

홍수전파와 배수갑문 운영에 따른 새만금호 내부 수리특성의 동적응답 Dynamic Response of Hydraulic Characteristics in the Inner Saemankeum Reservoir According to Gate Operation and Flood Events

서승원* · 조완희*
SeungWon Suh* and WanHei Cho*

요 지 : 새만금호의 방조제 완공이후와 내부 개발이후 만경강 및 동진강의 홍수량 유입과 내부 수위를 관리하기 위해 수문을 작동할 때 수리특성이 어떻게 반응할 것인가를 평가하기 위한 수치실험이 수심적분된 ADCIRC 모형을 이용하여 실시되었다. 2차원 동적하도추적에 따르면, 상류에서는 홍수수문의 시간적 변화가 민감하나 홍수파가 호 내로 유하 하면서 급확대되는 물리적 특성에 따라 호 중심부터는 안정화된다. 평상시 관리수위를 유지하기 위해 수문을 제어하는 경우, 내부개발이후가 방조제 완공직후에 비해 수문 인근영역에서 유속, 수위 등에 동적응답이 즉각적으로 보다 크게 일어나고, 외해수를 호 내측으로 받아들이면 불규칙 수면교란이 일시적으로 발생하는데 내부개발 전후에 따라 최대 10 km 및 16 km 정도까지 상류방향으로 전파된다.

핵심용어 : 새만금호, 동적 하도추적, ADCIRC 모형, 관리수위, 수면 교란

Abstract : Numerical simulations were done using depth integrated ADCIRC model in order to evaluate dynamic response on the inner Saemankeum reservoir due to flood flow and gate operation for the both situations of dike construction and inner development. According to 2-dimensional dynamic flood routing, temporal variation of hydrographs shows sensitive at upstream riverine region while it becomes stable from the center part of the reservoir due to sudden expansion of physical changes. Dynamic response of hydraulic changes such as water surface elevation and velocity on the inner region arises suddenly by gate operation and more rapidly after the inner development than dike construction. Temporal surface fluctuation arises during inflow of outer sea water and propagates upstream up to 10Km to 16Km in accordance with inner development status.

Keywords : Saemankeum reservoir, dynamic routing, ADCIRC, control water level, surface fluctuation

1. 서 론

곧 물막이 공사가 완공될 새만금호는 시화호와 마찬가지로 하구호의 특성을 그대로 유지하게 된다. 방조제 완공 이후 내부단지 개발이 순차적으로 이루어질 때 단지조성고와 내부호소의 목표수질을 확보하기 위한 관리수위 설정은 수문의 운영과 연계하여 인공적인 하구호의 수질 및 생태환경이 변화되므로 공학적인 측면에서 뿐만 아니라 매우 중요한 실제적인 관심사이다. 특히 상류에서 일시적으

로 유입되는 홍수시의 유량을 적절히 배제하기 위한 수문의 조작은 내부단지의 안정성 확보를 위해 매우 중요하다. 새만금호는 방조제 완공이후 수문 작동에 따라 새만금호 내측의 수위 및 유속 등 수리 및 수질특성이 직접적으로 변하게 된다. 따라서 새만금호의 완공이후 내부개발이 완료된 시점에서 만경강 및 동진강 홍수량 유입이 수위 및 유속 등 수리특성에 어떠한 변화를 가져올 것인가를 평가하기 위한 수치실험이 절실히 필요하다. 본 연구에서는 내부 관리수위를 DL=0.0m로 취한경우로 상류

*군산대학교 해양시스템공학전공(Corresponding author: SeungWon Suh, Dept. of Ocean System Engineering, Kunsan National University, Miryong, Kunsan, Chonbuk 573-701, Korea. suh@kunsan.ac.kr)

의 홍수유입과 하류의 수문작용에 따른 새만금 내부호의 동적응답에 대한 검토가 실시되었다.

일반적으로 홍수추적의 목적은 상류에서 유입되는 수문곡선으로부터 하류지점의 하도를 따른 추적을 실시하여 적절한 공학적인 대응처방을 신속히 모색하고 관리하는데 있다고 할 수 있다(전민우·조용수, 2002). 현재까지의 수리학적 하도추적은 대체적으로 1차원적인 해석에 의존하였으며, 1차원 해석의 경우 유한차분법이 계산의 효율 면에서 유리하여 일반적으로 많이 사용되고 있다. 국내에서의 홍수와 추적을 실제하천에 적용한 예는 많이 있으나(김상호·김원, 2002; 이정규·전세호, 2004), 유역에 대해서는 선형저수지 모형을 적용하고 하도망에 대해서는 수리학적 홍수추적을 실시한 것으로 하구호에 대한 홍수파의 검토는 제한적이다.

본 연구에서는 상류 경계조건으로 홍수파의 유입, 하류 경계조건으로 수문의 동적인 조건을 설정하며, 기존의 홍수추적 연구들과 차별성을 고려하여 접근하였다. 본 연구에서와 같이 만경강과 동진강 하류부와 이어진 새만금호의 수평적 변화를 수리학적 홍수추적에 적절히 반영하기 위해서는 최소한 2차원 이상의 모형 적용이 필수적이다(Martin and McCutcheon, 1999). 따라서 본 연구에서는 기존의 1차원적인 홍수추적과 달리 2차원 홍수추적을 실시하는데 상류에서 유입되는 홍수량과 함께 하류에서 실시간으로 작동되는 수문의 경계조건이 정의된다. 이처럼 상류-하류의 동적인 연동을 고려한 수리학적 홍수추적을 만족스럽게 모의하기 위해서는 비선형 천수방정식에 의해 수행하는 것이 타당하다. 사용하는 모델은 2차원의 유한요소법에 근거한 시간진행형의 유한요소모형이며, 정밀한 경계 처리와 장기간 동안 넓은 영역에서 해수순환을 모의할 수 있는 ADCIRC(Luetlich et al., 1992)이다. 일반적인 하도 추적과 달리 2차원 비선형 천수장과 유한요소 모델인 ADCIRC를 선택한 이유는 상하류경계 특성과 해안해양 및 호소 그리고 하천이 연계된 새만금호의 수리 모델링에 본 모형이 가장 적합하기 때문이다. 본 연구결과는 새만금호 내외의 효율적인 흐름 및 수질관리에 중요한 기초적 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

2. 수치모형의 개요

2.1 모형의 기본이론

ADCIRC(ADvanced CIRCulation model for oceanic, coastal and estuarine waters)는 복잡한 해안경계를 정밀

하게 처리를 하며 장기간 넓은 영역에서 해수순환을 모의할 수 있도록 개발된 유한요소 모형이다. 근저에는 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 바다마찰계수와 운동량 확산계수를 이용하는 수심 적분된 외부모드 방정식(external mode equation)만 풀게 되어있고 3DL(three-dimensional, local)은 모드분리(mode splitting) 기법을 이용하여 2DDI에서처럼 외부모드(external mode)에서 자유수면에 대해서 수심 적분된 연속방정식과 운동방정식을 풀고, 내부모드(internal mode)에서 상대적으로 긴 시간간격동안 3차원 방정식을 풀어 수직 성분을 계산한다. ADCIRC는 기본방정식의 연속방정식을 시간에 대하여 미분하고, 운동량방정식을 공간에 대하여 각각 x와 y방향으로 미분한 후 원래의 연속방정식에 임의의 계수인 τ_0 를 곱하고 이송항을 비보존성 형태로 변환하면 식 (4)와 같으며, 천수방정식의 연속방정식을 변형한 형태인 일반화된 파동연속방정식(generalized wave continuity equation)과 운동량방정식을 택하고 있다. 시간진행 모형인 ADCIRC는 양음 해법으로 시간 적분을 수행할 수 있는 특징이 있다. 초기에 모형이 발표된 이후 현재까지 지속적인 수정보완을 거치면서 모델의 세련화와 기능의 향상이 추진되고 있는데, 본 연구에는 version44가 적용되었다. 모형의 기본적인 서술은 국내 문헌으로 서승원·김정훈(2003)에 게재되어 있으며, 상세한 것은 모형의 이로서(Luetlich et al, 1992) 또는 모형의 홈페이지에 소개된 지침서(http://www.marine.unc.edu/C_CATS/adcirc/adcirc.htm)를 참조할 수 있다. 본 고에서는 상세한 내용은 생략한다.

수심적분된 2차원의 연속 및 운동량 방정식은 다음과 같다.

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

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} - fV = -\frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{P_s}{\rho_0} + g\zeta - (\eta + \gamma) \right] + \frac{\tau_{sx}}{\rho_0 H} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_0 H} + D_x - B_x \quad (2)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + fU = -\frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{P_s}{\rho_0} + g\zeta - (\eta + \gamma) \right] + \frac{\tau_{sy}}{\rho_0 H} - \frac{\tau_{by}}{\rho_0 H} + D_y - B_y \quad (3)$$

여기서, ζ : 수면변위, U, V : 수심평균된 수평방향 유속, $H(x, y, t$ or $\lambda, \phi, t) = h + \zeta$: 지오이드를 고려한 수심, $f = 2\Omega \sin\phi$: Coriolis 인자, p_s : 자유수면의 대기압, ρ_0 : 기준유체밀도, g : 중력가속도, $(\eta + \gamma)$: 기조력, τ_{sx}, τ_{sy} : 수면의 응력, τ_{bx}, τ_{by} : 바닥의 응력 D_x, D_y : 운동량확산항, B_x, B_y : 경압가속항을 의미한다.

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_0 를 추가하고 연쇄법칙을 적용하면 다음과 같이 된다(Luetlich et al, 1992).

$$\begin{aligned} & \frac{\partial^2 \zeta}{\partial t^2} + \tau_0 \frac{\partial \zeta}{\partial t} \\ & + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ U \frac{\partial \zeta}{\partial t} - UH \frac{\partial U}{\partial x} - VH \frac{\partial U}{\partial y} + fHV - H \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{p_s}{\rho_0} + g\zeta \right] \right. \\ & \left. + D_x + B_x - \frac{\tau_{bx}}{\rho_0 H} + \tau_0 UH \right\} \\ & + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ V \frac{\partial \zeta}{\partial t} - UH \frac{\partial V}{\partial x} - VH \frac{\partial V}{\partial y} + fUH - H \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{p_s}{\rho_0} + g\zeta \right] \right. \\ & \left. + D_y + B_y - \frac{\tau_{by}}{\rho_0 H} + \tau_0 VH \right\} = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

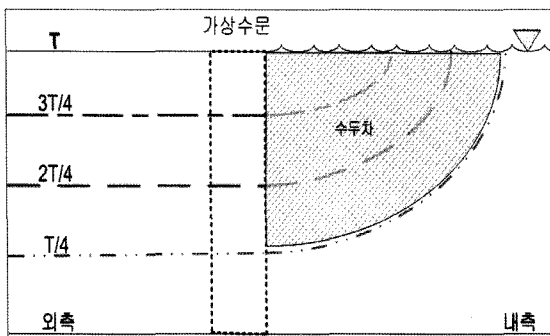
2.2 경계처리

수치모의 영역인 새만금호에 정의되는 경계로는 상류

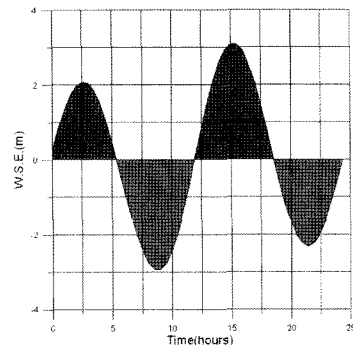
의 만경강 및 동진강의 유입 경계와 하류의 신시 및 가력 배수갑문이 있다. 이들에 대한 자연적 경계(natural boundary condition) 및 필수적 경계(essential boundary condition)는 다음과 같이 정의된다. 상류에서는 하천 유입량이 정의되며, 하류에서는 외조위 변화와 연계하여 수문이 연동되어 작동되는 일련의 시나리오(아직까지 수문 운영에 관한 명확한 방침이 설정되어 있지 않으므로)가 정의된다.

새만금호 완공이후 내부 개발 방안과 호측의 수질과 연계하여 외해수를 받아들이는 경우인 해수 소통이 전제되는 경우는 하류의 수문이 외조위에 따라 자연적으로 개폐되는 조건을 설정하였다. 그러나 호 내부의 수위를 관리하기 위해 조절이 필요한 경우에는 상류로부터 유입되는 홍수량에 따라 적절한 수문을 제어해야하므로 Fig. 1에서 보듯이 하류에서 수문이 외조위에 연계되어 비연속적으로 작동되는 현상을 모의하도록 실시간으로 동적인 하류경계가 설정된다. 하류 경계에는 배수갑문의 특성을 반영하였으며 새만금호 내부를 관리수위를 두어 유지하고자 하는 경우에는 창조시 수문이 닫히고 낙조시 호 내의 수위와 외해의 수위차가 있는 시간에만 수문이 열리는 경계조건이 사용되었다. 즉, 창조시에는 개방되었던 경계에 수문이 닫히는 시간동안 한시적으로 육지경계를 부여함으로써 자연적으로 유출입이 없는 상황이 되어, 해당절점에 고정경계 조건이 부여되어진다. 이때는 필수적 개방경계가 수문이 닫힌 일종의 자연적인 육지경계로 변하게 된다.

홍수파의 전파와 수문의 연동에 따른 새만금호 내부에서의 동적 수리특성을 모의하기 위해서 상류 경계조건으로 정상시의 유입량과 함께 특정 사상으로 Fig. 2에 보이



(a)



(b)

Fig. 1. (a) Schematic diagram of gate operation according to tidal level and (b) tidal level and discharging time (below 0) regarding control WSE of DL=0.0 m.

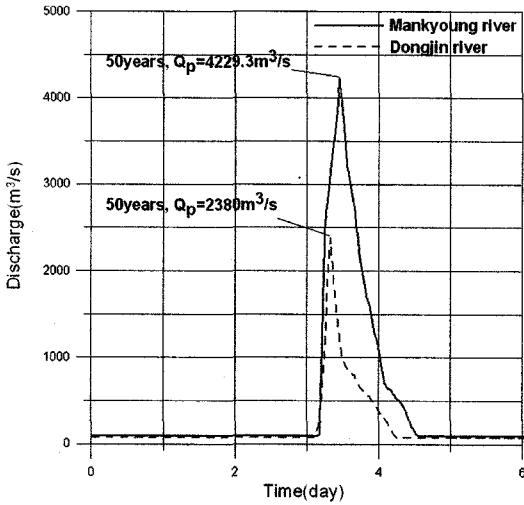


Fig. 2. Hydrographs of 50 years flooding event at Mankyong and Dongjin rivers.

는 50년 빈도의 홍수수문곡선도(농업기반공사, 2004)가 사용되었다. 홍수전과를 모의하는 경우에는 상류에서 홍수 수문곡선에 따라 유입되는 홍수량 이외에 하류에서는 Fig. 1에서 보듯이 호 내측의 수위가 상승하여 관리수위를 초과하게 되면, 수문이 외조위에 연계되어 비연속적으로 작동되는 현상을 모의하도록 실시간으로 동적인 경계가 설정되었다. ADCIRC ver.44에서는 동적인 하류 경계조건으로 weir로 처리할 수 있는 경계조건이 있지만, 주기적인 경계조건으로서 본 연구와 부합되지 않아 개선책으로 외조위에 연계되어 작동되는 가상의 수문을 만드는 동적인 비주기적 경계조건이 사용되었다.

Table 1. Physical characteristics variations due to construction of the Saemankeum development

	Surface area (km ²)	Volume (*10 ⁹ m ³)	Mean depth (m)
Present	395.5	1.4	3.6
After development	122.9	0.68	5.5
Reduction ratio	31.1%	48.6%	-52.8%

2.3 대상 영역과 입력자료

새만금호 방조제 축조공사의 취지는 시화호와 마찬가지로 용수를 이용하면서 내부를 개발하여 농업용지 등으로 활용하는 것이다. 새만금 개발이 최종적으로 마무리되면, 본 연구의 대상영역인 새만금호는 완공이후 내부 개발에 따라 물리적 특성이 Table 1에 보이는 바와 같이 크게 변하게 된다. 이러한 상황을 수치모의하기 위해 방조제 시공이 완료된 상황과 내부 개발이후의 새만금호 내부 영역을 이산화 하여 표현하면 Fig. 3에 보이는 바와 같은 유한요소 망이 된다. 수치 실험에서는 새만금호 내측을 40 m 내외로 해상하였다. 방조제 완공이후 총 절점수는 16531개이며 요소는 32269개이고 내부 개발이후 총 절점수는 7751개이며 요소는 14471개이다.

입력 자료에는 새만금 내외측의 수심자료와 함께 상류에서 정의되는 유량조건이 있는데, 수심자료는 가장 최근의 측심자료(농업기반공사 새만금사업단, 2005)가 활용되었다. 평상시 모의에는 상류경계에 새만금지구 수문조사 보고서에 인용한 평균유량(농업기반공사, 1999)이 사용되어, 상류경계에는 만경강과 동진강에서 유입되는 평수량

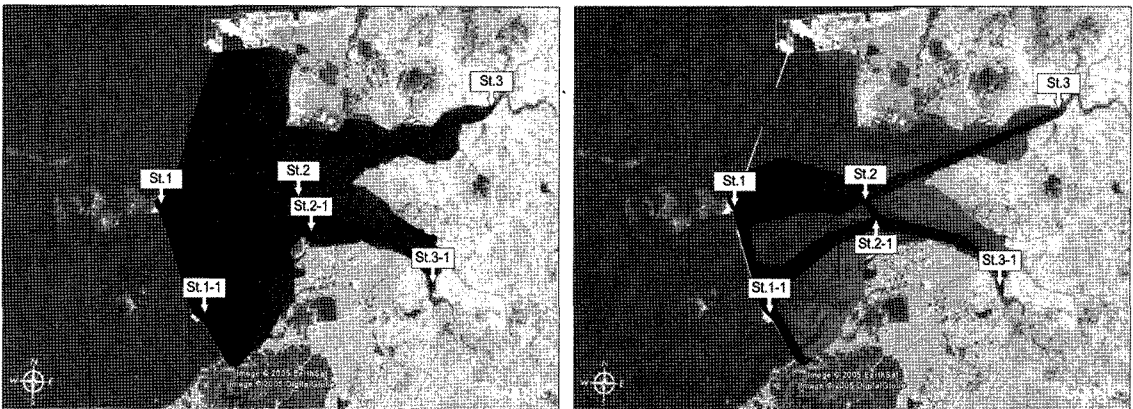


Fig. 3. Finite element meshes for the Saemankeum reservoir just after the final closing and after inner development with reference stations for comparison of computed results.

이 때 30분 간격으로 입력되었다. 홍수전파를 모의하는 경우에는 새만금지구 수문조사보고서에 인용한 50년 빈도의 홍수수문곡선도(농업기반공사, 2004)가 사용되었다. 이 홍수수문곡선도에 따르면, 50년 빈도의 만경강의 침투유량은 4,229.3 m³/sec, 동진강의 침투유량은 2,380 m³/sec이다. Fig. 2에서 보는 바와 같이 평상시 유량에서 홍수량으로 변화되는 수문곡선의 변곡점이 3일 이후에 나타나므로 수치실험에서는 이 시점을 홍수 발생 초기로 보아 입력에 이용하였다. 새만금 외조위는 기존의 연구(서승원, 1999)에서 검토된 조화 분해 자료를 이용하여 계산하였다. 본 연구에 적용된 모델은 이미 연구된 선형결과(서승원·김정훈, 2003)에 의해 새만금을 포함하는 전북 해역과 군장해역에 대한 적용에서 검증된 바가 있으며, 본 연구에서는 기존 연구에서 사용된 계수를 적용 하였다.

3. 새만금호 내부 수리특성의 동적변화

3.1 홍수전파에 따른 동적변화

일반적 하도추적과 달리 하구호에 대한 홍수추적을 실시한 본 연구에서 50년 빈도 홍수량이 유입되는 경우 신시 및 가력 수문이 낙조시에만 개방되는 것을 고려한 실험이 실시되었다. 홍수수문곡선에서 보는 바와 같이 평상시 유량에서 홍수량으로 변화되는 수문곡선의 변곡점이 3일 이후에 나타나므로 이 시점을 홍수 발생 초기로 보아 계산하였고, 결과는 1시간 간격으로 도시하였다. 광범위

한 새만금호 내부의 동적응답을 평가하는데, 전역에 대한 계산결과와 비교가 곤란하므로 임의로 정한 특정 정점에서 새만금호 내부의 수위와 유속의 동적변화를 고찰하였다. 즉, 수치 실험결과를 정량적으로 평가하기 위해 Fig. 3에 제시하는 바와 같이 새만금 내부를 만경, 동진 수역으로 나누어 도시하였다. 만경수역에서는 신시 배수 수문 인근을 St.1 만경강과 동진강의 연결 수로 지점을 St.2 그리고 만경강 유입부를 St.3으로 취하였다. 동진수역에서는 가력 배수 수문인근을 St.1-1 만경강과 동진강의 연결 수로 지점을 St.2-1 그리고 동진강 유입부를 St.3-1로 취하였다. 각 정점에서는 수위와 유속의 동적 응답변화를 비교 고찰한다. 정량적인 비교는 각각의 정점에서 시간에 따라 변화되는 수위와 동-서방향의 유속을 대상으로 홍수시와 여름철 평상시 유량이 있는 경우에 제한적으로 실시한다. 이때 제시된 유속은 만경강 및 새만금호 지형 특성상 강의 상류부인 동측에서 하류의 수문방향인 서측으로 향하는 방향이 자연적인 유향이므로 서향 유속을 +유속으로 정의하여 분석한다. 수문 작동은 평수시에는 1일 2회의 개방 조건으로 2일 동안 유지하다가, 홍수파가 도래하기 전에 외해수의 유입을 억제하고, 외조위와 연계하여 외조위가 내부의 수위 보다 낮아지는 경우에만 개방을 전제로 하여 홍수전파를 모의하였다.

계산결과를 도시한 Fig. 4, Fig. 5에서 보듯이 상류에서 하류로 전파되는 홍수파는 수문 인근영역에 가까워질 수록 유속, 수위의 변화가 크게 일어나지 않는 것으로 분

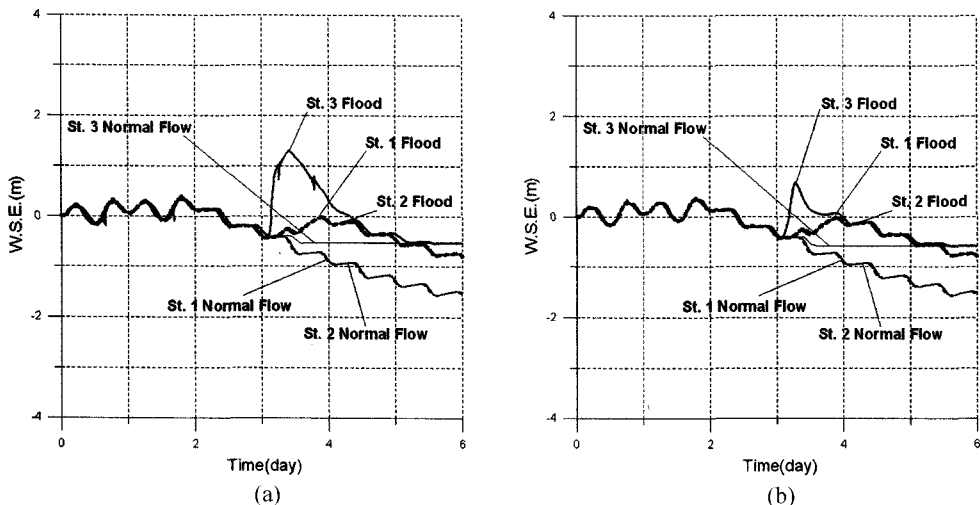


Fig. 4. Time varying water surface elevation along (a) Mankyong, (b) Dongjin riverine stations for flood events just after dike construction.

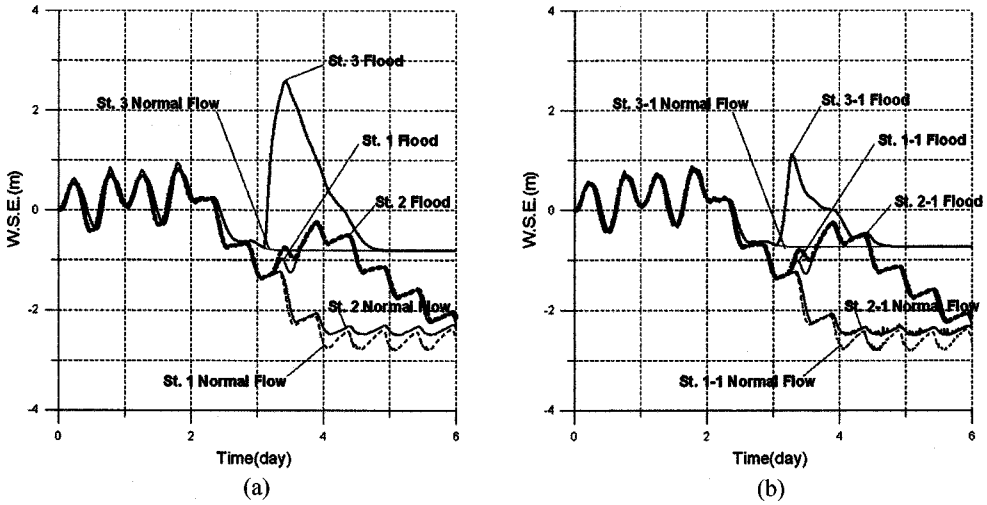


Fig. 5. Time varying water surface elevation along (a) Mankyong, (b) Dongjin riverine stations for flood events after inner development.

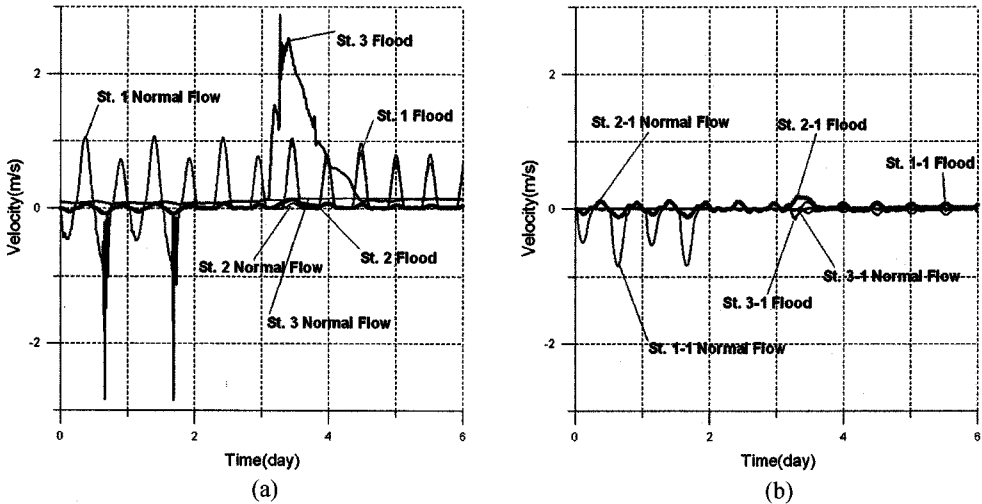


Fig. 6. Dynamic response of flow velocities along (a) Mankyong, (b) Dongjin riverine stations for flood events just after dike construction (negative means upward, positive means downward flow direction).

석되었다. 수위 변화를 특정 정점에서 비교하면 방조제 완공 이후 홍수시 만경수역에서는 상류 St.3에서의 최고 수위는 1.3 m이나, 하류 St.1에서의 최고 수위는 0.0 m로 변화된다. 동진수역에서는 상류 St.3-1에서의 최고 수위는 0.7 m이나, 하류 St.1-1에서의 최고 수위는 0.0 m로 변화된다. 내부개발 이후 홍수시 만경수역에서는 상류 St.3에서의 최고 수위는 2.6 m이나, 하류 St.1에서의 최고 수위는 0.26 m로 변화되며, 동진수역에서는 상류 St.3-1에서의 최고 수위는 1.1 m이나, 하류 St.1-1에서의 최고 수위는 0.27 m

로 변화된다. 기본적으로 만경강과 동진강 유입부에서는 유입되는 홍수수문곡선의 시간적 변화에 민감하게 작용하는 반면, 홍수와 전파가 하류로 진행하면서 새만금호의 중앙부인 St.2에서는 홍수에 의한 유속 변화가 둔화되고, St.2에서는 수위가 일시적으로 높아졌던 것이 점차 낮아지면서 안정화 되는 것을 보여주고 있다. 즉, St.1과 St.2에서는 상류에서 유하된 홍수 유입에 의한 영향은 거의 나타나지 않으며, 수문 조작에 의하여 수위가 하강하며 수문 운영에 따른 직접적 영향을 받는 것이 뚜렷하다.

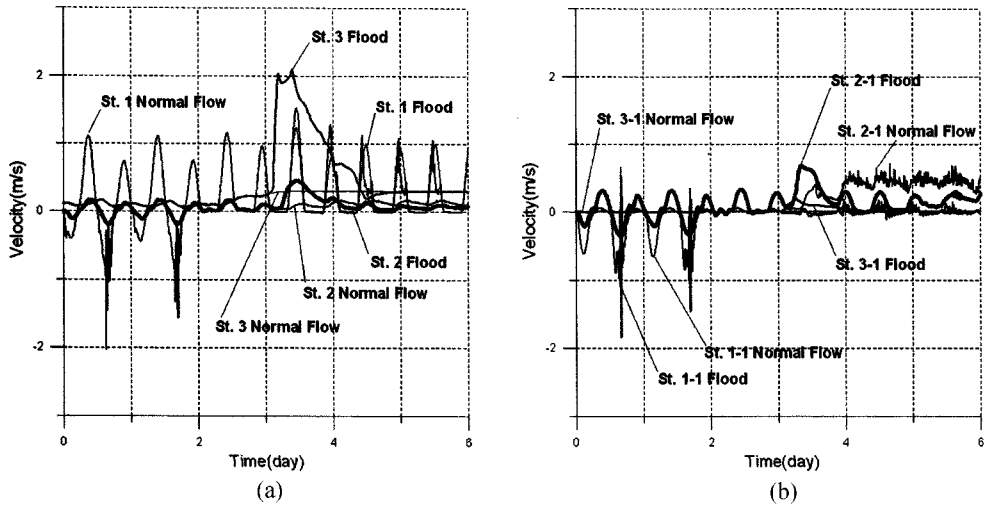


Fig. 7. Dynamic response of flow velocities along (a) Mankyong, (b) Dongjin riverine stations for flood events after inner development.

또한 Fig. 6, Fig. 7에서의 유속의 동적 응답에 관한 그림을 보면 +방향과 -방향의 흐름이 교대로 나타나는 것을 볼 수 있다. 앞에서 언급한 바와 같이 +방향은 하류를 향하는 흐름을 의미하고 -방향은 상류를 향하는 흐름이므로 역상하는 -방향의 동향성분은 수문의 작동에 따라 순수하게 상류로 향하는 흐름을 의미한다. Fig. 6에 도시된 것과 같이 방조제 완공이후 만경수역 상류 수로부에서 홍수시 최고 유속은 2.9 m/sec로 크게 나타나지만, 점차 홍수과가 유하되면서 새만금호의 유입부에 진입하고서 0.2 m/sec 내외의 낮은 유속으로 변한다. 동진수역의 유속은 상대적으로 적은 홍수량으로 인하여 유속이 낮게 나

타난다. Fig. 7에 도시된 것과 같이 내부 개발이후 만경수역 상류 수로부에서 홍수시 최고 유속은 2.1 m/sec로 크게 나타나지만, 점차 홍수과가 유하되면서 새만금호의 유입부에 진입하고서 0.4 m/sec 내외의 낮은 유속으로 변한다. 동진수역의 유속은 상대적으로 적은 홍수량으로 인하여 유속이 낮게 나타난다.

3.2 평상시 수문조작에 따른 호 내부의 동적응답

일정한 관리수위를 유지하기 위해 1일 2회로 수문을 개폐할 때 평수량이 유입되어 호 내측의 수위 변화에 따라 후속적으로 수문을 열거나, 또는 수문을 닫은 상태에서 내

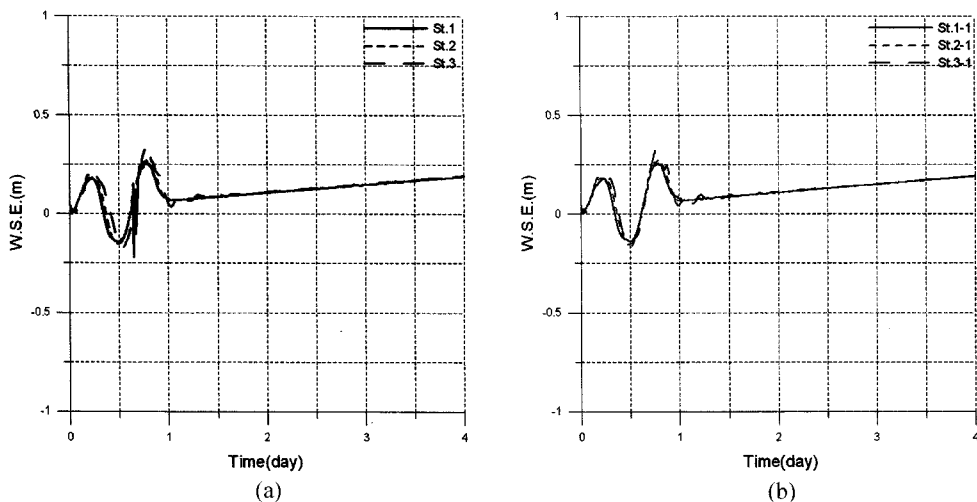


Fig. 8. Variation of water surface elevation just after dike construction along (a) Mankyong, (b) Dongjin riverine stations.

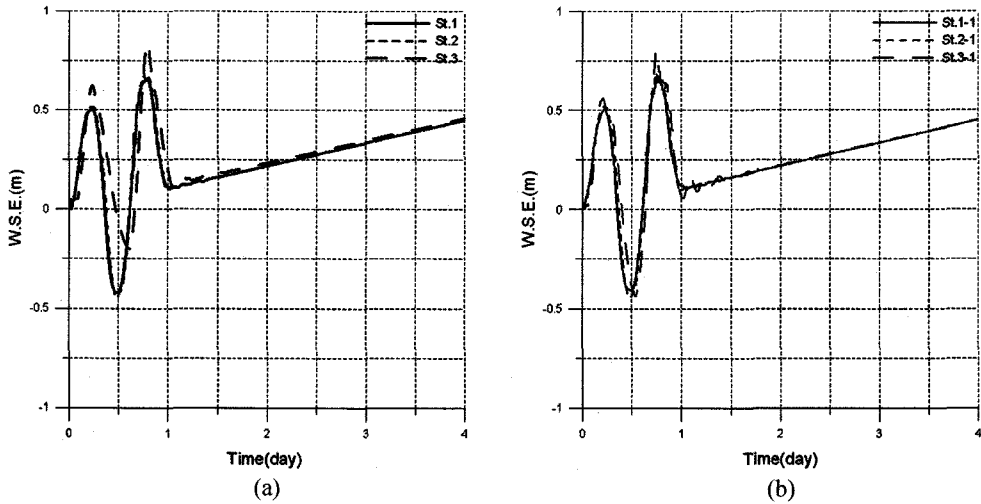


Fig. 9. Variation of water surface elevation after inner development same as in Fig. 8.

부 수위가 상승하는 경우에 신시 및 가력 수문을 일시적으로 하루 동안만 소통하는 경우에 대한 내부의 동적응답을 수치실험을 통해 살펴본다.

Fig. 8에서 보듯이 새만금 방조제 완공 이후 하루 동안 수문을 개방하는 경우 수위 변화를 정량적으로 표현하면 새만금호 내부 수위는 수문에서 내측으로 유입될 경우 만경수역의 St.1과 St.2에서는 0.27 m, St.3에서는 0.35 m 상승한다. 동진수역에서는 St.1-1, St.2-1 및 St.3-1에서 동일하게 0.26 m 상승한다. 수문을 하루 동안만 개방한 이후 만경수역과 동진수역의 내부의 수위는 각각 0.07 m, 0.17 m 상승한다. 이후 3일 동안 하류 수문을 닫으면 상류 만경강과 동진강의 평수량 유입으로 인하여 만경수역과 동진수역의 내부 수위가 초기의 DL=0.0 m의 내부 수위에서 0.2 m 상승하며, 각 정점에서의 수위는 동일하게 상승하는 것으로 나타났다.

Fig. 9에서 보듯이 새만금 내부 개발이후 수문을 하루 동안만 개방하는 경우 새만금호 내부 수위는 수문에서 내측으로 유입될 경우 만경 수역의 St.1과 St.2에서는 0.65 m, St.3에서는 0.82 m 상승한다. 동진 수역의 St.1-1과 St.2-1에서는 0.67 m, St.3-1에서는 0.78 m 상승한다. 하루 동안 수문으로 소통된 이후 만경수역과 동진수역의 내부 수위는 0.1 m 상승한다. 이후 3일 동안 하류 수문을 닫으면 상류 만경강과 동진강의 유입으로 인하여 만경 수역과 동진 수역의 내부 수위가 초기의 DL=0.0 m의 내부 수위에서 0.45 m 상승하는 것으로 나타났다. 이처럼 내부 개발이후에 수위 상승이 개발 이전인 방조제 완공직후 보다 높아

지는 것은 갑문에서 동일한 유량의 유출입에 대해 호 내측의 수리특성의 동적 응답이 내부의 수용적과 수표면적 등의 물리적 인자 변화에 따라 빨리 반응하기 때문으로 판단된다. 즉, 수용적이 이전에 비해 거의 반으로 줄어드는 48.6%로 줄어들면서 내부 반응은 빨라지며 수위가 상승하는 것으로 분석된다.

새만금호 수문으로부터 내외수가 유출입되는 경우, 동적반응의 평면적 변화를 살펴보기 위해, Fig. 10에 수문을 개방하는 경우 시간에 따른 새만금 내부의 수위 변화를 3차원으로 도시하여 분석한다. 수문 개방 이후 16시간이 경과하면 외해수가 유입하게 되는데 그림에서 보는 바와 같이 방조제 완공 이후는 호 내측에서 일정하게 상승하면서 수문 인근 영역에서 불규칙 수면교란이 발생하여 내부로 전파되는 것을 볼 수 있다. 역시 내부 개발이후도 외해수가 유입되면서 호 내측에서 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. 내부 수면교란이 발생하는 원인은 수문에서의 급격한 유입과 상류 하천에서 호 내측으로 유입되는 유량에 의해 발생한다. 이러한 유입과의 전파특성은 Fig. 11에서 보듯이 호 내측의 수위는 시간이 경과되면서 상승하지만 공간적 편위가 위상차로 나타나는 원인으로 판단된다. 수면교란의 영향 범위도 방조제 완공이후와 내부 개발이후에 따라 변하게 되는데, 방조제 완공이후는 상류방향으로 최대 10 km정도까지 전파되며 내부 개발이후는 최대 16 km정

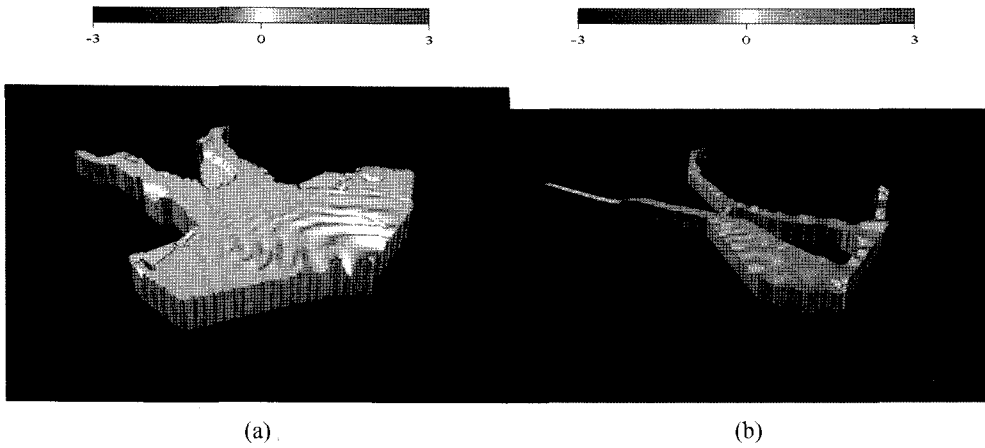


Fig. 10. Spatial distribution of water surface elevation at 16 hours later of gate operation (inflow case) (a) just after dike construction (b) after inner development.

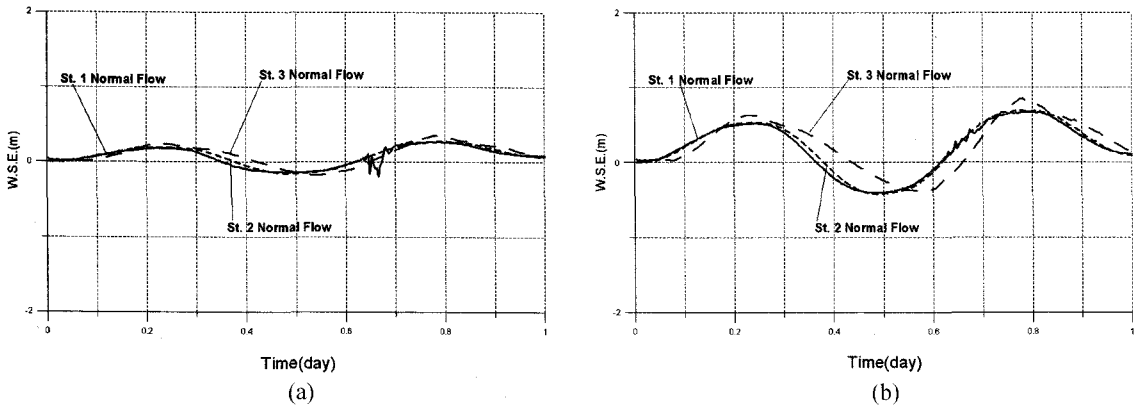


Fig. 11. Temporal variation of water surface elevation for one day along Mankyong riverine stations (a) just after dike construction (b) after inner development.

도까지 전파된다. 이는 방조제 완공이후와 내부 개발이후의 수표면적, 수용적이 감소하고 평균 수심이 증가하기 때문이며, 수문에서 동일한 유량이 유출입 되어도 호 내측의 수위 변화 폭이 증가하며 수문의 영향 범위가 증가하는 것으로 판단된다.

4. 결과분석 및 토의

새만금호의 완공이후 시점에서의 만경강 및 동진강의 평수량 및 홍수량 유입과 수문의 실시간적인 연동에 의한 수위 및 유속 등 수리특성은 매우 복잡한 응답을 보인다. 이는 상류의 유입, 그리고 하류 경계의 동적인 수문 연동과 상대적으로 넓은 수표면적을 갖는 새만금호 내

부의 수리학적, 물리화학적 특성에 의해 발생하는 것으로 평가된다. 내부 개발이후에는 수표면적이 31.1%, 수용적은 48.6% 감소하며, 평균 수심은 52.8% 증가한다. 수문을 통한 유출입량은 변화가 없지만 새만금호 내부의 물리적 특성 변화에 따라 Fig. 8-Fig. 11에서 보이는 바와 같이 호 내부의 동적반응이 급격하게 변화되는 것으로 모의되었다. 또한 방조제 완공 이후와 내부 개발이후의 만경강과 동진강의 홍수량 유입으로 인한 홍수파 전파는 내부 수위 및 유속 변화에 미미한 영향을 미치지만, 수위 변화는 내부 개발이후의 반응이 이전에 비해 더욱 크게 나타난다. 이는 내부 개발이후 호 내측의 혼합확산을 모의하면서 담수가 전파되고 시공간적 변화를 분석한 연구(서승원 등, 2005)와 비교하면 홍수량의 전파가 St.2인 새만금 중

양부까지 도달하는데 11시간이 걸리고 이후 24시간 경과되어도 더 이상 하류로 도달하지 않는 결과와 상호 유사하게 나타난다.

수치모의 결과 수문 개방에 따른 영향은 시간적 변화에 민감하게 작용하며, 방류시에는 수위 및 유속의 공간적 동적 변화가 새만금호 내부에서 크게 나타나지 않는다. 그러나 수문 영역에서는 수문 개방에 의한 변동이 강하게 나타나고 수용적 변화에 따른 수리특성 또한 민감하게 나타난다. 또한 수문에서 외해수가 호 내측으로 유입되는 경우에는 수문 영역에서 수면교란이 발생하며, Fig. 10에서 보듯이 발생된 수면교란은 호 내측에서 상류 쪽으로 전파된다. 수면 교란의 전파특성은 호 내측의 수위는 시간이 경과되면서 상승하지만 공간적 편위가 위상차로 나타나는 원인으로 판단된다. 수면교란 역시 내부 개발이후의 영향 범위가 넓게 작용함을 알 수 있다. 수문을 개방하여 외해수를 유입하면 새만금호 내측의 수위가 전 영역에서 상승하강하며, 실시간적인 수위 및 수리특성은 매우 복잡한 응답을 보인다. 수문을 닫은 이후에는 만경강과 동진강의 유입과 시간의 진행으로 인하여 수위가 점차적으로 상승하는 것으로 나타나지만, 호 내측 수위를 일정하게 관리하기 위해서는 보다 심층적인 연구가 수행되어 수문 운영이 효율적으로 실시되어야 할 것으로 판단된다. 특히 내부의 호소수를 외해로 방류할 때 보다는 해수소통이 전제되어 외해수를 내부로 받아들이는 경우 호 내측의 불규칙 유동이 심화되고 수문 인근 영역을 교란시킬 수 있는 인자로 작용하는 것으로 나타나, 내부 개발을 위한 내방수로 건설 등의 사전 평가에 만전을 기해 공사시의 제반 문제점을 해소시켜야 될 것으로 판단된다.

본 연구에서 적용한 수리모형은 서해 조위와 연계된 수문의 연동, 만경강과 동진강의 합류 등의 영향을 모두 적절하게 제시하는 것으로 판단되어 새만금 해역 및 새만금호 내부의 수문 운영, 흐름해석, 호의 수질관리 등에 효과적으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 적용된 모델의 특성상 새만금호와 수리특성이 유사한 시화호에 준용할 수 있으므로 수문 조작 및 조력발전에 따른 시화호 내측의 동적 응답 해석에 유용하게 적용될 수 있을 것으로 기대된다. 따라서 초기 수행된 본 연구의 결과를 토대로 이어지는 연구에서 집중적으로 동적인 수질모의가 이루어진다면, 사회적으로 큰 관심을 받고 있는 새만금호 또는 시화호 및 서해연안에 기 건설된 하구호의 수문조작과 관련된 내부의 향후 수질예측과 관리에 유용하게 이용될 수 있는 기본모형이 될 것으로 기대된다.

5. 결 론

본 연구에서는 방조제 완공 이후 인공적으로 체절된 방조제 일부 구간인 수문을 통해서만 외해수와 소통되는 부분적으로 폐쇄된 새만금호의 유동과 홍수량 유입시 하구호로 전파되는 홍수파를 모의하기 위하여 시간진행형 모델인 ADCIRC모형을 적용하여 해석하였다. 모형실험을 통하여 외조위와 연계된 수문의 실시간적인 연동에 발생하는 흐름 등, 새만금호 내부의 동적인 수리특성이 효과적으로 해석될 수 있음을 증명하였다. 수치 실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 50년 빈도 홍수파 전파는 만경강과 동진강 유입부에서는 하도추적과 유사한 반응을 보이지만 이후 하도 폭이 급화되면서 호소로 확대되어 새만금호 중앙부에 도달하면 그 영향이 크지 않다. 호 내에서는 홍수파 영향 보다는 수문 개폐에 따른 영향을 직접적으로 받는다.

(2) 관리수위를 유지하기 위해 수문 개방하는 경우 수문 인근영역에서 유속, 수위 등의 수리특성에 동적응답이 즉각적으로 일어나며, 내부 개발이후 수용적이 이전에 비해 48.6%로 줄어들면서 내부 반응은 빨라진다.

(3) 외해수가 호 내측으로 유입하게 되면 일시적으로 불규칙 수면교란이 발생하며 내부로 전파된다. 수면교란이 발생하는 원인은 수문에서의 급격한 유입과 상류 유입에 의해 발생한다. 수면교란의 영향 범위는 방조제 완공이후 상류방향으로 최대 10 km정도까지 전파되며 내부 개발 이후는 최대 16 km정도까지 전파된다.

감사의 글

본 연구에 사용된 ADCIRC ver. 44의 국내에서의 사용 및 저자와의 공동개발에 따른 제반사항을 협조해 주신 Luettich와 Westerink 교수께 감사의 뜻을 전한다. 본 연구는 새만금환경연구센터(SERC)의 연구지원, 해양수산부 2005 KSGP 및 해양개발연구소의 논문발간 지원에 의해 수행되었기에 심심한 사의를 표한다.

참고문헌

- 김상호, 김원 (2002). 한강 하류부 흐름해석을 위한 수리학 적 모형의 구축. 한국수자원학회논문집, 35(5), 485-500.
 농업기반공사 (1999). 새만금지구 수문조사 보고서.
 농림부 농업기반공사 (2004). 새만금호 종합물관리 방안 수

- 림(II) 수문조사 보고서.
- 농업기반공사 새만금사업단 (2005). 새만금 내측의 수심측량 성과. 사신에 의함.
- 서승원 (1999). 비선형 3차원 조화유한요소모형을 이용한 황해의 천해조석 발생. 대한토목학회논문집, 19(II-3), 389-399.
- 서승원, 김정훈 (2003). 조석수동역학 모의에서 조간대 침수노출 고려효과 비교연구. 한국해양해양공학회지, 15(2), 97-107.
- 서승원, 조완희, 유경선 (2005). 새만금호 수문 개방에 따른 내측의 혼합수송 및 외해역의 방류영향모의. 한국해양해양공학회지 심사증.
- 이정규, 전세호 (2004). 부정류 모형을 이용한 한강의 수리학적 홍수추적에 관한 연구. 대한토목학회논문집, 24(4B), 301-310.
- 전민우, 조용수 (2002). 선형저수지모형을 적용한 수리학적 홍수추적. 한국수자원학회지논문집, 35(6), 787-796.
- Chipada, 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.
- Luettich, R.A., 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.
- Martin, J.L. and McCutcheon, S.C. (1999). Hydrodynamics and Transport for Water Quality Modeling. Lewis Publishers.

Received May 18, 2005

Accepted December 6, 2005