「The Sea」 Journal of the Korean Society of Oceanography
Vol. 11, No. 4, pp. 133 ― 144, November 2006

새만금호 관리수위 유지를 위한 수문 운영방안모의

서승원* · 조완희 · 이화영
군산대학교 해양시스템공학과

Simulation of Gate Operations on Samangeum Reservoir to Maintain Target Water Level

SEUNGWON SUH*, WANHEI CHO AND HWA YOUNG LEE
Department of Ocean System Engineering, Kunsan National University, Kunsan 573-701, Korea

해수 소통이 전제된 새만금호의 내부 관리수위를 유지하는 최적의 수문 운영안이 ADCIRC모형을 적용한 실험을 통해 검토되었다. 수문 완공 이후와 내부개발 이후로 사업진행을 구분하였고 평수시와 풍수시로 하천유량을 구분하여 모델링을 실시하였다. 수문 운영방안은 유입/배출이 연속적으로 1일 1회, 1일 2회 및 2일 1회 등에 대해 검토되었으나 모든 경우 하천 유입 유량에 의해 수위가 지속적으로 상승된다. 목표 관리수위 0.0 m를 유지할 수 있는 현실적인 방안으로는 방조제 완공 직후에는 1일 2회의 유입/배출을 유지하면서 평수시에는 단속적으로 6일에 한번, 풍수시에는 3일에 한번 외해수의 유입을 억제시키면 최대편차 ±0.4 m 이내에서 관리수위 유지가 가능한 것으로 분석되었다.

It is investigated using ADCIRC model to find an optimal gate operation in order to maintain target water level of the inner Saemangeum Reservoir. Various developing procedures and river inflows conditions are considered in modeling. For the gate operations, consecutive openings to inflow and outflow, such as once a day, twice a day and once per two days are considered. However water level increases gradually due to river inflows regardless of gate operations. In order to maintain target level 0.0 m, it is recommended to shut down of gate in order to prevent inflows of outer sea water at least once per 6 days for normal riverine inflows and once per 3 days for flood inflows during consecutive operations. Then it is balanced within maximum of ±0.4 m of deviations from target level of 0.0 meter.

Keywords: Saemangeum Reservoir, Gate Operation, Target Water Level, ADCIRC Model

서 론

새만금호는 방조제 공사 완공이후 수질 저하 방지 대책의 일환으로 수문을 통하여 해수소통을 실시하게 된다. 방조제 완공이후 내부단지 개발이 순차적으로 이루어질 때 단지조성고와 내부 호소의 목표수질을 확보하기 위한 관리수위 설정 및 유지는 공학적인 측면에서 뿐만 아니라 호 내부의 수질환경과 밀접하게 연관된 매우 중요한 실제적인 관심사이다. 이유는 수문의 운영과 연계하여 인공적인 하구호의 수질 및 생태환경이 변화되기 때문이다. 즉, 수문을 운영하면서 목표 관리수위를 유지하는 것은 수질 유지와 내부단지의 안정성 확보를 위해 매우 중요하다. 새만금호는 방조제 완공이후 수문 작동에 따라 호 내측의 수위 및 유속 등 수리 및 수질특성이 직접적으로 변하게 된다. 따라서 관리수위 유지는 해안공학적, 환경공학적 및 경제적인 면 등이 모두 함께 검토되어야 하며, 적정 수위를 유지하여 내부개발에 따른 최적의 안을 도출하는 것이 절대적으로 필요하다. 본 연구에서는 새만금 방조제 완공이후와 내부 개발 단계인 동진측 정상운영기간(만경구역)에서 만경강 및 동진강의 계절별 유입과 수문 조작을 통한 내부 수위 관리에 필요한 운영지침을 작성하기 위해 수치모형을 적용하여 수문의 작동과 연계하여 관리수위 유지방안을 검토 한다.

본 연구 대상해역인 새만금호와 연관된 기존의 연구로는 방조제 완공이후와 내부 개발이후 만경강 및 동진강의 홍수량 유입에 따른 동적하도추적과 수문의 규칙적 운영에 따른 호 내부의 수리특성을 다룬 서와 조(2005)의 연구가 있다. 또한 내부 개발이후 수문을 통한 해수소통과 상류 하천의 평수량 및 홍수량 유입에 따른 혼합 확산을 평가하고, 수문을 통한 호소수 방류시 저염수가 외해에 미치는 영향범위를 평가한 연구로 서 등(2006a)의 선행 연구가 있다. 그러나 방조제 완공이후 연속적 또는 비연속적인 수문의 운영에 따른 호 내부의 수리특성 및 호 내의 안정성과 수질변화에 중요한 사항인 관리수위 유지방안에 대한 검토 및 관리수위 유지 방안은 아직까지 제시되지 못한 상태이다.

새만금 해역의 지형 및 수심은 불규칙하므로 이러한 점을 효과적으로 표현할 수 있는 모델 선정은 최종적인 결과의 신뢰성에 매우 중요한 인자로 작용한다. 본 대상 영역은 넓은 조간대 영역과

*Corresponding author: suh@kunsan.ac.kr

주기적 또는 비주기적으로 운영되는 수문의 특성을 반영하도록 적절한 모델 선정이 필수적이다. 본 연구에서는 효과적으로 적용 가능한 모델로 ADCIRC모형(Luettich *et al*., 1992)을 이용하여 해석하였다.

본 논문은 새만금호에 대한 관리수위 설정에 관한 초기 연구이며 내부 관리수위를 0.0 m로 국한한 경우에 상류의 유입과 하류의 수문작동에 따른 단기간(1개월) 동안 호 내부의 관리수위를 유지하는 사업진행별, 내부단지개발별, 계절별의 최적 수문 운영안을 마련하기 위한 검토가 포함된다. 월별 평균적 개념의 수문조작 시나리오로 1개월 또는 그 이상의 시간에 대한 수위변화가 예측 모의된다. 사업진행은 수문 완공이후와 동진측 정상운영기간으로 구분하였으며, 월별 유량변화는 평수시 3~4월과 풍수시인 7~8월로 구분하여 모델링 실시하였다. 수문 운영 시나리오는 실제운영 가능한 조건으로써 1일 1회 유입/배출, 1일 2회 유입/배출, 2일 유입/ 2일 배출 그리고 1일 2회 유입/배출(3, 6일마다 유입억제)의 조건으로 설정하였다.

본 연구에서는 새만금호의 수위변화 인자 중 증발 및 강수 등 체적변화에 미치는 부차적인 영향은 제외되었다. 그러나 수문 운영이 호 내부의 수리 및 수질 특성을 직접적으로 변화시킨다는 것을 이해한다면 본 연구결과는 새만금호 내부의 수위 및 수질관리에 중요한 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

수치모형의 개요

모형의 기본이론

ADCIRC(ADvanced CIRCulation model for oceanic, coastal and estuarine waters)는 복잡한 해안경계를 정밀하게 처리를 하며 장기간 넓은 영역에서 해수순환을 모의할 수 있도록 개발된 유한요소 모형이다(Luettich *et al*., 1992). 근자에는 넓은 영역을 처리하는데 있어 계산효율을 증진시키기 위해 병렬화를 구성한 접근이 이루어지고 있다(Chipada *et al*., 1996). 모형은 기본적으로 수심 적분된 2차원 모형(2DDI)과 3차원 모형(3DVS)으로 구성되어 있다. 2DDI(two-dimension, depth-integrated)는 바닥마찰계수와 운동량 확산계수를 이용하는 수심 적분된 외부모드 방정식(external mode equation)만 풀어 계산한다. ADCIRC는 기본방정식인 식 (1)의 연속방정식을 시간에 대하여 미분하고, 식 (2), 식 (3)의 운동량 방정식을 공간에 대하여 각각 x와 y방향으로 미분한 후 원래의 연속방정식에 임의의 계수인 τ_0를 곱하고 이송항을 비보존성 형태로 변환하면 식 (4)와 같이 된다. 최종적으로는 천수방정식의 연속방정식을 변형한 형태인 일반화된 파동연속방정식(generalized wave continuity equation)과 운동량방정식으로 표현된다. 시간진행 모형인 ADCIRC는 양·음해법으로 시간 적분을 수행할 수 있는 특징이 있다. 모형이 초기에 발표된 이후 현재까지 계속적인 수정보완을 거치면서 모델의 세련화와 기능의 향상이 추진되고 있는데, 본 연구에는 Version.44가 적용되었다. 모형의 기본적인 서술은 국내문헌으로 서와 김(2003)에 게재되어 있으며, 상세한 것은 모형의 이론을 다룬 매뉴얼(Luettich *et al*., 1992) 또는 모형의 홈페이지에 소개된 지침서(www.adcirc.org)를 참조할 수 있다. 본 고에서는 상세한 내용은 생략한다.

수심 적분된 2차원의 연속 및 운동량 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t}+\frac{\partial UH}{\partial x}+\frac{\partial VH}{\partial y}=0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial U}{\partial t}+U\frac{\partial U}{\partial x}+V\frac{\partial U}{\partial y}-fV=-\frac{\partial}{\partial x}\left[\frac{p_s}{\rho_0}+g\zeta\right]+\frac{\tau_{sx}}{\rho_0 H}-\frac{\tau_{bx}}{\rho_0 H} \tag{2}$$

$$\frac{\partial V}{\partial t}+U\frac{\partial V}{\partial x}+V\frac{\partial V}{\partial y}+fU=-\frac{\partial}{\partial y}\left[\frac{p_s}{\rho_0}+g\zeta\right]+\frac{\tau_{sy}}{\rho_0 H}-\frac{\tau_{by}}{\rho_0 H} \tag{3}$$

여기서, ζ: 수면변위, U, V: 수심 평균된 수평방향 유속, $H(x, y, t$ or $\lambda, \phi, t)\equiv h+\zeta$: 지오이드를 고려한 수심, $f\equiv 2\Omega\sin\phi$: Coriolis 인자, p_s: 자유수면의 대기압, ρ_0: 기준유체밀도, g: 중력가속도, τ_{sx}, τ_{sy}: 수면의 응력, τ_{bx}, τ_{by}: 바닥의 응력을 의미하며, 기조력과 운동량 확산항 그리고 경압 가속항은 무시하였다.

ADCIRC에서는 위의 기본 미분방정식을 풀 때 발생되는 수치해석적 오류를 피하기 위해 연속방정식을 일반화된 파랑연속방정식(GWCE, Generalized Wave Continuity Equation)으로 대체하는데, 공간적 변수의 수치해석 가중치인 τ_0를 추가하고 연쇄법칙을 적용하면 다음과 같이 된다(Luettich *et al*., 1992).

$$\frac{\partial^2 \zeta}{\partial t^2}+\tau_0\frac{\partial \zeta}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x}$$

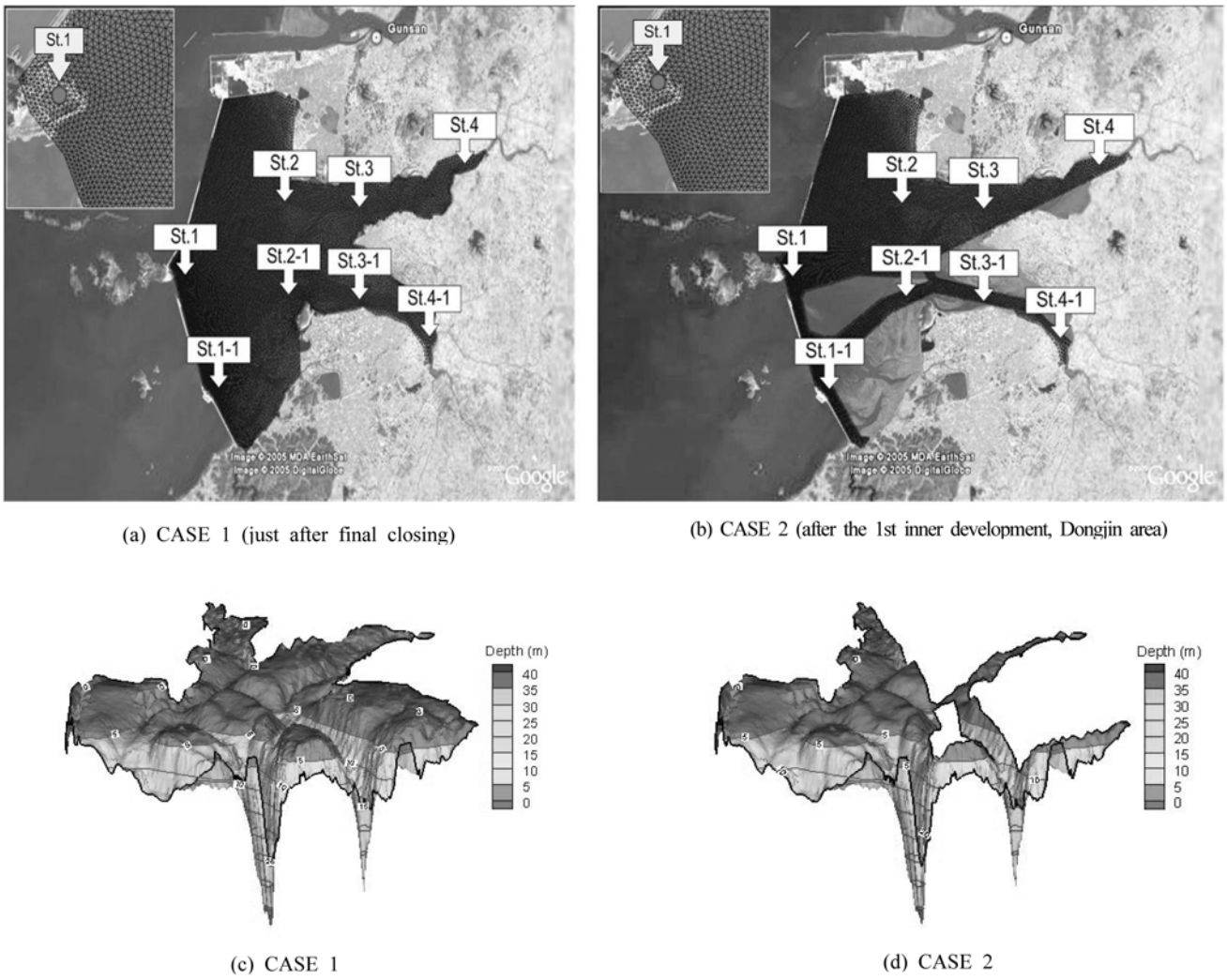
$$\left\{U\frac{\partial \zeta}{\partial t}-UH\frac{\partial U}{\partial x}-VH\frac{\partial U}{\partial y}+fHV-H\frac{\partial}{\partial x}\left[\frac{p_s}{\rho_0}+g\zeta\right]-\frac{\tau_{bx}}{\rho_0 H}+\tau_0 UH\right\}$$

$$+\frac{\partial}{\partial y}\left\{V\frac{\partial \zeta}{\partial t}-UH\frac{\partial V}{\partial x}+-VH\frac{\partial V}{\partial y}-fUH-H\frac{\partial}{\partial x}\left[\frac{p_s}{\rho_0}+g\zeta\right]-\frac{\tau_{by}}{\rho_0 H}+\tau_0 VH\right\}=0 \tag{4}$$

이 ADCIRC 모형에 대한 검증은 모델 개발의 초기단계에 단순해역에 대해 적용한 비교연구를 포함하여 다수가 있는데, Dresback *et al*.(2004)의 연구 성과에서 보듯이 4분 환원에 대하여 엄밀해와 비교한 결과 거의 근접하는 결과를 얻은 바 있다. 실제 해역에 대해서는 많은 연구가 있는데, 황해에 대해 적용한 연구로 Edward and Blain(2002) 등의 해외에서의 연구와 국내에서 최 등(2001) 및 서 등(2006b)이 황해에 적용한 연구사례가 있다. 이들 연구는 본 모델이 해양 및 연안의 수동역학을 매우 잘 재현하고 있는 것으로 보고하고 있다. 국내에서 국부 해역에 대해 ADCIRC 모델을 이용한 선행연구(서와 김, 2003; 서와 조, 2005; 서 등, 2006a)에서는 새만금을 포함하는 전북해역과 군장해역에 대한 적용에서 검증된 바가 있으므로 본 연구에서는 기존 연구에서 사용된 계수를 적용 하였다.

대상영역과 입력자료

본 연구의 대상영역을 수치모의하기 위해 방조제 시공이 완료된 직후 상황(CASE 1)과 향후 내부 개발 단계인 동진측 정상운영기간(CASE 2)에 대하여 새만금호 내부 영역을 이산화 하면 Fig. 1에 보이는 바와 같은 유한요소 망이 된다. 그림에서 보듯이 새만금호 내측을 40 m 내외로 해상하였다. 본 연구에서는 전회의 연구 서와 조(2005)에서 구축한 격자망과 일관성을 유지하기 위하여 본 연구에서도 동일한 요소망을 이용하였다. CASE 1의 총 절점수는 16531개이며 요소는 32269개이고, CASE 2의 총 절점수



(a) CASE 1 (just after final closing)

(b) CASE 2 (after the 1st inner development, Dongjin area)

(c) CASE 1

(d) CASE 2

Fig. 1. FEM meshes and topography showing reference stations for two cases.

는 11923개이며 요소는 22759개이다.

모델의 기본적인 입력 자료에는 새만금 내외측의 수심자료와 함께 상류에서 정의되는 유량조건이 있다. 수심자료는 가장 최근의 측심자료(농업기반공사 새만금사업단, 2005)가 활용되었다. 하천유입이 고려되는 상류경계에는 새만금지구 수문조사보고서에 인용한 각 월별 평균 하천유출량(농업기반공사, 1999)이 사용되었다. 새만금 외조위는 조화분석된 자료를 이용하여 평균조석의 값을 사용하였다. 이는 새만금 외부역인 서해에서 실시간의 조석 값을 반영하면서 수문을 통한 동적변화를 보는 것이 아니라 연평균된 조석 자료 즉, 조화분석을 통해 도출된 평균적인 M_2, S_2, K_1, O_1분조값의 사용을 의미한다. 하류 경계조건으로는 Fig. 2에서 보듯이 수문경계조건 자료로 관리수위 0.0 m일 때 신시 및 가력 수문에서 1일 2회의 유입/배출되는 경우(수문을 항시 개방하여 유출입하는 경우)의 유출입량을 부여하였다. 수문에서 발생되는 유출입량은 내부 수위를 고정 시키고 실시간적으로 발생되는 외조위와의 수두차를 식 (5)을 이용하여 계산하였으며, 형상계수는 0.74를 사용하였다. 수문에서의 유출입량은 그림에서 보는 바와 같이 외조위와 연계하여 대조, 중조, 소조의 경향으로 유출입량이 변한다. +값은 외측에서 내측으로 유입되는 유량을 의미하며, -값은 내측에서 외측으로 유출되는 유량을 의미한다. 여기서 신시수문과 가력수문의 수문 폭의 차이 때문에 유출입량이 차이가 나는 것을 알 수 있다.

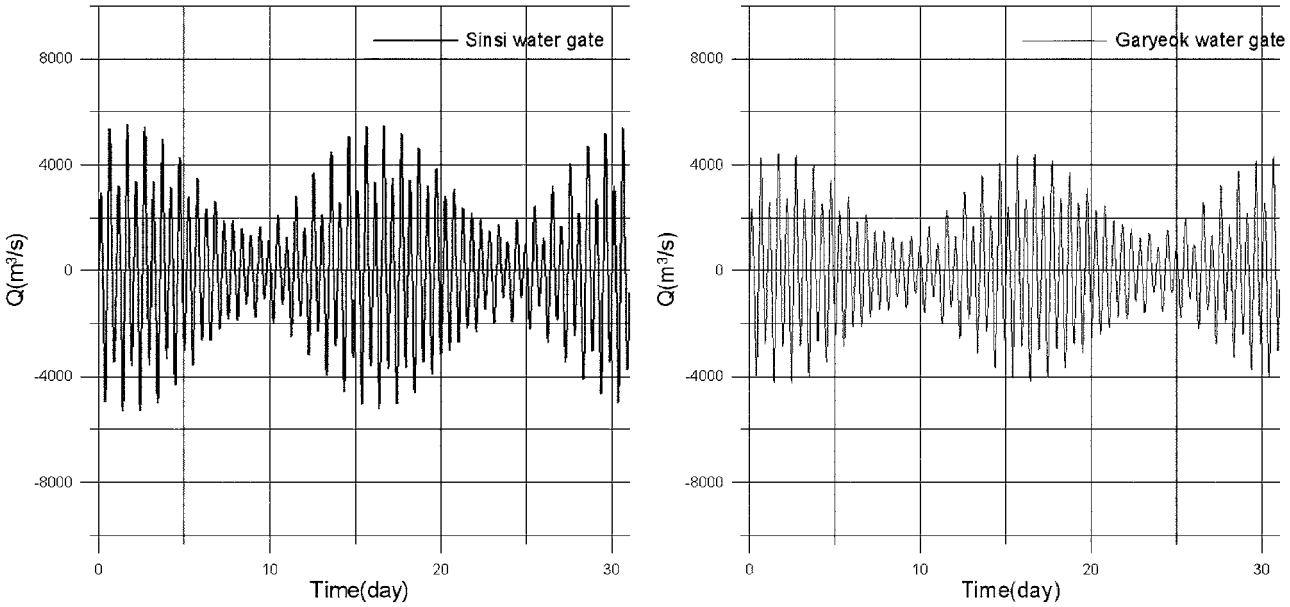
$$Q = A*C\sqrt{gh} \tag{5}$$

여기서, Q= 유출입량, A= 단면적, C= 형상계수, g= 중력가속도, h= 내외측의 수두차이다.

수문 운영에 따른 호내의 수동역학 변화

수문 운영방안 설정

수문 운영에 따른 호 내측의 영향을 평가하기 위한 수치모형실험에서 하천 유입 유량을 고려한 기간별 및 내부 단지개발을 고려한 사업진척이 고려되었다. 단계별 진척상황은 새만금 방조제 완공직후(CASE 1)와 내부 개발의 1단계인 동진측 정상운영기간



(a) Sinsi gate (b) Garyeok gate

Fig. 2. Tidal fluxes through sluice gates.

(CASE 2)의 두 경우로 구분하였다. 방조제 완공직후는 신시 및 가력 수문이 시나리오별로 운영되는 것으로 고려하였으며, 동진측 정상운영기간에는 신시 수문만을 시나리오에 따라 운영하는 것으로 설정하였다. 상류의 경계조건으로는 만경강과 동진강의 유출량을 분석하여 3~4월의 평수시 유량으로 20~23 m^3/s을 적용하였고, 7~8월의 풍수시 유량으로는 74~90 m^3/s을 적용하였다. 외해측의 조위와 내수위와의 수두차이로 발생하는 실시간적인 유량을 수문 경계조건으로 이용하였다.

수문 운영은 1일 1회의 유입/배출, 1일 2회 유입/배출, 2일 유입 / 2일 배출 그리고 1일 2회 유입/배출(3, 6일마다 유입억제)로 실제 운영 가능한 상황을 설정하였다. 방조제 완공이후와 내부 개발 단계인 동진측 정상운영기간에 수문 운영 시나리오를 정리하여 Table 1에 제시하였다. 실제 적용 가능한 수문 운영 시나리오인 1일 1회 유입/배출, 1일 2회 유입/배출, 2일 유입/ 2일 배출의 수문 조작을 통해서도 새만금 호내부에서 일정한 관리수위가 유지되지 않는다면, 해수소통량이 가장 많은 1일 2회 유입/배출을 운영하면서 관리수위가 유지 되도록 상류경계의 계절별 유입량에 따라서 3, 6일 마다 수문을 통한 외해수의 유입을 억제 하면서 일정한 관리수위를 유지할 수 있는 방안을 추가로 설정하여 평가하였다.

Table 1. Test cases of gate operation.

Development step	Riverine inflows	Gate operation	Case naming
CASE 1 (just after final closing)	normal flow	Once inflow and outflow per 1 day	C1-Nf-O1
		Twice inflow and outflow per 1 day	C1-Nf-O2
		Two days inflow and two days outflow	C1-Nf-O3
		Twice inflow and outflow per 1day(shut down of gate once in 6 days)	C1-Nf-O4
	flood flow	Once inflow and outflow per 1 day	C1-Ff-O1
		Twice inflow and outflow per 1 day	C1-Ff-O2
		Two days inflow and two days outflow	C1-Ff-O3
		Twice inflow and outflow per 1day(shut down of gate once in 3 days)	C1-Ff-O4
CASE 2 (after 1st inner development)	normal flow	Once inflow and outflow per 1 day	C2-Nf-O1
		Twice inflow and outflow per 1 day	C2-Nf-O2
		Two days inflow and two days outflow	C2-Nf-O3
		Twice inflow and outflow per 1day(shut down of gate once in 6 days)	C2-Nf-O4
	flood flow	Once inflow and outflow per 1 day	C2-Ff-O1
		Twice inflow and outflow per 1 day	C2-Ff-O2
		Two days inflow and two days outflow	C2-Ff-O3
		Twice inflow and outflow per 1day(shut down of gate once in 3 days)	C2-Ff-O4

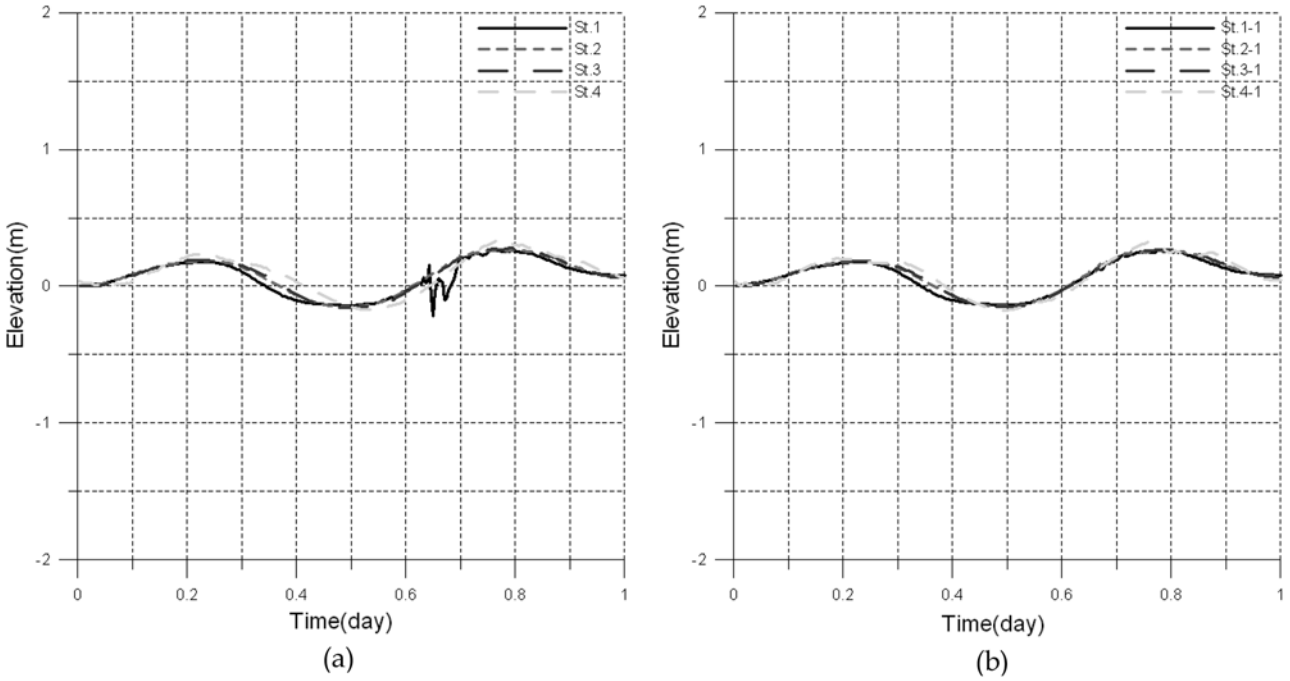


Fig. 3. Time varying water surface elevation during one day for CASE 1, (a) Mankyong (b) Dongjin river lines.

수문 운영에 따른 호내의 수위변화

방조제 완공이후 신시 및 가력 수문의 조작과 내부 개발단계인 동진측 정상운영기간 중 신시 수문만을 통한 새만금호 내부의 수위변화를 수치실험을 통해 살펴본다.

새만금 방조제 완공 이후 하루 동안 신시 및 가력 수문을 개방하는 경우 수위 변화를 정량적으로 표현하면 Fig. 3에서 보듯이 외해수가 수문을 통해 내측으로 유입될 경우 새만금호 내부 수위는 만경수역의 St.1과 St.2에서 0.27 m, St.3에서는 0.28 m, St.4에서는 0.35 m 상승한다. 반대로 호 내부의 유량이 외측으로 배출될 경우 만경수역의 St.1과 St.2에서는 -0.14 m, St.3에서는 -0.16 m, St.4에서는 -0.17 m 하강한다. 동진수역에서는 St.1-1과 St.2-1 및 St.3-1에서는 0.27 m, St.4-1에서는 0.33 m 상승한다. 외측으로 배출될 경우 만경수역의 St.1-1과 St.2-1에서는 -0.14 m, St.3에서는 -0.15 m, St.4에서는 -0.18 m 하강한다. 수문을 하루 동안만 개방하면 만경수역과 동진수역의 내부의 수위는 각각 0.1 m 상승한다.

새만금 내부 개발 단계로 동진측 정상운영기간 신시수문을 하루 동안만 개방하는 경우 새만금호 내부 수위는 수문에서 내측으로 유입될 경우 Fig. 4에서 보듯이 만경 수역의 St.1, St.2, St.3에서는 0.3 m, St.4에서는 0.39 m 상승한다. 외측으로 배출될 경우 만경 수역의 St.1, St.2, St.3에서는 -0.1 m, St.4에서는 -0.12 m 하강한다. 동진 수역의 St.1-1, St.2-1, St.3-1에서는 0.3 m, St.4-1에서는 0.39 m 상승한다. 외측으로 배출될 경우 만경 수역의 St.1, St.2, St.3에서는 -0.1 m, St.4에서는 -0.11 m 하강한다. 하루 동안 수문으로 해수가 소통된 이후 만경수역과 동진수역의 내부 수위는 0.1 m 상승한다.

새만금호 전체적인 평면적 수위변화를 살펴보기 위해 수문으로부터 외해수가 유입되는 경우의 동적반응을 모의하여 Fig. 5에 제시하였다. 방조제 완공 이후는 호 내측에서 일정하게 수위가 상승하나 수문 인근 영역에서 불규칙 수면교란이 발생하여 내부로 전파되는 것을 볼 수 있다. 내부 수면교란이 발생하는 원인은 수문에서의 급격한 유입이 일시적으로 호 내부로 전파하기 때문에 발생한다. 그러나 동진측 정상운영기간에는 외해수가 유입되면서 수위가 급격하게 상승되고, 하류 수문과 상류 만경강 및 동진강의 유입부와 수위차가 큰 폭으로 발생한다. 또한 수문 인근 영역에서 수면교란이 발생하여 내부로 전파되는 것을 볼 수 있다. 수면교란의 영향 범위도 방조제 완공이후와 동진측 정상운영기간에 따라 변하게 되는데, 방조제 완공이후는 상류방향으로 최대 10 km 정도까지 전파되나 동진측 정상운영기간에는 최대 13 km 정도까지 전파된다. 이처럼 수위상승의 전파거리가 길어지는 것은 방조제 완공이후에 비하여 동진측 정상운영기간의 경우 새만금 호내부의 수표면적, 수용적이 감소하기 때문이며, 수문에서 동일한 유량이 유출입 되어도 호 내측의 수위 변화 폭이 증가하여 그 영향 범위가 확대되는 것으로 판단된다. 즉, 내부개발에 따라 방조제 완공 직후에 비해 수용적이 14.5%로 감소하면서 내부 반응은 빨라지며 수위가 상승하는 것으로 분석된다.

수문 운영별 모의결과 평가

수문 완공이후 수위 변화

수문 완공이후 1개월간의 수문 조작과 상류 만경강 및 동진강의 유입량 변화를 모의하여 도출된 결과를 앞에서와 같이 특정 정점에서의 수위 변화로 도시하여 Fig. 6, Fig. 7에 제시하였다. 관리수위 0.0 m일 때 평수시인 3~4월의 1일 1회 유입/배출 모의결과 호 내의 수위가 Fig. 6(a)에 보이는 바와 같이 주기적인 성향을 띄고 변화되고 있다. 그림에서 보는 것처럼 주기 한 달을 갖는 정현(sine)함수와 같은 양상을 보이고 있으며 한 달을 주기로 수위

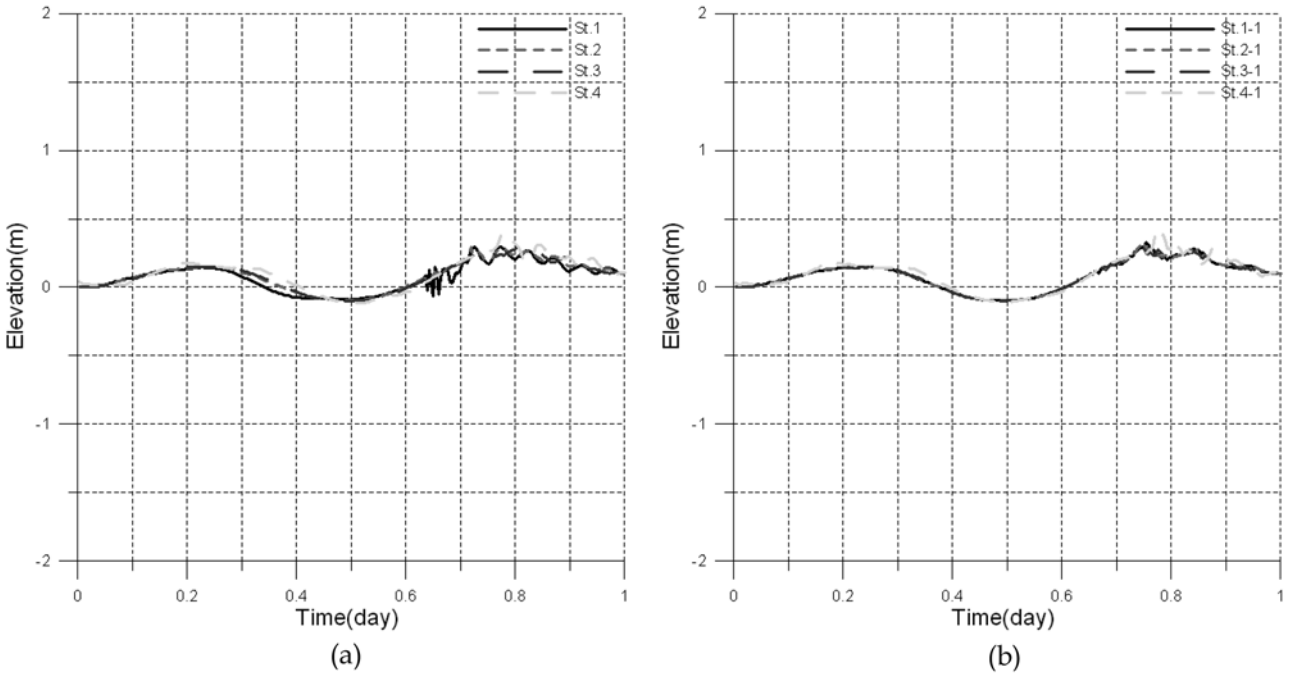


Fig. 4. Time varying water surface elevation during one day for CASE 2, (a) Mankyong (b) Dongjin river lines.

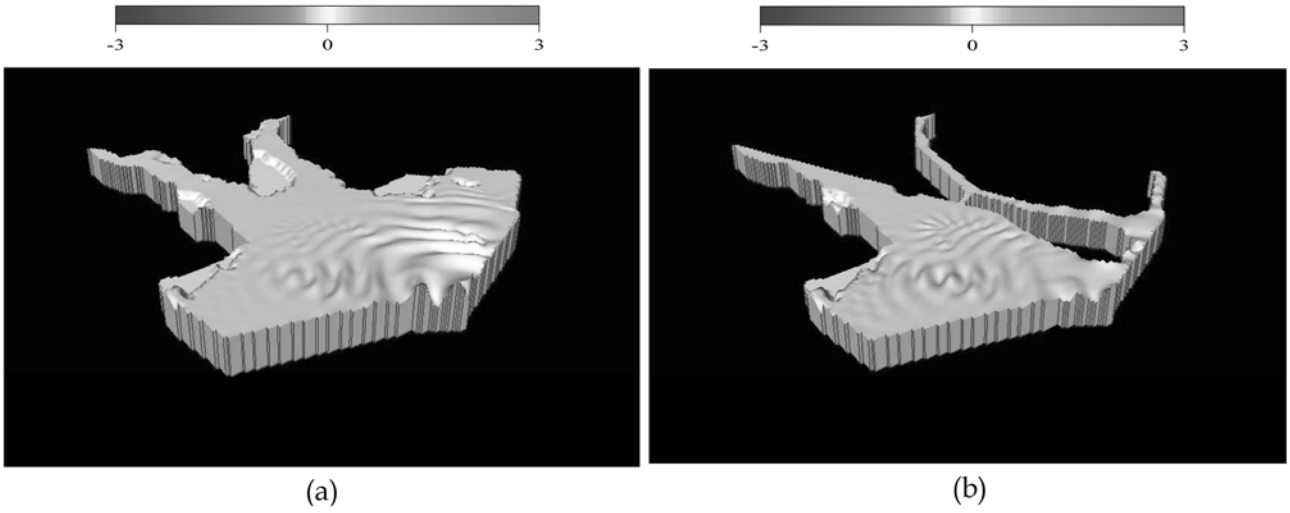


Fig. 5. Propagation of water surface disturbances due to inflows (a) CASE 1 (b) CASE 2.

가 하강과 상승의 경향을 보이고 이후에는 초기의 관리수위에 비해 0.7 m 상승한다. 1일 1회 유입/배출의 경우에 주기가 한 달을 갖는 이유는 외조위 창낙조의 불규칙성과 1일 1회만을 유출입하므로 외조위 주기의 2배가 되어야만 주요 외력인 외조위 주기와 동일해지기 때문에 새만금호 내부의 주기는 2배로 증가되는 것으로 유추된다. 1일 2회 유입/배출의 경우 호 내의 수위가 Fig. 6(b)와 같이 선형증가하고 있다. 이는 대조 중조 소조를 거치면서 외조위의 영향으로 인하여 유출입량은 평형을 유지하지만 상류 유입량으로 인하여 호 내의 수위가 선형적으로 상승하는 것으로 판단된다. 1일 2회의 경우는 하천에서의 유입량으로 호 내의 수위가 초기의 관리수위에 비해 0.6 m 상승한다. 2일 유입/ 2일 배출하는 경우에는 호 내의 수위가 2일 배출과 2일 유입으로 인하여 Fig. 6(c)에서 보듯이 불규칙적으로 변하는 양상을 나타내고 있다. 한 달 이후 초기의 관리수위에서 -0.22 m 하강한다.

풍수시 유량이 고려되는 경우도 앞의 경우와 유사한 결과가 도출되었다. 모의 결과를 Fig. 7에 제시하였으며 관리수위 0.0 m일 때 7~8월 여름철의 유량에 따른 1일 1회 유입/배출의 경우 Fig. 7(a)와 같이 호 내의 수위가 주기적인 성향을 보이고 있다. 그림에서 보는 것처럼 주기 한 달을 갖는 정현(sine)함수와 같은 양상을 보이고 있다. 모의 기간 종기인 1개월 이후에는 초기의 관리수위에 비해 1 m 상승하는 것으로 나타났다. 1일 2회 유입/배출의 경우 호 내의 수위가 Fig. 7(b)와 같이 직선적인 증가되며, 평수시에 비해

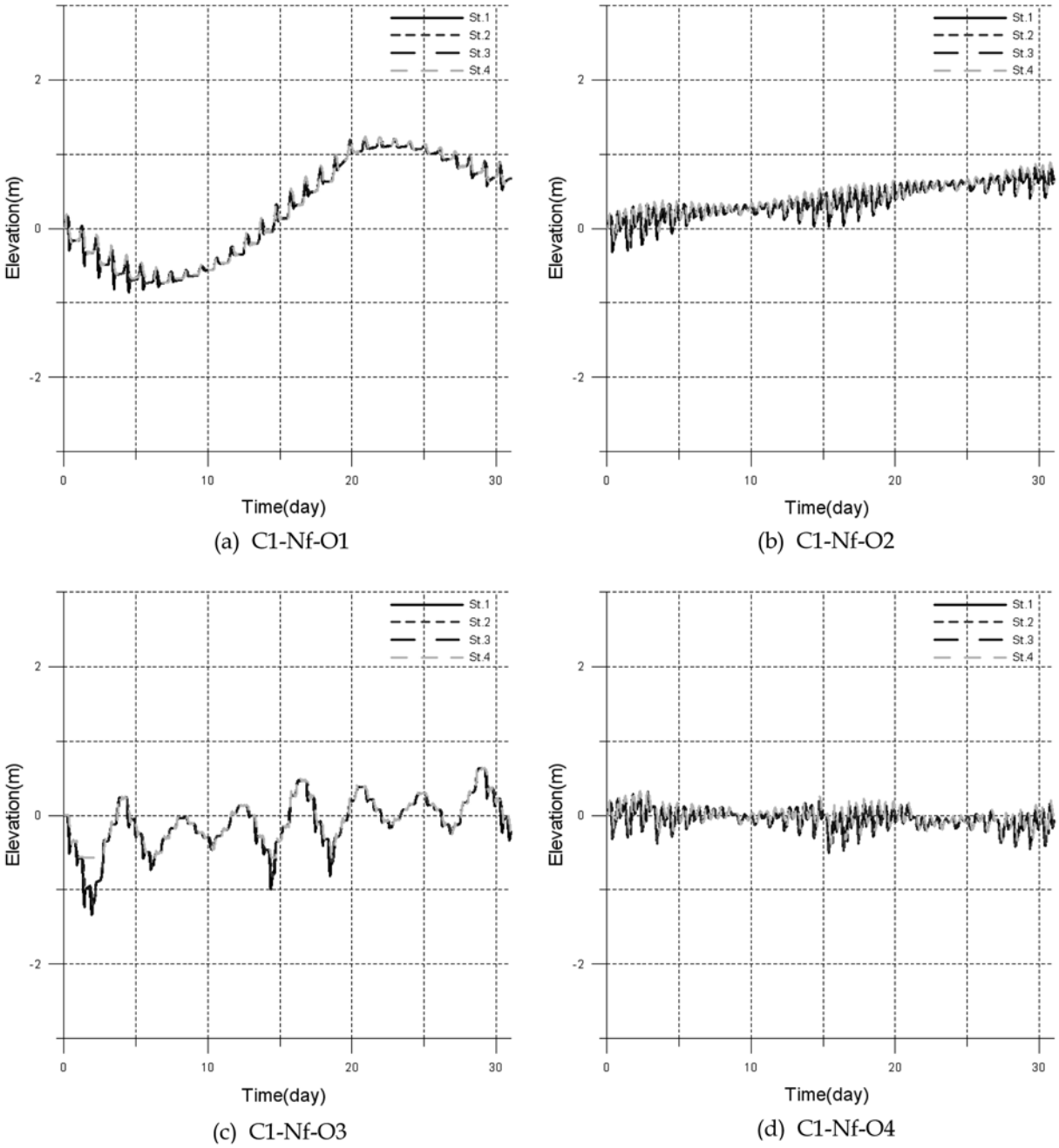


Fig. 6. Time varying water surface elevation for 31 days for normal river inflows, CASE 1.

하천에서의 유입량 증가로 인하여 초기의 관리수위에 비하여 2 m 상승한다. 2일 유입/ 2일 배출하는 경우에는 호 내의 수위가 2일 배출과 2일 유입으로 인하여 Fig. 7(c)와 같이 불규칙적으로 변하는 양상을 나타내고 있다. 한 달 이후에는 초기의 관리수위에서 0.8 m 상승한다. 유입량을 달리하여 모의한 평수시와 풍수시의 결과를 비교하면, 풍수시는 평수시의 유동 양상과 같지만 상류(만경강, 동진강) 유입량이 평수시보다 많아 호 내의 수위가 상류 유입량의 영향으로 평수시에 비하여 수위가 상승하는 양상을 보인다.

동진측 정상운영기간의 수위 변화

동진측 정상운영기간에 대하여 모의한 신시 수문 조작과 상류 만경강 및 동진강의 유입량 변화에 따른 호 내의 수위 변화를 Fig. 8, Fig. 9에 도시하였다. 관리수위 0.0 m으로 유지하면서 평수시의 유량에 대한 1회 유입/배출의 경우 Fig. 8(a)에서 보는 바와 같이 호 내의 수위가 주기적인 성향을 나타낸다. 그러나 신시 수문만을 운영하기 때문에 한 달 이후에는 초기의 관리수위보다 0.5 m 상승한다. 1일 2회 유입/배출의 경우에는 Fig. 8(b)와 같이 호 내의 수위가 직선적인 성향을 보이고 있다. 유출입량이 거의 0에 근접하

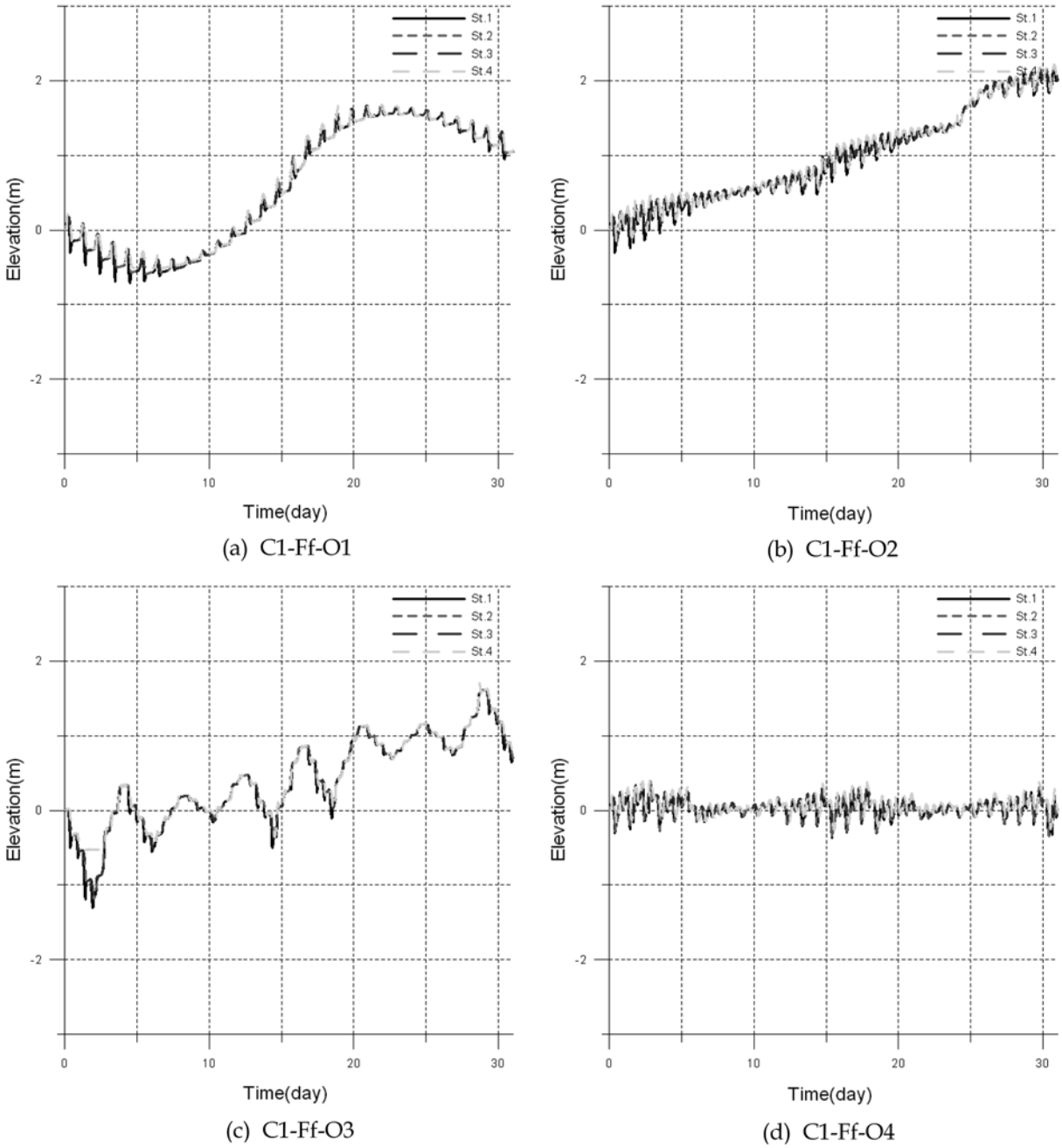


Fig. 7. Time varying water surface elevation for 31 days for flood river inflows, CASE 1.

지만 상류 유입유량에 의해 호 내의 수위변화가 직선적으로 상승함을 알 수 있다. 하천에서의 유입량으로 인하여 점진적으로 호 내의 수위가 0.6 m까지 상승한다. 2일 유입/ 2일 배출하는 경우에는 호 내의 수위가 유입과 배출로 인하여 불규칙적으로 변하는 양상을 나타내고 있다. 2일 유입/ 2일 배출하는 경우는 Fig. 8(c)에서 보듯이 호 내의 수위를 일정하게 유지하지 못하고 있다.

풍수시의 경우 관리수위 0.0 m으로 유지하면서 1회 유입/배출하면 Fig. 9(a)에 보이는 바와 같이 호 내의 수위가 주기적인 성향을 보이지만 상류경계의 증가된 유입유량으로 인하여 1.4 m 상승한다. 1일 2회 유입/배출의 경우에는 호 내의 수위가 직선적인 성향을 보이면서 Fig. 9(b)와 같이 한 달 이후에는 호 내의 수위가 2 m까지 상승한다. 2일 유입과 2일 배출하는 경우에는 호 내의 수위가 유입과 배출로 인하여 Fig. 9(c)처럼 불규칙적으로 변하는 양상을 나타내고 있다. 2일 배출 2일 유입으로 인하여 수위의 변화를 볼 수 있으며, 호 내의 수위를 일정하게 유지하지 못하며 수위의 상승과 하강을 반복하고 한 달 이후에는 1 m 상승한다.

평수시와 풍수시의 결과를 비교하면, 풍수시의 결과는 평수시의 유동 양상과 같지만 상류(만경강, 동진강) 유입량이 평수시보다 커져, 호 내의 수위가 상승하는 양상을 보인다. 동진측 정상운영기간도 수문 완공직후의 수위 상승보다 확연하게 차이가 난다. 이는

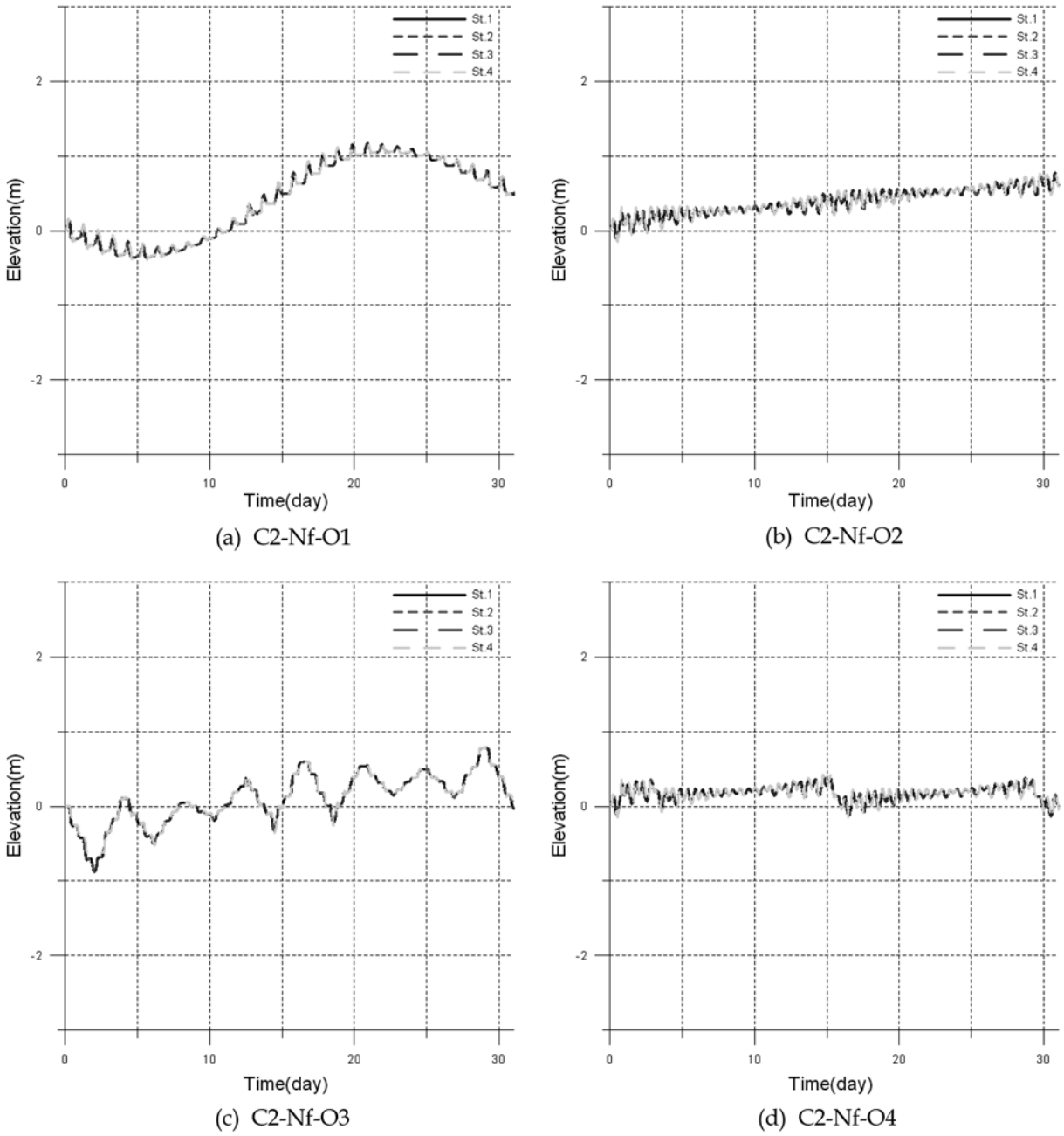


Fig. 8. Time varying water surface elevation for 31 days for normal river inflows, CASE 2.

신시수문 운영으로 인한 유출입량의 차이와 방조제 완공이후의 수용적에 비하여 동진측을 정상운영 하면 수용적이 14.5% 감소하는 것에 따른 것으로 판단된다.

관리수위 유지를 위한 수문운영방안

방조제 완공이후 및 내부 개발단계인 동진측 정상운영 기간에 대해 수문을 통해 1일 1회 유입/배출, 1일 2회 유입/배출, 2일 유입/ 2일 배출의 해수를 소통시킨 결과를 비교 검토한 바 앞 절에서 보듯이 설정된 수문운영방안으로는 호 내부의 수위변동이 야기되며 관리수위 유지가 곤란한 것으로 모의 되었다. 따라서 새만금호 내의 관리수위 유지를 위해서는 다른 방안이 고려되어야 하므로 본 연구에서는 앞서 설정된 기존의 수문 운영방안을 참고하여 비 연속적인 수문운영 방안을 제시한다.

관리수위를 유지하기 위해서는 방조제 완공직후 또는 내부 개발단계 모든 경우 1일 2회 유입/배출을 기본안으로 설정하면서 선형 증가되는 것을 억제하기 위해 단속적(dis-continuous)인 수문 제어방안이 고려되어야 한다. 평수시 상류 유입 유량에 기인된 호 내부의 증가된 수위는 수문으로 들어오는 외해수를 제어하면 관리수위 유지에 필요한 동적인 평형이 유지될 수 있기 때문이다. 앞서 검토한 바와 같이 방조제 완공직후와 내부개발에 따라 수용

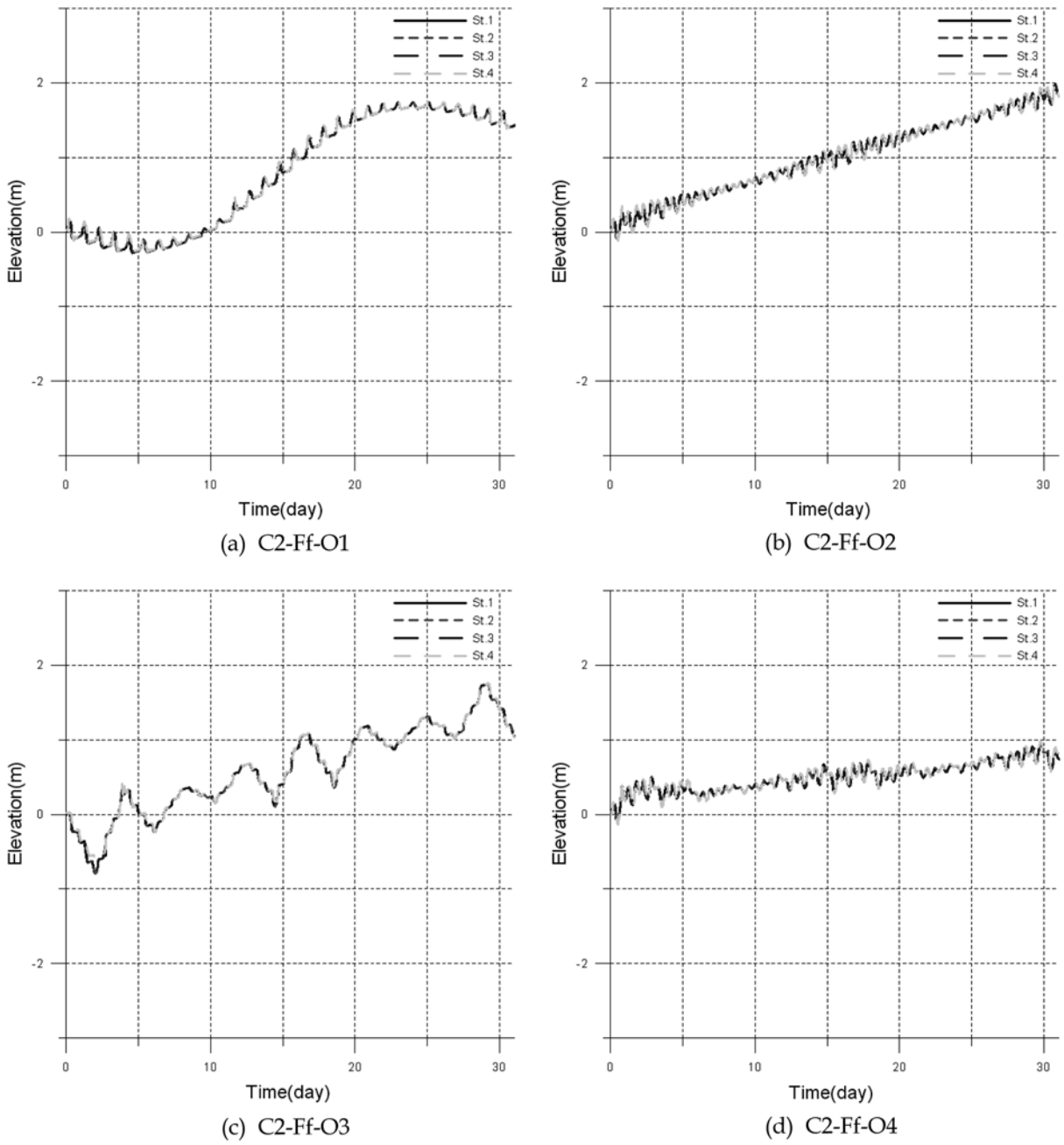


Fig. 9. Time varying water surface elevation for 31 days for flood river inflows, CASE 2.

적이 변화되므로 이를 고려한 적정한 단속적 수문제어 방안이 검토되어야 한다.

제어방안으로 고려된 것은 방조제 완공직후의 평수시에는 1일 2회 유입/배출하면서 6일마다 호 내측으로의 외해수 유입을 억제하는 것인데, 이렇게 설정된 방안을 모의하면 그동안 상류 유입유량의 증가분과 외해로 유출되는 유량이 평형을 이뤄 관리수위 유지가 가능하기 때문이다. 즉, 6일마다 외해로부터의 유입을 억제하기 때문에 호 내의 수위는 관리수위인 0.0 m를 기준으로 동적인 평형을 이루게 된다. 그러나 외조위와 연계된 유입/배출이 완전 균형을 이루지 못하기 때문에 편차가 발생하는데 최대 -0.4~0.4 m의 범위 내에서 관리수위가 동적평형을 유지하고 있다(Fig. 6(d) 참조). 그러나 풍수시에는 상류에서의 유입량 증가로 평수시보다 짧은 기간내에 유입 억제 방안이 고려되어야 한다. 앞서와 같이 유입/배출량의 균형을 고려한 수문제어 방안은 3일마다 호 내측으로의 유입을 억제하는 것이며, 이 설정된 방안으로 모의된 결과는 Fig. 7(d)와 같이 관리수위인 0.0 m를 기준으로 최대 -0.4~0.4 m의 편차 내에서 관리수위가 효과적으로 유지되고 있음을 보여준다.

내부 개발 단계인 동진측 정상운영기간 중 평수시와 풍수시로 나누어 앞서와 같이 동일하게 단속적인 수문제어를 실시하였는데, 결과로 제시된 Fig. 8(d) 및 Fig. 9(d)와 전술한 경우에 대한 결과

인 Fig. 6(d) 및 Fig. 7(d)와 비교하면 평수시에 6일, 풍수시에 3일마다 외해로부터의 유입을 제어하여도 새만금호 내부 개발이후 축소된 수용적에 기인하여 동일한 기대효과는 나타나지 않는다. 이렇게 외해수의 유입을 억제하더라도 현재 검토된 방안으로는 내부 수위가 선형 증가되는 것으로 나타났다. 이유는 개발 전에 비해 줄어든 수면적과 수문 조작을 신시 수문만을 운영하기 때문에 관리수위 0.0 m 유지가 곤란하고 편차가 난다. 본 연구는 관리수위 유지에 관한 초기 접근의 연구이므로 향후 적정 관리수위가 설정되고, 새만금 내부 호소를 담수로 유지할 것인지 또는 본 연구에서 검토한 바와 같이 해수소통을 전제로 할 것인지가 확정되면 이에 따른 구체적인 관리수위 유지 방안이 새롭게 검토되어야 할 것으로 판단된다.

결과 분석 및 토의

새만금호 완공이후 해수소통을 전제한 수문 운영은 호 내의 수위변화에 직접적인 영향을 미치며 관리 수위 유지를 위해서는 수문의 운영과 상류경계인 하천의 유입량에 따른 영향이 함께 검토해야 한다. 본 연구에서는 이러한 점을 감안하여 수문 운영에 따른 호 내부의 수동역학적 변화를 수치실험을 통하여 살펴보았다. 그러나 장래에 조성되는 담수호로부터의 유출에 따른 밀도의 공간적 분포는 고려되지 못한 제한사항이 있다.

수문 운영 방안에 따라서 호 내부의 수동역학 특성이 변화되며, 초기 관리수위에 비해 최대 2 m까지 수위 변화가 나타난다. 수문 운영에 따른 영향은 호 내부 전 영역을 상승하강시키며 연동되는 수위변화는 매우 복잡한 응답을 보인다. 1일 1회의 유입/배출의 경우는 호 내의 수위가 주기 한 달을 갖는 정현(sine)함수와 같은 양상으로 수위가 하강과 상승의 경향을 보이고 있다. 상류에서 유입되는 하천경계조건의 영향으로 수위의 하강보다는 수위상승 경향이 우세하며 평수시에 비해 풍수시처럼 상류의 유입량이 많을수록 수위의 상승이 더욱 우세하게 나타난다. 1일2회 유입/배출의 경우는 외조위와 연계되어 내수면이 관리수위 0.0 m 근방에서 상승하강하나 수문을 통한 유출입량의 차와 하천에서의 유입량으로 인하여 호 내의 수위가 점진적으로 상승하는 직선적 변화를 보인다. 2일 유입/ 2일 배출하는 경우에는 호 내의 수위를 일정하게 유지하지 못하고 불규칙적인 수위 변동을 보이고 있다. 이러한 수위변동은 수문의 조작에 의해 발생하지만 한 달 이후의 수위는 상류경계의 유입량 영향에 따른 수위변화가 가장 크게 나타난다.

적정 관리수위를 유지하기 위해서는 1일2회 유입/배출하면서 수문을 통한 유입을 단속적으로 3, 6일마다 억제하는 방안이 검토되었다. 실험결과 방조제 완공직후 관리수위를 유지하기 위해서는 평수시에는 6일마다, 풍수시에는 3일마다 외해수의 유입을 억제하는 것이 효과적인 것으로 검토되었다. 즉, 설정된 관리수위 0.0 m에서 다소간의 편차는 있으나 모의 기간으로 설정한 1개월간 평형을 유지하면서 거의 0.0 m에 근접하고 있다. 이는 관리수위가 원하는 목표수위에 근접하여 일정하게 유지될 수 있음을 의미한다.

내부개발 이후인 동진측 정상운영기간에는 평수시에는 방조제 완공이후와 동일한 수문 운영으로 관리수위를 유사하게 유지 할 수 있으나, 풍수시에는 상류 하천의 유입량 증가로 관리수위 유지가 곤란하고 호 내의 수위가 점진적으로 상승된다. 이때는 관리수위를 유지하기 위하여 별도의 수문 조작이 필요할 것으로 판단된다.

본 연구에서 수문 운영과 연계된 관리수위 유지방안이 수동역학적인 면만을 고려하여 실험하였으나, 관리수위 유지는 방조제 및 내부단지의 안정성과 호소수의 수질 관리가 종합적으로 검토되어 유지 되어야 한다. 관념적인 판단으로는 호 내부의 수질저하를 억제하기 위해서 수문을 통한 해수 소통량이 증가 될수록 수질이 향상될 것으로 기대된다. 그러나 배수 수문을 통한 해수소통은 수문 주변의 급격한 유동장으로 인하여 저질에 침전 되었던 오염물을 부유시킬 수 있으며, 새만금호 외해역의 유동과 수질에 악영향을 미칠 수도 있는 개연성을 가지고 있다. 따라서 초기 시도된 본 연구 결과를 토대로 새만금호 내외측의 수리특성과 내측의 수질을 연계한 보다 심층적인 연구가 수행되어져야 할 것으로 판단된다.

본 연구에서 적용한 수치모형인 ADCIRC는 시나리오별 수문 운영 및 만경강과 동진강의 계절별 유입 등의 영향을 모두 적절하게 제시하는 것으로 판단되어 향후 새만금 호 내의 최적 관리수위 유지방안의 중요한 도구로 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 초기 수행된 본 연구의 결과를 토대로 이어지는 연구에서 새만금호 등 인공적인 하구호의 수문조작에 따른 수위 변화 및 수질예측에 유용하게 이용될 수 있을 것으로 판단된다.

결 론

본 논문은 방조제 물막이가 끝난 후 새만금호 내부에서의 수동역학 및 수질환경과 생태환경에 중요한 관리수위 유지를 위한 다양한 방법을 다룬 내용 중 초기접근 결과의 일부이다. 해수 소통이 전제된 경우 내부 관리수위를 0.0 m로 유지시키기 위해 상류의 유입과 하류의 수문작동에 따른 단기간(1개월) 동안 호 내부의 관리수위를 유지하는 사업진행별, 내부단지개발별, 계절별의 최적 수문 운영안이 검토되었다. 수문 완공이후와 동진측 정상운영기간으로 사업진행을 구분하고 상류 유량을 평수시와 풍수시로 구분하여 모델링을 실시하였다. 수문 운영 시나리오는 실제운영 가능한 조건으로써 1일 1회 유입/배출, 1일 2회 유입/배출, 2일 유입/2일 배출 등이 검토되었다. 관리수위 유지방안으로는 1일 2회 유입/배출(3, 6일마다 유입억제)의 조건을 설정하여 ADCIRC모형을 적용한 실험을 실시하였다. 내부의 수위는 수문의 운영에 민감하지만 상류에서 유입되는 유량의 증가로 완만한 변화를 유지하면서 모의 기간에 걸쳐 상승된다. 목표 관리수위 0.0 m를 유지할 수 있는 현실적인 방안으로는 방조제 완공 직후에는 1일 2회의 유입/배출을 연속하면서 평수시에는 단속적으로 6일에 한번, 풍수시에는 3일에 한번 외해수의 유입을 억제시키면 최대편차 ±0.4 m 이내에서 관리수위 유지가 가능한 것으로 모의되었다. 장래의 상황으로 내부개발 1단계인 동진측 운영기간에는 그 양상이 달라지며 보다 면밀한 검토가 수반되어야 할 것으로 판단된다. 초기 시도된 본 연구에서 제시하는 관리수위 유지방안과 연계하여 선행 연구된 수질모형과의 접합으로 새만금호 내측의 목표수질을 평가 할 수 있으며, 향후 발생 가능성이 높은 수질문제의 해결방안을 신속하게 제공할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구에 사용된 ADCIRC Version.44의 국내에서의 사용 및 저자와의 공동개발에 따른 제반사항을 협조해 주신 Luettich와 Westerink 교수께 감사의 뜻을 전한다. 본 연구는 군산대학교 새만금환경연구센터(SERC)의 연구지원 및 해양수산부 KSGP 지원에 의해 수행되었기에 심심한 사의를 표한다.

참고문헌

농업기반공사, 1999. 새만금지구 수문조사 보고서.

농림부 농업기반공사, 2004. 새만금호 종합물관리 방안 수립(II) 수문조사 보고서. 118–125 pp.

농업기반공사 새만금사업단, 2005. 새만금 내측의 수심측량 성과. 사신에 의함.

서승원, 김정훈, 2003. 조석수동역학 모의에서 조간대 침수-노출 고려효과 비교연구. 한국해안 · 해양공학회지, **15**(2): 97–107.

서승원, 조완희, 2005. 홍수전파와 배수갑문 운영에 따른 새만금호 내부 수리특성의 동적응답. 한국해안 · 해양공학회지, **17**(4): 269–279.

서승원, 조완희, 유경선, 2006a. 새만금호 수문 개방에 따른 내측의 혼합수송 및 외해역의 방류영향모의. 한국해안 · 해양공학회지, **18**(1): 43–52.

서승원, 이화영, 조완희, 2006b. 병렬 유한요소모형 이용을 위한 병렬 클러스터 시스템 구축 및 황해 조석모의의 초기 접근. 한국해안 · 해양공학회 추계학술대회 발표논문집, 16. pp. 17-20.

최병호, 변상신, 김경옥, 2001. 병렬유한요소 모형에 의한 황해의 조석산정. 한국해안 · 해양공학회 발표논문집, 12. pp. 21–34.

Chippada. S., Dawson, C.N., Martinez. M.L. and Wheeler, M.F., 1996. Parallel computing for finite element models of surface water flow. Computational Methods in Water Resources, 2.

Dresback, K.M., Kolar, R.L. and Dietrich, J.C., 2004. A 2D implicit time-marching algorithm for shallow water models based on the generalized wave continuity equation, Int. J. for Numerical Methods in Fluids, **45**: 253–274.

Edwards, C.R. and C.A. Blain, 2002. Applications of the Incremental Approach to Yellow Sea Modeling, in Estuarine and Coastal Modeling, Proceedings of the Seventh International Conference, M.L. Spaulding and K. Bedford, eds., American Society of Civil Engineers, 447–466.

Luettich, R.A., Jr., Westerink. J.J. and Scheffner, N.W., 1992. ADCIRC: an advanced three-dimensional circulation model for shelves coasts and estuaries, report 1: theory and methodology of ADCIRC-2DDI and ADCIRC-3DL. Dredging Research Program Technical Report DRP-92-6, U.S. Army Engineers Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS, 137 pp.

2006년 4월 18일 원고접수
2006년 11월 16일 수정본 채택
담당편집위원: 홍철훈