

기술보고

새만금호 방수제 공사에 따른 관리수위 운영과 환경변화에 관한 고찰

최정훈¹ · 오찬성^{1,†} · 조영권¹ · 안치호²

¹한국농어촌공사 농어촌연구원

²한국농어촌공사 기술본부

Consideration on the Operation of water level management and Environmental Change Associated with Inner Dike Constructions in Saemangeum Reservoir

Jung-Hoon Choi¹, Chan-Sung Oh^{1,†}, Young-Kweon Cho¹ and Chi-Ho Ahn²

¹Saemangeum Research Team, Rural Research Institute, Korea Rural Community Corporation, Ansan 426-908, Korea

²Technical Project Office, Korea Rural Community Corporation, Daejeon 302-859, Korea

요 약

새만금 사업은 대체 농지조성 및 쾌적한 복지 농어촌을 건설하고, 동북아 경제중심지로서 거점을 개발하는 한편 친환경적 개발 계획 및 기술에 바탕을 둔 녹색 도시로 성장하도록 하는 글로벌 명품 사업이다. 이러한 새만금 사업을 친환경적 간척 모델의 하나로 개발하기 위하여 새만금 사업 환경영향 공동조사 및 토론회 등을 거쳐 친환경적 순차 개발 계획이 확정되었다. 현재는 방수제 공사가 진행 중에 있으며, 이에 따라 새만금호의 적정 수질 유지 및 환경변화에 따른 합리적인 대책 수립이 요구되고 있는 실정이다. 새만금호 내 환경은 상류 오염부하량 및 배수갑문 조작 현황 등에 의해 많은 영향을 받게 되므로, 본 연구에서는 새만금 방조제 끝막이로부터 방수제 공사 이후까지의 새만금호 관리수위 결정에 미치는 전반적인 요인들을 파악하였으며, 현재 진행 중인 방수제 공사와 관련된 수치 모델링 및 지속적인 해수유통이 미치는 환경적 문제를 함께 고찰하였다. 새만금호 관리수위는 배후지 침수 분석, 끝막이 시공 여건과 비산면적 등 환경대책에 대한 내용을 포함한 여러 조건에 따라 결정되며, 방수제 축조 후가 축조 전에 비하여 염분 농도 뿐 아니라 해수 유입 범위가 갑문 방향으로 1.2 km 감소하는 것으로 예측되었다.

Abstract – A Saemangeum Development Project, which is a national project in South Korea, has started with the objective of developing the reclaimed area mainly agricultural land use since the mid'80s. To develop a model of the global eco-reclamation, constructions of the eco-friendly counter facilities such as sluice gates and inner dikes, as well as environmental preservation measures for an estuary reservoir, have been carried out. However, reasonable measures of the water quality management for the Saemangeum area are required. Thus, the purpose of this study is to rigorously analyze and quantitatively evaluate the environmental problems due to the water level management associated with inner dike constructions. To achieve these objectives, the affecting factors on determination of water level management are described and a series of calibrated transient-state numerical simulations was performed to demonstrate the salinity distribution difference in the estuary before and after the construction of inner dikes. The overall salinity reduced about 2~5 psu, and the seawater intrusion was weakened by a well-regulated waterway after construction of the inner dikes compared to before construction of them.

Keywords: Saemangeum Project(새만금 사업), Sluice gates(배수갑문), Environmental problems(환경문제), Operation of water level management(관리수위 운영), Continuous seawater circulation(지속적인 해수유통)

[†]Corresponding author: oray78@empal.com

1. 서 론

새만금호는 만경강 및 동진강 하구에 위치하며, 서해 조석간만의 차로 노출된 갯벌에 조성되기 때문에 수심은 방조제 내측 인근 지역(40 m)을 제외하고 0 m~10 m로 낮게 분포하며, 지형은 완만하여 경사도 1° 이하 지역이 전체의 90%를 차지한다. 이로 인해 호 내 체류시간이 짧고 수심변화도 매우 작기 때문에 상류로부터의 유입수량 및 수질과 배수갑문의 운영 이력에 의해 호 내 수리, 수질 및 환경적 변화는 크게 영향을 받는다. 그러므로 방조제 체절 이후 현재까지 신시와 가력배수갑문의 운영을 통해 호의 수리 및 수질이 관리되고 있으며, 평수기나 홍수기에는 관리수위를 조절한다. 여기서 관리수위는 호 내 수질과 생태적인 문제, 내부개발에 따른 홍수위의 문제 등 여러 문제가 복합적으로 작용하여 결정된다.

1989년 새만금 간척종합개발사업 기본계획 수립 당시, 외조위의 영향을 받는 새만금 간척 지구의 호소 관리수위는 소조평균간조위인 EL. (-) 1.45 m를 감안하여 평상 시 수위가 유지관리 되도록 EL. (-) 1.50 m로 결정되었다(KEI(한국환경정책평가연구원) : Korea Environment Institute[2011]). 이는 홍수기에 EL. (-) 1.10 m~EL. (-) 2.00 m 사이에서 탄력적으로 운용하고, 수자원 확보, 내부개발지 면적 확보, 홍수배제능력, 홍수위 및 홍수지속시간에 의한 배후지 침수 등을 감안할 때 EL. (-) 1.5 m가 토지이용효율 및 유지관리 측면에서 가장 적절한 것으로 판단되었기 때문이다(KRC(한국농어촌공사): Korea Rural Community Corporation[2006]). 이 후 방조제 끝막이 공사가 완료된 2006년부터 2010년까지는 관개기와 비관개기, 평수기와 풍수기에 따라 관리수위를 EL. 0.0 m~EL. 1.2 m로 유지해오다가, 2010년 말부터 2015년까지 계획된 방수제 공사가 경제성과 용이성 측면에서 원활히 진행되도록 EL. (-) 1.6 m로 관리되고 있으나, 수질 및 생태학적 변화 측면에서의 고려는 상대적으로 미미하여 이로 인한 환경적 변화를 고찰하는 것은 중요하다고 할 수 있다.

국내외에서 방조제 및 배수갑문의 운영과 관련하여, 하구호의 수질 및 생태환경이 변화되고 이로 인한 문제점들이 나타났다. 새만금과 유사한 일본의 이사하야 만(Isahaya Bay) 간척지는 방조제 건설 후 수질이 악화되어 수질개선대책을 추진하였으나 목표수질을 달성하지 못하였고(Yokoyama & Kyojuka[2003]), 네덜란드는 델타사업(Delta Works)의 한 부분인 하링블리트 댐(Haringvliet dam with sluice gate)을 건설한 이후 해수 유입이 방지되는 긍정적인 효과를 가져왔으나 유속의 감소로 수질이 심하게 악화되었다(Stuyfzand *et al.*[2004]). 또한 호주에서는 투콤빌(Tuckombil) 수로에 홍수 범람을 방지하기 위해 수문을 건설하였으나, 현재는 관리 시설물들의 노후화와 함께 수질이 급격하게 악화되었다(Richmond River County Council[2007]). 한편 국내의 경우, 방조제 체절 후 농업용수로 활용을 계획했던 시화호는 상류 유역에 공단과 도시가 밀집해 있으나, 환경기초시설이 완공되지 않은 상황에서 담수화를 시작하여 시화호 표층은 저염분층, 저층은 고염분층을 이루는 환원층을 형성하는 등(Park *et al.*[1997]) 수질 오염에 대한 문제가 발생하여, 해수를 유통시키는 것으로 계획이 변경되었다(KRC[2006]).

새만금의 경우는 호 내측의 수위를 관리하기 위해 갑문을 개방하면 유동장의 형성으로 인하여 새만금 방조제 전면의 저층에 침전되었던 오염물을 부유시켜 해수 순환과 유동 및 생태환경에 적지 않은 영향을 미칠 개연성이 있으며(Suh *et al.*[2006a]; Suh *et al.*[2006b]), 새만금 방조제 체절 초기에 가력 배수갑문을 통한 여름철 방류로 인해 거품띠가 발생하여 인근 변산해수욕장에 피해가 보고된바 있다(Kim and Jang[2011]). 현재에는 방수제 공사를 위해 배수갑문 운영을 통한 관리수위를 EL. (-) 1.60 m로 유지하고 있고, 국내외의 배수갑문 또는 수문 운영에 의한 환경적인 문제점들이 보고되고 있으므로, 이들이 주변 환경에 미치는 영향과 이를 최소화하는 방안에 대한 고찰이 필요할 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 새만금 방조제 끝막이 이후 관리수위 운영과 이에 따른 환경변화를 고찰하고, 현재 진행 중인 방수제 공사를 위한 관리수위에 따른 해수 유입 범위를 모의하여 지속적인 해수 유통이 새만금호에 미치는 환경적인 영향을 함께 분석하였다.

2. 연구 지역

새만금 사업은 1991년 11월 방조제 공사 착공을 시작으로 2006년 4월 방조제 최종 물막이 공사가 완료된 이후 2010년 4월 새만금 방조제가 준공되었다. 이 방조제는 행정구역상 군산시, 김제시, 부안군의 일부 및 만경강(북측)과 동진강(남측) 하구를 포함하며, 부안군 변산면 대항리에서 군산 비응도까지 연결된 총 길이 33.9 km인 4개의 방수제와 2개의 배수갑문(신시, 가력)으로 구성되어 있다(Fig. 1). 지형적으로는 새만금 방조제 내측 수심은 0 m~40 m 내외로 분포하며, 만경강으로부터 4호 방조제와 2호 방조제로 이어지는 2개의 수로와 동진강으로부터 가력 배수갑문과 2호 방조제로 이어지는 2개의 수로, 총 4개의 수로가 존재하나, 이러한 수로들을 제외하고는 대체로 평편한 지형을 보인다.

새만금사업 전체 면적은 401 km²으로 새만금호 방수제 공사가 완료되는 시점의 관리수위 EL. (-) 1.5 m를 기준으로 할 때, 자연 상태로

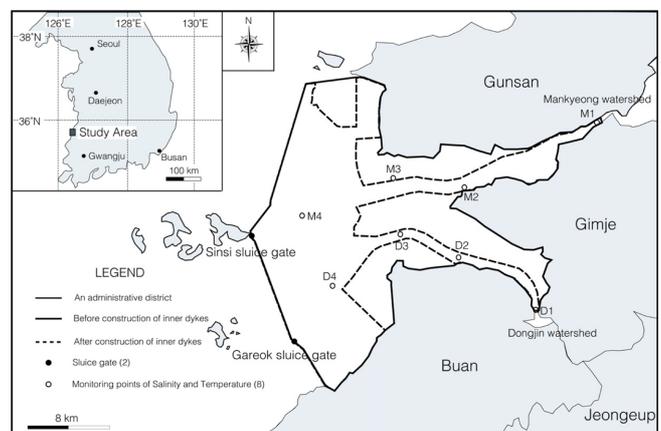


Fig. 1. Locations of the study area and counter facilities (modified from Oh *et al.*[2013]).

노출되는 육지부 면적은 180 km²으로 전체 면적의 45%를 차지하고, 용지로 조성되는 지역(282.9 km²)의 64%를 차지한다(MLTMA (국토해양부): Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs[2011]).

한편 새만금 유역은 만경강 유역, 동진강 유역, 인근의 서해안 일부 유역, 직소천 유역 및 새만금 간척개발지로 구분된다. 유역의 면적은 3,319 km²이고, 그 중 만경강과 동진강의 유역면적은 각각 1,571 km²와 1,034 km²이며, 전체 유역 면적의 78.5%를 차지한다(KRC[2009a]). 또한 만경 유역에 위치한 군산 지역의 기상현황 중 2007년부터 2012년 평균 강수량은 1,349.7 mm이며, 평균 기온은 12.8로 조사되었다.

3. 새만금호 관리수위 변화 과정

3.1 배수갑문 설계 및 운영 방안

담수호의 관리는 첫째, 배후지의 침수분석, 성토제 끝막이 시공 조건 및 비산먼지 등 환경대책에 대한 내용을 포함하여 관리수위를 결정하고 둘째, 이러한 조건별 시기별 장단점을 분석하여 셋째, 수위조건에 맞는 최적의 배수갑문 운영관리지침을 마련하게 되어 있다(Fig. 2). 특히, 배수갑문을 통한 해수유통이 이루어지는 시기의 새만금 수역 배수갑문 작동은 새만금호의 적정수질 유지 및 재해예방, 환경개선, 시공관리 등을 주된 목적으로 실시된다.

새만금의 관리수위는 이와 같이 여러 요인들에 의해 지배를 받으며, 여기서 결정된 관리수위는 배수갑문에 의해 조절된다. 새만금의 배수갑문은 만경 및 동진 유역의 331,900 ha에 대한 홍수 조절과 방조제 끝막이 후 조성되는 담수호의 수위 조절을 통해 배후도시 및 지구 내의 홍수 피해를 최소화하기 위하여 500년 빈도 홍수량을 기준으로 규모가 결정되었다(KRC[2006]). 또한 새만금호 내 담수가 해수로 변화되는 피해를 최소화하여야 할 필요가 있으므로, 배수갑문의 통수단면 규모는 20년 빈도 홍수일 경우, 최저 EL. (-) 1.00 m 까지 48시간 이내, 기준수위까지는 72시간 이내로 하고, 100년 빈도 이상의 홍수일 경우, 허용 담수위 EL. (-) 0.70 m까지는 48시간

Table 1. Water inflow from Mankyong and Dongjin rivers to Saemangeum reservoir depending on flood frequencies

Recurrence interval [year]	Flood [m ³ /sec]	Mankyong river [m ³ /sec]	Dongjin river [m ³ /sec]
20	7,210	4,460	2,750
100	9,410	5,820	3,590
200	10,630	6,575	4,055
500	12,400	7,404	4,936
1,000	13,862	8,568	5,294

이내, 기준수위까지는 72시간 이내에 홍수를 배제할 수 있도록 설계되었다.

유역 내 빈도별 홍수량은 Table 1에 제시되어 있다. 배수갑문 통수단면 검토 범위는 홍수위가 가장 높게 발생하는 조위시간을 기준하여 바닥 표고 EL. (-) 8.00 m~EL. (-) 5.00 m를 0.50 m간격으로, 갑문폭 300 m~1,200 m를 30 m 간격으로하고 조위는 대조(spring tide) 및 소조(neap tide)를 적용하고, 홍수량은 20, 100, 200, 500, 1,000, 2,000, 5,000, 10,000년 빈도에 대한 검토 결과에 따라 바닥 표고와 홍수빈도별 적정 통수 단면을 결정하였다. 하천공사 시 규정을 참고하면, 계획홍수량이 2,000 m³/sec~4,000 m³/sec일 때 갑문폭은 30 m로, 4,000 m³/sec 이상 일 때는 30 m~40 m 범위로 계획하도록 되어있다. 새만금의 경우 배수갑문 바닥 표고별, 갑문폭별로 공사비를 비교하면 바닥 표고 EL. (-) 6.50 m에서 통수단면 전체 폭을 540 m로 하고, 갑문폭을 30 m로 할 때가 가장 경제적인 것으로 분석되었다(Jo[2011]).

3.2 방수제 공사 전 관리수위

새만금 방조제 끝막이 공사 후, 내부개발 착수 전까지는 가력·신시 배수갑문을 해측 조위에 따라 상시 개방하여 해수유통 할 계획이며, 배후지 침수, 담수호 수질, 내부간척지 비산먼지발생 등의 환경문제, 방조제 성토공사 시공 조건 등의 종합적인 검토사항을 고려하여 담수호를 관리·운영하였다. 따라서 새만금 방조제가 체철된 2006년 4월 이후 관개기와 비관개기 동안 EL. 1.00 m 이하로 관리하고, 홍수기 동안은 EL. 0.50 m 이하로 관리하는 한편, 2007년 이후에는 관개기와 비관개기 동안 EL. 0.00 m~EL. 1.20 m로, 홍수기 동안은 2006년과 동일하게 수위를 관리하였다(Table 2).

이 때의 새만금호 예정 수역 수질은 방조제 끝막이 전 5년 간 (2001~2005), Chemical Oxygen Demand(COD)는 1.8~2.0 mg/L, Total Nitrogen(TN)은 0.334~0.375 mg/L, Total Phosphorus(TP)는 0.045 mg/L로 해역수질 II 등급수준을 나타냈으며, 2006년 끝막이 이후 수질은 등락을 거듭하다가 2010년 연평균 해역수질기준 III등급이 유지되었다(KRC[2009b]).

3.3 방수제 공사 중 관리수위

새만금 방수제는 내부의 토지와 수면의 경계를 확정짓는 제방으로써, 홍수로부터 내부 토지를 보호하고 토지의 침식 및 세굴을 방지하는 기능을 수행하며, 전라북도 군산시, 김제시, 부안군 공유수

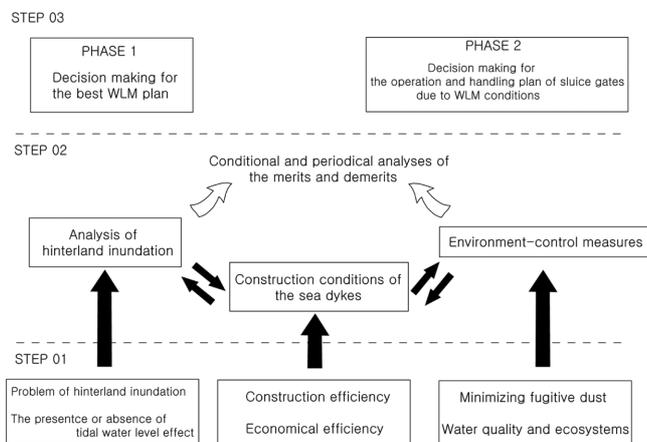


Fig. 2. Flow chart for determining processes of the water level management (WLM) in the Saemangeum reclaimed area.

Table 2. Operations of two sluice gates before construction of the inner dikes

Category		2006		2007~2010
		Irrigation period	Non-irrigation period	
WLM* (EL. m)	Ordinary season	below (+)1.00		(+)0.0~(+)1.20
	Rainy season	below (+)0.50		below (+)0.50
Opening condition of sluice gates		Gareok : normal opening Sinsi : partial opening		Gareok : normal opening Sinsi : normal opening
Seawater in/outflow		normal seawater in/outflow due to tide level		

*WLM refers to Water Level Management

면 일원에 위치한다. 공사 규모는 방수제 11개 공구 총 68.2 km, 기간은 2010년에서 2015년(6개년)까지이다. 새만금 방수제는 만경 및 동진강 구간으로 나뉘며 전자는 31.8 km, 후자는 36.4 km이다. 또한 내부간척지 침수피해 방지를 위해 내부 토지를 조기 개발하며, 새만금 내부개발 종합실천계획에 따라 2010년 7개 공구 방수제를 일괄입찰로 착공하여, 현재 방수제 49 km에 대한 축조 공사가 진행 중이다.

방수제 공사 중의 배수갑문 운영은 새만금호 내 수질오염 방지를 위해 월 2회 대조기 시 가력 및 신시 배수갑문을 개폐하여 대조기 시작일로부터 2회/일에 걸쳐 EL. (-) 1.3 m 까지 해수를 유입시키고, 대조기 잔여일 2회/일에 걸쳐 EL. (-) 1.6 m~EL. (-) 2.2 m까지 일 시적으로 해수를 유통시키고 있다(KRC[2011a]). 이러한 새만금호 내 방수제 공사 중 관리수위 EL. (-) 1.6 m의 결정은 다음과 같은 측면이 고려되었다. 첫째, 경제성과 시공측면으로 관리 수위가 낮으면 경제적으로 유리하다. 관리수위가 상승하게 되면 새만금호 내에서의 준설작업이 육상 준설 방법에서 해상 준설 방법으로 변경되어야 하고, 시공 공법 변경이 수반되어야 한다. 둘째, 비산먼지의 발생과 관련하여, 이들을 줄이기 위해서는 관리수위를 높여 현재 새만금에 드러난 간척지의 면적을 축소시키는 것이 중요하다. 새만금 인근 계화도 사업지구에서는 비산 및 부유 먼지의 발생으로 조성된 논둑과 수로가 매워진 사례가 있으며, 기존의 화용방조제의 경우도 방조제 체절 초기에 드러난 간척지에서 발생한 비산먼지로 인하여 피해 사례가 보고되었다(CIES((사)시민환경연구소: Citizen Institute for Environmental Studies[1998]). 셋째, 수질 및 생태적 측면에서도 관리수위를 높이는 것은 해수유통을 시행하고 있는 현재 실정에서 일시적 수질관리 측면에서는 유리하다. 따라서 공사 중의 관리수위는 상기와 같은 조건을 고려하고, 환경영향을 최소화하는 방안을 검토하여 EL. (-) 1.6 m로 결정되었다(Table 3).

한편 방수제 공사 중 2012년의 호 중앙부 수질은 COD가 0.6~15.4 mg/L, TN이 0.304~3.400 mg/L, TP가 0.030~0.409 mg/L로서 호수 수질등급 Ia ~VI(COD 기준)으로 시기별로 수질 변동 폭이 매우 큰 상태이다(KRC[2012a]). 2010년 11월 방수제 공사를 위하여 단계적으로 수위낮춤에 따라 해수 영향의 감소로 인한 담수의 영향이 증가하였고, 새만금호 상부 지역(심포(M2 인근), 문포~계화(D2 인근)에 형성되었던 정체수역이 호 중앙지역까지 확대되며, 수체적 감소로 인하여 장마철 집중 호우 시 호 전역에서 염분농도 저하현상이 심화되었다(KRC[2012a]).

Table 3. The best water level management(WML) for construction of the inner dikes

WML	EL. (-)	EL. (-)	EL. (-)	remarks
	1.00 m	1.60 m	2.00 m	
Economic efficiency	△	○	◎	◎ : BEST ○ : FAIR △ : POOR
Construction condition	△	○	◎	
Fugitive dust control	◎	○	△	
Water quality and ecosystems	◎	○	△	
Adoption		∨		

3.4 방수제 공사 후 관리수위

새만금호의 담수화는 2020년을 목표로 추진하도록 계획되어 있으며(PMO(국무총리실) : Prime Minister's Office[2011]), 담수호의 수위는 해측 조위, 간척지 표고, 홍수저류능력, 필요저수량의 크기, 물관리방식, 제염방식 및 사수위 등의 여러 인자에 의해 결정된다. 담수호 계획 홍수량 및 배수갑문 통수능력을 고려하여 평상시에는 담수호 관리수위를 EL. (-) 1.50 m로 하고, 홍수기에는 EL. (-) 1.50 m~EL. (-) 2.00 m까지 탄력적으로 운영하도록 계획되었다(KRC[2006]).

4. 결과 및 고찰

4.1 방수제 공사 전후의 환경변화

앞서 언급한 바와 같이 방수제 공사 전은 후에 비해 상대적으로 높은 관리수위로 유지되었기 때문에 해상 시공에 따른 경제적인 문제점이 발생하며, 집중호우 시 담수호 상류부는 하류부에 비해 갑작스런 수위 상승으로 공사 중 피해가 발생되었다. 특히 작업 장비의 침수와 단면 유실 시, 장비 전도사고 등의 안전사고가 우려되었으며, 준설토 단면 유실에 따른 담수호 내 오탕수 발생을 증가시켰다(Fig. 3). 환경적인 측면에서는 2003년부터 2006년 사이 새만금 제 4호 방조제 완공으로 막혀진 만경강 하구역에서 입자성 물질과 유기탄소의 표층농도가 증가하였으며(Park et al.[2009]), 새만금 내부 수역에서의 조석 영향과 저층 퇴적물의 재부유현상은 약해지고, 수중의 부유물질 농도가 급감하였으며, 과거에 전형적인 대조차 연안환경에서 인산염이 일차생산의 제한인자로 작용하여 기수환경으로 전환되었다(Yang et al.[2008]). 또한 이 시기에 배수갑문 주변 공사를 위하여 일시적으로 배수갑문 운영을 중단하여 2006년 8월 가력 배수갑문을 통해 강화된 거품띠가 새만금 방조제 해측 5 km 내외에 위치한 변산해수욕장에 유입되어 누린 색깔과 거품으로 인한 심미적



Fig. 3. (a) An inundated construction equipment and (b) a washed catch canal drain away.

인 문제를 야기했다(Choi *et al.*[2013]).

한편 방수제 공사 위한 관리수위의 하강은 일부 호 내 상류 유역에서의 결빙을 유발하여 2011년 1월에 새만금호 내의 상행이가 이전에 없었던 극저온 환경으로 인하여 249 개체가 동사하였으며(Park *et al.*[2012]), 노출갯벌 증가로 일부 드러난 지역에서 비산먼지가 발생되었으나 육지화 진행과 염생 식물의 파종으로(Sin and Kim[2010]) 이러한 문제는 현재 줄어들고 있는 실정이다. 또한 부분적으로 생성된 웅덩이를 통해 유해 곤충 출현이 예상되며, 섬금류(도요새류)에서 수조류(오리류)로의 종 변화가 가속화되어, 방수제 공사가 진행되는 지역에 드러난 갯벌은 이들의 선호 수심에 종종 맞아 떨어져 수조류의 집중화 현상이 유도되었다(Choi[2011]).

4.2 방수제 건설과 관리수위에 따른 해수 유입범위

새만금호 내에서는 상층과 저층 사이에 염분 성층이 관찰되고 있다. 방조제의 건설로 해수 유입은 줄어들고 1월에서 6월까지 상류 유역으로부터의 담수 유입이 적어, 염분 성층은 잘 나타나지 않지만 7월 및 8월의 집중 강우로 EL. (-) 5 m까지 염분 성층이 나타나고 있는 실정이다(KRC[2012b]), 즉, 인공적인 구조물로서의 방조제의 건설은 새만금호 내에 염분 거동 특성의 변화를 가져오며, 이로 인한 환경 변화를 유발하게 된다. 따라서 새만금호 내 현재 건설되고 있는 또 다른 인공 구조물인 방수제와 이에 따른 관리수위 운영과 관련한 해수유입 범위를 파악하고 예측하는 것은 환경적 측면에서 매우 중요하다고 할 수 있다. 본 연구에서는 방수제 축조 전(2008년, 관리수위 EL. 0.05 m), 방수제 축조 중(2011년, 관리수위 EL. (-) 1.60 m), 방수제 축조 후(2015년, 관리수위 EL. (-) 1.50 m) 및 방수제 축조 후 준설까지 고려(EL. (-) 1.50 m)한 경우를 모의하여 각각에

대한 해수 유입범위를 파악하였다. 각 경우에 대하여 수심은 모두 0.1 m~42.7 m 내외이며, 상류 지역 준설 전 원 지반고가 만경 수역은 EL. (-) 2.3 m~EL. (-) 0.1 m, 동진 수역은 EL. (-) 4.3 m~EL. (-) 0.1 m로 분포하지만(MLTMA[2011]), 준설을 고려한 경우는 최상류 지점(M1과 D1 지점 인근)까지 EL. (-) 5 m로 준설하는 것으로 계획되어 있어, 이로 인한 해수 유입은 상류로 더욱 진행될 것으로 예상된다. 본 연구에서 활용한 수치 모델은 유역과 수역 모델이며, 각각 HSPF(Hydrological Simulation Program Fortran)와 EFDC(Environmental Fluid Dynamics Code)이다. 먼저 만경강과 동진강의 유입 유량과 유입수 수온은 HSPF 모델(2007년~2008년 보정과 2009년~2011년 검정)로부터 산정된 자료(KRC[2012c])를 이용하여 EFDC 모델의 상류 경계 조건으로 할당하였다. 모델링에 적용한 기상 자료는 2008년과 2011년 군산 기상대의 기온, 해면기압, 상대습도, 강수량, 증발산량, 일사량, 풍향, 풍속 및 강수량(KMA(기상청): Korea Meteorological Administration [2012a])이다. 2008년 및 2011년 기상자료는 해당 년도 모델링 수행 시 각각 적용하였으며, 2015년의 경우는 2011년 기상자료를 적용하였다. 또한 수리 변수들에 대하여 검보정(2008년 보정과 2009년 검정)된 모델(Shin *et al.*[2012])과 새롭게 보정된 2011년도에 모델(Oh *et al.*[2013])에 수평 및 수직적으로 격자를 세밀하게 구축하여(Table 4), 수치 모델링을 수행하였다. 이렇게 구축된 방수제 축조 전 2008 모델과 2011년 모델에 대한 8 지점(M1~M4, D1~D4)에서의 염분 보정 결과, 유효화 변수별로 RMSE(Root Mean Square Error)는 각각 0.22~3.41과 0.02~5.28로 나타났으며, AME(Absolute Mean Error)는 0.13~2.78과 0.02~3.91의 범위로 나타나 모의값이 실측값을 잘 반영하는 것으로 평가되었다.

Table 4. Comparison of grid configurations and numerical modeling setups in the previous and this studies

Parameter	Shin et al[2012]	Oh et al[2013]	This study
Scenario	Before construction of inner dikes (2008)	Before construction of inner dikes (2011) / After construction of inner dikes with dredging operations (2015)	Before construction of inner dikes (2008) with Oh <i>et al.</i> [2013]'s scenarios
A number of horizontal cells	2,214	5,919 / 4,025	5,919 / 4,025
A number of vertical cells	10	5	10
Max. / Min. mesh sizes of Δx	355.4 / 315.5 m		250 / 250 m
Time step size	6 sec		5 sec
Period of numerical simulation		365 day	
Vertical coordinate system		sigma-stretching coordinate system	

방수제 건설과 관리수위에 따른 수치 모델링 결과는 Fig. 4에 도시하였으며, 전반적인 염분 유입 범위를 파악하기 위해 평균 염분 분포를 분석하였다. 여름철(7월 15일)에서의 염분 분포는 Fig. 4a~4d 까지 도시되어 있다. 먼저 방수제 축조 전 관리수위 중 2008년(Fig. 4a)을 분석한 이유는 해당 연도의 관리수위가 EL. 0.05 m로 다른 연도에 비하여 높게 유지되고 있으며, 또한 최근 몇 년 동안 가장 강수량이 적은 기간으로(부안기상관측소의 경우, 강수량은 884.0 mm로 2011년 강수량 1237.7 mm에 비하여 매우 작은 값을 기록(KMA[2012b])), 만경 및 동진강 하류로부터 새만금호로 유입되는 유량이 매우 적어 만경 및 동진 수역 상류로 염분 침투가 가장 심화될 것으로 예상되어 이를 다른 경우들과 비교해 보기 위해서이다. 수치 모델링 결과, 방수제 축조 전 2008년(Figs. 4a, 4e)은 다른 모든 경우(Figs. 4b, 4c, 4d)와는 다르게 상대적으로 적은 강수량으로 인한 상류 유입량 감소와 높은 관리수위 운영으로 인하여 여름철에도 높은 염분 분포를 보이고 있다. 하지만 상류 유입량의 증가와 낮은 관리수위 운영으로(Figs. 4b, 4c, 4d) 새만금호 내 전체가 5 이하의 낮은 염도를 보이고 있다. 따라서 현재 방수제 공사 중 새만금호 내 관리수위를 EL. (-) 1.6 m로 관리하고 있는 실정에서 여름철 배수갑문 운영은 만경 동진 상류 유역의 홍수량을 계산하여 미리 관리수위를 EL. (-) 1.6 m~EL. (-) 2.2 m까지 일시적으로 낮추어 탄력적으로 관리하는 것이 합당한 것으로 연구되었다(KRC[2011a]). 한편 겨울철(12월 15일)에 대한 염분 분포는 Fig. 4e~4h까지 도시되어 있다. 겨울철의 경우는 강수량도 적을 뿐 아니라 이로 인해 상류로부터의 담수 유입량이 적기 때문에 해수의 상류 유입이 가장 많이 나타나는 시점이다. 방수제 축조 전 2008년(Fig. 4e)은 2011년(Fig. 4f)에 비하여 전반적으로 높은 염분 농도 분포를 보이며, 특히 신시 및 가력 갑문에서부터 M3와 D3 지점에서 그 특징이 두드러지게 나타난다. 이는 앞서 언급한 바와 같이 2008년의 강수량과 상류 유입량이 적고, 상대적으로 높은 관리수위(EL. 0.05 m)로 인해 해수 유통량의 증가가 원인으로 판단된다. 또한 2008년의 해수 유입은 최상류인 만경(M1) 및 동진(D1) 하구 인근까지 미치고 있는 것으로 모의되었으며, 2011년은 낮은 관리수위(EL. (-) 1.6 m)로 인해 만경 및 동진 수역의 상류 지역 대부분과 가력 갑문 북동 방향으로 노출갯벌이 증가하고 육지화가 되는 것으로 나타났다. 이러한 경우, 호 상류부는 염도가 낮지만 부유물이 감소하고 햇볕이 강하게 되면 녹조현상이 발생할 가능성이 높으며, 호 내 축적된 유기물의 분해에 따른 수질오염도 상승이 예상된다. 방수제 축조 후 2015년(Fig. 4g)은 방수제 축조 전 2011년에 비하여 관리수위가 EL. (-) 1.6 m에서 EL. (-) 1.50 m로 높아져 해수 유입이 상류 방향으로 다소 진행되긴 하지만, 만경 수역의 M2~M3 구간과 동진 수역의 D2~D3구간에서 염분 농도가 2~5 정도 감소하는 것으로 나타났다. 이는 방수제 축조 전 불규칙한 수체의 흐름이 방수제 축조 후 정돈된 유로 단면을 따라 일정하고 빠른 유속을 형성하여 담수의 영향이 확대되기 때문이다(Oh *et al.*[2013]). 한편 방수제 축조 전의 관리수위 EL. (-) 1.6 m(Fig. 4f)에서는 M2 및 D2 인근까지만 유입되던 해수가 방수제 축조 후 준설까지 고려한 경우의 관리수위 EL. (-) 1.5 m(Fig. 4h)

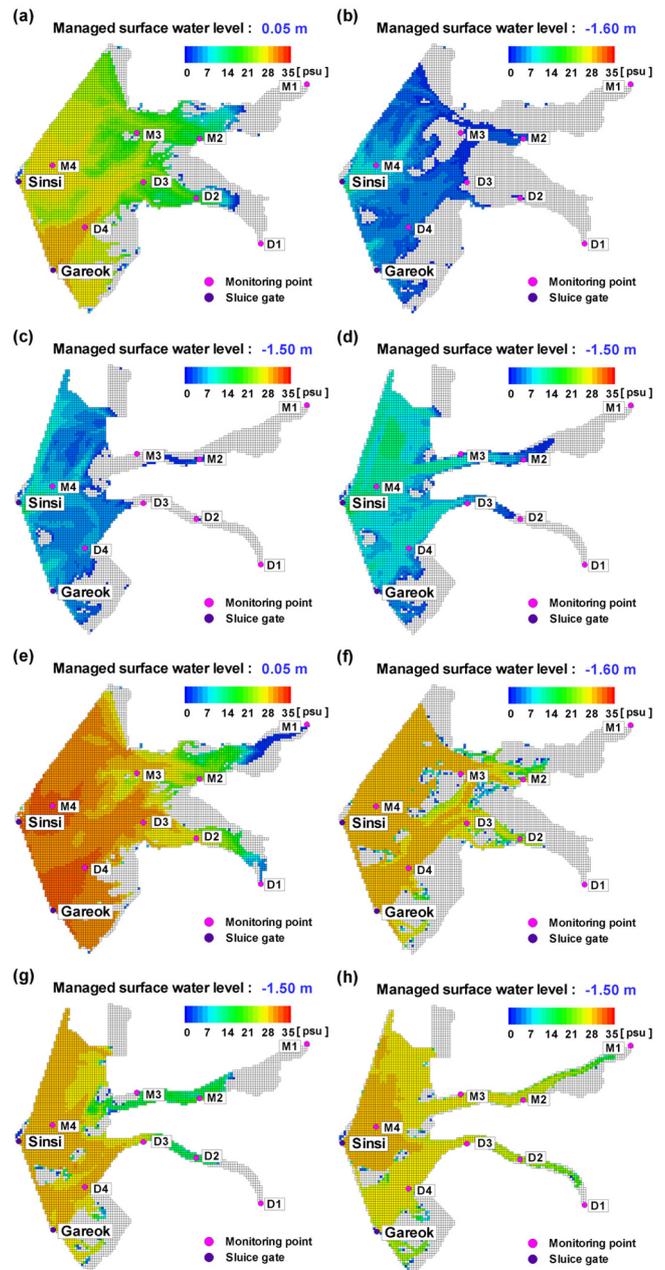


Fig. 4. Salinity distributions before and after constructions of the inner dikes in the summer (from (a) to (d)) and winter (from (e) to (h)) seasons: 2008 ((a) and (e)) and 2011 ((b) and (f)) without inner dikes, 2015 ((c) and (g)) with inner dikes, and 2015 ((d) and (h)) with inner dikes + dredging operations.

에서는 M1 및 D1 인근까지 유입된다. 또한 방수제 축조 후 준설까지 고려한 경우는 방수제 축조 후인 2015(Fig. 4g)년에 비해 M2~M3 구간과 D2~D3구간에서 약 10의 염분 농도 상승이 나타나는 것으로 모의되었다. 이는 상기에 언급한 바와 같이 준설로 인해 최상류 지점까지의 계획 지반고가 EL. (-) 5 m이기 때문이며, 낮은 관리수위라 하더라도 상류로의 해수 유입이 준설 전보다 원활하여 동일지점에서 높은 염분 농도가 나타나게 된다. 수치 모델링 결과, 새만금

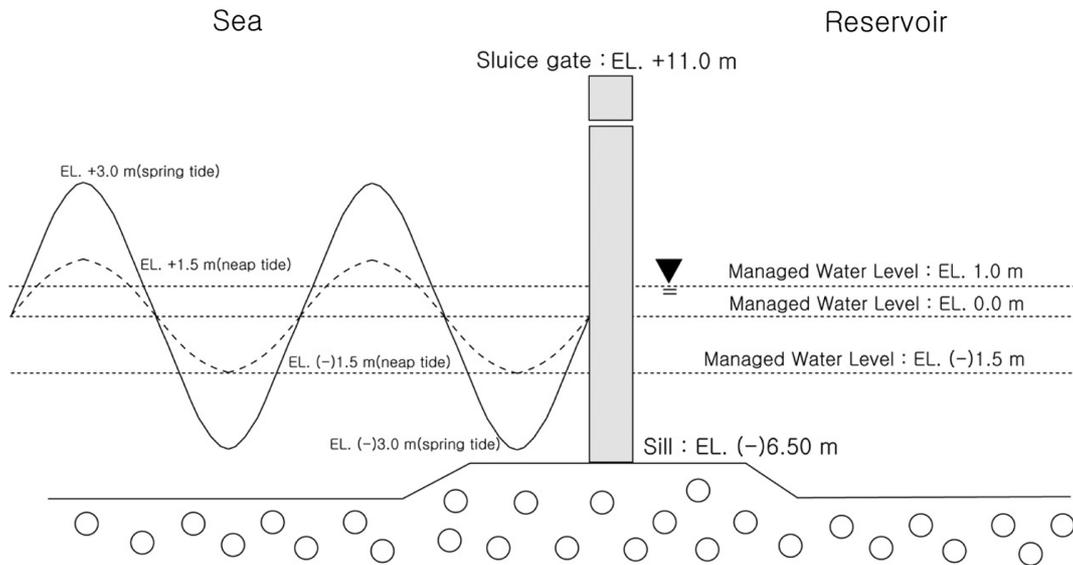


Fig. 5. Ranges of spring and neap tides in Saemangeum area and determination of water level management.

호 내 상류로의 해수 유입 진행 정도는 방수제 축조 유무 보다는 관리수위 및 지형에 영향을 많이 받으며, 염분 농도는 방수제 축조에 따라 더욱 영향을 받는 것으로 나타났다. 따라서 환경변화 측면에서 해수 유통 시 형성되는 염분 성층은 지속적인 수위 관리로 개선할 수 있을 것으로 판단된다.

4.3 지속적인 해수 유통에 따른 환경변화

방수제 공사가 진행되면서 수질 문제로 인해 담수화 결정이 지연 될 경우, 지속적인 해수 유통은 필수적이며, 이러한 상황은 여러 환경변화를 유발하게 된다.

첫째, 해수유통은 구조적으로 수체가 정체되는 구역에서는 수질이 좋지 않을 것으로 예상된다. Fig. 5는 방조제 외해측의 대조기에서 소조기까지의 조위변화를 그래프로 나타낸 것이다. 대조 평균 조위가 EL. (-) 3.0 m~EL. 3.0 m임을 고려할 때, 내측 관리수위를 EL. (-) 1.5 m로 유지할 경우, 대조기나 중조기에는 모두 낙조 시(썰물시) 외해의 조위가 관리수위 이하로 내려가 해수 소통이 다소 원활하지만 소조기인 경우에는 낙조 시에도 외해측의 조위가 관리수위 이하로 내려가지 않는 경우가 있을 수 있으므로 해수 유통량은 극히 제한된다. 이러한 경우 해수 유통이 계속되고 있기 때문에 염수쟁기현상을 통해 저층으로 유입한 해수로 인해 염분 성층이 발생한다면 여름철에 저층에 국부적인 빈산소층이 발생할 가능성이 있다(Yang et al.[2008]). 또한 해수와 담수가 만나는 만경 및 동진강 하구는 상습 정체 수역이 되어 수질 문제에 대한 확실한 해결방안이 없고, 해수 유통량을 증가시키려면 내측 관리수위를 EL. 0.0 m 이상으로 높여야한다. 하지만 상류 침수 문제가 발생하고, 해수면 변동 폭이 하루 동안 2 m 이상이 상승되어 넓은 면적의 갯벌이 침수와 노출이 반복되어 많은 문제가 야기될 수 있다.

둘째, 용수공급측면이 불합리해진다. 용수의 수요·공급 분석(KRC[2011b])에 의하면 새만금 담수호의 총 용수 공급 가능량 380

백만³/년(만경 220, 동진 160 백만³/년)에서 최대 농업용수 필요수량인 215 백만³/년을 제외하면, 165 백만³/년의 잉여수량이 발생하는 것으로 추정되나, 상류 하천에서 공급되는 용수는 하계에 집중되는 우리나라 계절 특성상 연간 안정적으로 농업용수를 공급시키지 못할 가능성이 매우 크다. 또한 만경 및 동진 수역으로의 해수 유입은 물 부족을 유발하기 때문에 새만금 농업용수 공급에 영향을 미칠 것으로 판단된다. 이 외에도 내부개발지의 제염과 생·공용수 공급을 위해서는 추가적인 용수공급이 필수적이다.

셋째, 해수 유통 시에 새만금호 내 담수를 사용할 수 없게 되어 물배분 체계(용담댐, 부안댐 등의 조정)가 예상되며, 이는 지역 간의 물 분쟁이 발생할 가능성이 있다. 안정적인 새만금 자체 용수 공급원을 포기하면서까지 타 지역의 물배분을 요구하는 것은 부적절할 것으로 판단된다.

마지막으로 새만금의 배수갑문은 담수호를 전제로 설계되어 있지만, 지속적인 해수유통은 배수갑문을 경계로 해측과 내측의 수두가 수시로 변하게 하기 때문에 이로 인한 유속 변화가 심하게 나타나 내측 바다보호공의 안정성에 무리가 갈 수 있다. 새만금의 배수갑문을 통과하는 흐름은 난류가 강하고 이로 인한 유속이 증가하므로 지속적인 해수유통이 바다보호공에 미치는 영향에 대한 심도 있는 조사가 필요할 것으로 판단된다. 시화호의 경우 호수의 수질악화를 방지하기 위하여 배수갑문을 당초 계획보다 낮은 빈도로 작동하여 수중콘크리트 타설 등의 바다보호공 보강사례가 있다(Jo et al.[2000]).

5. 결 론

본 연구에서는 새만금 방조제 끝막이 이후로부터 내부개발 완료 시까지의 새만금호 관리수위 결정에 미치는 전반적인 요인들을 파악하였으며, 현재 진행 중인 방수제 공사와 관련된 환경적 문제를 고찰하였다.

(1) 새만금호 관리수위는 배후지 침수분석, 끝막이 시공 여건과 비산먼지 등 환경대책에 대한 내용을 포함하여 수위 조건에 따라 결정되었으며, 새만금 방수제 공사 중 관리수위는 시공성 등을 종합적으로 검토하여 EL. (-) 1.60 m로 계획되어 진행되고 있다.

(2) 방수제 공사 완료 후 관리수위는 평상 시, 수위가 유지 및 관리되도록 EL. (-) 1.50 m로 결정되었으며, 홍수기에는 EL. (-) 1.10 m~EL. (-) 2.00 m 사이에 탄력적으로 운용하여, 재해를 방지하는 것이 필요하다. 이는 수자원 확보와 내부개발지 면적 확보, 홍수위 및 홍수지속시간에 의한 배후지 침수 등을 감안할 때 EL. (-) 1.5 m가 토지이용효율 및 유지관리 측면에서 가장 적절한 것으로 판단된다.

(3) 새만금 방수제 공사 전후 환경변화

방수제 공사로 이전 새만금 내부 수역은 기수환경으로 전환되었으며, 새만금 방조제가 체질 직후인 2006년 8월에 가력 배수갑문을 통해 강화된 거품띠가 인근 해수욕장에 심미적인 영향을 미쳤다. 방수제 공사 이후에는 관리수위의 하강으로 호 내 상류 지역이 일부 결빙되어 새만금 외해에서 유입된 상랭이가 동사하는 사례가 발생하였으며, 방수제 공사로 인하여 생긴 웅덩이를 통해 유해 곤충 출현이 예상되고, 조류는 섭금류(도요새류)에서 접차로 수조류(오리류)로 바뀌고 있으며 방수제 공사가 진행되는 갯벌에 수조류 집중현상이 유도되었다.

(4) 방수제 건설과 관리수위 변화에 따른 해수 유입 범위

방수제 축조 전 2008년은 2011년에 비하여 전반적으로 높은 염분 농도 분포를 보이며, 2011년은 낮은 관리수위(EL. (-) 1.60 m)로 인해 만경 및 동진 수역의 상류 지역 대부분과 가력 갑문 북동 방향으로 노출갯벌이 증가하고 육지화가 되는 것으로 나타났다. 이러한 경우, 호 상류부는 염도가 낮아진다. 방수제 축조 전 2011년은 방수제 축조 후 2015년에 비하여 해수 유입이 상류 방향으로 약 1.2 km 진행되는 것으로 모의되었다. 한편 방수제 축조 후 준설까지 고려한 경우, 방수제 축조 후인 2015년에 비해 약 10 정도의 염분 농도 상승이 나타나며, M1 및 D1 부근까지 해수가 유입되고 있는 것으로 모의되었다. 수치 모델링 결과, 새만금호 내 상류로의 해수 유입 진행 정도는 방수제 축조 유무 보다는 관리수위 및 지형에 많은 영향을 받는 것으로 나타났다.

(5) 지속적인 해수 유통에 따른 환경변화

해수유통은 구조적으로 수체가 정체되는 구역에서는 수질이 좋지 않을 것으로 예상되며, 담수화가 지연이 되는 경우에 새만금호 내 용수공급 측면에 불리하고, 향후 물배분 체계(용담댐, 부안댐 등)의 조정이 예상되며, 새만금 배수갑문의 경우 담수호를 전제로 설계되어 있어 배수갑문 인근의 새만금호 측 바닥보호공에 영향을 미칠 것으로 판단된다.

(6) 방수제 공사 중 배수갑문 운영과 수질개선 방안

장마철 이후 새만금호 상류부는 부유물이 감소하여 햇볕이 강하게 되면 녹조가 발생할 가능성이 높다. 또한 여름철 가력 배수갑문의 개폐로 인한 거품띠 발생 문제는 여름철 해수욕장 개장 기간 동안 홍수기를 제외하면 신시 배수갑문으로만 해수를 유통하여 예방할 수 있을 것으로 보인다. 배수갑문은 새만금 내측의 담수화를 전

제로 설계되었기 때문에 홍수량을 배제하기 위한 시설로써 사용되어 지속적인 해수 유통은 배수갑문의 노후화를 촉진할 것으로 판단되므로 이에 대한 지속적인 관찰이 필요할 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 한국농어촌공사 농어촌연구원의 2012년도 새만금 수질예측 모델 연구의 연구지원에 의해 수행되었습니다(SH-01-11-06-12). 아울러 본 연구의 심사 과정에서 발전적인 조언과 비판을 해주신 익명의 심사자님들께 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

- [1] Choi, J.H., 2011, "Management practices for birds associated with changes of water level management in Saemangeum area", Rural and Env. Eng. J., Vol 113, pp. 90-101.
- [2] Choi, J.H., Oh, C.S., Cho, Y.K., Kong, B.S. and Park, B.J., 2013, "Occurrence of Form Tail Cased by Sluice Gate Opening and Prevention Method at Saemangeum Sea Dike", Proceedings of the Korean Association of Ocean Science and Technology Societies, Jeju, Korea.
- [3] Citizens Institute for Environmental Studies (CIES), 1998, "Contiguity crops damage cause searching examination study at Shihwa lake: Final report".
- [4] Jo, J.H., 2011, "Roles and functions of Saemangeum sluice gates", Rural and Env. Eng. J., Vol 110, pp. 81-95.
- [5] Jo, J.H., Park, Y.J. and Park, S.H., 2000, "Estimation of rock erodibility due to energy dissipation of inflow passing through the sluice gate of seadike", J. Kor. Water Res. Assoc., Vol 33, No. 2, pp. 237-245.
- [6] Kim, T.R. and Jang, S.W., 2011, "Examination of the ground remote monitoring system for coastal environmental elements-Marine radar and camera system", Kor. J. Remote Sensing, Vol. 27, No. 4, pp. 403-410.
- [7] Korea Environment Institute (KEI), 2011, "A research on environment-friendly operation and management of Saemangeum sluice gates for water quality improvement".
- [8] Korea Meteorological Administration (KMA), 2012a, "Observation data of Gunsan meteorological station", <http://www.kma.go.kr>.
- [9] Korea Meteorological Administration (KMA), 2012b, "Observation data of Buan meteorological station", <http://www.kma.go.kr>.
- [10] Korea Rural Community Corporation (KRC), 2006, "Environmentally oriented operation and management of Saemangeum sluice gates", KRC publication No. 04-1-09.
- [11] Korea Rural Community Corporation (KRC), 2009a, "Ecological changes in the Saemangeum water and reclaimed land areas (IV)", KRC publication No. SH-01-04-08-09.
- [12] Korea Rural Community Corporation (KRC), 2009b, "Report for water quality monitoring network in Saemangeum reservoir", KRC publication.

- [13] Korea Rural Community Corporation (KRC), 2011a, "Submission of opinion about a study on sluice gates", personal communication.
- [14] Korea Rural Community Corporation (KRC), 2011b, "Review of agricultural water supply programs in Saemangeum area", personal communication.
- [15] Korea Rural Community Corporation (KRC), 2012a, "Post-environmental impact investigation report", KRC publication.
- [16] Korea Rural Community Corporation (KRC), 2012b, "A prediction and management plan for salinity transport with additional dredging operations in Saemangeum reservoir", KRC publication No. SH-04-07-01-12.
- [17] Korea Rural Community Corporation (KRC), 2012c, "Model study on water quality for Saemangeum water area", KRC publication No. SH-01-11-06-12.
- [18] Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (MLTMA), 2011, "Stabilized grantee scheme for dredging reclamation soil in Saemangeum area", Publication No. 11-1611000-001718-01.
- [19] 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 reservoir", *J. Env. Sci.*, Vol. 22, No. 9, pp. 1115-1129.
- [20] Park, J.K., Kim, E.S., Kim, K.T., Cho, S.R., Song, T.Y., Yoo, J.K., Kim, S.S. and Park, Y.C., 2009, "Characteristics in organic carbon distribution in the Saemangeum area during the construction of artificial sea dike, Korea", *J. Kor. Soc. Mar. Env. Eng.*, Vol. 2, No. 2, pp. 75-83.
- [21] Park, K.J., An, D.H., Lim, C.W., Lee, T.H. and Kim, D.N., 2012, "A mass mortality of the finless porpoise *Neophocaena asiaeorientalis* at a dike of the Saemangeum sea: Possible effects of unusually low temperatures", *Kor. J. Fish. Aqu. Sci.*, Vol. 45, No. 6, pp. 723-729.
- [22] 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 reservoir shihwa", *J. Kor. Soc. Ocean.*, Vol. 2, No. 2, pp. 53-68.
- [23] Prime Minister's Office (PMO), 2011, "Saemangeum Master Plan", PMO publication No. 11-1101000-000038-01.
- [24] Richmond River County Council, 2007, "Final report for Tuckombil Canal management structure review of gate alternative", GHD Pty Ltd. No. 21-15892-128245, Sydney, Australia.
- [25] Shin, Y.R., Jung, J.Y., Choi, J.H. and Jung, K.W., 2012, "Hydrodynamic modeling of Saemangeum reservoir and watershed using HSPF and EFDC", *J. Kor. Soc. Water Env.*, Vol. 28, No. 3, pp. 384-393.
- [26] Sin, M.H. and Kim, C.H., 2010, "Traits of water level control by sluice gates and halophyte community formation in Saemangeum", *Kor. J. Env. Eco.*, Vol. 24, No. 2, pp. 186-193.
- [27] Suh, S.W., Cho, W.H. and Lee, H.Y., 2006a, "Simulation of gate operations on Saemangeum reservoir to maintain target water level", *The Sea: J. Kor. Soc. Ocean.*, Vol. 11, No. 4, pp. 133-144.
- [28] Suh, S.W., Cho, W.H. and Yoo, G.S., 2006b, "Simulation of mixing transport on inner reservoir and influence impacts on outer region of the Saemangeum effluents caused by gate operation", *J. Kor. Soc. for Mar. Env. Eng.*, Vol. 18, No. 1, pp. 43-52.
- [29] 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", the 18th Salt Water Intrusion Meeting (SWIM), Cartagena, Spain, pp. 665-678.
- [30] Yang, J.S., Jeong, Y.H., Ji, K.H., Kim, H.S., Choi, J.H. and Kim, W.J., 2008, "The early-stage change of water qualities after the saemangeum sea-dike construction", *J. Kor. Soc. Mar. Env. Ener.*, Vol. 11, No. 4, pp. 199-213.
- [31] 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.

2013년 9월 5일 원고접수

2013년 10월 16일(1차), 2013년 11월 19일(2차) 심사수정일자

2013년 11월 20일 게재확정일자