

2개의 하천이 합류하는 하구역에서의 연결수로 통수능에 따른 홍수위저감효과 분석

Analysis of Flood Control Effect by Applying the Connecting Channel in Estuary Area Including the Confluence of Two Rivers

김수영* / 김형준** / 윤광석***

Kim, Sooyoung / Kim, Hyung-Jun / Yoon, Kwang Seok

Abstract

In the estuary where the structure such as river-mouth weir has been installed, the flow is developed very complicatedly due to river water from upstream, tide of the sea and floodgate operation. Especially, if basin outlets more than one exists in one estuary, the boundary conditions will be significantly more complex form. Saemangeum (SMG) project area in Korea is the most typical example. There are Mankyung river and Dongjin river in upstream. The water of them inflows into SMG project area. In the downstream, river flow was drained from inland to sea over the SMG sea dike through the sluice. The connecting channel was located between Mankyung and Dongjin basins. It functions not only as transportation by ship in ordinary period but also as flood sharing by sending flood flow to each other in flood period. Therefore, in order to secure the safety against flood, it is very important to understand the flood sharing capacity for connecting channel. In this study, the flood control effect was analyzed using numerical simulation. Delft3D was used to numerical simulation and simulated period was set up with neap tide, in which the maximum flood stage occurred due to poor drainage. Actually, three connecting channels were designed in land use plan of the SMG Master Plan, but they were simplified to a single channel for conciseness of analysis in this study. According to the results of numerical analysis, the water level difference between two basins was increased and the maximum flood stage at dike sluice was also upraised depending on decrease of conveyance. And the velocity induced by same water level difference was decreased when the conveyance became smaller. In certain conveyance above, there was almost no flood control effect. Therefore, if the results of this study are considered for design of connecting channel, it will be expected to draw the optimal conveyance for minimizing dredging construction cost while maximizing the flood control effect.

Keywords : Saemangeum, Estuary, Flood sharing, Connecting channel, Delft3D

요 지

하구둑과 같은 구조물이 설치된 하구역에서는 상류로부터 내려온 하천수와 외해의 조석, 수문의 운영에 따라 복잡한 유출특성을 가지게 되며, 하나의 하구역에 2개 이상의 유역출구가 존재하는 경우 더욱 복잡한 형태의 홍수유출특성을 나타낸다. 이러한 사례로 현재 개발계획이 수립중인 새만금 지역을 들 수 있다. 새만금 지역의 경우 만경강과 동진강 유역에서 하천수가 유입되고 방조제에서는 배수갑문을 통해 하천수를 방류하고 해수유입을 차단한다. 두 하천이 만나는 새만금호 내에는 분리하는 용지가 들어서게 되며, 두 수계의 유출량을 연결수로로 통해 교환할 수 있도록 계획되고 있다. 이러한 연결수로는 평소에는 주운의 역할을 하지만 홍수시에는 두 수계간의 홍수를 소통시켜 홍수를 분담하는 기능을 하게 된다. 따라서 하구역 내의 치수적 안전성 확보를 위해서는 연결수로에 대한 홍수분담능력을 파악하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 연결수로의 통수능에 따른 홍수위 저감효과를 수치해석을 통해 분석하였다. 해석에는 Delft3D를 활용하였으며 해석기간은 배수갑문의 방류가 어려워 최대홍수위가 발생하는 소조기로 설정하였다. 새만금종합개발계획상의 토지이용계획에서는 3개의 연결수로가 계획되어 있으나 연결수로에 의한 홍수위저감효과를 검토하기 위해 해석을 단순화하여 가장 폭이 넓은 수로 1개만 운영되도록 설정하였다. 연결수로의 폭은 동일하게 하고 하상고를 EL.-15m~EL.-3m까지 2m 단위로 변화시켜 다양한 통수능 조건에서의 홍수위저감효과를 검토하였다. 수치해석 결과 연결수로의 통수능이 감소하면 두 수계간의 수위차가 증가하면서 배수갑문지점에서의 최대수위도 증가하며, 동일한 수위차라 하더라도 통수단면적에 따라 유속의 영향으로 홍수위 저감효과도 변화한다는 것을 확인하였다. 또한, 통수단면적이 증가하더라도 홍수위 저감효과가 발생하지 않게 되는 통수단면적도 분석하여 제시하였다. 본 연구결과는 향후 연결수로 설계시 기초자료로 활용될 수 있으며, 준설로 인한 공사비를 최소화하면서 홍수위 저감효과는 극대화할 수 있는 최적 연결수로를 설계할 수 있을 것으로 기대된다.

핵심용어 : 새만금, 하구역, 홍수분담, 연결수로, Delft3D

* 한국건설기술연구원 수자원·하천연구소 박사후연구원 (e-mail: sooyoungkim@kict.re.kr)

Post-Doctoral Researcher, Hydro Science and Engineering Research Institute, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Goyang, Gyeonggi, Korea

** 한국건설기술연구원 수자원·하천연구소 전임연구원 (e-mail: john0705@kict.re.kr)

Researcher, Hydro Science and Engineering Research Institute, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Goyang, Gyeonggi, Korea

*** 교신저자, 한국건설기술연구원 수자원·하천연구소 연구위원 (e-mail: ksyoon@kict.re.kr, Tel: 82-31-9100-270)

Corresponding Author, Research Fellow, Hydro Science and Engineering Research Institute, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Goyang, Gyeonggi, Korea

1. 서론

하구역에서는 조석과 상류로부터 내려온 유수가 만나 복잡한 흐름특성을 갖게 되며, 하구둑과 같은 구조물이 설치된 경우에는 배수문 운영에 따라 흐름특성이 영향을 받게 되어 홍수시 치수적 안정성 확보를 위한 적절한 대안이 필요하다. 하천의 홍수량을 분배하여 홍수위험도를 저감시키는 방법으로는 강변저류지 또는 연결수로와 같은 구조물적인 방법이 있다. 강변저류지를 통한 홍수위 저감에 관한 연구는 국내외적으로 활발히 수행되어 치수 효과에 대한 정량적 결과가 제시되고 있으나, 홍수분배에 의한 효과는 저류지 용량에 영향을 받으므로 대규모의 저류용량을 확보하지 못하는 경우 홍수위 저감 효과를 크게 기대하기는 어려운 것으로 알려져 있다. 그러나, 연결수로는 하천과 하천을 연결함으로써 홍수위를 저감시키는 시설로서 2개 이상의 하천유역의 유량이 서로 교환될 수 있도록 함으로써 홍수시 침투유량 및 수위를 저감시킬 수 있는 효과를 기대할 수 있다.

국외의 하천 연계운영 사례를 살펴보면, 독일에서는 Nuremberg의 Rhine강과 Bamberg의 Main강, Kelheim의 Danube강을 연결한 Rhine-Main-Danube 운하가 1992년 완공되어 운영되고 있으며, 미국은 541 km의 Mississippi 강을 통하여 5대호와 멕시코만을 연결하는 Illinois 수로 시스템을 설치하여 운영하고 있다. 또한, 인도에서는 하천과 저수지를 연결하여 수로를 설치하여 홍수위험을 저감시키는 Indian Rivers Inter-Link 사업을 진행하고 있다.

연결수로 및 하천간 홍수량 분배에 의한 홍수위 변화에 관한 연구를 살펴보면 다음과 같다. Morishita et al. (2004)은 캄보디아의 Mekong강과 Bassac강 하류지역에 설치된 연결수로에 의한 홍수위 변화를 관측하고 수문모의를 통하여 예측하여 하천의 연계운영이 수자원운영에 효율적임을 나타내었다. Kim and Lee (2008)는 영산호와 영암호 배수갑문의 확장 및 영암 연락수로의 확장이 영산호와 영암호의 홍수위에 미치는 영향을 검토하였으며, Kim and Kim (2010)은 금호호 배수갑문과 금호연락수로의 확장이 영산호, 영암호 및 금호호의 홍수위에 미치는 영향을 검토하였다. Kim (2012)은 연락수로를 통하여 연계된 영산호, 영암호 및 금호호의 홍수위 변화가 제수문의 개폐기준에 따라 변화함을 수치모의를 통하여 검토하였다. 본 연구의 대상지역인 새만금에 대한 홍수위산정에 관한 연구는 Jung and Cho (2013)에 의해 수행되었으며 홍수의 시작시간에 변화를 주고 외해조위에 의한 내측 홍수위의 변화를 예측하였다.

하천의 연결수로는 인공수로를 통해 두 하천을 연결함으로써 홍수시 하천의 수위를 낮춰 홍수위험도를 저감시키는 수리구조물이다. 인접한 하천의 하도가 저류지의 기능을 할 수 있으며, 하구의 특성상 상대적으로 저류용량이 크기 때문에 저류지 면적과 같은 제약사항이 없어 보다 큰 홍수위 저감효과를 기대할 수 있다. 이에 본 연구에서는 새만금호를 출구점으로 공유하는 만경강과 동진강의 연결수로가 설치될 경우, 홍수위 저감효과에 미치는 영향을 수치모의를 통하여 검토하였다.

2. 수치모의 기법

Delft3D Flow는 Deltares에서 개발한 해석프로그램인 Delft3D의 유동해석 모듈로서 경계조건으로 조화상수를 입력하여 조위를 재현할 수 있는 프로그램이다. 또한, 암거와 같은 구조물을 통해 배수갑문의 운영에 따른 해석이 가능하여 하천의 하구에 방조제가 있고, 배수문이 운영되는 조건에 대한 흐름해석에 적합한 모형이다. 또한, 이 모형은 추가적인 모듈과 결합하여 온도 및 농도 확산과 유사이송에 대한 해석도 가능하다.

2.1 지배방정식

이 모형의 지배방정식은 2차원 천수방정식을 따르며 이는 비압축성유체에 대한 Navier-Stokes 방정식으로부터 유도된다. 수직방향의 스케일이 수평방향에 비해 현저히 작다는 가정하에 σ -좌표계를 사용하며 Delft3D에서 사용하는 수위, 수심, 전수심의 정의는 Fig. 1에 나타났다.

2.1.1 연속방정식

Eq. (1)은 수심적분된 연속방정식으로 비압축성유체에 대한 3차원 연속방정식을 적분하여 도출되며 수면과 바닥에서의 운동학적 경계조건이 고려되었다(Deltares, 2010).

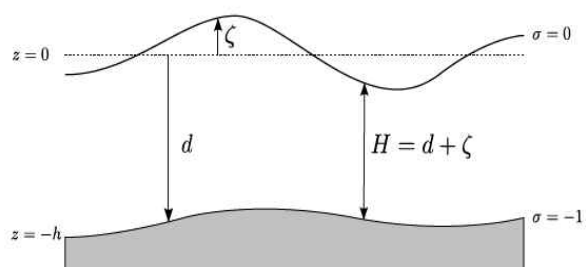


Fig. 1. Definition of Water Level (ζ), Depth (d) and Total Depth (H) (Deltares, 2010)

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

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

여기서, ζ 는 수위(Water level), d 는 수심(depth), Q 는 유입, 유출, 강우, 증발로 인한 단위면적당 유량, \sqrt{G} 는 곡선좌표에서 직사각형 좌표로의 변환계수, U 와 V 는 수심평균유속으로 각각 $U = \frac{1}{d+\zeta} \int_d^\zeta u dz = \int_{-1}^0 u d\sigma$, $V = \frac{1}{d+\zeta} \int_d^\zeta v dz = \int_{-1}^0 v d\sigma$ 로 나타내며 u, v 는 각각 수평방향(ξ, η)의 유속 성분이다.

2.1.2 운동량방정식

운동량 방정식은 정수압 경사를 제외한 밀도변화를 무시하는 Boussinesq 가정을 따르며 수평방향(ξ, η)에 대한 운동량 방정식은 Eqs. (2a) and (2b)와 같다.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{u}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial u}{\partial \eta} + \frac{w}{d+\zeta} \frac{\partial u}{\partial \sigma}$$

$$- \frac{v^2}{\sqrt{G_{\xi\xi}} \sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\eta\eta}}}{\partial \xi} + \frac{uv}{\sqrt{G_{\xi\xi}} \sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\xi\xi}}}{\partial \eta} \quad (2a)$$

$$- fv = - \frac{1}{\rho_0 \sqrt{G_{\xi\xi}}} P_\xi + F_\xi + \frac{1}{(d+\zeta)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\nu_V \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right) + M_\xi$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial v}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial v}{\partial \eta}$$

$$+ \frac{w}{d+\zeta} \frac{\partial v}{\partial \sigma} - \frac{uv}{\sqrt{G_{\xi\xi}} \sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\eta\eta}}}{\partial \xi}$$

$$+ \frac{u^2}{\sqrt{G_{\xi\xi}} \sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\xi\xi}}}{\partial \eta} - fu =$$

$$- \frac{1}{\rho_0 \sqrt{G_{\eta\eta}}} P_\eta + F_\eta + \frac{1}{(d+\zeta)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\nu_V \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right) + M_\eta \quad (2b)$$

여기서, ρ_0 는 물의 밀도, P 는 정수압 경사, F 는 수평방향 Reynold's stress의 불균형에 의해 발생하는 힘이며, M 은 모멘텀 생성항이다. 또한, ν_V 는 연직방향 와점성계수(vertical eddy viscosity coefficient)이며, w 는 연직방향 유속으로 연속방정식으로부터 계산된다.

2.2 배수갑문 유량산정공식

새만금 방조제에 위치한 신시 및 가력 배수갑문은 해수

의 유입을 막고 새만금 호내를 담수로 유지시켜 주는 기능을 한다. 따라서 호내 수위보다 외해조위가 높을 때는 수문을 폐쇄하고 호내 수위보다 외해 조위가 낮을 때에만 수문을 개방해 담수를 방류한다. 또한 배수갑문의 수문 개방시 흐름이 수문의 하단에 닿지 않도록 설계되어 있어 배수갑문은 높이가 높은 암거(culvert)와 같은 거동을 하게 된다. 본 연구에서 활용되는 조건은 Fig. 2에서 제시한 암거의 흐름 중 Type 1, 2, 3의 세 가지 형태이며 각각에 해당하는 유량산정공식은 Eqs. (3a)~(3c)에 제시하였다. 유량산정공식에 사용되는 유량계수(c_D^1)는 Ministry of Agriculture and Forestry (2007)에서 실측한 유량으로부터 산정된 결과인 가력배수갑문 0.94, 신시 배수갑문 0.88을 사용하였다.

$$\text{Type 1 : } Q = \mu H_c W \sqrt{2g(\zeta_u - H_c)} \quad \text{with } \mu = c_D^1 \quad (3a)$$

$$\text{Type 2 : } Q = \mu(H^*) H_c W \sqrt{2g(\zeta_u - H_c)} \quad \text{with} \quad (3b)$$

$$H^* = 0.5H_c + 0.5\zeta_u$$

$$\mu(H^*) = c_D^1 / \sqrt{1 + \left\{ \frac{2gLn^2}{(R^*)^{4/3}} + \alpha \right\} (c_D^1)^2 \left(\frac{H_c}{H^*} \right)^2} \quad \text{and}$$

$$R^* = \frac{H^* W}{2H^* + W}$$

$$\text{Type 3 : } Q = \mu(H^*) \zeta_d W \sqrt{2g(\zeta_{intake} - \zeta_{outlet})} \quad \text{with}$$

$$H^* = 0.5\zeta_u + 0.5\zeta_d \quad (3c)$$

$$\mu(H^*) = c_D^1 / \sqrt{1 + \left\{ \frac{2gLn^2}{(R^*)^{4/3}} + \alpha \right\} (c_D^1)^2 \left(\frac{\zeta_d}{H^*} \right)^2} \quad \text{and}$$

$$R^* = \frac{H^* W}{2H^* + W}$$

여기서, ζ_u, ζ_d : 상·하류수위, c_D^1 는 유량계수, H_c 는 한계수심, W 는 암거의 폭, L 은 암거의 길이, n 은 Manning 조도계수이다.

3. 연구방법

3.1 수치모의 조건

3.1.1 외조위 조건 및 홍수발생시간

기존 연구에 따르면 배수갑문의 배수에 불리하여 최대 홍수위가 발생하는 기간은 소조기이다(Ministry for

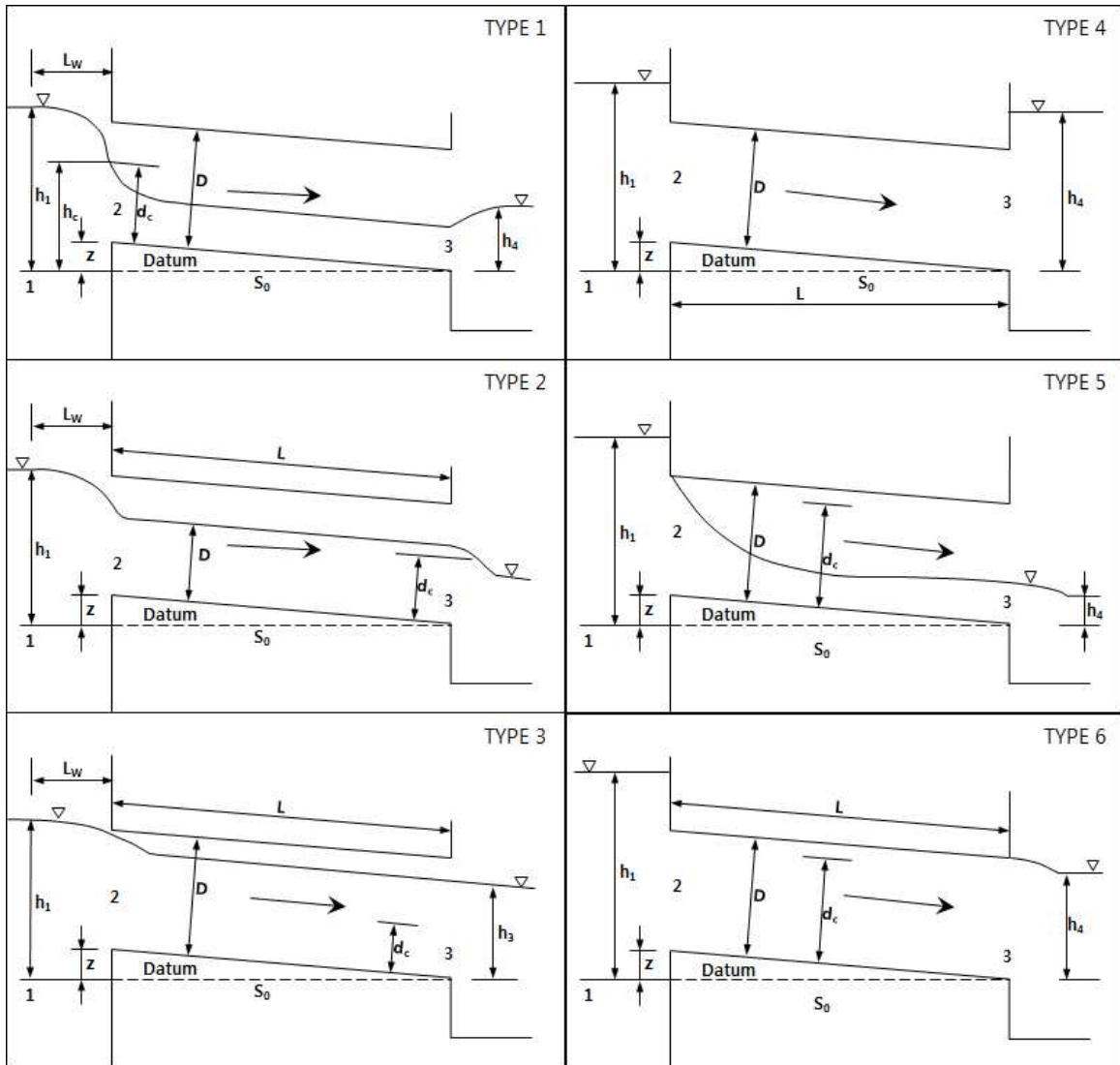


Fig. 2. Flow Types in Culvert (French, 1985)

Food, Agriculture, Forestry and Fisheries, 2008). 새만금 유역에서 가장 가까운 군산 외항의 과거 31년간의 조위관측자료로 기왕최대 소조기를 도출하였으며, 기간은 2009년 7월 31일~8월 3일이다(Fig. 3). 인접한 유역인 만경강과 동진강 유역의 홍수는 동시에 발생하는 것으로 가정하였으며 홍수시작시간을 소조기 시작시간인 2009년 7월 31일 00시를 기준(0h)으로 -9h~33h까지 3시간 단위로 설정하였으며 소조기 3일에 앞뒤로 1일씩을 추가하여 총 5일간 모의하였다.

3.1.2 격자생성

격자는 새만금 배수갑문으로 방류되는 흐름에 영향을 미치지 않도록 방조제로부터 30 km까지 확장하였으며 만경강과 동진강의 상류계계는 각각 만경대교와 동진대교

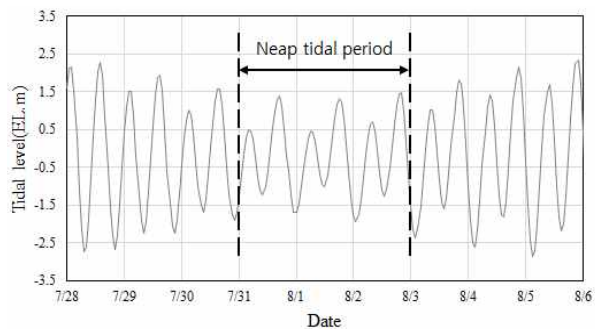


Fig. 3 Tide at Gunsan Port (Neap tide)

로 설정하였다. 횡방향으로 560개, 수직방향으로 387개로 구축하였으며 격자의 Resolution은 하천구간에서 최소 2.70 m, 외해구간에서 최대 617.6 m로 차이를 두어 효율적인 해석이 가능하도록 격자를 구성하였다(Fig. 4).

3.1.3 지형 및 연결수로 조건

새만금 호내 지형은 새만금지구 간척종합개발사업 내부 개발 기본계획서(Ministry for Food, Agriculture, Forestry and Fisheries, 2008)의 측량자료를 활용하였고, 새만금 호내 매립토 확보방안(K-Water, 2011)의 매립토 준설·배분계획 및 토지이용계획을 반영하였다(Fig. 5). 외해 지형

은 국립해양조사원의 전자해도를 이용하여 구축하였다.

새만금 종합개발계획의 토지이용계획에서 만경강 유역과 동진강 유역을 연결하는 수로는 총 3개로 계획되어 있다(Fig. 5). 각각의 수로 폭이 120 m, 220 m, 80 m이며, 본 연구에서는 통수능에 따른 홍수위 변화양상과 홍수저감효과를 파악하는 것을 목적으로 하므로 폭 220 m 연결수로만 존재하는 것으로 단순화하여 해석하였다. 또한 연결수

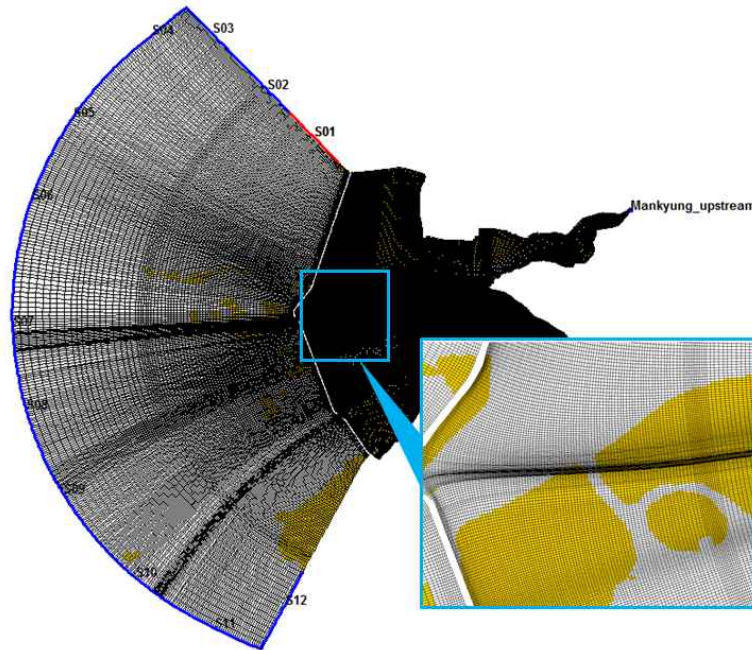


Fig. 4. Mesh Generation

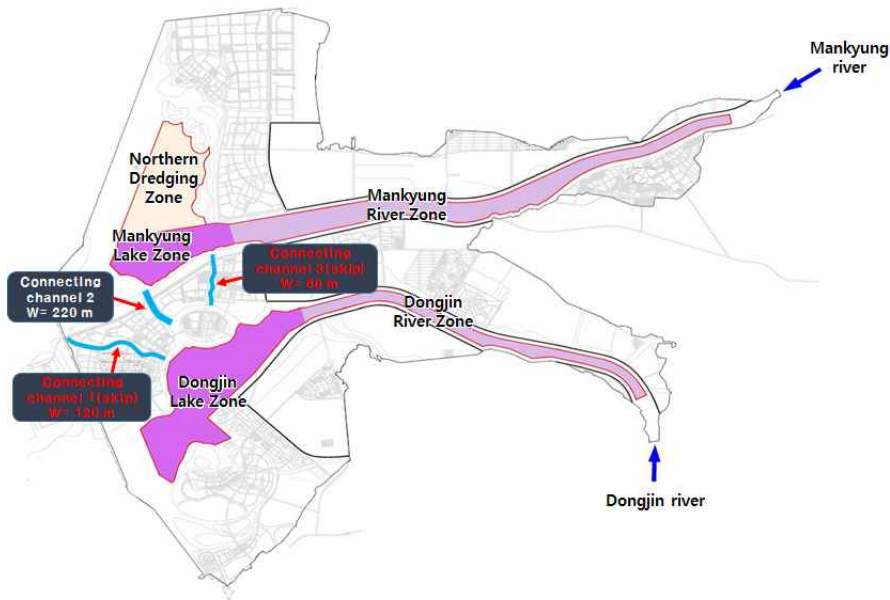
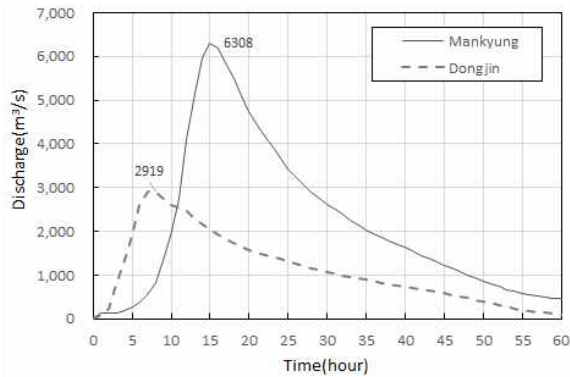


Fig. 5. Acquisition Plan of Dredging Reclamation Soil and Connecting Channels in Saemangeum (Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 2011)

로의 하상고는 확정되진 않았지만 현재까지 연결수로의 최저 하상고인 EL.-11.0m을 기준으로 하여 EL.-15.0 m~EL.-3.0m까지 2m 간격으로 하상고 변화를 설정하였다.

3.1.4 유입유량 및 조위

새만금유역의 상류경계인 만경대교와 동진대교의 유입 유량 및 횡유입 유량은 새만금 종합개발계획(Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 2011)에서 홍수량으로 제시한 새만금 지구 수문조사보고서(Ministry for Food, Agriculture, Forestry and Fisheries, 2008)의 200년 빈도 홍수량을 이용하였으며 첨두홍수량은 만경대교 6,308 m³/s, 동진대교 2,919 m³/s이다(Fig. 6(a)). 하류경계인 외해의 조위는 주변 조위관측소에 대한 조화상수 자료를



(a) Hydrograph of Mankyung and Dongjin (Ministry for Food, Agriculture, Forestry and Fisheries, 2008)

이용하여 역거리 가중치법(Inverse Distance Weighted)으로 경계지점의 조화상수(M2, S2, K1, O1)와 평균해수면을 계산하였다(Fig. 6(b)). 역거리 가중치 법은 가까이 있는 실측값에 더 큰 가중치를 주어 보간하는 방법으로 대표적인 공간보간 방법의 하나이다.

3.2 경계조건 및 수치모의 조건

홍수시작 변화조건을 통해 홍수시작시점과 외해조위조건에 대한 영향을 분석하였다. 하상고는 기존 연결수로의 하상고인 EL.-11 m로 설정하였다. 이를 통해 최대홍수위 발생 케이스를 도출하고 하상고를 EL.-15m~EL.-3m까지 변화시켜 연결수로 통수능에 따른 홍수위 변화를 산정하였다(Table 1).



(b) Tide stations near Saemangeum (14 places)

Fig. 6 Boundary Conditions

Table 1. Cases of Numerical Simulation

Case	Start time of flood (hour)	Bed elevation (EL.m)	Case	Start time of flood (hour)	Bed elevation (EL.m)
Case01	-9	-11	Case12	24	-11
Case02	-6	-11	Case13	27	-11
Case03	-3	-11	Case14	30	-11
Case04	0	-11	Case15	33	-11
Case05	3	-11	Case16	Maximum flood stage case	-15
Case06	6	-11	Case17		-13
Case07	9	-11	Case18		-11
Case08	12	-11	Case19		-9
Case09	15	-11	Case20		-7
Case10	18	-11	Case21		-5
Case11	21	-11	Case22		-3

■ : Variation of flood start time

4. 수치모의 결과

4.1 모형의 검증

구축된 모형에 대한 검증은 새만금이 개발되기 이전인 현재 상태의 관측값이 존재하는 기간에 대해서 동일한 조건으로 수치모의하여 관측값과 비교하였다. 이 시기에는 만경수역과 동진수역이 경계없이 개방되어 자유롭게 유수의 소통이 가능하다. 관측값이 존재하는 기간은 2007년 4월 11일 00시부터 4월 14일 00시이며, 이 기간은 신시배수갑문은 개방된 상태이고 가력배수갑문은 폐쇄된 상태로 해수가 유통되는 시기였다. 총 2개 지점에 대해서 비교하였으며 신시수위탑은 야미도 내측에 위치하고 외해조위탑은 비안도와 방조제 사이에 위치하고 있다(Table 2). 관측값과 수치해석의 평균제곱근오차(RMSE)는 신시수위탑 0.055, 외해조위탑 0.299로 외해 경계에 대한 오차가 상대적으로 크게 나타났다. 외해의 경우 호내에 비해 격차가 상대적으로 크기 때문에 오차도 크게 발생한 것으로 판단되나 외해 조위와 호내 수위가 제대로 반영되는 것을 확인할 수 있었다(Fig. 7).

4.2 홍수시작시간에 따른 홍수위

상류경계조건인 홍수수문곡선은 시간에 따라 변화하며

하류경계조건인 조위 또한 시간에 따라 변화한다. 따라서 두 조건이 발생하는 시점의 차이에 따라 새만금 호내 홍수위는 달라지게 된다. 최대홍수위 발생 시점을 파악하기 위해 -9h~33h까지 홍수발생시점을 변화시켜 수치모의한 결과 3h에서 만경강과 동진강 수역 모두에서 최대홍수위가 발생했다. 이 시점은 소조기 중에서도 조위가 상승하는 시점이며 이 때 홍수가 발생하면 홍수 초기에 발생하는 큰 홍수량을 배수갑문을 통해 방류할 수 없어 홍수위를 상승시키는 것으로 나타났다. 조위가 상승하는 시점인지 하강하는 시점인지에 따라 홍수위가 변화하며 조위의 변화의 따라 증가와 감소를 반복하는 것으로 나타났다(Table 3, Fig. 8). 최대홍수위가 발생할 시점에 대한 수위와 유속벡터는 Fig. 9에 도시하였다. 신시 및 가력배수갑문으로 방류를 하고 있고 연결수로를 통해 만경측에서 동진측으로 홍수를 분담하고 있는 것으로 나타났다.

4.3 통수능 별 배수갑문 홍수위

연결수로의 하상고변화를 통해 통수능을 변화시켜 수치모의를 수행한 결과 하상고가 낮아 통수능이 커질수록 만경과 동진의 수위차는 작게 나타났으며 홍수위 또한 감소하였다(Table 4, Fig. 10). 이는 만경강 유역과 동진강 유역의 수문곡선의 차이로 인해 발생하는 두 유역간의 홍

Table 2. Numerical Conditions for Verification of Model

Category	Contents	Remarks
Simulation period	2007.04.11. 00:00 ~ 2007.04.14. 00:00	Observed data
Operating condition of sluice	Sinsi gate open Garyuk gate close	
Upstream discharge condition	Low water discharge (Mankyung: 7.64 m ³ /s, Dongjin: 6.02 m ³ /s)	

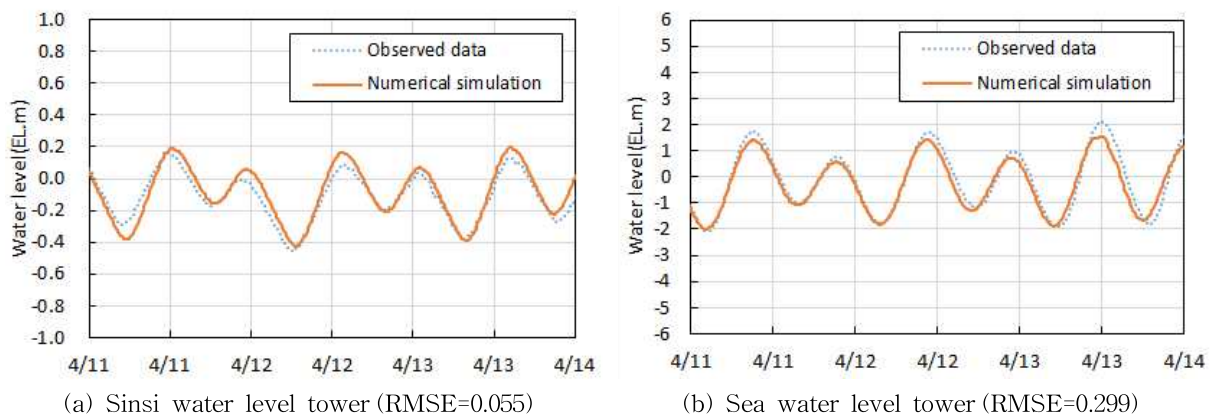


Fig. 7. Verification of Sea and Lake Level

Table 3. Flood Stages for Various Start Times of Flood

Case	Start time of flood (hour)	Maximum Flood stage at dike sluice (EL.m)		Difference (m)
		Mankyung River	Dongjin River	
Case01	-9	0.54	0.40	0.14
Case02	-6	0.46	0.36	0.10
Case03	-3	0.55	0.43	0.12
Case04	0	0.62	0.49	0.13
Case05	3	0.71	0.56	0.16
Case06	6	0.62	0.44	0.18
Case07	9	0.46	0.38	0.08
Case08	12	0.52	0.41	0.11
Case09	15	0.53	0.41	0.12
Case10	18	0.47	0.32	0.16
Case11	21	0.49	0.40	0.09
Case12	24	0.56	0.44	0.12
Case13	27	0.67	0.50	0.16
Case14	30	0.70	0.51	0.19
Case15	33	0.53	0.46	0.07

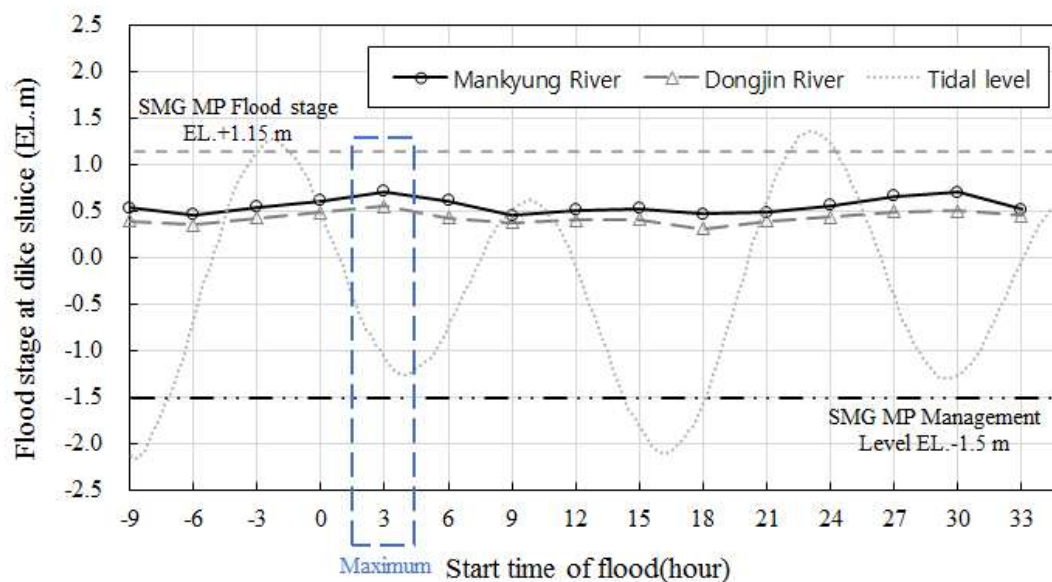


Fig. 8. Flood Stages for Various Start Times of Flood

수위 차이를 연결수로 통해 분담하면서 수위차가 감소되어 동시에 최대홍수위도 감소되는 것으로 판단된다. Case 16과 Case 17은 하상고가 2.0m 차이가 나지만 최대홍수위는 동일하게 나타났다. 이는 어느 정도 수준을 넘어서면 통수능 증가에 따른 홍수위저감 효과가 미미하다는 것을 의미하므로 연결수로 설계 시에 홍수위저감 효과는 최대가 되면서 준설공사에 소요되는 비용을 최소화 할

수 있는 경제적인 설계를 위해서는 통수능에 따른 홍수위저감효과에 대한 분석을 통해 연결수로의 하상고를 결정하는 것이 합리적이라는 것을 알 수 있다.

4.4 연결수로 유속

만경강과 동진강의 두 유역간 수위차에 따른 연결수로 내의 흐름을 분석하기 위해 케이스별로 연결수로 중앙에

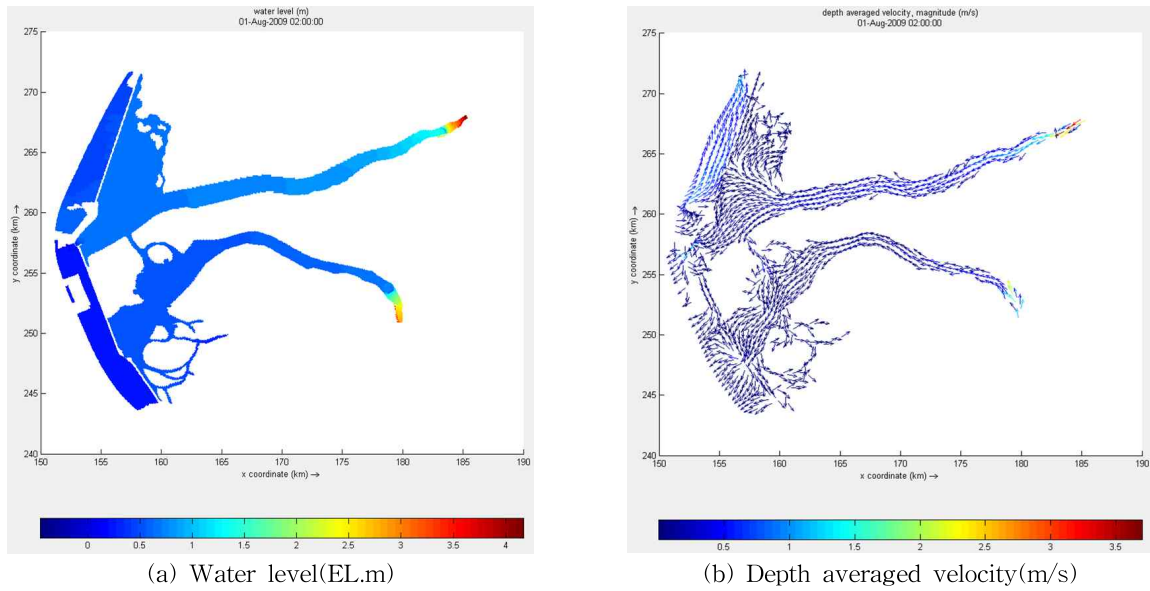


Fig. 9. Flow Characteristics at Time of Maximum Flood Stage

Table 4. Flood Stages for Various Bed Level of Connecting Channel

Case	Bed level of connecting channel (EL.m)	Maximum Flood stage at dike sluice (EL.m)		Difference (m)
		Mankyung River	Dongjin River	
Case16	-15	0.70	0.58	0.12
Case17	-13	0.70	0.57	0.14
Case18	-11	0.71	0.56	0.16
Case19	-9	0.73	0.55	0.19
Case20	-7	0.74	0.53	0.21
Case21	-5	0.79	0.50	0.29
Case22	-3	0.82	0.43	0.39

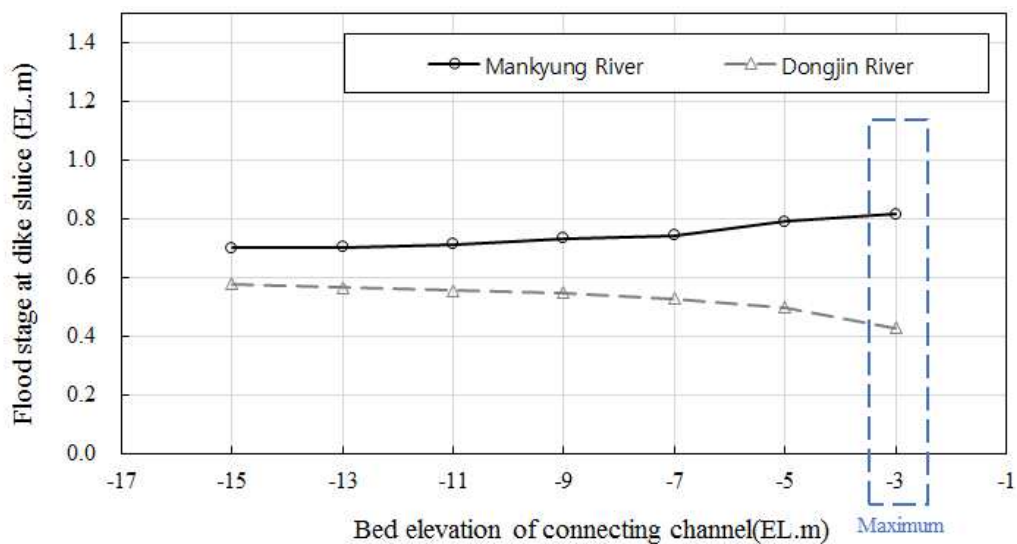


Fig. 10. Flood Stages for Various Bed Level of Connecting Channel

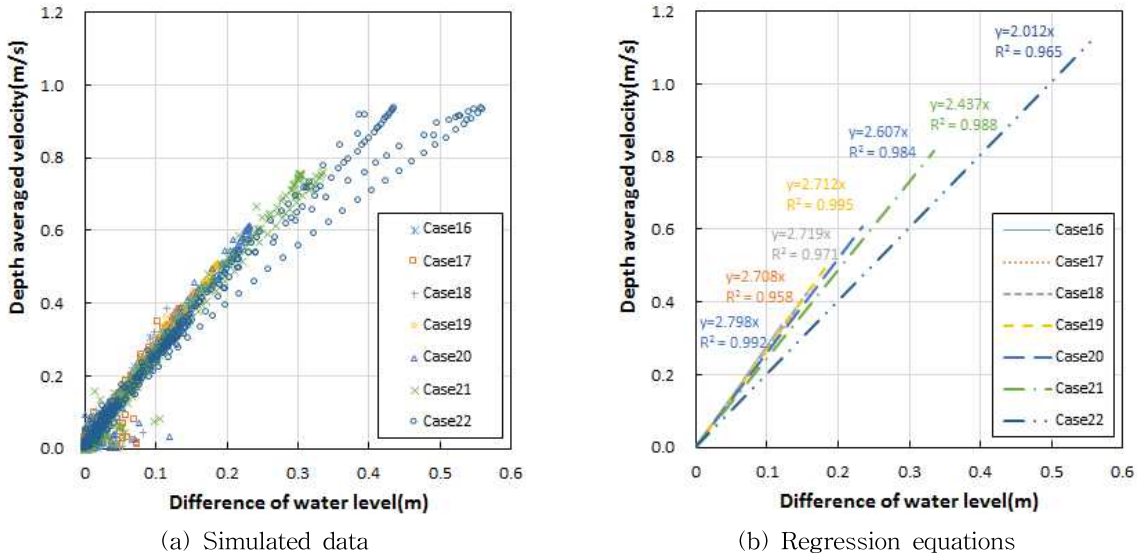


Fig. 11. Regression Analysis of Simulation Data

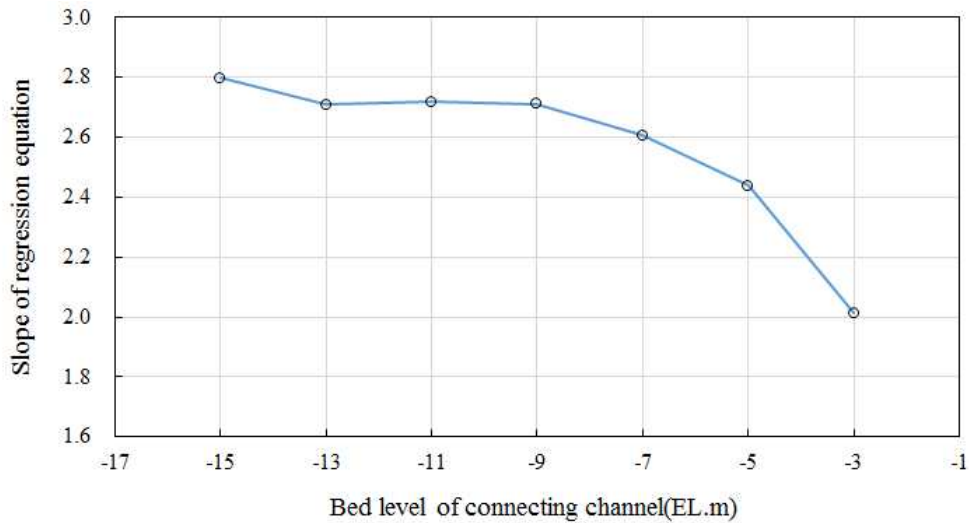


Fig. 12. Slopes of Regression Equations

서의 유속과 두 유역간 수위차를 그래프에 도시하였다 (Fig. 11(a)). 또한 각각에 대해서 선형회귀식을 도시하여 연결수로 통수능의 변화와 수로내 발생유속과의 관계를 확인하였다(Fig. 11(b)). 그 결과 선형회귀식의 기울기는 연결수로의 하상고가 높아 통수능이 감소될수록 작아지는 경향을 나타냈다(Fig. 12). 이는 동일한 수위차가 발생하여도 통수능이 작은 경우 발생유속 또한 작아져서 연결수로가 분담하는 홍수량이 감소하는 것을 의미한다. 홍수 분담량의 감소는 홍수위 및 홍수위험성의 증가로 이어지게 된다.

5. 결론

본 연구에서는 두 유역이 만나는 하구역의 경우 연결수로를 통한 홍수분담이 홍수위 저감에 미치는 영향을 수치모의를 통해 분석하였다. 분석을 통해 도출된 결과는 다음과 같다.

- 1) 연결수로의 통수능이 증가할수록 배수갑문 지점에서의 최대홍수위 및 유역간 수위차는 감소하였다.
- 2) 통수단면적이 일정 수준을 넘으면 연결수로의 통수능이 증가하여도 홍수위 저감효과는 증가하지 않고 일정하게 된다.

3) 연결수로의 통수능이 감소할수록 연결수로내 발생 유속이 감소하여 홍수분담능력을 더욱 저하시킨다. 본 연구의 결과에서 두 유역이 만나는 하구역에서 연결수로의 통수능은 홍수위 저감효과 뿐만 아니라 경제적인 측면에서도 중요한 인자로 나타났다. 연결수로의 통수능을 증가시키면 홍수위 저감효과는 있지만 연결수로의 준설 및 확대에 소요되는 공사비는 증가할 것이다. 또한 하상고를 지나치게 낮추게 될 경우 불필요한 하상준설과 수중시공의 증가로 시공성도 감소한다. 반면, 홍수위가 증가하면 제방의 높이를 높이거나 홍수방어에 소요되는 비용이 증가할 것이다. 특히, 새만금과 같은 경우 매립을 통해 개발용지를 조성하므로 홍수위에 따라 매립고가 결정되어 홍수위 증가에 따른 매립공사비는 증가하게 된다. 또한, 두 유역이 공유하고 있는 개발용지의 매립고는 안전을 고려한 측면에서 두 유역 중 높은 지역의 홍수위를 이용하여 매립고를 산정하게 된다. 따라서 연결수로를 통해 홍수를 분담시켜 홍수위를 낮추는 것은 막대한 경제적 효과가 있다고 할 수 있다. 그러므로 본 연구의 결과를 기초자료로 활용하여 연결수로의 최적통수능을 결정한다면 준설로 인한 공사비는 최소화하고 홍수위저감효과는 극대화할 수 있는 경제적이고 효율적인 최적 연결수로의 통수능을 도출할 수 있을 것으로 기대되며 추후 연결수로의 설계인자 및 위치결정에 대한 연구가 추가적으로 수행된다면 연결수로 설계에 대한 활용성을 높일 수 있을 것이다.

References

Deltares (2010). Delft3D-FLOW user manual.
 French, R.H. (1985). Open-Channel Hydraulics.
 Jung, J.S., and Cho, Y.S. (2013). "A 3D Hydrodynamic Model for Determination of Maximum Flood Level inside Saemangeum Embankment." *Journal of Coastal Research*, Special Issue No. 65, pp. 243-248.
 K-Water (2011). Acquisition plan of dredging reclamation soil in Saemangeum

Kim, D.G. (2012). Operation of the Yeongam Connecting Channel Check Gate for the Flood Stage Control in the Lake Yeongsan. Ph.D. Dissertation, Mokpo National University.
 Kim, D.G., and Kim, D.O. (2010). "Coupled Operation of the Lake Youngsan, Yeongam and Kumho for the Flood Stage Control in the Downstream of the Youngsan River." *Journal of Korean Society of Civil Engineering*, Vol. 30, No. 3B, pp. 277-284.
 Kim, D.G., and Lee, J.H. (2008). "Coupled Operation of the Lake Youngsan and Yeongam for the Flood Control in the Downstream of the Youngsan River." *Journal of Korean Society of Civil Engineering*, Vol. 28, No. 3B, pp. 297-306.
 Ministry for Food, Agriculture, Forestry and Fisheries (2008). Basic Plan of Internal Development in Saemangeum Project.
 Ministry for Food, Agriculture, Forestry and Fisheries (2008). Report of Hydrologic Investigation in Saemangeum Project Area
 Ministry of Agriculture and Forestry (2007). '07 Report of Hydraulic Experiment in Saemangeum Project Area.
 Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (2011). Master Plan of Saemangeum Project.
 Morishita, K., Garsdal, H., and Masumoto, T. (2004). "Hydrological monitoring system for the Cambodian floodplains." Proceedings of 2nd Conference of Asia Pacific Association of Hydrology and Water Resources, Singapore.

paper number : 15-090
 Received : 26 October 2015
 Revised : 16 November 2015
 Accepted : 16 November 2015