새만금 담수호 수리동역학적 특성을 고려한 적정 수질관리방안 연구

A Study on Appropriate Water Quality Management Measures Dependent on a Hydrodynamic Characteristics in Saemangeum Freshening Reservoir

오찬성* · 송용식** · 윤재선* · 장정렬**

*한국농어촌공사 농어촌연구원

**지오시스템리서치

Chansung Oh* · Yongsik Song** · Jae-Seon Yoon* · Jeongryeol Jang*

*Rural Research Institute, Korea Rural Community Corporation

**Geosystem Research Corporation

1. 서론

새만금 사업은 미래 농업을 위해 집단화·규모화·자동화를 통한 국가경쟁력 제고와 기후변화 관련 부족한 수자원 확보와 식량위기 등에 대비하고, 더 나아가 남북 통일이대 등을 고려한 국가적으로 중요한 사업 중에 하나이다. 1991년 방조제 착공 이후 순조롭던 사업은 1996년 시화호의 수질악화에 대한 환경적 이슈를 시작으로 1999~2001년 공사 중단, 2001~2003년 공사 재개 등 새만금 담수호 수질 문제가 여러 사회적인 논의와 이해당사자들 간의 갈등이 현재까지 이어지고 있는 실정이다. 특히 사업 존립에 관한 환경단체 및 지역 주민들을 중심으로 한 소송이 진행되어 사법재판부까지 개입하게 되었으며, 2006년 대법원 승소, 2009년 새만금 사업촉진을 위한 특별법이 제정되어 이 법에 근거한 토지이용계획이 수립되었다(Koh et al., 2010). 최근에는 중간평가(2015.10) 및 최종평가(2020.09)가 실시되어 새만금 목표수질 달성 여부 평가 및 추가대책과 관리방안 등을 제시하고 있으나, 여전히 새만금호는 내부개발 여건이 시시각각 끊임없이 변화하고 있고, 이에 따른 계량 또는 정량화된 수리동역학적 특성 분석을 통한 호내 내부 수체 순환 파악 및 수질관리가 지속적으로 요구되고 있다.

국내 담수호인 아산호, 삽교호 및 영산호 등과 마찬가지로 하천 말단에 조성되는 새만금 담수호의 수리동역학적 특성은 상류 유역의 유입유량에 주로 영향을 받고, 호 내부 수위, 유속, 지형과 호 외부의 조석체계 등에 의해서도 변화된다. 새만금호는 EL. -1.50m의 관리수위를 유지한 채로 현재 내부공사 중으로 농업용지 및 도시용지 일부 구간 준설, 동서2축도로 및 방수제 도로 건설, 새만금 농생명용지 조성 등이 진행되고 있어 내부 수리특성이 급격한 변화가 나타나고 있다. 새만금 내부개발에 따른 수리동역학적 특성 관련 수치 모델링은 여러 선행연구에서 수행되었다. Suh et al.(2006)은 해수소통을 전제로 내부개발 이후 배수갑문을 통한 내부의 염분 확산을 모의하였으며, Suh and Cho(2007)는 끝물막이 전·후의 새만금호 내측의 수리특성 변화를 모의하였다. 이 후 Suh and Lee(2008), Suh et al.(2010)은 방

수제 공사 전·후의 호내 수질평가를 통한 갑문운영을 통한 해수유통의 중요성을 언급하였으며, 새만금호 수리와 수질환경분석(Yoo et al., 2012) 및 새만금호 내 방수제 공사 및 준설에 의한 수리동역학적 특성(Oh et al., 2013)을 수치 모의를 하였다. 상기 모의 결과들은 앞서 언급한 바와 같이 새만금호 내부공사단계별 수질변화를 모의하였으나 주로 해수유통을 전제 조건으로 분석하였으며, 담수화 조건에서의 수리동역학적 분석은 NIER(2015)에서 수행하였으나, 이는 마스터플랜(MP)에서 제시된 최종안을 바탕으로 모델을 구축하고 수치 모의를 실시하였기 때문에 현재까지 실행 가능한 내부개발 여건이 반영된 수리동역학적 특성을 이해하고 향후 장기적인 변화를 추론하는 것이 바람직하다고 판단된다.

따라서 본 연구에서는 새만금 담수호 조건에서의 방수제와 동서2축도로가 완료된 상태를 가정하여 호내 수리동역학적 변화 양상을 분석하고 이를 통한 적정 수질관리방안을 제시하고자 한다. 이를 위해 유역 모델인 HSPF(Hydrological Simulation Program-Fortran)로부터 산정된 유입유량과 실제 배수갑문 운영 이력 및 외측 조위가 반영된 경계조건을 고려하여 모델 보정을 실시하였으며, 보정된 매개변수는 향후 담수화 조건에서의 입력자료로 활용하여 모델의 신뢰성을 높일 수 있도록 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 수치 모델

본 연구 사용된 수치 모델은 EFDC(Environmental Fluid Dynamics Code)로 미국 VIMS(Virginia Institute of Marine Science)에서 개발되었다. 연속방정식과 수평·수직방향 운동방정식, 열·염보전 방정식, 그리고 퇴적물 등을 포함한 물질보전방정식들로 구성되어 있으며, 수평 난류점성계수와 수평 난류확산계수는 Smagorinsky(1963)의 식을 통해 계산하며, 질량 보전 기법(mass conservation scheme)을 사용한 조건대 처리가 가능하다(Hamrick, 1992; 1994).

이 모델은 국외의 다양한 연구에서 사용되어 우수성이 입

증된 모델로, 섬진강과 광양만 해역의 해수와 담수의 혼합과 성층현상 모의(Kim et al., 2008; Kang et al., 2011), 새만금 방조제 완공 후의 유동 및 수질 모의(Suh et al., 2010; Yoo et al., 2012), 목포 해역의 점착성 퇴적물 이동 모의(Jung et al., 2006; Choi and Jung, 2012), 가조림조력발전소 건설 후 수리특성 변화 모의(Shin et al., 2011) 등의 연구에 활용되었다. 현재는 국립환경과학원의 4대강 수리 및 수질 예보 모델로 사용되고 있다.

본 연구에서는 수직방향으로 시그마(σ) 좌표계, 수평방향으로는 직교 곡선 좌표계를 사용하였으며, 선형화 된 행렬 방정식의 해를 구하기 위해서 conjugate gradient method를, 운동량 방정식(momentum equation)은 외연적 해(explicit solution) 방법을 사용하였다.

2.2 연구지역 및 물리적 특성

2.2.1 연구지역

연구지역은 행정구역 상 전라북도 군산시, 김제시 및 부안군 일원을 포함하며, 군산시 비응도를 시작으로 야미도, 신시도 및 가력도를 지나 부안군 변산면 대항리까지 연결하는 4개의 방조제로 구성되어 있다(Fig. 1). 새만금 유역의 면적은 3,340 km²이고, 만경강과 동진강 유역면적은 각각 1,527.1 km²와 1,129.3 km²로 전체 유역의 45.8%와 33.9%를 차지하며 새만금호와 새만금호로 직접 유입되는 면적은 677.6 km²로 20.3%를 차지한다(KRC, 2018). 새만금호 유역

에 위치한 20개의 강우관측소의 2013년 평균 강우량은 1,195.9 mm/year이며, 2012년 평균 강우량의 75.6% 수준이다. 이 중 대표기상대인 전주기상대(KMA, 2013)의 2013년 월강우량, 월평균 기온, 월평균 풍속 및 월 일사량을 Fig. 2a, b, c 및 d에 도시하였다. 월별 강우량을 살펴보면, 6월부터 9월까지 4개월 동안 연간 강우량의 62.3%가 집중적으로 발생하는 것으로 나타났으며 4월에서 6월은 농업용수가 상대적으로 많이 필요한 시기인데 강우량이 적어 이 시기에는 외부에서 용수공급이 필요한 원인이 되는 것으로 판단된다. 해당 기간의 평균 기온(Fig. 2b)과 풍속(Fig. 2c)은 각각 13.7°C와 1.8 m/s로 나타나 8월 경에 28.6°C로 가장 높은 온도를 보이며 월별 편차는 크게 나타났으나, 풍속은 1.38 ~ 2.28 m/s 범위 내로 분포하여 상대적으로 월별 편차가 적을 경향을 보이고 있다. 월 일사량(Fig. 2d)은 평균 291.6 MJ/m²으로 관측되어 겨울철을 제외하고 해당 지역의 기상 특성은 거의 동일한 패턴을 보이는 것으로 조사되었다. 새만금호의 수리동역학적 특성의 지배적인 영향을 미치는 요인 중 하나인 만경강(만경B)과 동진강(동진A 및 원평A)의 유입유량(Fig. 2e)은 각각 6.0 ~ 53.5 m³/s와 6.6 ~ 15.3 m³/s로 관측되어, 만경 유역은 여름철 집중호우 시기에 하천 유량이 급증하는 추세를 보였으나, 동진 유역은 연중 일정한 양의 유량이 새만금호로 유입되는 것으로 나타났다. 따라서 서로 다른 유입유량 특성은 주로 여름철에 집중되는 강우량에도 영향을 받지만 유역 내 복잡한 용·배수체계의 복

Fig. 1. Location of study area and monitoring points of water temperature and salinity in Saemangeum Reservoir.

합적인 특성에도 영향을 받은 것으로 보이므로 향후 이에 대한 세부적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

한편 새만금호는 2011년 새만금 종합개발계획(MP)이 심의·확정되고, 2013년 ‘새만금사업 추진 및 지원에 관한 특별법’이 시행되어가면서 국토교통부 산하에 새만금개발청이 개청한 이후 새만금 사업을 보다 체계적이고 효율적으로 추진하고 있다. 현재 새만금개발청에서는 새만금 동서2축 도로건설공사(2015~2020)와 새만금 남북도로(3, 4축)건설공사(2017~2022)를 진행 중에 있으며, 한국농어촌공사에서는 홍수 시 내부용지 보호와 간척지 진출입 도로 기능 확보 등을 위한 방수제 공사(2010~2020)와 농생명용지 조성공사에 따른 준설 및 매립(2013~2023)을 추진하고 있다. 따라서 새만금호 내부개발 여건과 지형은 현재에도 지속적으로 변화하고 있고, 호 내 수리동역학적 특성도 함께 바뀌고 있는 실정이므로 이에 대한 수리적 특성을 파악을 통한 향후 수질오염 및 저감 대책을 마련할 수 있는 방안이 요구될 것으로 사료된다.

2.2.2 새만금호 수온, 염분 및 밀도 성층 특성

한국농어촌공사 새만금사업단에서는 2006년 끝물막이 완료, 2010년 내부개발 본격화 및 수위낮춤 실시로 염분변화를 비롯한 현장수질모니터링 강화필요성 대두로 2011년부터 현재까지 새만금호 내 24개 지점(Fig. 1)에서 수온, 염분 및 수질 모니터링을 실시하고 있다. 본 연구에서는 상기 2013년 자료를 활용하여 수온 및 염분 분포 특성을 파악하고 새만금호 대표 지점에서의 밀도 성층 특성을 분석하였다.

새만금호의 염도는 앞서 언급되었던 강우량, 상류 유입량 및 신시 및 가력갑문을 통한 해수유통량에 영향을 받는다. 2013년의 경우 227.0~334.5 mm의 강우량이 7월과 8월 사이에 집중되었으며, 새만금호의 해수유통을 위해 2012년 12월부터 2013년 11월까지 신시갑문은 388회, 가력갑문은 384회의 갑문조작이 이루어졌으며, 매월 25~40회(월평균 30회) 해수유통이 실시되었다(KRC, 2013). 새만금 수역의 가력 및 신시배수갑문을 통해 유출입되는 해수유통량은 내외 수위차를 이용한 위어공식을 적용하여 산정하였으며(Kim and Min, 2009) 이 때 수면이 수문 아래의 통수단면 상단을

Fig. 2. Annual analysis of meteorological data of Saemangeum area: (a) monthly precipitation, (b) monthly mean air temperature, (c) monthly mean wind speed, (d) monthly solar radiation and (e) water inflow rate at Mankyeong B and Dongjin A with Wonpeong A.

닿지 않고 흐르는 흐름을 위어흐름이라 한다. 호내 수위에 따라 변화하는 수면적과 부피자료로부터 산출된 수위-내용적 곡선, 갑문별 개방련수(신시갑문 10련, 가력갑문 8련) 및 관측 수위, 상류 유입량, 강우량 및 증발산량 등을 반영하여 해수유통량을 산출한 결과는 Fig. 3에 도시하였다. 2013년 해수유통량 산출 결과, 가력배수갑문의 해수유입량은 4,029 백만 m^3 으로 나타났으며, 새만금호에서 해수로 나가는 양(이하 담수유출량)은 5,130 백만 m^3 으로 나타났다. 한편 신시배수갑문의 해수유입량은 5,516 백만 m^3 , 담수유출량은 6,741 백만 m^3 으로 산출되어 전체적으로 신시배수갑문에서의 해수유통량이 가력배수갑문에서의 해수유통량보다 많아 이는 련수 차이에 기인한 것으로 판단된다. 하지만 여름철 강우사상이 증가하는 시기에 해수유통량 또한 증가하는 것이 일반적이나, 실제 해수유통량 산출 시 오히려 반대되는 양상이 나타났다. 이는 집중강우시 새만금 관리수위의 급격한 상승 방지와 방수제의 원활한 해상 또는 육상 공사를 위해 적극적인 해수유통으로 강우기 전·후에 해수유통량이 증가된 것으로 판단되나 향후 강우량, 새만금호 내부 공사 여건 변화와 이에 따른 갑문조작 현황, 상류 유입량 등의 복잡한 인과관계를 면밀히 분석해야 할 것으로 판단된다.

만경수역 농업용지구간의 대표 지점인 M2 염도는 0.1~20.3psu의 범위로 조사되었으며, 담수와 염수가 만나는 전이대(Oh et al., 2013)로 비교적 큰 폭의 불규칙적인 염도 분포를 보이고 있고, 도시용지구간의 대표지점인 M4 염도는 3.5~30.7psu의 범위로 나타나며, 집중강우기시 제외하고 15.8~30.7psu의 범위를 보인다. 한편 동진수역 농업용지구간의 대표 지점인 D2의 염도는 0.1~21.7psu의 범위로 분포하며, M2 지점과 마찬가지로 비교적 큰 폭의 염도변화가 나타나고, D4 지점은 1.9~28.8psu의 염도 분포를 보인다. 즉, 상류로부터 만경수역의 M2-M3구간과 동진수역의 D2-D3구간은 담수영향을 직접적으로 영향을 받아 염도는 큰 폭으로 변화하며, 배수갑문 운영으로 인한 해수는 M4와 D4 지점을 지나 각각 M2 및 D2 지점까지 직접적인 영향을 미치는 것으로 판단된다.

새만금호의 수온 분포는 염도 변화와 마찬가지로 계절적 변동이 크게 나타난다. 2012년 12월부터 2013년 2월까지 새만금호 내 표층 및 저층 수온은 0℃~5℃ 내외로 분포하며 표·저층간의 수온은 유사하게 관측되었으나 3월의 표층 수온이 10℃를 시작으로 5월에는 21℃로 급격하게 상승하였다. 이 시기의 표·저층간 수온은 5℃~7℃ 이상의 차이를 보여 수온성층이 발생하는 시기이며, 8월의 수온은 최대 31℃까지 급격하게 상승하지만 표·저층간 수온차이는 다시 안정화되어 수온성층이 약화되는 시기로 판단된다. 마지막으로 9월부터 11월은 계절적인 영향으로 표·저층 수온이 급격히 낮아지는 시기로 11월의 경우는 표층 및 저층 수온이 11℃~12℃ 내외로 분포하고 있다.

새만금호 밀도 성층 특성은 앞서 분석된 수온 및 염분 자료를 이용하여 분석하였다. 새만금호는 외해역에서 배수갑문인 인공구조물로부터 유입되는 해수와 하구로부터 유입되는 담수가 서로 균형을 이루며 기수역으로 유지되고 있고 상호간의 영향력에 따라 염분성층에 의한 수체의 수직적 혼합 제한, 저층의 빈산소층 형성, 퇴적물 용출 증가 등으로 수질이 악화될 개연성이 존재한다. 따라서 성층 해석은 새만금호의 수질 관리 및 예측과 밀접한 관계가 있으며 본 연구에서는 새만금호 대표지점인 M2~M4, D2~D4 지점에서의 potential energy anomaly(PEA; Simpson et al., 1978)를 계산하여 성층계수를 도출하였다. 계산에 활용한 식은 아래와 같다.

$$V = \frac{g}{H} \int_{-H}^0 (\rho' - \rho) z dz$$

여기서 ρ' 와 ρ 는 각각 수층이 완전히 혼합되었을 경우와 해당 수심의 밀도이고, g 는 중력가속도, H 는 수심(m)이다. PEA(V)는 관측된 수층이 지닌 위치에너지와 이 수층이 수직적으로 완전 혼합되었을 경우의 위치에너지의 차로써, V가 0이면 완전혼합이고 성층이 강할수록 V는 커진다. 그리고 수직적으로 밀도가 역전되어 있으면 음의 값이 된다(Oh

Fig. 3. Annual comparisons of seawater in/out-flow amounts from Sinsi and Gareok sluice gates in 2013.

and Choi, 2015). 계산한 성층계수는 Table 1부터 Table 4에 정리하였다. 성층계수는 5월과 8월이 2월과 11월보다는 큰 성층계수가 도출되었다. 이는 새만금호 상류로부터 유입되는 담수의 영향으로 담수 유입이 강해지는 풍수기 시에 배수갑문 인근 지점(M4, D4)까지 담수가 해수를 밀어내어 영향을 미치기 때문이며 이 때 성층해소를 위한 위치에너지

가 많이 요구된다. 일반적으로 담수의 영향이 큰 지역일수록 성층강도는 강해지지만 새만금호는 풍수기 때 일시적으로 배수갑문 인근 해수가 담수로 치환되는 특징이 나타나기 때문에 담수 유입부 보다는 배수갑문 인근의 성층 강도가 다소 강한 것으로 나타났다. 가을부터 초겨울 사이의 성층계수는 $0.33 \text{ J/m}^3 \sim 1.60 \text{ J/m}^3$ 사이에 분포하며 다른 계절에

Table 1. Comparisons of water properties with stratification parameters ($\log[-V]$) at the monitoring points in Feb., 2013

Monitoring point	Observed depth [m]	Surface temp.[$^{\circ}\text{C}$]	Bottom temp.[$^{\circ}\text{C}$]	Surface sal.[psu]	Bottom sal.[psu]	Stratification parameter[J/m^3]
M2	1.15	5.35	4.81	3.15	18.79	1.54
M3	2.03	3.72	3.75	27.72	27.75	0.22
M4	5.40	3.17	2.59	22.78	28.51	2.11
D2	2.49	5.06	4.63	0.38	21.75	2.31
D3	2.65	4.76	3.41	10.67	24.96	2.15
D4	8.79	3.50	3.04	21.07	28.19	2.77

Table 2. Comparisons of water properties with stratification parameters ($\log[-V]$) at the monitoring points in May, 2013

Monitoring point	Observed depth [m]	Surface temp.[$^{\circ}\text{C}$]	Bottom temp.[$^{\circ}\text{C}$]	Surface sal.[psu]	Bottom sal.[psu]	Stratification parameter[J/m^3]
M2	1.60	21.36	19.46	2.28	13.97	1.75
M3	2.43	21.74	18.69	5.59	21.41	2.18
M4	6.04	19.99	13.76	18.34	29.37	2.77
D2	1.81	21.01	19.83	1.33	13.06	1.77
D3	2.70	21.75	18.78	7.91	22.37	2.09
D4	8.06	20.01	14.85	21.04	28.52	2.91

Table 3. Comparisons of water properties with stratification parameters ($\log[-V]$) at the monitoring points in Aug., 2013

Monitoring point	Observed depth [m]	Surface temp.[$^{\circ}\text{C}$]	Bottom temp.[$^{\circ}\text{C}$]	Surface sal.[psu]	Bottom sal.[psu]	Stratification parameter[J/m^3]
M2	1.87	27.79	27.52	0.13	0.15	-0.23
M3	2.54	27.58	27.18	0.32	8.14	1.80
M4	6.08	29.41	27.55	3.53	27.08	3.08
D2	1.21	27.14	26.88	0.10	0.10	-0.75
D3	1.99	28.15	27.35	0.24	1.89	1.04
D4	7.99	27.71	28.19	1.92	23.69	3.29

Table 4. Comparisons of water properties with stratification parameters ($\log[-V]$) at the monitoring points in Nov., 2013

Monitoring point	Observed depth [m]	Surface temp.[$^{\circ}\text{C}$]	Bottom temp.[$^{\circ}\text{C}$]	Surface sal.[psu]	Bottom sal.[psu]	Stratification parameter[J/m^3]
M2	0.94	11.28	11.18	18.42	19.72	0.33
M3	2.42	10.67	12.27	25.14	27.75	1.34
M4	5.91	12.13	11.96	30.18	30.22	0.38
D2	1.49	10.26	10.57	21.70	23.15	0.34
D3	2.24	11.50	12.62	25.63	28.11	1.22
D4	8.79	12.62	11.66	28.84	28.93	1.60

비해 상대적으로 낮은 성층계수가 산출되었다. 이 시기는 담수 유입량의 감소와 함께 새만금호 수질관리를 위한 적극적인 해수유통으로 인하여 염분 농도가 빠르게 상승하게 된다. 이는 표·저층의 염분 농도 차이가 작아지게 된다. 이러한 특성은 배수갑문 인근의 깊은 수심과 배수갑문 운영 이력, 만경 및 동진으로부터 유입되는 유동 특성에 따라 서로 많은 영향을 받는다. 따라서 현 시점에서는 만경보다는 동진권역에서 수질관리에 유의해야 할 것으로 판단되며, 향후 새만금호 내의 좀 더 정량적인 특성을 파악하기 위해서는 추가적인 장기 관측을 통한 연구가 지속적으로 필요하다고 판단된다.

새만금 유역은 도시 및 산업지역, 대규모 농경 및 축산지역의 점 및 비점오염원이 산재되어 있고, 새만금 수역의 경우는 사업여건의 변화, 수도작에서 전작으로의 변화로 인하여 새만금 유입 오염부하의 변화가 예상되고 있는 실정이다. 성층계수 분석 결과, 새만금호 내의 낮은 관리수위로 인한 제한적 해수유통으로 상류유역으로부터 담수유입이 없는 5월 중순까지 밀도 성층이 나타나지 않으나 최근 새만금 수체 내 정체현상이 증가하는 양상이 뚜렷이 나타나고 있다. 따라서 염분 성층이 형성되는 시기에는 향후 수질관리에 유의해야 하며 새만금호 정체해소를 위한 대책이 요구된다.

2.3 수치 모의 입력자료 구성

2.3.1 지형자료 구축

모형의 계산영역은 동서방향으로 77km, 남북방향으로 93km이다. 지형은 격자 수심은 한국농어촌공사 새만금사업단에서 2010년도의 새만금호를 대상으로 측량한 수치 지도와(Fig.4c)와 내부개발 최종단계에서 계획된 준설량을 고려(Fig. 4d)하여 구축하였다. 수심은 0.1~42.7 m 내외로 분포하며 만경 수역 준설계획고는 EL.(-) 13.52~EL.(-) 5 m, 동진 수역 준설계획고는 EL.(-) 14.71~EL.(-) 5 m이며, 하류부는 EL.(-) 15 m로 동일하다.

2.3.2 격자수립

새만금호 내의 시·공간적 수리동역학적 특성을 분석·예측하기 위하여 격자를 구축하였으며, Table 5에 정리하였다. 모형을 보정하기 위해 2013년을 기준년도로 설정하였으며, 활성화 된 격자수는 8,260개(Fig. 4a)로 구성되었으며, 담수화 시 격자수는 4,669개(Fig. 4b)로 구성하였다. 수직방향으로는 sigma stretching 좌표계가 각각 사용되었으며, 약 0~8 m 간격으로 5개의 수층으로 구성하였다.

2.3.3 초기 및 경계 조건

수치 모델링의 초기 수위는 EL. (-)1.50 m, 기상 자료는

Fig. 4. Grid configurations with the bathymetry for numerical simulations : (a) model structure and (c) bathymetry for seawater circulation condition and (b) model structure and (d) bathymetry for freshening reservoir condition.

Table 5. Grid configurations of EFDC model depending on the scenarios

Parameter	Value	
Scenario	Saewater circulation	Freshening Reservoir
A number of horizontal cell	8,260	4,669
A number of vertical cell	5	5
Minimum mesh size	$\Delta x = 39.5 \text{ m}$	$\Delta y = 37.8 \text{ m}$
Maximum mesh size	$\Delta x = 738.9 \text{ m}$	$\Delta y = 605.5 \text{ m}$
A Period of numerical simulation	365 days(2013')	365 days(2020')
Time step size	5 sec	2 sec

Table 6. Model calibration results at monitoring points

		Temp. ($^{\circ}\text{C}$)	Salinity (psu)			Temp. ($^{\circ}\text{C}$)	Salinity (psu)
M1	%difference	2.78	26.6	D1	%difference	6.17	19.64
	RMSE	1.62	0.12		RMSE	1.91	0.04
	AME	-0.47	-0.09		AME	1.03	0.03
M2	%difference	23.38	36.15	D2	%difference	18.65	13.76
	RMSE	5.86	8.84		RMSE	4.64	8.57
	AME	-4.84	4.05		AME	-3.58	-2.00
M3	%difference	27.03	3.93	D3	%difference	23.51	16.16
	RMSE	7.40	8.26		RMSE	6.23	6.28
	AME	-5.55	0.66		AME	-4.72	2.76
M4	%difference	17.92	8.91	D4	%difference	9.78	4.40
	RMSE	3.84	3.23		RMSE	2.12	2.91
	AME	3.31	2.03		AME	-1.65	-1.05

2013년 군산 기상대의 기온, 해면기압, 상대습도, 강수량, 증발산량, 일사량 및 강수량 자료를 이용하였다. 수위는 2013년 1월 1일 새만금호 내수위 기준으로 하고 수온과 염분의 경우는 2012년 12월부터 2013년 1월까지 선형보간을 통해 입력하였다. 새만금호 만경 및 동진 수역으로의 유입되는 유량 및 수온·염분 자료는 유역 모델링 결과(NIER, 2015)를 활용하고, 신시 및 배수갑문으로의 해수유통량은 계산된 추산 유량을 적용하였다(Fig. 3).

3. 결과 및 고찰

3.1 수치 모델 보정

모델 보정은 안정화 기간을 포함하여 2013년 1년간 수행하였다. 해수유통 모형의 현지 재현성을 확인하기 위하여 실험결과를 관측자료와 비교하였다. 관측자료는 한국농어촌공사 새만금사업단의 2013년 새만금호 염분 및 상시 수질 모니터링 보고서를 이용하였다. 모델 유효화 변수는 %difference (ASCE, 1993), RMSE(Root Mean Square Error) 및 AME(Absolute Mean Error)를 적용하였으며, Donigian(2000)이 검·보정을

위한 가이드라인으로 제시한 평가 지표인 %difference가 'Fair' 수준에 도달할 때까지 Technical note(US EPA, 2000)를 참고하여 보정하였다.

수온 및 염분 실측값과 모의값을 비교하기 위한 관측위치는 앞서 Fig. 1에 도시하였으며, 그 결과를 Table 6에 정리하였다. 수온에 대한 수치 모델 보정 결과, 만경 및 동진 수역에서의 %difference, RMSE, AME 값이 각각 2.78~27.03, 1.62~7.40, -5.55~3.31로 나타났으며, 모의 효율은 'Fair' 이상으로 수온 예측의 신뢰도가 우수한 것으로 평가된다. 하지만 염분의 경우는 %difference, RMSE, AME 값이 각각 3.93~36.15, 0.04~8.84, -2.00~4.05로 M2 지점에서 낮은 모의 효율 나타났다. 이는 새만금 유역의 복잡한 제수문의 운영방식과 농업용수 공급을 위해 인위적으로 하천 본류의 흐름을 막고 인공 도수시설로 관개가 되기 때문에 하천 본류 유량은 계절에 따라 크게 달라진다. 따라서 만경 및 동진 수역의 실제 유입량을 정확하게 재현하지 못하므로 상기와 같이 하계에 낮은 모의 효율을 보이는 것으로 판단된다. 향후 모델의 신뢰성과 재현성 더욱 확보를 위해 경계 조건에 대한 검증이 필요할 것으로 보인다.

3.2 수치 모델링 결과

새만금호의 담수화 조건에서의 수리 특성을 예측하기 위해 내륙의 경계 조건은 국립환경과학원 20년 예측 유역모델링 결과(NIER, 2015)를 활용하였으며, 해수유출은 담수만 배제되도록 입력하고 이 때 가력 및 신시 갑문은 20년 예측 외조위를 반영하였다. 수치 모델링의 초기 수위는 EL. (-)1.50 m로 하였다.

전반적인 새만금호 유동특성 변화는 Fig. 5에 도시하였다. 동서 방향 및 연직 방향의 운동성이 둔화되고 상류 하천의 만경 및 동진강의 담수 유입, 배수갑문 조작에 의한 담수의 제한적 방류로 인하여 오염물질이 정체 또는 고립될 가능성이 있을 것으로 판단된다. 7월의 수체 이동 특성으로 표층은 농업용지 구간을 지나 신시배수갑문으로 빠져나가는 양상을 보이며 일부는 환경생태용지가 이동하는 양상을 보인다. 저층의 경우는 농업용지 구간에서 상류로의 흐름을 보이며 표층 보다 흐름 속도가 매우 느리게 나타난다. 이러한 이유는 표층의 경우는 바람 등의 영향으로 빠른 순환 흐름을 보여주지만 저층의 경우는 바람 등의 영향 보다는 저층의 밀도차에 의해 흐름이 발생하게 되기 때문이다.

11월의 경우는 표층과 저층 모두 흐름이 약해지는 시기로

상대적으로 정체수역 형성 가능성이 있다. 특히 담수호 운영으로 인해 외해의 방류가 원활하지 않고 제한적 배제 등으로 인해 수괴는 저층에 장기간 체류될 가능성 또한 나타나게 된다. 한편 환경부 관리 환경생태용지 조성 지역에는 하계를 제외하고 정체 구간 및 체류 시간 증가가 나타날 수 있으므로 동계에는 물질 순환 대책이 필요할 것으로 판단된다.

3.3 새만금 수역 적정 수질관리방안 도출

현 상태는 새만금호 내측수역 개발이전으로 본격적인 준설 이전이므로 향후 준설로 인하여 수심이 증가될 경우 새만금호의 수용력이 증가하고 체류시간이 증가한다. 수심증가로 인한 체류시간 증가는 호내 수질에 중요한 영향을 미칠 수 있다. 새만금호 담수 및 해수 유입량 자료를 활용한 물수지 분석 결과, 해수가 자유소통 되던 2009년에는 호 내로 유출입하는 해수유량과 상류에서 유입되는 유량의 비가 2:98로 해수 유출입 유량이 월등이 많아 호 내로 유입되는 오염물질의 희석과 외해 배출이 원활하게 이루어 졌다. 반면 2012년에는 유량비 50:50으로 유사하게 유지되었다. 2012년에는 COD의 농도가 크게 높아지는 등 호내 수질 특

Fig. 5. Main flow directions under the freshening reservoir condition at surface((a) and (b)) and bottom((c) and (d)) layers in July and November.

성이 이전과 크게 달라져 해수의 유출입량과 이로 인한 호내 체류시간(용수 교환율)이 중요하게 작용했음을 유추할 수 있다.

새만금 내부개발을 완료하고 만경수역과 동진수역을 모두 담수화하는 경우 체류시간은 증가될 것으로 예상된다. 현재 새만금호는 유역에서 유입된 담수와 함께 신시와 가력갑문을 통하여 해수가 유·출입되는 조건이므로 해수순환이 활발하고 체류시간이 비교적 짧다. 2013년의 경우 새만금호로 유입된 유량 중 해수가 차지하는 비율이 89%로 높은 비율을 차지하였다. 따라서 향후 새만금 개발이 완료될 경우 현재보다 체류시간이 증가하므로 수질모델링을 통하여 체류시간 증가가 수질에 미치는 영향을 면밀히 검토할 필요가 있다. 새만금 내부개발 완료 후에는 새만금호가 하천지형과 같이 바뀌므로 정체수역이 상대적으로 줄어들 것이다. 그러나 만경수역의 환경생태용지는 여전히 정체수역으로 남을 수 있다. 또한 복합도시용지의 소규모 수로에서도 국지적으로 정체수역이 발생할 수 있으므로 복합도시용지수로 실시설계 시 이를 검토할 필요가 있다. 새만금 유역은 도시 및 산업화 지역과 대규모 농경 및 축산 지역의 점 및 비점오염원이 산재해 있다. 이로 인해 새만금 수역에는 내부개발에 따른 성층화, 침전 및 퇴적물 용출, 조류번성 가능성이 점차 높아지고 있는 실정이다. 따라서 상기 모델링 결과로부터 새만금 수역 농업용지 구간에서는 하계시 조류번성에 대한 대비가 필요하며 그 외 계절에서는 낮은 수심으로 인해 정체현상 해소를 위한 대책이 필요하다. 한편 도시용지 구간에서도 마찬가지로 하계 시에는 밀도 성층 강화로 인한 저층의 빈산소층 형성에 대한 대비가 필요하며, 표·저층 간 순환 미미, 상류 수질개선대책에 대한 수질 민감도가 낮은 지역이므로 자체 부하량 제거 방안을 채택하는 것이 필요할 것으로 판단된다. 더불어 환경부 관리 환경생태용지에서는 외부 유입 수위 관리 및 물질 순환 대책이 필요할 것으로 판단된다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 새만금 담수호 조건에서의 방수제와 동서2축도로가 완료된 상태를 가정하여 호내 수리동역학적 변화 양상을 분석하고 이를 통한 적정 수질관리방안을 제시하였다. 이를 위해 유역 모델인 HSPF(Hydrological Simulation Program-Fortran)로부터 산정된 유입유량과 실제 배수갑문 운영 이력 및 외측 조위가 반영된 경계조건을 고려하여 모델 보정을 실시하였으며, 보정된 매개변수는 향후 담수호 조건에서의 입력자료로 활용하여 모델의 신뢰성을 높일 수 있도록 하였다. 수치 모의 결과, 새만금 담수화 이전에 비해 수체적의 증가하고 배수갑문의 제한적 배제로 인하여 유체의 체류시간이 다소 증가하여 만경수역 환경생태용지와 동진수역 관광레저용지에서는 국지적으로 정체수역이 발생

하였다. 하지만 유로 역할을 하는 방수제 축조와 동서2축도로, 그리고 준설로 인해 지형구배가 급하고 정돈된 하천지형으로 새만금호가 바뀌므로 호내 상류의 정체수역은 담수화 이전 보다 상대적으로 많이 줄어들었다. 향후 수질모델링으로 통해 수리특성 변화와 오염물질 유입특성 변화를 복합적으로 해석하고 수역별 수질변화 특성을 예측할 필요가 있을 것으로 판단되며, 지속적인 보완이 필요할 것으로 판단된다.

References

- ASCE: task committee on definition of criteria for evaluation of watershed models. (1993). "Criteria for evaluation of watershed models." *J. Irrig. Drain. Eng.*, Vol. 119, No. 3, pp. 429-442.
- Choi, J. H. and Jung, T. S. (2012). "A two-dimensional numerical simulation of cohesive sediment transport in the Mokpo coastal zone." *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, Vol. 24, No. 4, pp. 287-294.
- Donigian, Jr., A. S. (2000). HSPF Training Workshop Handbook and CD. Lecture #19. Calibration and Verification Issues, Slide #L19-22. EPA Headquarters, Washington Information Center, 10-14 January, 2000, Presented and prepared for U.S. EPA, Office of Water, Office of Science and Technology, Washington, D. C.
- 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. (1994). "Linking hydrodynamic and biogeochemical transport and transformation models for estuarine and coastal waters." In: M. L. Spaulding, K. W. Bedford, A. F. Blumberg, R. T. Cheng and J. C. Swanson (Eds.). "Estuarine and coastal modeling III." New York: ASCE, pp. 591-608.
- Kang, Y. S., Chae, Y. K., and Lee, H. R. (2011). "Variation of density stratification due to fresh water discharge in the Kwangyang Bay and Jinju Bay." *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, Vol. 23, No. 1, pp. 126-137.
- Kim, W. J. and Min, B. M. (2009). "Evaluation of flood control capability of barrage gate according to the tidal conditions." *Journal of Advanced Engineering and Technology*, Vol. 2, No. 4, pp. 321-326.
- Koh, C. H., Ryu, J. S., and Khim, J. S. (2010). "The Saemangeum: History and Controversy." *Journal of Korean Society of Marine Environment and Energy*, Vol. 13, No. 4, pp. 327-334.
- Korea Meteorological Administration(KMA). (2013). Observation data of Junju meteorological station, <http://www.kma.go.kr>
- Korea Rural Community Corporation(KRC). (2013). Report for

- monitoring of salinity and water quality in Saemangeum reservoir. KRC publication.
- Korea Rural Community Corporation(KRC). (2018). Study on management measures due to changes in Saemangeum Project Conditions. KRC publication.
- NIER. (2015). A model construction for quantification on water quality improvement effect of Saeamangeum area(III).
- Oh, C. S., Choi, J. H., and Cho, Y. K. (2013). "Numerical simulation on hydrodynamic characterization changes associated with the construction of dikes and dredging operations in Saemangeum Lake." *Journal of Environmental Science International*, Vol. 22, No. 9, pp. 1115-1129.
- Oh, C. S. and Choi, J. H. (2015). "Consideraton on changes of density stratification in Saemangeum Reservoir." *Journal of Korean Society of Marine Environment and Energy*, Vol. 18, No. 2, pp. 81-93.
- Shin, B. S., Kim, K. H., Kim, J. H., and Baek, S. H. (2011). "Feasibility study for tidal power plant site in Garolim Bay using EFDC model." *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, Vol. 23, No. 6, pp. 489-495.
- Smagorinsky, J. (1963). "General circulation experiments with the Primitive equation, Part I : the basic experiment." *Monthly Weather Review*, Vol. 91, pp. 99-164.
- Suh, S. W., Cho, W. H., and Ryu, K. S. (2006). "Simulation of mixing transport on inner reservoir and influence impacts on outer region for the Saemangeum effluents caused by gate operation." *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, Vol. 18, No. 1, pp. 43-52.
- Suh, S. W. and Cho, W. H. (2007). "Hydraulic change analysis on Saemangeum Reservoir after final closure." *Journal of Korean Society of Civil Engineering*, Vol. 27, No. 38, pp. 361-369.
- Suh, S. W. and Lee, H. Y. (2008). "Water quality simulations after completion of Saemangeum reservoir construction." *Journal of Korean Society of Civil Engineering*, Vol. 28, No. 1B, pp. 79-93.
- Suh, S. W., Lee, H. Y., and Yoo, S. C. (2010). "Simulation of water quality changes in the Saemangeum reservoir induced by dike completion." *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, Vol. 22, No. 4, pp. 258-271.
- USEPA. (2001). "Better assessment science integrating point and nonpoint sources: BAINS version 3.0 user's manual." EPA-832-F-01-021, US Environmental Protection Agency, Office of Water, Washington, DC.
- Yoo, S. C., Suh, S. W., and Lee, H. Y. (2012). "Impacts on residence time and water quality of the Saemangeum reservoir caused by inner development." *Journal of Korean Society for Marine Environment and Energy*, Vol. 15, No. 3, pp. 186-197.