



# 염분수지 및 EFDC 모형을 이용한 간척 담수화호 염도변화모의 Assessing Temporal and Spatial Salinity Variations in Estuary Reservoir Using EFDC

성충현<sup>\*,†</sup>

Seong, Chung Hyun

## Abstract

Forecasting salinity in an estuary reservoir is essential to promise irrigation water for the reclaimed land. The objective of the research was to assess salinity balance and its temporal and spatial variations in the Iwon estuary reservoir which has been issued by its high contents of salinity in spite of desalination process for four years. Seepage flows through the see dikes which could be one of possible reason of high salinity level of the reservoir was calculated based on the salinity balance in the reservoir, and used as input data for salinity modeling. A three-dimensional hydrodynamic model, Environmental Fluid Dynamics Code (EFDC), was used to simulate salinity level in the reservoir. The model was calibrated and validated based on weekly or biweekly observed salinity data from 2006 to 2010 in four different locations in the reservoir. The values of  $R^2$ , RMSE and RMAE between simulated and observed salinity were calculated as 0.70, 2.16 dS/m, and 1.72 dS/m for calibration period, and 0.89, 1.15 dS/m, and 0.89 dS/m for validation period, respectively, showing that simulation results was generally consistent with the observation data.

**Keywords:** Estuary reservoir; EFDC; reclaimed land; salinity balance

## 1. 서 론

국내 간척사업으로 조성된 담수호의 저수량은 약 29 억톤으로 우리나라 농업용수 이용량의 약 18%에 해당하며, 담수호로부터 관개중이거나 관개계획중인 논면적 183천 ha에 해당한다 (KRC, 2009; MOCT, 2006). 이처럼 간척 담수호는 우리나라의 주요 수자원 중 하나이다. 담수호는 처음에는 해수를 포함하고 있다가, 유역으로부터 유입되는 담수로 희석된 물이 적절한 배수갑문의 조작을 통하여 바다로 방류되는 과정을 통하여, 담수화된다. 담수화가 완료된다고 해도 호내 염분농도는 바다로부터 침입해 오는 염분 때문에, 일정한 범위 내에서 계절적인 변동이 반복하기 때문에, 가뭄시 염해피해가 보고되기도 한다 (Kang et al., 1993). 특히, 이월간척지구는 2005년부터 담수화를 시작하였으나, 설계당시의 담수화기간인 2년을 경과하고서도 염도문제로 인해 간척지에서 경작을 할 수 없는 상황이다 (KRDC, 2009). 따라서, 간척지구의 잠정적인 염해피해를 막고 안정적인 관개용수 공급하기 위해서는, 담수호내 염분농도의 모의와 예측이 필요하다.

담수호의 염도에 영향을 미치는 요소로는 지형, 기상, 담수 유입량, 염분유입량 등이 있으며, 각 요소를 고려하여 담수화 해석을 실시한다 (Kang et al., 1993). 담수호 염도예측 방법은 호소의 체류시간 및 교환율을 적용하는 방법, 염분수지모델을 이용하는 방법 및 담수호를 격자로 구성하여 해석하는 수리해석모형을 이용하는 방법으로 구분할 수 있다. 이월 담수화호에서 이용된 Minami 식의 염분수지 경우 방조제 역침투수량, 배수갑문 누수량 등의 입력자료를 기존의 경험식 등으로 계산하기 때문에 담수화모의 결과의 불확실성이 커지게 되므로, 장기간의 현장조사를 통하여 각 입력자료들의 정량화가 필요하다 (KRC, 1984). 한편, 수리해석모형의 경우 염분을 포함한 여러 수질항목의 모의가 가능한 3차원 기반의 수리수질모형들이 많이 개발되어, 호내 염도예측 및 과거 담수호 염도모의시 구현이 어려웠던 담수호에서 염분의 공간분포 모의도 가능하다. 그 중에서 Environmental Fluid Dynamics Code (EFDC) 모형은 최근 국내외의 여러 연구에 이용되고 있다.

EFDC 모형은 현재까지 여러 연구에 적용되어 왔는데, 그 중 버지니아의 제임스 (James) 강과 요크 (York) 강에서 담수 유입으로 인한 희석 효과 연구 (Hamrick, 1995), 미국 팜리코 (Pamlico) 하구언에서 유량, 풍향의 영향에 대한 염분 성층화 연구 (Xu et al., 2008), 미국 세인트루시 (St. Lucie) 하구언에서의 염분분포연구 (Ji et al., 2007) 및 중국의 오우지영 (Oujiang) 하구언에서의 염분 성층화 연구 (Jiang et al., 2009)

\* Department of Biological Systems Engineering, Virginia Polytechnic Institute and State University

† Corresponding author

Tel.: +1-540-553-4162 FAX: +1-540-231-3199

E-mail: chseong@vt.edu

Received: November 13, 2014

Revised: November 14, 2014

Accepted: November 17, 2014

등이 있다. 국내에서는 Kim et al. (2008)은 섬진강 하구역에서 동계 및 하계의 하천유출수에 따른 염도모의를 실시하여 하천유출량에 따른 염도차이를 모의하였으며, 평택항의 부유사 이송 (Seo et al., 2005) 및 대산항의 준설 부유사 이송 (Kim et al., 2011)에 관한 연구, 소양호 탁수거동 (Byun et al., 2009), 금강하류의 수리-수질 연구 (Seo et al., 2009) 및 낙동강 하구부 수리해석 (Hur and Park, 2009)에 관한 연구 등에 이용된바 있으며, 새만금호의 수질변화 (Lee et al., 2010) 및 퇴적변화 (Jeong, 2010) 등에 적용된바 있다.

본 연구에서는 담수화호의 염도모의를 위해서 관측된 수문자료와 염도자료를 바탕으로 호내 염분수지를 정량적으로 해석하고, 호소수질모형을 적용하여 염도모의를 실시하고자 한다. 또한 이로부터 간척 담수화호에서의 염도예측에 대한 모형의 적용성을 평가하고자 한다.

## II. 재료 및 방법

### 1. 연구대상지역

이원 담수화호는 충남 태안군 원북면에 위치하고 있으며, 1990년에 간척농지 개발사업을 착공하여 1997년에 최종물막이 공사를 완료하였다. 담수호의 면적은 282 ha 이며, 총 저수량은 460 ha·m 이며, 총 1,002 ha 에 관개용수를 공급하도록 설계되었다. 방조제의 길이는 2,918 m이고, 조석을 고려하여 배수갑문을 통해 해수를 소통시키며 2005년부터 담수화를 실시하였다. 설계단계에서 2년으로 계산된 담수화는 방조제의 누수 문제를 비롯한 여러 제반문제들로 인하여 2009년 현재 담수화 5년차임에도 불구하고 호소 염도가 높아 관개용수가 농경지에 공급되지 못하고 있다.

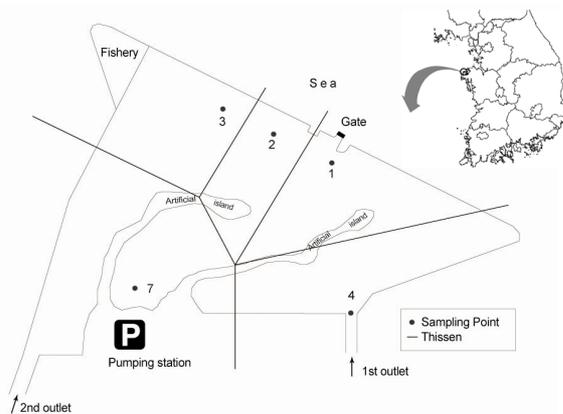


Fig. 1 Schematic map of the Iwon estuary reservoir with Thiesen network for averaging salinity observations

Fig. 1에서 볼 수 있듯이, 이원호로 유입되는 하천은 제1호 배수간선, 제2호 배수간선이며, 배수갑문을 통하여 방류가 되고 있다. 또한 호소 중간에 2 개의 인공섬이 설치되어 있고, 인공섬 사이에 양수장이 위치하고 있다. 한편, 호의 북서쪽에 양어장 부지가 있으며, 제방으로 막혀 있으나 2 개의 연락관이 매설되어 있다. 호내시설로 방조제 2,981 m, 배수갑문 1 개소 (4.0 m × 3.0 m × 6 런), 양수장 1개소 (600 m/m × 450 HP × 4 대) 등이 있다.

### 2. 담수화호 염분수지 및 염도자료

#### 가. 염분수지

호내 염분수지는 물수지와 밀접한 관계를 가진다. 담수화호의 물수지는 식 (1)에 의해 계산될 수 있다 (Seong, 2014).

$$ST_t - ST_{t-1} = (IN_t + PR_t) - (RE_t + EV_t + PE_t + SP_t + GL_t + IT_t) \quad (1)$$

여기서,  $ST_t$ 는  $t$  일의 저수량 (Storage),  $IN$ 은 유입량 (Inflow),  $PR$ 은 강수량 (Precipitation),  $RE$ 는 방류량 (Release),  $EV$ 는 증발량 (Evaporation),  $PE$ 는 침투량 (Percolation),  $SP$ 는 제방 침윤량 (Seepage),  $IT$ 는 양수량 (Intake),  $GL$ 은 배수갑문누수량 (Gate leak) 이다. 한편, 유입량은 지표유출 (surface)과 지하수유출 (ground water)의 합을 나타낸 것이다. 제방침윤량과 배수갑문 누수량 요소는 외조위에 따라 호소로 유입되거나 유출되는 과정을 반복하게 되는데, 일단위로 계산하게 되면 하루 두 번의 만조와 간조에 따른 유입과 유출의 양이 평형을 이룬다고 가정하여, 물수지 계산시 제외하였다. 또한, 침투량의 경우도 지하수위가 높다는 점을 고려하여 미미한 것으로 가정하였고, 현재 관개를 실시하고 있지 않은 점을 고려하면, 본 연구에서 사용된 물수지는 유입량, 방류량, 증발량, 강수량의 4가지 요소로 압축되며, 식 (2)로 단순화될 수 있다.

$$ST_t - ST_{t-1} = (IN_t + PR_t) - (RE_t + EV_t) \quad (2)$$

담수호의 염분수지는 Fig. 2과 같이 구성할 수 있다. 담수호의 염분은 강우 및 관개회귀수에 의한 상류로부터의 유입량, 배수갑문 누수, 호저토로부터의 확산 염분, 제방으로부터의 침윤, 개답지 토양중의 용탈 등으로 인해 유입되고 관개용수로 취수되거나 배수갑문에 의해 염분이 방류되어 유출되는 형태로 표현할 수 있으며, 식 (3)과 같다. 다만, 배수갑문 누수와 제방침윤 항목은 만조시에는 염도가 높은 해수가 호소로 유입되며, 간조시에는 호소중 담수와 희석된 염도가 낮은 물

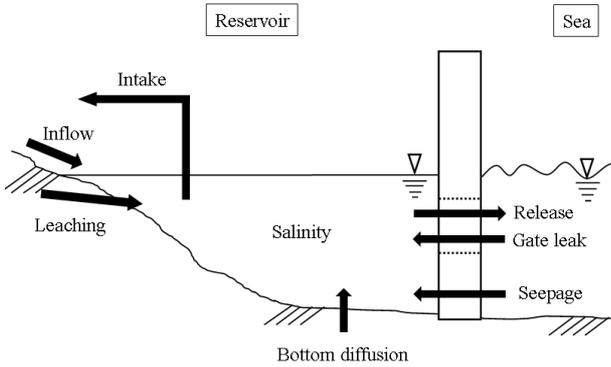


Fig. 2 Schematic diagram of salinity balance in an estuary reservoir

이 외에도 유출되기 때문에 일단위로 계산시 염분수지의 차이가 발생한다. 따라서, 물수지 계산의 경우와 달리, 배수갑문 누수와 제방침윤으로 인한 염분량을 염분수지 계산항목으로 고려하였다.

$$S_{res_t} - S_{res_{t-1}} = S_{inf_t} + S_{bot_t} + S_{leak_t} + S_{sp_t} + S_{lch_t} - S_{out_t} - S_{it_t} \quad (3)$$

여기서,  $S_{res_t}$ 는  $t$  일에서의 담수호 염분량,  $S_{inf}$ 는 유입염분량 (Inflow),  $S_{bot}$ 는 호저토 확산염분량 (Bottom diffusion),  $S_{leak}$ 은 배수갑문 누수량 (gate leak),  $S_{sp}$ 은 제방침윤량 (Seepage),  $S_{lch}$ 은 농경지에서의 제염염분량 (leaching),  $S_{out}$ 은 배수갑문을 통해 방류되는 염분량 (Release),  $S_{it}$ 는 관개용수로 양수되는 염분량 (intake)이다.

한편, 이원호의 경우 관개를 실시하지 않고 있기 때문에, 취수로 인한 염분유출이 발생하지 않는 것으로 가정하였다. 또한, 농경지 제염으로 인한 용탈염분량은 이원호의 경우 제염을 실시하지 않고 있기 때문에 염분수지 해석시 제염염분량은 고려하지 않았다. 따라서, 본 연구에서 이원호에 적용한 염분수지식을 다시 정리하면 식 (4)와 같다.

$$S_{res_t} - S_{res_{t-1}} = S_{inf_t} + S_{bot_t} + S_{leak_t} + S_{sp_t} - S_{out_t} \quad (4)$$

담수호 상류유역으로부터의 유입되는 유입염분량은 크게 강우유출수 중의 염분량과 간척지의 관개방법에 따른 관개회귀용수 중의 염분량으로 구성할 수 있으며, 식 (5)로 표현할 수 있다.

$$S_{inf} = C_{IN} \cdot IN + C_{return} \cdot IT \cdot \alpha \quad (5)$$

여기서,  $S_{inf}$ 는 상류로부터의 유입염분량,  $C_{IN}$ 는 호소로 유입되는 강우유출로 인한 호소유입 염도,  $C_{return}$ 은 간척농경지 관개회귀용수의 염도,  $IT$ 는 담수호로부터의 취수량,  $\alpha$ 는 관개회귀율이다. 한편, 담수화가 진행 중인 이원호의 경우는 관개용수의 공급이 이루어지지 않으므로, 유입염분량으로 식 (6)을 적용하였다.

$$S_{inf} = C_{IN} \cdot IN \quad (6)$$

호저토 확산 염분은 담수호 바다 토양으로부터 확산되는 염분을 말하며, 식 (7)과 같이 추정될 수 있다 (KRC, 1984).

$$S_{bot} = A \cdot \frac{\beta}{100} \cdot (C_o - C_t) \cdot \sqrt{\frac{k}{\pi t}} \quad (7)$$

여기서,  $S_{bot}$ 는 호저토 확산 염분량,  $A$ 는 호저토 면적 ( $m^2$ ),  $\beta$ 는 토랑공극률 (%),  $k$ 는 확산상수 ( $m^2/day$ ),  $t$ 는 경과일수 (day),  $C_o$ 는 호저토 토양의 초기염분농도 ( $kg/m^3$ ),  $C_t$ 는  $t$ 일의 호저토 토양의 염도 ( $kg/m^3$ )이다.

배수갑문으로부터 누수되어 유입되는 염분량은 배수갑문 역유입 유량에 해수의 염도를 곱하여 계산할 수 있으며, 누수 단면과 수위를 고려하여 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다 (KRC, 1984).

$$Q = CA \sqrt{2 \times g \times (H_1 - H_2)} \quad (8)$$

여기서,  $Q$ 는 배수갑문 역유입량 ( $m^3/sec$ ),  $C$ 는 상수 (0.062),  $A$ 는 누수단면 ( $m^2$ ),  $g$ 는 중력가속도 ( $9.8 m/sec^2$ ),  $H_1$ 는 평균만조위 (EL.m),  $H_2$ 는 관리수위 (EL.m)이다. 역유입수의 염도는 해수와 같다고 가정한다.

본 연구의 대상지역은 제방의 누수문제로 인해 제방보강 공사가 세 번에 걸쳐 이루어진 곳으로, 기존의 단순한 침투량 공식으로 적용하기에는 무리가 있다. 따라서, 본 연구에서는 실측염도자료와 호의 염분수지를 바탕으로 일별 제방침윤량을 산정하였다. 즉, 호소 염분수지로부터 계산된 일단위 호소 염도가 실측 염도자료에 가까워지도록 일단위 제방침윤량을 조정하는 방식으로 일별 제방침윤량을 계산하였다.

#### 나. 염도자료

호소 염도모니터링 자료는 2006년 3월부터 2010년 4월까지 구축하였다. 모니터링 자료는 2006년까지는 2주간격, 2007년 이후부터는 1주간격으로 존재한다. 또한, 중규모 이상의 호우시 추가적인 모니터링을 실시하고 있다. Fig. 1과 같

이 호소내 염도를 측정하는 지점은 5 개소이며, 염분수지 계산을 위한 호소 평균염도 산정을 위해 티센면적가중법을 적용하였다.

호에서는 수심에 따른 염도분포에 의해 성층화현상이 나타나는데, 주로 상류로부터의 담수유입과 바람에 의한 교란의 두 가지 요인으로 염분의 수직혼합이 발생된다(William et al., 1990). 이원호의 경우 최저바닥고가 EL.-4.0 m 로서, 유지관리수위를 감안하면, 최대수심이 약 3.5 m 정도이며, 평균수심은 약 2.0 m 내외로서 바람에 의한 교란 및 담수유입으로 인한 혼합작용이 활발히 이루어지는 편이지만, 겨울철에는 상류로부터의 담수유입이 거의 없고, 특히 표면 결빙시에는 바람에 의한 혼합작용이 나타나지 않아, 밀도차에 의한 성층화 현상이 나타난다. 이원담수호의 염분농도 측정 자료는 표층수에 대한 자료이기 때문에 겨울철 온도하강 및 결빙에 의해 성층화 현상이 나타나면 염분농도가 실제농도보다 낮게 측정되는 경향이 있다. 따라서, 염도 측정자료 중 겨울철 이상치는 제외하였다.

### 3. EFDC 모형

담수호의 공간적 염분분포를 모의하기 위해 사용한 EFDC 모형은 수리 및 수질을 모의할 수 있으며, 연안, 강, 호수, 하구 등에 적용이 가능하다. EFDC 모형은 3차원 수리해석, 유사수송 해석, 온냉수 배출 해석, TMDL 수질 해석 분야에 널리 이용되고 있다(USEPA, 2002).

EFDC 모형은 미국 EPA의 지원을 받아 버지니아 해양연구소(VIMS, Virginia Institute of Marine Science)에서 개발되었다(Hamrick, 1992). EFDC 모형은 US EPA에서 대중에게 공개된 후, 다양한 버전으로 변화 발전 되었는데, 본 연구에서는 다이나믹 솔루션(Dynamic Solution)사의 Craig (2004)에 의해 전-후처리 기능이 추가되고 원시 코드를 Fortran 95로 코딩한 EFDC DS 버전을 사용하였다.

EFDC 모형은 크게 동수역학, 수질, 퇴적물 이송 그리고 독성물질의 네 가지 모듈로 구성되어 있다. 동수역학 모델 부분은 수온과 염분이 함께 고려된 3차원 천수방정식을 기본으로 하며, 다른 3차원 모형에 비교하여 습지에서의 유동현상을 고려하기 위하여 식생저항구간, 조간대 등에서 유동현상과 파랑의 영향(Hamrick and Zarillo, 1995) 등도 고려할 수 있는 장점이 있다.

수질 모델 부분은 CE-QUAL-ICM 또는 체사픽베이(Chesapeake Bay) 수질 모델(Cerco and Cole, 1994)을 기본으로 하고 있으며, HEM-3D 라고 불린다. 미국 EPA의 TMDL(Total Maximum Daily Load)을 산정하는 공인모형으로 지정되어 활용되고 있다. 수온, 염분을 비롯한 용존산소, 식물성

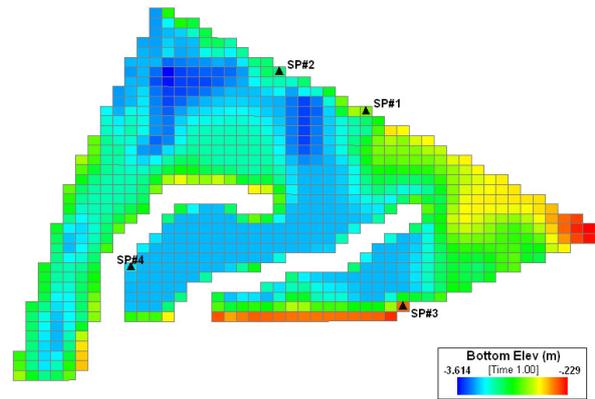


Fig. 3 Model grid mesh and bathymetry of the Iwon estuary reservoir with the location of sampling points from SP#1 to SP#4

조류, 탄소순환계, 질소순환계, 인순환계, 규소순환계를 포함하는 22개 상태변수를 모의할 수 있다.

### 4. 모형의 구성

#### 가. 계산격자망

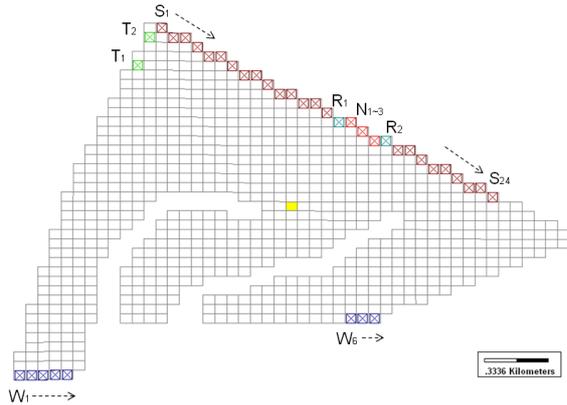
대상 지역의 수치 해석을 위한 유한차분 격자는 대상 지역을 측량한 수치지도를 기초로 하여 SMS (Surface Water Modeling System) (BYU, 1995)를 이용하여 계산격자망을 구성하였다. 격자체계는 수평방향으로는 직교좌표계를 사용하였고, 수직방향으로는  $\sigma$ -좌표계를 사용하였다. 계산격자망이 조밀하면 실제지형을 자세하게 나타낼 수 있고, 계산 결과도 더 정밀하게 얻을 수 있지만, 계산시간이 증가하는 단점이 있어, 모형의 구동시간과 결과의 정밀성 등을 고려하여 최적화된 격자망을 구성하는 것이 중요하다(Ahn et al., 2012). 본 연구에서는 이점을 고려하여, 종단방향 61m, 횡단방향 49 m의 면적을 단위로 하는  $42 \times 51$ 의 격자망을 구성하였다. 이 중 수평방향의 유효계산격자는 802개이며, 한편, 수직방향 격자는 3개의 등간격층으로 구성하였다.  $\sigma$ -좌표계의 특성상 수심에 따라 3개의 등간격층이 항상 존재함으로써 수심이 얇은 곳에서도 일정한 수직 해상도를 유지할 수 있다.

Fig. 3은 구성된 계산격자망을 보여주고 있다. 바닥고는 1:5,000 수치지도로부터 구하였으며, EL.-3.6 m ~ EL.-0.3 m의 분포를 보였다. 또한, 호내 5 개소 염도모니터링 지점 중 방조제 측 가운데 지점을 제외한 SP#1~SP#4 총 4 개소의 모의 결과 평가지점을 보여주고 있다.

#### 나. 초기조건 및 경계조건

수층의 초기조건은 초기 수위와 염분농도 등으로 구성되

는데, 모형의 보정과 검정기간에 대해 초기 수위는 2006년 3월 3일과 2008년 12월 1일의 EL.-0.83 m, EL.-0.48 m 을 전체



**Fig. 4** Boundary conditions of the Iwon estuary reservoir:  $N_1$  to  $N_3$  are gate release,  $R_1$  and  $R_2$  are gate leak,  $S_1$  to  $S_{24}$  are seepage through tide dike,  $T_1$  and  $T_2$  are the fishery leveling pipe,  $W_1$  to  $W_5$  are flow from inlet #1, and  $W_6$  to  $W_8$  are flow from inlet #2

**Table 1** Boundary conditions of the Iwon estuary reservoir

Items	Description	Cell coordinates	Salinity (ds/m)
$N_1 \sim N_3$	Gate release	(31,30),(32,29),(33,28)	-
$R_1, R_2$	Gate leak	(30,30), (34,28)	46.9
$S_1 \sim S_{24}$	Seepage	(18,38) ~ (43,22)	46.9
$T_1, T_2$	Fishery leveling pipe	(13,36), (14,39)	31.2
$W_1 \sim W_5$	Inflow1	(3,3) ~ (7,3)	0.3
$W_6 \sim W_8$	Inflow2	(31,9) ~ (33,9)	0.3

**Table 2** Hydraulic parameter values used in the EFDC model

Items	Unit	Value	Common range (USEPA, 2002)
Roughness coefficient	-	0.022	-
Coriolis factor	-	$8.49 \times 10^{-5}$	-
Horizontal kinetic			
• Background/Constant Eddy viscosity	$m^2 s^{-1}$	0.3	0.5 ~ 20
• Dimensionless hor. momentum diff.	-	0.25	-
Vertical kinetic			
• Background/Constant Eddy viscosity	$m^2 s^{-1}$	$1.0 \times 10^{-4}$	$1.0 \times 10^{-7} \sim 1.0 \times 10^{-3}$
• Molecular diffusivity	$m^2 s^{-1}$	$1.0 \times 10^{-8}$	-
Turbulent intensity advection scheme	-	1.0	-
Turbulence closure constants			
• Von karman's constant	-	0.4	-
• Minimum turbulent intensity squared	$m^2 s^{-2}$	$1.0 \times 10^{-8}$	-
• Minimum dimensionless length scale	-	$1.0 \times 10^{-4}$	-

계산격자망에 대해 지정하였다. 보정과 검정기간에 대한 초기 염도는 해당되는 날짜의 호소 평균염도인 7.58 ds/m 및 9.81 ds/m 를 전 격자망에 대해 동일하게 적용하였다.

EFDC 모형의 기상자료는 2006년 3월부터 2010년 4월까지 서산관측소의 자료를 활용하였으며, 일별 대기압, 건온, 습온, 증발량, 태양의 단파 복사율, 운량을 입력하였다. 강우량 자료는 이원호 한국농어촌공사에서 관측하여 제공되는 유역 내에 위치한 이원면의 일자료를 활용하였다.

수리계산을 위한 상류단 경계조건으로 상류유역 모의를 실시한 HSPF 모형의 구동결과 산정된 1호배수간선과 2호배수간선의 유량으로 설정하였다 (Seong, 2014). 하류단 경계조건은 배수갑문 지점의 호소 수위로 설정하였으며, 수위자료는 호소 물수지 해석으로부터 산정한 일단위 수위값을 적용하였다. 염수침입의 경계조건으로 제방침윤, 배수갑문누수, 연락관으로부터의 유입 등을 고려하였다. 제방침윤과 배수갑문누수에 대한 염도는 평균해수농도를 적용하였으며, 연락관으로부터 유입되는 농도의 경우 양어장의 실측 염도를 평균하여 적용하였다. 또한, 제방 및 연락관의 염수침입유량은 염분수지로부터 산정한 제방침윤량을 적용하였다. Fig. 4 및 Table 1은 각 경계조건을 보여주고 있다.

#### 다. 매개변수

수리계산을 위한 매개변수는 Table 2와 같으며, 이중 조도계수와 와점성 계수 (eddy viscosity)의 수리계산 매개변수에 대해 수동보정을 실시하였으며, 나머지 매개변수들은 모형에서 제공하는 기본값을 적용하였다.

조도계수는 유속의 결정에 있어서 큰 비중을 차지하며, 흐름단면의 상태에 따라 그 값이 다르게 적용된다. 본 연구에서

는 호소내 수초를 고려하여 조도계수를 0.03을 기준으로 하여 값을 변화시키며 보정을 실시하였다. 와점성 계수는 난류 교환 계수라고도 하며, 와점성 계수가 너무 크면 안정적인 해는 구할 수 있지만 흐름의 이탈, 와류 등의 모의가 약해지며, 난류 교환 계수가 너무 작으면 수치해가 발산하는 등 해를 구하기 어려워진다는 특징이 있다(Ahn et al., 2008). 본 연구에서 와점성 계수는  $0.1 \text{ m}^2/\text{s}$  를 기준으로 하여 값을 변화시키며 보정하였다.

### III. 결과 및 고찰

#### 1. 염분수지를 이용한 제방침윤량 산정결과

호소의 염분수지와 실측염도자료를 바탕으로 일별 제방침윤량을 산정하였다. Fig. 5는 이원호의 염분수지로부터 산정

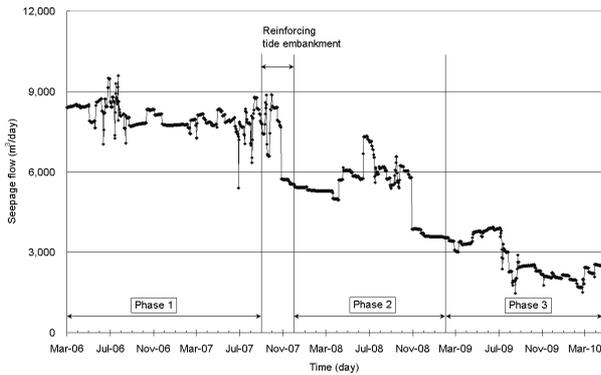


Fig. 5 Calculated daily seepage flow at the Iwon estuary reservoir

Table 3 Comparison of seepage flows among tide embankments

Tide embankment	Location	Seepage flow ( $\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ )	Source
Iwon	Taeaeon-gun, Chungnam-do, south Korea	$1.16 \times 10^{-4} \sim 3.30 \times 10^{-4}$	This study
Iwon	Taeaeon-gun, Chungnam-do, south Korea	$1.55 \times 10^{-5} \sim 2.06 \times 10^{-5}$	Korea rural community corporation, 2003
Hwahong	Hwaseong-si, Gyeonggi-do, south Korea	$1.53 \times 10^{-3} \sim 2.32 \times 10^{-3}$	Lee, 2005
Tando	Ansan-si, Gyeonggi-do, south Korea	$8.53 \times 10^{-4}$	Korea rural community corporation, 2009
Hongseong	Hongseong-gun, Chungnam-do, south Korea	$4.17 \times 10^{-3}$	Korea rural community corporation, 2007

Table 4 Statistics on simulated and observed salinity during calibration period in the Iwon estuary reservoir

Stations	No. of measure (day)	$R^2$	RMSE (dS/m)	RMAE (dS/m)
SP#1	76	0.70	2.09	1.75
SP#2		0.70	2.11	1.69
SP#3		0.73	2.17	1.73
SP#4		0.66	2.28	1.72
Average		0.70	2.16	1.72

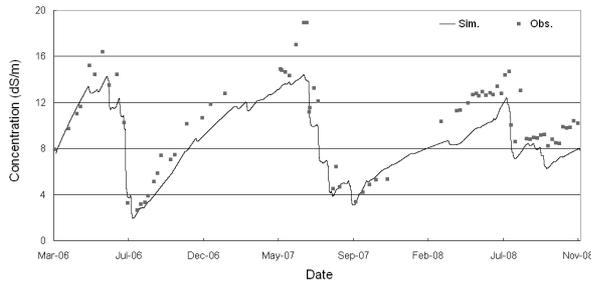
한 일별 제방침윤량을 도시한 것으로 제방보강공사 등의 염분대책에 따라 시기별로 구분하였으며, 단, 침윤량은 해수 중 염분량을 기준으로 제시한 것이다. 각 기간에 따른 제방침윤량을 살펴보면 방조제 보강공사를 기준으로 평균 제방침윤량이 해수 약  $8,000 \text{ m}^3/\text{day}$  에 들어있는 염분량에서 약  $5,300 \text{ m}^3/\text{day}$  으로 감소되었고, 2009년 2월 이후의 양수장 연락수로 폐쇄, 관리수위 상승 등의 제반 조치로 약  $2,700 \text{ m}^3/\text{day}$  까지 감소된 것으로 계산되었다.

한편, 본 연구에서 산정된 제방침윤량을 선행연구와 비교하였으며, 각 제방침윤량은 방조제의 단위길이당 침윤량을 나타내었다(Table 3). 다만, 본 연구에서 산정한 이원호의 제방침윤량은 호소의 실측염도자료를 바탕으로 염분수지로부터 역산하여 구한 일평균 염분량으로 비교를 위하여 방조제를 통한 확산률(MOA, 1991)인 0.1을 곱한 값이다. 한편, 화홍, 탄도, 홍성 방조제의 침윤량은 방조제 외측의 수위조건이 만조시의 관측공 자료를 바탕으로 침투량 공식을 적용하여 산정한 값이다. 화홍과 홍성방조제의 경우에 비해 이원은 침윤량이 많은 것으로 나타났으나, 탄도방조제에 비해서는 적은 것으로 계산되었다.

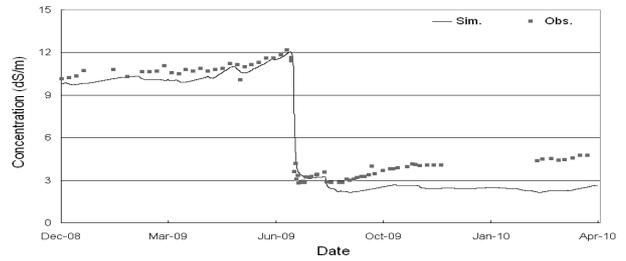
#### 2. 모형의 보정

모형의 보정은 2006년 3월부터 2008년 11월의 총 3년 8개월간의 기간에 대해 실시하였다. 목적함수로서 결정계수( $R^2$ ), RMSE, RMAE의 통계적인 변량을 이용하였다.

Table 4는 호소의 4개 염도모니터링 지점에 대해 모형의 보정을 실시한 결과를 나타내고 있다. 결정계수  $R^2$ 은 측정별로 0.66~0.73의 범위를 보였고, RMSE는 2.09~2.28 dS/m,

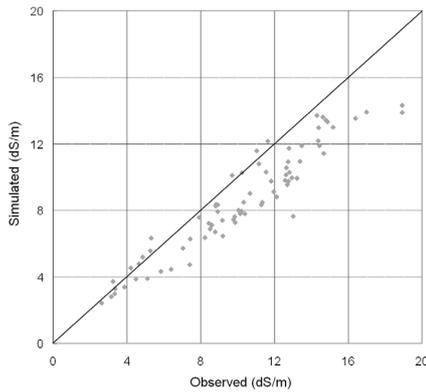


(a) Calibration period

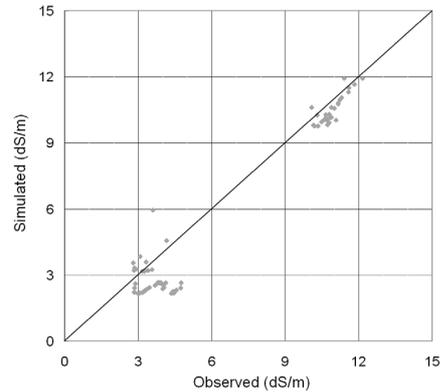


(b) Validation period

Fig. 6 Comparison of simulated and observed salinity data at SP#1 for calibration and validation periods



(a) Calibration period



(b) Validation period

Fig. 7 Scatter diagram of simulated and observed salinity data at SP#1 for calibration and validation periods

RMAE는 1.69~1.75 dS/m 범위로 나타났다. Fig. 6(a)는 SP#1에 대한 실측치와 모의치의 시계열 염분농도를 보여주고 있으며, Fig. 7(a)는 모의치와 실측치의 일대일 그래프이다. 고농도로 관측된 기간에 대해 모의치가 과소 산정된 부분이 발견되나, 저농도의 기간에 대해서는 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 실측치와 모의치에 대한 통계값과 시각적 비교 결과로 볼 때, 전체적으로 보정된 모형의 결과가 실측자료의 경향을 비교적 잘 반영하고 있는 것으로 평가된다.

### 3. 모형의 검증

모형의 검증은 2008년 12월부터 2010년 4월까지의 기간에 대해 SP#1~SP#4의 실측염도자료를 바탕으로 실시하였다. Table 5는 모형의 검증 결과에 대한 통계적 변량을 보여주고 있다. 결정계수  $R^2$ 는 측정별로 0.84~0.92의 범위를 보였고, RMSE는 1.02~1.30 dS/m, RMAE는 0.78~0.99 dS/m의 범위를 보임으로서 보정 결과와 마찬가지로 이원담수호에 대한 염분농도 검증 결과도 실측치에 대해 적용성을 나타낸다고 볼 수 있다.

Fig. 6(b)는 SP#1 지점의 염분농도에 대해 검증한 모의치

Table 5 Statistics on simulated and observed salinity during validation period in the Iwon estuary reservoir

Stations	No. of measure (day)	$R^2$	RMSE (dS/m)	wRMAE (dS/m)
SP#1	76	0.91	1.07	0.85
SP#2		0.92	1.02	0.78
SP#3		0.89	1.22	0.99
SP#4		0.84	1.30	0.93
Average		0.89	1.15	0.89

와 실측치를 비교하여 보여주고 있으며, Fig. 7(b)는 모의치와 실측치의 일대일 그래프를 나타낸 것이다. 비교적 고농도 및 저농도 시기의 실측염도값을 잘 반영한 것으로 보이며, 다만 2009년 7월 이후의 저농도 기간에 대한 점진적인 염도의 상승 경향은 모의치에 잘 나타나지 않았다. 전체적인 검증결과 모의치는 실측자료의 경향과 비교적 일치하는 잘 것으로 판단된다.

#### IV. 요약 및 결론

본 연구에서는 간척 담수화호의 염도모의를 위해 호소의 염분수지와 EFDC 모형을 이용하였다. 호소의 염분수지를 이용하여 방조제 제방으로부터의 염분침입량을 산정하고, 이를 EFDC 모형의 입력자료로 활용하여 호소의 시간적, 공간적 염도변화를 모의하고, 모형의 보정과 검정을 통하여 그 적용성을 평가하였다.

호의 염분수지를 이용하여 제방침윤량을 산정한 결과는 화홍과 홍성방조제의 침윤량결과보다는 많고, 탄도방조제보다는 적은 것으로 나타나, 타 방조제의 침윤량 산정치 범위에 들어가는 것으로 나타났다. 또한 방조제 보강공사에 따라 제방침윤량이 감소하는 경향을 확인할 수 있었다. 구축한 EFDC 모형을 2006년부터 2008년까지의 기간에 대해 보정한 결과, 4개의 실측지점에 대해 평균적으로 RMSE 는 2.16 dS/m, RMAE 는 1.72 dS/m, 결정계수는 0.70 으로 나타났다. 모형의 검정기간에 대해서는 평균적으로 RMSE 가 1.15 dS/m, RMAE 가 0.89 dS/m, 결정계수가 0.89 로 나타나 보정기간에 비해 검정기간의 통계변량이 나은 값을 나타내었으며, 대상구역에 대해 모형의 적용성이 있는 것으로 평가되었다.

본 연구는 제방으로부터 침윤되어 들어오는 염분량을 호소 염분수지를 바탕으로 정량적으로 산정한 것으로, 기존의 경험식을 적용할 경우 반영할 수 없는 제방의 누수 및 보강공사 등으로 인한 효과 등을 계산할 수 있었다. 따라서, 염도가 문제가 되는 간척 담수호에서 염도의 정량적인 해석과 관리 대안 등을 평가하는 방법론으로 활용될 수 있을 것이다.

#### REFERENCES

- Ahn, J. M., I. H. Park, S. W. Lyu, and Y. T. Hur, 2012. Evaluation of optimal grid resolution for hydrodynamic proper simulation. *Journal of Korean society for geospatial information system* 20(1): pp. 109-116. (In Korean)
- Ahn, S. S., D. H. Yim, M. J. Seo, and H. J. Lee, 2008. Sensitivity analysis of RMA2 model parameter variation with hydraulic characteristics of stram junction area. *Journal of the environmental sciences* 17(7): pp. 783-793. (In Korean)
- Brigham Young University (BYU), 1995. *SMS Hydrodynamic Modeling Reference Manual*. Engineering Graphics Laboratory, Provo, Utah.
- Byun, C. Y., B. Y. Son, H. Y. Song, S. and G. Kang, 2009. Simulation of soil loss and turbid water movement using watershed(HSPF) and reservoir(EFDC) model in Soygangang Dam, *Journal of Korean society of water environment* 2009: p. 5. (In Korean)
- Cerco, C. F. and T. M. Cole, 1994. Three-dimension eutrophication model of Chesapeake bay : Volume 1, main report. Technical Report EL-94-4, US Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.
- Craig, P. M. 2004. *User's manual for EFDC\_Explorer : A pre/post processor for the environmental fluid dynamics code*.
- Hamrick, J. M. 1992. *A three dimensional environmental fluid dynamics computer code: Theoretical and computational aspects*, Special report, The College of William and Mary, Virginia Institute of Marine Science, Gloucester Point, VA.
- Hamrick, J. M. and M. Z. Moustafa, 1995. Development of the Everglades wetlands hydrodynamic model : 1. Model formulation and physical processes representation. submitted to Water Resources Research.
- Hur, Y. T. and J. H. Park, 2009. Assessment of EFDC model for hydrodynamic analysis in the Nakdong River, *Journal of Korean water resource association* 42(4): pp. 309-317. (In Korean)
- Jeong, H. Y., 2010. Analysis of sediment transport and deposition in Saemangeum reservoir using the EFDC model. Master thesis, Chungbuk Univ. (In Korean)
- Ji, Z. G., G. Hu, J. Shen, and Y. Wan, 2007. Three-dimensional Modeling of Hydrodynamic Processes in the St. Lucie Estuary, *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 73 (2007): pp. 188-200.
- Jiang, H and Y. Shen, 2009. Numerical study on salinity stratification in the Oujang River Estuary. *Journal of Hydrodynamics* 21(6): pp.835-842.
- Kang P. M., 1993. *Engineering in land reclamation*. 323-327. Hyangmoonsa.pp. (In Korean)
- Kim, J. H., G. H. Park, K. C. Kim, and K. S. Suh, 2011. Numerical simulations for dispersion of the suspended sediments near Daesan coastal areas, *Journal of Korean Society of Environmental Engineers* 33(1): pp. 16-24. (In Korean)
- Kim, J. K., G. I. Kwak, J. H. Jeong, 2008. Three-dimensional mixing characteristics in Seomjin River Estuary, *Journal of the Korean Society for Marine Environmental Engineering* 11(3): pp. 164-174. (In Korean)
- Korea Rural Community Corporation (KRC), 1984. A study for desalination process in an estuary reservoir. 71-72. (In Korean)
- Korea Rural Community Corporation (KRC), 2009. A study for ensuring stability on enlarging an unit size of agricultural infrastructure (I), 107. (In Korean)
- Korea Rural Development Center (KRDC), 2009. Desalination assessment in the Iwon reclaimed reservoir.
- Lee, H. Y., S. W. Seo, and S. C. Yoo, 2010. Simulation of water quality changes in the Saemangeum reservoir induced by dike completion. *Journal of Korean society of coastal and ocean*

- engineers* 22(4): pp. 258-271. (In Korean)
20. Ministry of Agriculture (MOA), 1991. Standard for design of agricultural land improvement project plan (Land reclamation). (In Korean)
  21. Ministry of Construction and Transportation (MOCT), 2006. National longterm water plan. 8-14. (In Korean)
  22. Seo, D. I. and J. W. Lee, 2005. Application of 3-D hydrodynamic model, EFDC-Hydro for WASP7.0, *Journal of Korean society of environmental engineers conference* 1(3): pp. 431-436. (In Korean)
  23. Seo, D. I., M. J. Seo, M. S. Koo, and J. K. Woo, 2009. Serial use of hydrodynamic and water quality model of the Geum River using EFDC-Hydro and WASP7.2, *Journal of Korean society of water and wastewater* 23(1): pp. 15-22. (In Korean)
  24. Seong, C. H., 2014. Streamflow modeling in data-scarce estuary reservoir watershed using HSPF, *Journal of Korean society of agricultural engineers* 56(6): pp.129~137. (In Korean)
  25. U.S. Environmental Protection Agency (USEPA), 2002. User's Manual for Environmental Fluid Dynamics Code (Hydro version) Release 1.00
  26. Schroeder, W. W., D. P. Scott, and W. J. Wiseman, 1990. Salinity Stratification in a River-Dominated Estuary. *Estuaries* 13(2): pp. 145-154.
  27. Xu, H., J. Lin, and D. Wang, 2008. Numerical study on salinity stratification in the Pamlico River Estuary, *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 80: pp.74-84.