어 : 염분 침투길이, 염분 분포, 염분도 측정, 염수침투의 거동

1. 서론

낙동강 하구둑은 강물과 바닷물의 자연스러운 교환을 인위적으로 차단하는 구조물이기 때문에 이로 인한 생태계 단절 등 고유의 하구기능을 손상시키는 것이 불가피하다. 하지만 이러한 단점에도 불구하고 하구둑이 건설되는 가장 큰 목적중 하나는 주변지역의 안정된 용수공급이다. 하지만, 최근 염분 농축현상과 염분 침투는 낙동강에서 새로운 문제로 대두되고 있다. 하구주변의 환경변화로 인한 하구의 변화에 관한 연구는 많이 진행되어 왔지만, 낙동강 하구둑의 유지와 관리에 대한 필요한 염분 침투에 관한 조사는 많이 이루어지지 않았다. 본 연구에서는 낙동강 하구둑의 수문을 완전히 개방한 경우의 상황으로 외해로부터 염수가 하천의 상류방향으로 침입해 가는 과정을 수치모의하였다.

2. 하구 흐름 해석

하구(河口)는 하천과 바다의 교차지점으로 담수(Fresh water)와 해수(Salt water)가 서로 혼합하는 수역으로 이러한 수역을 기수역(汽水역, Brackish water zone)이라고 하며 하구역(河口域, Estuary)라고도 한다. 천이역인 하구의 흐름은 하천류, 조석파와 해빈류, 지형 그리고 담수와 해수 간의 밀도차이에 영향을 받는다. 그리고 담수가 하천을 지나게 되면 기수역부분에서 바다의 조위에 영향을 받게 된다. 담수와 해수의 염분이나 수온의 차이 또는 부유물질의 농도 분포등에 기인하는 밀도차가 흐름의 연직구조에 큰 영향을 주는 것이 하구 수리현상의 특징이라고 할 수 있다. 하구의 조건들에 있어서 깊이에 따른 밀도의 분포는 염도와 온도에 의해서 지배된다. 하구에서 표

* 정회원 · 부산대학교 사회환경시스템 공학부 토목공학전공 교수 · E-mail : sakpark@pusan.ac.kr
** 정회원 · 부산대학교 사회환경시스템 공학부 토목공학전공 · E-mail : cicope@kwater.or.kr
*** 정회원 · 부산대학교 사회환경시스템 공학부 토목공학전공 · E-mail : pixelas@naver.com
**** 정회원 · 부산대학교 사회환경시스템 공학부 토목공학전공 · E-mail : sangwoocivil@naver.com

층 염도의 감소는 상류 하천을 통하여 유입되는 담수에 의해 발생되고 깊이에 따라 확연한 염도의 차이를 보이는 하구는 염수썰기(Salinity wedge)가 형성된다. 조석이나 하천류의 작용에 의해 전단력이 커지면 내부파나 대규모의 와류가 밀도 경계면에서 발생하여 발달한다. 그 결과, 밀도경계면을 통해서 운동량이나 질량의 연직방향의 교환이 크게 되어 담수와 해수간의 혼합이 촉진된다. 이 혼합의 강약에 의해 하구 밀도류의 유동형태는 그림 1. 및 그림 2.와 같이 세가지 형태로 분류된다.

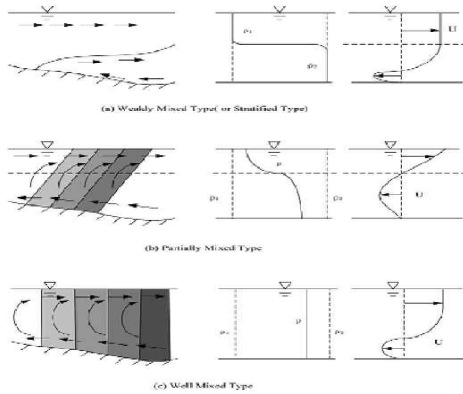


그림 1. 하구흐름의 연직구조

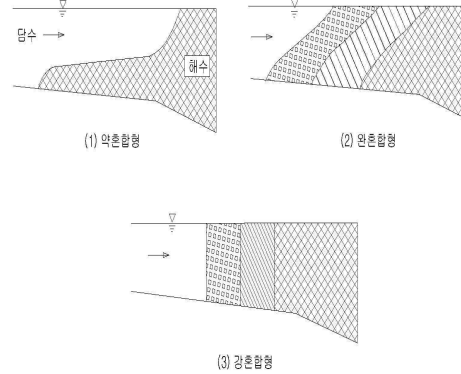


그림 2. 염수썰기의 혼합형태

3. 모델링 개요

일반적으로 유체역학적인 현상을 모방한 수치해석적인 접근은 수자원의 계획과 경영에 중요한 역할을 하고 자연의 상세한 이해와 하구의 수질 동역학의 이해에 관해서 중요한 역할을 한다. 특히, 바닥층에서의 퇴적물 운송 그리고 오염물질의 운송과 같은 문제나 바닥에 가까운 흐름의 정확한 조사를 위해 중요하다고 할 수 있다. 결과적으로 1차원적인 접근이나 수심이 포함된 이차원적인 모델은 종종 계산상 오류가 발생할 수 있다. 그런 관점에서 3차원 모델은 하상마찰력 및 물질 운송등을 주의깊게 고려하여 이용되어야 한다.

3.1 ECOMSED 모델의 개요

본 연구에 사용한 ECOMSED(Three-Dimension Hydrodynamic and Sediment Transport Model)는 1980년대에 태동된 POM(Princeton Ocean Model)을 근본하는 모델을 기본으로 하고 있으며 기본적으로 천수방정식을 지배방정식으로 하고 있다. 그러므로 하구, 해안 그리고 해양등 다양한 지표수에 적용이 가능하다. 1990년대 중반 이후에는 점착성 저질에 대한 모듈이 추가 되었으며 이후 비약적인 발전을 거듭하여 다양한 모델링을 수행 할 수 있도록 발전되었다. 이 모형은 직교 곡면형 선형 좌표계(Orthogonal Curvilinear Coordinate System)을 이용함으로써 유한 요소의 격자 생성과 같이 불규칙한 해안경계의 표현력이 뛰어나고 특정 구간에 대해 집중적으로 분석 할 수 있는 장점을 가지고 있다. 또한 본 모델은 물의 온도, 염분, 혼합과 수송등에 관한 퇴적물 운송 모델링도 가능하다. 앞서 언급한 기능 이외에도 하구와 해안·해양에서의 부유물질, 용존 추적자, 중립 입자 추적등의 수송과 반응을 고려할 수 있다. 점착성 혹은 비 점착성이 유사의 수송과 변환 과정이 이 모듈에서 계산되어지는데, 특히 Clay나 Silt 혹은 유기물질등의 점착성 저질에 대해서는 재부유, 침적, 수송등을 계산하며, 가는 모래 등과 같은 비점착성 저질의 부유 수송은 Van Rijn의

이론(Van Rijn, 1984)에 근거해서 계산을 한다. 저질경계에서 추적자의 수송 모듈을 이용하면 하천 방류라던가 특이한 전이토가 속한 지역등 특수한 발원으로부터의 저질의 변환과정도 모의할 수 있는데 이러한 종류의 모의는 저질-경계라는 특별한 추적자를 이용하여 계산하게 된다. 특히, 이와 같은 수송모의는 보전성으로 간주될 수 있고 1차원 소멸을 고려하는 비보전성으로 간주되어 해석 될 수 있는 기능을 가지고 있다(HydroQual, 2002).

3.2 지배방정식

순환 모델의 기본이 되는 방정식은 속도장, 표면장, 수위장, 온도장 그리고 염도장으로서 표현이 가능하다. 이러한 방정식은 3차원 좌표계로서 네가지 지배방정식(연속 방정식, 운동량 방정식, 압력 방정식, 보존 방정식)으로 나타낼 수 있다. X, Y, Z가 동쪽, 북쪽, 수직 방향으로 증가하는 직교 좌표의 시스템으로 고려하면, 자유 수면이 $\eta(x, y, t)$ 에 위치하고 바닥이 $Z=-H(x, y)$ 에 있다. 만약 V 가 (U, V)성분과 ∇ 를 가지는 수평적 속도 벡터라면, 연속 방정식은 다음과 같다.

$$\nabla \cdot \bar{V} + \frac{\partial W}{\partial Z} = 0 \quad (1)$$

또한, 레이놀즈 운동량 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \bar{V} \cdot \nabla U + W \frac{\partial U}{\partial z} - fV = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z} \left(K \frac{\partial U}{\partial z} \right) + F_x \quad (2)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \bar{V} \cdot \nabla V + W \frac{\partial V}{\partial z} - fU = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_M \frac{\partial V}{\partial z} \right) + F_y \quad (3)$$

$$\rho g = -\frac{\partial P}{\partial z} \quad (4)$$

여기서, ρ_0 는 기준 밀도, ρ 는 현장 밀도, g 는 중력가속도, P 는 압력, K_M 은 난류 운동량 혼합의 연직 와동 확산계수이다. 위도 변화에 대한 Coriolis Parameter f 는 β 평면 근사를 사용하고 있다.

수온과 염분에 대한 보존 방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + \bar{V} \cdot \nabla \theta + W \frac{\partial \theta}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K_H \frac{\partial \theta}{\partial z} \right] + F_\theta \quad (6)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \bar{V} \cdot \nabla S + W \frac{\partial S}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K \frac{\partial S}{\partial z} \right] + F_S \quad (7)$$

여기서, θ 는 포텐셜 온도(혹은 천수에서 현장 수온)이고 S는 염분을 나타낸다. 열과 염분의 난류 혼합에 대한 연직 와동 확산은 K_H 로 나타낼 수 있다.

3.3 직교·곡선 격자망

주수로와 홍수터를 구별이 되는 일반 하천의 특성을 고려하여 격자를 생성할 필요가 있다. 또한 하상고를 전 격자에 분포시키는 방법 중 가장 단순한 방법인 전·후면 단면의 선형보간은 실제 주수로내의 최심부를 표현하는데 한계가 있다. 본 연구에서는 이러한 문제점을 제거하여 실제 하도 형상에 가깝게 표현하기 위하여 횡단면 데이터의 선형 보간 및 Kriging법을 순차적으로 적용하였으며, 측량 단면과 평면도를 참고하여 수정을 하였다. 염수침입 현상을 재현하기 위하여 수평방향에 직교 곡선좌표계를 연직방향에는 σ 좌표계를 도입하여 검토대상 수심주변을 더욱 세밀하게 계

산 할 수 있게 하였다. 이러한 격자망은 Batten과 Han[1981]에 의해 제안되었다

4. 수치 모델링

4.1 대상 영역 및 계산 조건

계산 영역은 낙동강 하구둑에서 가덕도 인근해상 약 16km에서부터 상류쪽 약 84km지점(진동)까지 총 100km 구간이다. 실제 해역의 해수 유동 및 염분 침투현상을 모의하기 이전에 연구대상지를 단순화하여 연구 대상지인 낙동강의 수심을 현장과 동질성을 가질 수 있도록 수평격자(종단방향 504개, 횡단방향 48개)를 구성하였다. 하천의 흐름방향을 표현하기 위하여 하천측량 단면을 참고로 최심하상고를 중심선으로 하는 직교곡선격자망을 구축하였다. 하천의 하상고는 하구부에서 진동지점까지 0.0001정도로 매우 완만한 경사를 가지고 있고, 평면상으로 하도는 사행하천의 형태이다. 본 연구에서는 전 수역을 담수(염도 0.0psu)를 적용하였고 총 구간에서의 수온은 20℃로 동일하다고 가정하였다. 또한 상류부에서는 각각 75 /s, 130m³/s를 유입시켰다. 하류부 끝단에서의 조위는 M.W.L, H.W.L로, 염도는 33.0psu로 가정하였다. 각 조위별로 10개의 층으로 격자를 구성하였다.

4.2 수치모의 결과

본 연구는 낙동강 하구에서의 염분침투를 알아보기 위한 모델링을 실시했다. 그러나 염수침입에 대한 수치모의는 대상지역의 3차원형상, 외력의 형태에 따라 매우 복잡하다. 특히 본 연구에서 대상으로 하고 있는 하구부를 포함한 하천의 경우 조위와 상류단에서 유입하는 유량조건에 따라 다양한 결과를 나타낼 수도 있다. Fig. 3은 각 CASE에 따른 염수빼기거동의 변화를 도시한 것이다. 또한 각 조건별 1psu이상 염분침투거리를 표 1.에 제시하였다.

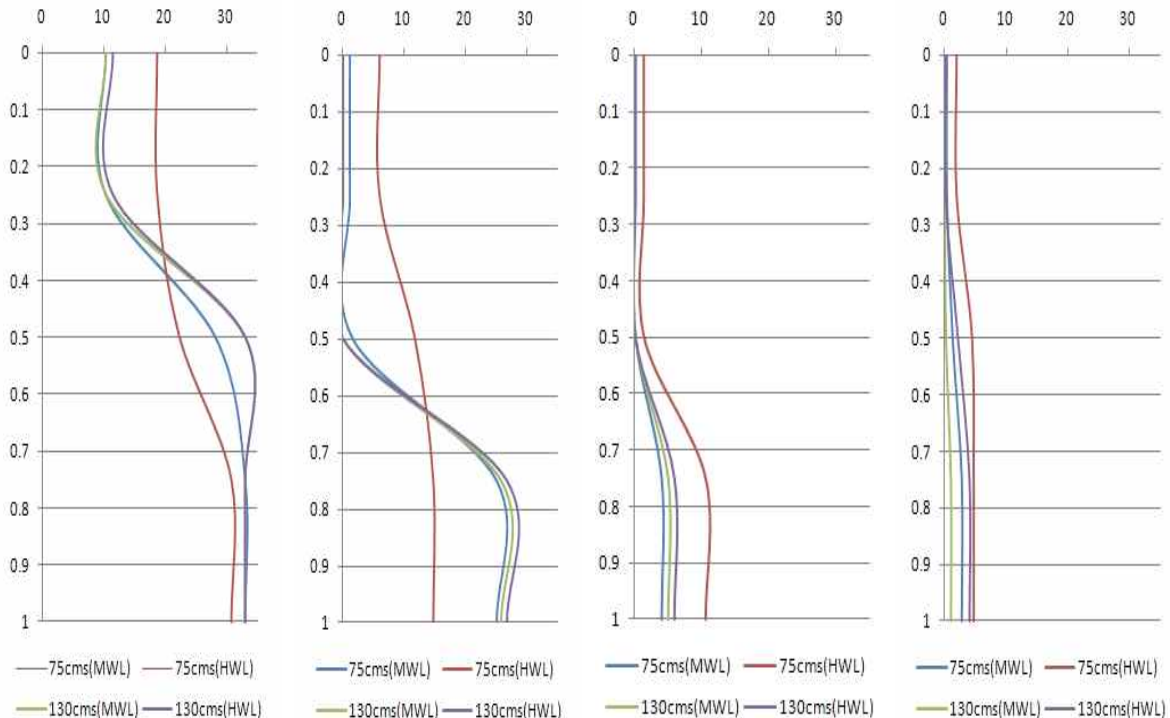


그림 3. 낙동강 하구둑 하류에 대한 염분의 수직분포 (완전개방시)

표 1. 수치모델링 결과

조위	유입유량	1psu이상 도달거리 (하구둑 기준, km)	
		표층	저층
H.W.L	75 /s	19.40	28
	130m ³ /s	8.4	23.8
M.W.L	75m ³ /s	8.68	19.88
	130m ³ /s	7.28	18.2

5. 결론

ECOMSED 모형을 이용하여 각각의 유입유량별로 수치모의를 수행한 결과, 대상 영역내에서 염수가 하구부를 시작으로 낙동강 상류방향으로 활발하게 침입하고 있음을 알 수 있었다. 각 경우의 결과들로부터 갈수기 낙동강에서의 염분침투는 조위나 상류유입량과 같은 외부 조건들에 민감하다는 것도 알 수 있다. 또한, 밀도차에 의한 담수와 염수의 층 분할현상은 유입유량이 작을수록 더욱 강하게 나타나고 유입 유량이 클 경우 층분할 현상이 작아지며 좁은 영역에서 담수와 염수의 혼합이 이루어지고 있다는 것을 알 수 있다. 하지만, 향후 실내실험과 현장관측 자료등을 통한 매개변수 보정 및 지속적인 모니터링등 다양한 부분에 대한 조사가 필요하다고 할 수 있다.

참고 문헌

1. 한중수 (2011). 낙동강 하구 염분 농도 분포에 관한연구. 한국해양·해양공학회논문집, 23(1), 101-108
2. 김도훈 (2010). 낙동강 하구둑 염분 침입 조사·분석 및 방지대책 연구. 박사학위논문. 부산대학교.
3. 지운, Julien Pierre Y., 박상길, 김병달 (2008). 낙동강 하류의 유사특성과 낙동강하구둑 준설 효과에 관한 수치모의 연구. 대한토목학회논문집, 28(4), 405-411.
4. 한국건설기술연구원 (1989). 하천 유사량 산정방법의 선정기준 개발. 기본연구과제 보고서. 89-WR-112, 건기연.
5. 한국건설기술연구원 (1990). 수정 아인쉬타인 방법의 한국하천에의 적용 - 하천총유사량의 추정. 90-WR-112, 건기연.
- 한국건설기술연구원 (1991). 하상변동 예측모형의 비교분석. 91-WR-112, 건기연.
6. 한국수자원공사 (1995). 낙동강하구둑 퇴사 거동 특성에 관한 연구.
7. 한국수자원공사 (2004). 낙동강 유역조사.
8. 한국수자원공사 (2008). 낙동강 하구둑 유지관리 개선방안 연구보고서.건설교통부(2003), 도로 배수시설 설계 및 유지관리 지침 연구.
9. HydroQual (2002). A primer for ECOMSED version 1.3 User Manual
10. Park, S.K., Julien, P.Y, Ji, U. and Ruff, J.F. (2008). Case Study: Retrofitting large bridge piers on the Nakdong River, South Korea. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 134(11), 1639-1650.