새만금 호내 수환경 측면에서 최적 관리수위에 대한 수치모의 Optimal Management of Water Level for Water Quality Security in Saemangeum Basin

정석일* · 류광현** · 정영훈*** · 이승오****

Jeong, Seokil*, Ryu, Kwanghyun**, Jung, Younghun***, and Lee, Seungoh****

Abstract

The Saemangeum Basin has been subjected to water quality issues following the construction of a seawall downstream of the Mangyeong River and Dongjin River. Various structural measures have been discussed, but none have been effective so far. In this study, the change in management water level was proposed as a countermeasure, and Delft3D was used to investigate the change in water quality according to the management water levels. Future operations, including the interruption of seawater inflow, were considered. Based on three assumptions for simulating the operation of the drainage gate, the condition of Saemangeum in 2030 when the Master plan is completed was modeled. COD and T-N were selected as the pollutant indicators. The boundary conditions and numerical analysis input data were obtained by integrating actual field data and operation logs. The numerical analysis showed that the water level was more advantageous for water quality when the water level was increased by 0.10m from the current management level of EL.(-)1.5m. It was also confirmed that contaminant diffusion in Mangyung and Dongjin was not actively progressing through the new connecting canal.

Key words : Delft3D, COD, T-N, Management Water Level, Water Quality

요 지

새만금 방조제 준공 후 새만금 호내 수질에 대한 문제가 지속적으로 제기되어 왔다. 다양한 구조적인 대책이 수립되고 시행되었지만, 뚜렷한 수질 개선이 되지 않았다. 이에 본 연구에서는 수질 대책의 일환으로 관리수위 변화를 제시하였고, Delft3D를 통해 수질 개선 효과를 보고자 하였다. 새만금종합개발계획이 완료되는 시점에서의 수문 운영을 가정하여 재현하였으며, 현장 계측 자료 및 Delft3D 모의 조건을 고려하여 COD와 T-N을 수질에 대한 지표로 선택하였다. 분석결과 현행 관리수위(EL.(-)1.5 m)보다 0.10 m 관리수위가 증가하였을 때, 수질적인 측면에서 최적의 결과가 나타났으며, 만경강 유역과 동진강 유역을 연결하는 연락수로가 오염물의 확산 측면에서 큰 역할을 수행하지 못하는 것으로 나타났다.

핵심용어 : Delft3D, COD, T-N, 관리수위, 수질

1. 서 론

방조제 건설로 인하여 기존에 하천구간이었던 지역이

호소의 수리특성을 나타내게 되어 수질 문제가 발생할 가능성이 높아지게 된다. 새만금과 유사한 일본 이사하야 만(Isahaya bay)은 방조제 건설 후 수질이 악화되어 수질대책을

*정희원, 홍익대학교 토목공학과 박사과정(E-mail: suhibb@gmail.com)
Member, Ph.D. Candidate, Department of Civil Engineering, Hongik University

**농림축산식품부, 사무관(E-mail: rkh0428@korea.kr)
Deputy Director, Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs

***경북대학교 건설방재공학과 교수(E-mail: y.jung@knu.ac.kr)
Professor, Department of Construction & Disaster Prevention Engineering, Kyungpook National University

****교신저자, 정희원, 홍익대학교 토목공학과 교수(Tel: +82-2-325-2332, Fax: +82-2-325-2332, E-mail: seungoh.lee@hongik.ac.kr)
Corresponding Author, Member, Professor, Department of Civil Engineering, Hongik University

추진하였으나, 목표수질을 달성하지 못하였고(Yokoyama and Kyozyuka, 2003), 네덜란드는 델타(Delta)사업의 한 부분인 하링블리트 댐(Haringvliet dam) 건설 후 해수 유입이 사라지는 효과를 가져왔으나, 유속의 감소로 수질이 매우 악화되었다(Stuyfzand et al., 2004). 호주 투콤포빌 수로에서는 홍수범람을 방지하기 위하여 수문을 설치하였으나, 현재는 관리 시설물이 노후화되었을 뿐만 아니라 수질 또한 급격하게 악화되었다. 결국 호르는 하천을 인위적으로 막아 형성된 호수는 유입되는 유기물이 많아지는 것이 일반적인 특징이며, 유속이 작아져서 호내에 오염물질이 그대로 축적되게 된다. 이러한 현상은 국내에서도 발생하였는데, 방조제 체절 이후 농업용수 공급을 계획하였던 시화호의 표층은 저염분층, 저층은 고염분층으로 성층화 되어 수질오염 문제가 심각하게 되었다(Part et al., 1997). 결국 해수를 유통시키는 것으로 기본 계획이 변경되었다(Korean Rural Community Corporation, 2006). 새만금 호 또한 이러한 일반적인 현상과 거리가 멀지 않으며, 지속적으로 수질오염 문제가 제기되어 왔다. 또한 많은 예산이 투입되어 구조적인 대책이 수립되었지만, 명확하게 수질 개선 효과를 가져오지는 못하고 있는 실정이다. 새만금 수질관련 연구는 대부분 수치해석 모델을 이용하여 수행되어 왔으며, 관리기관인 한국농어촌공사를 중심으로 지점을 정하여 현장에서 실측을 수행하였다. Seo and Lee (2006)은 EFDC 모델을 이용하여 새만금 수질변화를 예측하였고, 한국농어촌공사는 1991~2006년까지 16년간 환경영향 조사를 실시하였다. 또한 한국농어촌공사(Korean Rural Community Corporation, 2006)는 QUALKO, WASO5를 이용하여 유역 및 호소의 수질을 예측하였다. Jeong and Yang (2015)은 2002년부터 2010년까지 40회의 현장조사 자료를 바탕으로 경향성 분석과 장래의 수질을 예측하였다. 염도, Chl-a, SPM, DIN에 대해 조사하였으며, 끝막이 이후 유기물이 축적되고 있으며, NH₄-N은 증가하고 있다는 경향을 도출하였다. 또한 수심 1.0 m 이하에서 저산소 상태가 발견되어, 대책마련이 시급함을 확인하였다. Kim et al. (2016)은 만경/동진강의 환경유지용수 확보를 위해 강변저류지 설치, 저수지증고, 신규댐 건설, 용수 취배수 체계 조정, 용담댐과 섬진강댐 물 이용체계 조정을 적용하여, 새만금 호내 수질을 검토하였다. 그러나 새만금 수질관련한 대부분의 선행연구는 현재의 상태를 가정하고, 이를 기반으로 수질을 예측한 것이다. 또한 새만금 호내는 현재 준설이 지속적으로 수행되고 있는 점을 감안하면, 향후 변화할 수리특성을 적절하게 반영했다고 보기 어려운 측면이 있다. 이에 본 연구에서는 좀 더 근본적인 대책 마련을 위해 환경적인 측면에서 관리수위를 재산정하고자 연구를 수행하였다. 기존의 관리수위는 이수성, 시공용이성에 초점이 맞추어져 있었을 뿐, 환경적인 측면이 고려되어 있지 않다. 현재 새만금 호내 수질은 해수유통으로 목표 수질을 간신히 유지하고 있으나, 새만금종합개발계획(2011)이 종료되는 2030년에는 완전 담수호를 목표

로 하고 있기 때문에, 보다 근본적인 대책이 필요하다고 할 수 있다. 이에 본 연구에서는 관리수위에 따른 시나리오를 작성하고, Delft3D-WAQ 모델을 이용하여 수질 모의를 수행하였다.

2. 수치해석 모델

2.1 기본 방정식

본 연구에서는 전 세계적으로 널리 사용되고 있는 Delft3D를 이용하여 수질을 고려한 최적의 관리수위를 도출하고자 하였다. Delft3D는 2차원 비선형 천수방정식이 기본방정식이며, 이는 비압축성 유체 흐름에 대하여 Navier-Stokes 방정식으로부터 도출되는데, Boussinesq 가정을 전제로 한다(Deltares, 2011). 지배방정식은 다음 Eqs. (1), (2) 및 (3)과 같다.

- 연속방정식

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}} \sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial((d+\zeta)U\sqrt{G_{\eta\eta}})}{\partial \xi} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}} \sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial((d+\zeta)U\sqrt{G_{\xi\xi}})}{\partial \eta} = (d+\zeta)Q \quad (1)$$

여기서, ξ , η 는 수평과 곡선의 좌표, $\sqrt{G_{\xi\xi}}$, $\sqrt{G_{\eta\eta}}$ 는 곡선을 직교좌표로 변환하는데 사용되는 계수, d 는 수평 평면 기준 점, ζ 는 수위, t 는 시간, Q 는 유체의 배출 또는 유입, 강수 또는 증발에 따른 단위면적당 유량의 변화를 나타낸다.

- x방향 운동량 방정식

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial u}{\partial \eta} \\ + \frac{\omega}{d+\zeta} \frac{\partial u}{\partial \sigma} - \frac{v^2}{\sqrt{G_{\xi\xi}} \sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\eta\eta}}}{\partial \xi} \\ + \frac{uv}{\sqrt{G_{\xi\xi}} \sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\xi\xi}}}{\partial \eta} - fv \\ = -\frac{1}{\rho_0 \sqrt{G_{\xi\xi}}} P_{\xi} + F_{\xi} + \frac{1}{(d+\zeta)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\nu_v \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right) + M_{\xi} \end{aligned} \quad (2)$$

- y방향 운동량 방정식

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial v}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial v}{\partial \eta} \\ + \frac{\omega}{d+\zeta} \frac{\partial v}{\partial \sigma} - \frac{uv}{\sqrt{G_{\xi\xi}} \sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\eta\eta}}}{\partial \xi} \\ + \frac{u^2}{\sqrt{G_{\xi\xi}} \sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\xi\xi}}}{\partial \eta} - fu \\ = -\frac{1}{\rho_0 \sqrt{G_{\eta\eta}}} P_{\eta} + F_{\eta} + \frac{1}{(d+\zeta)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\nu_v \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right) + M_{\eta} \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, ν_v 는 수직와점도계수, P_{ξ} , P_{η} 는 압력경사를 나타내며 정수압 조건을 제외하고 밀도 변화는 고려하지 않으며,

F_x, F_y 는 운동량 방정식에서 수평 레이놀즈의 응력 불균형, M_x, M_y 는 외부 조건으로 인한 운동량 생성과 소멸항(수리구조물, 물의 유입과 유출, 파랑 응력 등에 의한 외력)을 나타낸다. 수질모델인 Delft3D-WAQ는 수질과 관련된 물질의 이송과 물리적, 화학적과 생물학적 공정에 대해 해석하여 수생태 내에 수질분석을 수행할 수 있다. 기본적인 가정은 질량의 보존이며, 이는 다음 Eq. (4)와 같이 표현될 수 있다.

$$M_i^{t+\Delta t} = M_i^t + \Delta t \times \left(\frac{\Delta M}{\Delta t} \right)_{T_r} + \Delta t \times \left(\frac{\Delta M}{\Delta t} \right)_P + \Delta t \times \left(\frac{\Delta M}{\Delta t} \right)_S \quad (4)$$

여기서, M_i^t 는 시작단계에서의 질량, 시작단계의 Δt 초후의 끝에서의 질량은 $M_i^{t+\Delta t}$, 이송에 대한 변화는 $\left(\frac{\Delta M}{\Delta t} \right)_{T_r}$, 물리적, 화학적 또는 생물학적 과정에 의한 변화는 $\left(\frac{\Delta M}{\Delta t} \right)_P$, 유입물에 의한 변화(예. 폐기물, 유출수 등)는 $\left(\frac{\Delta M}{\Delta t} \right)_S$ 이다.

2.2 모델 검증

2.2.1 이상화 수로 적용(Nashta et al., 2010)

Delft3D 모델의 검증을 위하여 Nashta et al. (2010)이 수행한 급확대부 실험을 재현하였다. 급확대부를 검증 대상으로 결정한 이유는 새만금 호가 하구호로 하천의 하류부가 급확대 되는 지형이며, 더욱이 준설로 인한 단면 급확대가 예상되기 때문이었다. Table 1에 제시된 Nashta et al. (2010)의 실험 제원을 그대로 적용하였으며, 모든 결과는 Nashta et al. (2010)의 연구에서 제시한 무차원 변수를 이용하여 비교, 분석하였다. Nashta et al. (2010)의 실험조건은 Froude number가 0.4 ~ 0.75이며, Reynolds number가 $2.5 \times 10^4 \sim 6.5 \times 10^4$ 였으며, Delft3D로 재현하였던 시험에서는 Froude Number 0.60, Reynolds number 4.0×10^4 이었다. 난류모델은 $k-\epsilon$ 으로 결정하였으며, 상류와 하류의 수로 폭의 비는 1:2로 격자를 구성하였다. 격자는 $1.0 \text{ m} \times 1.0 \text{ m}$ 크기의 정사각형 격자를 이용하였다. Table 1은 수치해석 조건 및 결과이며, Fig. 1은 이를 분석한 것이다.

Nashta et al. (2010)의 결과와 Delft3D 결과의 오차는 중앙부에서 약 1.2%, 측면부에서 평균 21.0%정도였으며, 전체적으로는 7.8%로 나타났다. 측면에서 Delft3D의 오차 값이 다소 크게 나온 이유는 벽효과(wall effect)로 인한 것으로, 이는 Delft3D가 벽면에 대해 slip과 no-slip으로만 구분이 가능하기 때문에 실제 실험수로의 벽효과를 정확히 재현하기가 불가능하였을 것으로 판단된다. 그러나 대부분의 구간에서 무차원 유속 분포는 매우 유사하였으며, 이에 실제 단면 확대부에서의 수리현상을 Delft3D가 잘 재현한다고 판단하

여, 단면 확대부에서의 수리특성 및 수질변화를 모의·분석하는데 적합하다고 판단하였다.

Table 1. Delft3D Hydrodynamic Model Validation in Idealized Channel

Contents	Experimental con. (Nashta et al., 2010)
Channel	27.0 m (L) × 0.6 m (B)
Froude Number	0.60
Reynolds Number	4.0×10^4
Grid size	1.0 m × 1.0 m
time step	0.01 min (0.6 sec)
turbulence model	$k-\epsilon$
Simulation conditions

Results of simulation reproduced the experiment of Nashta et al. (2010) using Delft3D

Fig. 1. Comparison with Nashta et al. (2010)'s Experiment and Delft3D Results

2.2.2 새만금 지구에의 적용

Nashta et al. (2010) 실험과의 비교를 통하여 Delft3D의 모의 정확성을 검증하였지만, 실제 하천에의 적용성 확인을 위해 새만금 유역 동진강 하류부 부랑지점에서 실측자료와 수치해석 결과를 비교하였다. Fig 2는 동진강의 수위 관측소 지점을 도시한 것으로, 본 연구 범위 내의 지점은 부랑, 정우, 신태인지점이 포함된다. 또한 농림부에서는 동진대교에서 수위를 측정하기 때문에, 새만금 지구에 적용성 확인을 위한 정읍천 정우 관측소, 동진강 신태인 관측소에서 동진대교까지로 결정하였다. 이러한 검증과정에서 재현한 동진강

의 길이는 약 11.2 km였다. 모의기간은 2009년 7월 1일부터 2009년 7월 30일까지로 총 30일에 걸쳐 모의하였으며, 12일의 안정화 시간을 두고 비교기간은 7월 13일부터 7월 23일까지로 결정하였다. 모의시간간격(time step)은 0.1s로 하였으며, 조도계수는 동진강 하천기본계획(Ministry of Land, Infrastructure, and Transport, 2008)을 참고하였다.

Fig. 2. Delft3D Mesh and Boundary Conditions for Field Validation

Fig. 3. Comparison with Field Data and Delft3D Results at Buryang Measuring Point

Figs. 2와 3에서 제시하는 바와 같이, 부랑관측소의 실측데이터와 Delft3D결과를 비교하였을 때, 전체적인 경향은 매우 유사한 것으로 나타났다. 평균 오차는 약 4%였으며, 특히 첨두점의 값들이 대부분 오차가 작게 나타나 Delft3D를 새만금 유역에 적용하는 것이 가능하다고 판단하였다.

2.2.3 새만금 호내 수질 측정자료를 이용한 검증

현재 새만금호에는 신시배수갑문과 가력배수갑문이 설치되어 있으며, 수질유지를 위해 해수유통을 하고 있다. Delft3D-WAQ 검증을 위해 이러한 해수유통의 재현은 반드시 필요하기 때문에, Fig. 4와 같이 배수갑문 주변의 조위 자료 및 현행 관리수위를 이용하여 해수 유통을 간접적으로 재현하였다. 유입조건은 WAMIS 자료를 이용하여, 2016년 6월의

유량을 상류 경계조건으로 설정하였다. 수질자료는 한국농어촌공사(Korean Rural Community Corporation, 2016)에서 실측한 데이터를 이용하였다. Fig. 4에서 ‘+’로 표시된 지역은 실측한 자료가 있는 곳이며, ‘o’로 표시된 지역은 수치해석 측정 지점이다. 실측 data가 월별로 제시되었기 때문에, 해당되는 월에는 동일한 오염물 농도를 입력하였다. 실측자료는 2016년 6월 자료(Korean Rural Community Corporation, 2016)를 사용하였다. Fig. 5는 수치해석 지점과 실측 자료를 도시한 것이다. Fig. 5에서 보듯이 배수갑문 부근으로 갈수록 COD 농도가 감소하는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 4. Measuring Points

Fig. 5. Comparison with Measuring Data and Simulations Data (2016. 06)

이는 배수갑문의 작용으로 흐름이 발생하며, 또한 상대적으로 COD 농도가 낮은 해수가 유입됨으로써 높은 농도의 COD를 가진 기존 물이 희석되기 때문인 것으로 판단된다. 실측 자료가 많지 않기 때문에 정확한 경향성 비교는 불가능하였지만, 실측점된 지점의 자료와 수치해석 결과의 오차가 모두 5% 내외로 나타나, Delft3D-WAQ 모듈의 정확성을 확보하였다고 판단하였다.

3. 시나리오 구성

본 연구의 목표는 새만금종합개발계획(Korean Government, 2011)으로 인하여 새만금 유역의 전반적인 수리특성이 변화하고, 이로 인한 다양한 제반 여건 변화를 예측하는 것으로써 수질 또한 이에 포함된다. 따라서 연구 대상 범위는 준설구간이 시작되는 만경대교와 동진대교를 시작으로, 신시배수갑문과 가력배수갑문에 이르는 새만금 방조제까지로 결정하였다(Fig. 6 참조). 시간적 범위는 내부개발계획이 완료되는 시점인 2030년을 기준으로하여, 1년간 모의를 수행하였다. 2030년에는 새만금호의 담수화가 목표이기 때문에, 해수유통은 없을 것이며, 호내에서 외해로 빠져나가는 유출만이 고려되어야 할 것이다. 이러한 조건을 고려하기 위해 다음의 가정을 통해 배수갑문 운영을 재현하였다.

- (1) 배수갑문의 운영시간은 평균 4시간으로 일정하다.
- (2) 배수갑문은 월 16회 개방한다.
- (3) 배수갑문을 통해 호내에서 외해로 빠져나가는 유량은 유입유량과 동일하다.

Fig. 6. Spatial Scope of Research

첫 번째, 배수갑문의 운영시간은 평균 4시간으로 일정하다. 배수갑문 운영자료를 살펴보면, 수위조절 목적으로 수문을 개방한 시간은 평균적으로 약 4시간인 것으로 나타났다. 이에 배수갑문 운영시간을 일률적으로 4시간을 적용하였다(14:00 ~ 18:00). 두 번째, 배수갑문은 월 16회 개방한다. 목표 시점인 2030년에는 현재 수질 개선을 목적으로 시행 중인 해수유통을 하지 않을 것으로 예상된다. 이에 현재 수위조절을 위해 배수갑문의 개방횟수를 분석한 결과 월평균 15.8회로 나타났으며, 이에 해수유통이 없을 경우 약 16회/월의 배수갑문 개방이 수행될 것이라 예상하였다. 세 번째, 배수갑문을 통해 호내에서 외해로 빠져나가는 유량은 유입유량과 동일하다. 2030년은 해수유입이 없기 때문에, 배수갑문의 조작은 전적으로 호내의 관리수위 유지 목적이

유일할 가능성이 높다. 이러한 상황을 고려할 때, 배수갑문의 조작은 호내에서 외해로의 유출이 유일한 목적이며, 관리수위를 기준으로 그 이상 유입되는 유량에 대해서는 전량 유출을 할 것이다. 이러한 가정들을 전제로 배수갑문에 대한 경계조건을 Fig. 7과 같이 결정하였다.

(a) Sinsi gate

(b) Garyeok gate

Fig. 7. Downstream Boundary Condition

유입유량 조건은 2031년의 유량 예측이 쉽지 않기 때문에, WAMIS에서 취득한 자료 중에서 최근의 10개년 평균을 이용하였다. 또한 만경, 동진강으로 유입되는 중소 하천의 유입량에 대해서는 상대적으로 규모가 크다고 판단되는 지방하천 이상만을 고려하였다. 이 중 유량자료의 취득이 쉽지 않은 하천에 대해서는 유역면적 비를 이용하여 산출하였다. Table 2는 이러한 조건들을 이용하여 결정된 수치해석 시나리오를 정리한 것이다.

Table 2. Scenario for Simulation of Water Quality

No.	Management water level (EL.m)	Operation of Gates	Inflow conditions
Snr.01	(-)1.3	Fig. 7	10 years average (2007~2016)
Snr.02	(-)1.4		
Snr.03	(-)1.5		
Snr.04	(-)1.6		
Snr.05	(-)1.7		

4. 수치해석 및 결과분석

사후영향조사보고서(Korean Rural Community Corporation, 2012~2015, 2016)를 통해 총 5개년의 실측 data를 살펴 본

결과, 뚜렷한 증가세 또는 감소세 등의 경향이 보이지 않았으며, 새만금개발청에서 제시하고 있는 새만금친환경개발계획도에서는 만경강 유역은 만경대교, 동진강 유역은 동진대교 지점까지 침전지, 인처리시설 및 하수종말 처리장 등의 설치계획을 세웠을 뿐, 상류 지역까지 친환경 관련 계획을 수립하지 않았다. 이에 2030년에도 현재와 유사한 정도의 오염물이 만경대교 및 동진대교로 유입된다고 판단하여, 최근의 자료를 이용하여 입력자료를 구성하였다.

현장에서 측정된 자료가 월 1회만 측정했으며, 정확한 시기를 알 수 없기 때문에, 각 월 첫째날에 측정된 것으로 가정하였고, 월과 월 사이의 유입 조건은 선형보간 된다고 가정하였다. 실측자료는 Fig. 4에서 보는 바와 같이 만경강 유역 3지점, 동진강 유역 3지점에서 측정되었고, 유입조건으로는 M1, D1에서 측정된 자료를 이용하였다. 오염지표 항목은 실측 보고서와 Delft3D-WAQ에서 지원하는 항목을 비교하여, 최종적으로 COD, T-N로 결정하였다. Fig. 8은 만경강과 동진강 유입부에서 수질모의에 이용된 오염물 등의 유입조건을 도시화한 것이다.

(a) COD

(b) T-N

Fig. 8. Upstream Boundary Condition

모의기간은 2031년 1월 1일 ~ 2031년 12월 31일까지이며, 모의시간간격(time step)은 20분으로 결정하였다. 수치해의 수렴을 위한 반복계산법은 16-Iterative solver를 이용하였고, 초기조건은 1월의 M4와 D4를 평균한 값을 부여하였다. 수온 및 기온은 실측된 현장 자료(Korean Rural Community Corporation, 2016)를 활용하였다. Fig. 9는 예시로 Snr.03에 대한 수질모의 결과를 보여준다.

(a) COD (mg/L)

(b) T-N (mg/L)

Fig. 9. Simulation Result (Snr. 03)

각 항목에 대한 분포도는 모두 다른 양상을 나타냈으며, 해수 유입이 없기 때문에, 유입조건이 호내의 수질 특성을 결정 짓는 중요한 역할을 한 것으로 판단된다. 또한 T-N분포를 분석한 결과 만경강 유역과 동진강 유역의 농도차이가 발생한 것을 확인하였다. 현재의 지형과는 다르게, 내부개발 계획이 완료되는 2030년의 새만금 지형은 만경강 유역과 동진강 유역에 몇 개의 연락수로를 통해서만 유량 및 물질의 교환이 발생할 수 있다. COD 및 T-N 분포도 또한 이러한 현상을 보여주는데, 오염물질의 확산 측면에서 이 부분은 심도있는 추가 연구가 필요하다고 판단된다.

본 연구는 새만금 호내에 대한 연구로, 대표지점을 선택하여, 오염물질과 관리수위의 관계를 분석하였다. 대표지점은 호내의 현장계측 장소인 M4와 D4로 결정하였다(Fig. 4 참조). COD와 T-N의 경우는 수위 변화에 따른 변화 양상이 뚜렷하였는데, 관리수위 EL(-)1.4 m까지는 감소하는 경향을 보였으며, 이 후는 증가하는 현상이 나타났다. Table 3은 관리 수위 변화에 따른 각 항목별 변화율을 정리한 것이다. 기준이 되는 관리수위는 EL(-)1.5 m로 하였다.

Table 3. Water Quality Rate According to Management Water Level (summer)

Contents		Management water level (EL. m)				
		-1.30	-1.40	-1.50	-1.60	-1.70
COD	M4	0.943	0.937	1.000	1.046	1.063
	D4	1.00	0.955	1.000	1.015	1.030
T-N	M4	0.942	0.942	1.000	1.050	1.066
	D4	0.907	0.876	1.000	1.021	1.031

Fig. 10. Simulation Results of Connecting Channel (Snr. 03); COD and T-N concentrations are high in the Mangyeong River basin, but diffusion into the Dongjin River basin through the contacting canal is not observed significantly

만경강 유역과 동진강 유역은 Fig. 10에서 보듯이 수질면에서 각각 다른 경향을 보이며(만경강이 상대적으로 오염물 농도가 높았으며, 동진강 유역으로 확산현상이 잘 발생하지

않음), 앞서 제시하였듯이 연락수로를 통한 오염물의 유통이 활발하지 않은 것으로 확인된다. 이에 3개의 연락수로에 대해 1년동안의 유속분포 분석하였으며, 이를 Fig. 11에 도시하였다.

Fig. 11. Time Series of Flow Velocity at Connecting Channel Over 1 Year (The direction of flow was from the Mangyeong River to the Dongjun River)

Fig. 11에서 보듯이 연락수로를 통과하는 유속은 시기별로 큰 차이를 보이고 있다. 그러나 최대 유속은 A, B, C지점에서 각각 약 0.015 m/s, 0.040 m/s 및 0.065 m/s로 나타났는데, 제시된 유속의 크기는 연락수로의 길이가 약 3~4 km임을 감안할 때, 오염물들의 확산이 원활하게 발생하기에는 충분하지 않은 크기로 판단된다. 이는 오염물이 호내로 유입되었을 경우 확산 범위를 줄일 수 있는 장점이 있으나, 빠른 확산을 통해 기준 이하로 오염물의 농도를 저하시키는 능력은 떨어질 가능성이 크다. 다만 본 연구에서 가정하고 있는 배수갑문의 운영이 신시배수갑문과 가력배수갑문의 동시개폐이며, 만경강과 동진강 유역으로 유입되는 유량이 각각 신시배수갑문과 가력배수갑문으로 빠져나간다는 가정하에 수행되었기 때문에, 배수갑문의 운영이 본 연구의 가정과 다를 경우 연락수로를 통한 유수의 흐름이 변화할 가능성이 있다고 판단된다.

앞서 도출된 결과를 이용하여, 관리수위 변화에 따른 오염 항목들의 농도변화를 분석하였다. Fig. 12는 Table 3을 도시한 것으로 관리수위와 COD, T-N의 관계를 보여준다. COD와 T-N의 변화는 관리수위가 EL.(-)1.4 m까지 감소하는 경향을 보였으며, EL.(-)1.4 m ~ EL.(-)1.3 m 구간에서는 동일하거나 증가하는 현상이 나타났다. 이는 만경강과 동진강에서 공통적으로 보이는 현상이었다.

그러나 변화율은 크게 나타나지 않았는데, 이는 준설로 인하여, 수심이 5~6 m 정도 깊어졌으며 이로 인한 통수단면적 증가로 인한 것이라 판단된다. 호내 대부분의 구간이 수심이 약 15 m 이상으로 관리수위가 0.1 m씩 변화한다

하여도, 체적의 변화율은 크지 않기 때문에, 오염지표의 농도에 대한 전체적인 변화율이 크지 않게 나타난 것으로 판단된다.

(a) COD

(b) T-N

Fig. 12. Change of COD and T-N According to Management Water Level

5. 결 론

관리수위 변화에 따른 호내 수질변화를 모의하기 위해서 배수갑문 운영에 대한 4가지 가정을 정립하고, 이를 바탕으로 수치해석을 수행하였다. 실측된 자료를 이용하여 경계조건을 구성하였으며, COD, T-N이 관리수위가 변함에 따라 어떻게 변화하는지 살펴보았다. 전체적으로 관리수위 변화에 따른 변화율이 크지 않게 도출되었는데, 이는 준설로 인한 통수단면적 증가 때문인 것으로 판단된다. COD와 T-N의 농도변화는 EL(-)1.4 m까지 감소하는 경향을 보였으며, EL(-)1.4 m ~ EL(-)1.3 m 구간에서는 동일하거나 증가하는 현상이 나타났다. 이는 EL(-)1.4 m ~ EL(-)1.3 m 구간에서 오염물을 최소로 하는 어떠한 최적 지점이 존재한다는 것을 의미한다. 오염물의 농도는 물의 체적이 증가할수록 일반적으로 감소되며, 유속이 빠를수록 확산 및 배출이 원활하여 감소될 수 있다. 이러한 두가지 요인을 새만금 유역에 적용하여 보면, 관리수위의 증가로 인하여 체적이 커지기 때문에 EL(-)1.4 m까지는 물질들의 희석으로 오염물들이 감소하였으며, 그 이후 관리수

위의 증가는 물의 양 증가로 배수갑문으로부터 받는 영향력이 감소됨을 의미한다고 판단된다. 그러나 본 연구에서는 외부에서 유입되는 오염물질 재현되었을 뿐, 내부 퇴적층에서 용출되는 오염물질(SOD) 등은 고려대상이 아니었다. 향후 정확한 새만금 내의 수질 예측을 위해 다양한 오염원에 대한 연구가 추가된다면, 목표로 하고 있는 녹색·수변도시계획에 일조할 수 있을 것이다. 또한 배수갑문 운영이 본 연구에서 제시하고 있는 가정과 같이 수행된다면 연락수로 통한 오염물 확산 등 수질 관리측면에서 다소 불리할 수 있을 것으로 판단되며, 이에 새만금 종합개발계획이 완료되는 시점에서는 해수 유통이 없는 점을 고려하여, 해수 유통의 수질개선효과를 대신할 다양한 방안을 모색하는 것이 시급하고 판단된다.

감사의 글

이 성과는 2017년도 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2017R1A2B2011990).

References

- Deltares. (2011). *D-Water quality: User manual*.
- Jeong, Y. H., and Yang, J. S. (2015). The long-term variations of water qualities in the Saemangeum salt-water lake after the sea-dike construction. *Journal of the Korean Society for Marine Environment and Energy*, Vol. 18, No. 2, pp. 51-63.
- Kim, S.M., Park, Y.K., Won, C.H., and Kim, M.H. (2016). Analysis of scenarios for environmental instream flow considering water quality in Saemangeum watershed. *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, Vol. 38, No. 3, pp. 117-127.
- Korean Government. (2011). *Saemangeum master plan*.
- Korean Rural Community Corporation. (2006). *Report for environmental effect on reclamation of Saemangeum*.
- Korean Rural Community Corporation. (2012~2015). *Environmental survey report for Saemangeum district*.
- Korean Rural Community Corporation. (2016). *Environmental survey report for Saemangeum district*.
- Ministry of Land, Infrastructure, and Transport. (2008). *Dongjin River Plan*.
- Nashta, C.F., Garde, R.J., and Swa Mee, P.K. (2010). Subcritical flow in open channel expansions with movable bed. *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 25, No. 1, pp. 89-102.

- Park, Y.C., Park, J.K., Han, M.W., Son, S.K., Kim, M.K. and Huh, S.H. (1997). Biogeochemical study of dissolved organic and inorganic compounds under oxic/anoxic environment in lake Shihwa. 『The Sea』 *Journal of the Korean Society of Oceanography*, Vol. 2, No. 2, pp. 53-68.
 - Seo, S.W., and Lee, H.Y. (2008). Water quality simulations after completion of Saemangeum reservoir construction. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 28, No. 1B, pp. 77-93.
 - Stuyfzand, P.J., De Lange, W.J. and Zindler, J.A. (2004). Recognition, dating and genesis of fresh and brackish groundwaters in the Hollandsch Diep estuary in the compound Rhine-Meuse delta. *Proceedings of the 18th Salt Water Intrusion Meeting (SWIM)*, Cartagena, Spain, pp. 665-678.
 - Yang, J.S., Jeong, Y.H., Ji, K.H., Kim, H.S., Choi, J.H., and Kim, W.J. (2008). The early-stage changes of water qualities after the Saemangeum sea-dike construction. *Journal of the Korean Society for Marine Environmental Engineering*, Vol. 11, No. 4, pp. 199-213.
 - Yokoyama, T. and Kyojuka, Y. (2003) Experimental study on flow and tidal exchange of a reservoir through dike gates in Isahaya Bay. *Proceedings of the 13th International Offshore and Polar Engineering Conference*, Hawaii, USA, pp. 331-337.
-
Received	March 29, 2018
Revised	March 30, 2018
Accepted	May 10, 2018