

새만금호 내 밀도 성층 변화 고찰

오찬성 · 최정훈[†]
한국농어촌공사 농어촌연구원

Consideration on Changes of Density Stratification in Saemangeum Reservoir

Chan-Sung Oh and Jung-Hoon Choi[†]

Future Policy Research Group, Rural Research Institute, Korea Rural Community Corporation, Ansan 426-908, Korea

요 약

2010년 11월부터 새만금 내부개발을 위한 단계적 관리수위 적용이 실시되었으며, 이에 따른 수온 및 염분 변화 등을 파악하고자 현장 수질 모니터링 보완에 대한 필요성이 대두되었다. 한국농어촌공사에서는 월 3~4회에 걸쳐 총 25개 지점에서 염분 및 수온 자료를 관측·분석하고 있다. 본 연구에서는 상기 자료를 활용하여 계절적 성층수괴 분포 특성을 연도별로 비교하였으며, 관측한 자료는 크리깅을 이용하여 그 분포 특성을 파악하였다. 이 때 수온 및 염분 자료를 통한 σ_t 와 성층계수를 함께 계산하였으며, 여러 관측 지점 중 M4와 D4 지점을 선정하여 월별 수직적인 수온, 염분 및 σ_t 변화 양상을 분석하였다. 2011년 및 2012년의 수온-염분 모니터링 비교 결과, 수온은 두 기간 동안 수직적 성층 현상은 여름철에 일시적으로 발생하였으며, 수층 상·하 간의 온도차는 약 2~3 °C로 성층 강도는 크지 않은 것으로 판단된다. 염분 농도는 표층에서 저층으로 갈수록 염분 농도가 높아지며, 여름철 표층에서 낮은 염도를 보이는 동일한 경향을 갖는다. 하지만 전반적으로 2012년의 염분 농도가 2011년에 비해 높은 분포를 보이며, 수심 5 m 이내에서 농도가 급변하는 현상이 나타난다. 따라서 밀도 변화는 주로 풍수기 기간에 집중되는 현상이 나타나, 성층현상은 하구 지역의 여름철 상류유입량에 매우 민감하게 반응하는 것으로 나타난다.

Abstract – The comprehensive master plan in November 2010 on Saemangeum internal development has been released, and there is a need for complementary measures related to in-situ monitoring methods in order to acquire water temperature (T) and salinity (S) data. Thus, these data are monitored and analyzed by Korea Rural Community Corporation continuously. The purposes of current study are to evaluate the distributions of seasonal T and S, σ_t , and stratification parameter and to compare annual stratification system in 2011 and 2012. To achieve these objectives, monthly vertical changes of T, S, and σ_t , which are reproduced by a kriging technique, have been analyzed. In summer, the temperature difference between surface and bottom layers varies from 2 to 3 °C, and the stratification of T is considerably weak. The stratification of S occurs abruptly within depth of EL. (-)5 to EL. (-)10 m. Therefore, stratification is induced by sudden increasing of water inflow amount due to a localized down-pour during the rainy season, and these stratification processes are strongly influenced by inflowing a fresh water from watersheds in estuary environment.

Keywords: Saemangeum internal development(새만금 내부 개발), in-situ monitoring of water temperature and salinity(현장 수온 및 염분 모니터링), stratification parameter(성층 계수), estuary environment(하구 환경)

1. 서 론

새만금 사업이 진행되는 연구 지역 상류는 전라북도 군산시, 김제시 및 부안군을 포함하고 있으며, 대규모의 농경지, 축산시설, 도

십지 및 공단 등이 운영되고 있다. 현재 환경부는 새만금호 수질개선에 선대책을 위하여 상류 유역의 오염원을 줄이기 위한 새만금 유역 수질종합대책을 시행 중에 있다. 한편 새만금호 내에서도 2006년 4월 새만금 방조제 연결공사가 완료된 이후, 방조제 내·외측을 통한 제한된 해수유통과 바람 영향, 호 내 담수 체류시간이 증가 등

[†]Corresponding author: cjh5181@ekr.or.kr

의 영향에 따라 새만금호 수질에 영향을 주고 있다. 게다가 당초 새만금의 토지 이용은 농업용지로 대부분 이용될 예정이었기 때문에 새만금호의 수질은 농업용수 수질기준으로 맞추어져 있었지만 새만금 토지 이용에 관광, 생태 및 환경용지가 추가됨에 따라 새만금호 수질의 질적 향상이 더욱 더 요구되고 있다(KRC(한국농어촌공사): Korea Rural Community Corporation[2011a]). 이에 따라 2010년 11월 내부개발이 본격화되고 관리수위 운용 실시로 염분 변화를 비롯한 현장수질모니터링 강화 필요성 대두되고 있는 실정이다.

새만금호 내 관리수위는 방조제 끝막이 공사가 완료된 2006년부터 2010년까지는 관개기와 비관개기, 평수기와 풍수기에 따라 관리수위를 EL. 0.0 m~EL. 1.2 m로 운영(Choi *et al.*[2013])해오다가 새만금호 내부 방수제 공사의 원활한 진행을 위해 EL. (-)1.6 m 유지하고 있다. 하지만 앞서 언급한 바와 같이 한정된 해수유통 및 담수 체류시간 증가와 함께 낮은 관리수위 운영은 수질 및 생태학적인 환경 변화를 야기할 수 있다. 특히 이러한 환경에서 형성되는 밀도 성층은 하구 또는 연안에서 표·저층 간 수온, 염분 및 영양염의 이동을 제한하므로 저층에서 빈산소층을 형성하게 되어 수질 오염을 가속화시킬 수 있다. 하구에서 바람, 조류, 해저면 마찰 등이 성층을 약화시키며, 일사, 담수 유입 및 강수 등은 수직 성층을 유발하게 되는데 이들의 상호작용에 따라 나타나는 밀도 성층(Kim *et al.*[2006])은 국내 여러 지역에서 많은 연구가 지속되고 있다. An[2001]과 Kim and Kang[2013]은 각각 대청호와 합천호에서 수온 성층화는 호 내로 유입되는 밀도 높은 유입수와 바람 및 일사량이라고 언급하였으며, 하구와 인접한 해역에서의 밀도 성층은 주로 해역 또는 내륙으로부터의 조류나 담수 유입에 지배적인 영향으로 받는 것으로 보고하고 있다(Choo *et al.*[1997]; Suh *et al.*[2010]; Kang *et al.*[2011]; Kim *et al.*[2013]). 한편 새만금과 유사한 시화호에서도 장기간의 수온 및 염분 변화 자료를 활용하여 물리적인 특성 변화를 파악하였다. 시화호는 과거 해수의 순환이 차단된 끝막이 공사 후 수직적으로 강력한 염분 의존형 밀도 성층에 의한 2층 구조(two-layered system)를 보이고 있으나(Park *et al.*[1997]), 배수갑문의 운용 및 조력발전소 가동으로 해수의 유출입이 활발해짐에 따라 성층이 크게 약화되고 있는 것으로 보고되었다(Choi *et al.*[2000]; Choi and Kim[2001]; Kang *et al.*[2013]). 새만금의 경우도 4호 방조제 차단 이후부터 신시·가력 개발구간 차단 이전까지 새만금 해역에서 밀도 성층의 계절 변동 양상을 파악하였으며, 그 결과 하천 유량에 따라 성층 강도가 다양하게 변한다고 하였다(Kim *et al.*[2006]). 또한 새만금 방조제 완공 후 조석 영향 감소에 따른 연직 혼합 능력 감소로 밀도성층이 발달하며, 이로 인한 하천 유량 영향을 상대적으로 크게 받으면서 해수와 담수의 염분 차이에 의한 염분층기 구역이 만경·동진강 하구역 입구까지 나타난다고 하였다(Suh and Lee[2011]).

새만금과 같이 하폭이 넓고 수심이 낮은 미국의 Alabama 주의 Mobile Bay에서는 하천 유량과 바람의 속도에 성층은 주로 영향을 받으며, 상기 원인의 상대적 크기에 따라 그 강도가 수일에서 수개월 주기의 시간 변동이 나타날 수 있다(Schroeder *et al.*[1990]). 또

한 적절한 수질 운영을 통한 농업용수 확보 측면에서 계절별 담수 유입 및 해수유통량 변화에 따라 그 성층 순환 양상이 매우 다르므로 장기간의 수온 및 염분 관측은 필수적이라 할 수 있다. 또한 향후 새만금호 내 수질에 지대한 영향을 미칠 것으로 예상되는 성층에 대한 모니터링은 지속적으로 수행되어야 할 것으로 사료된다. 따라서 본 연구에서는 장기적인 관점에서 새만금 수역 특성과 관련한 실시간 관측자료를 분석하고, 새만금 내부 개발의 본격화와 관리수위 적용이 수질에 미치는 영향을 파악하는 등 장래 농업용수 확보를 위한 기초자료를 구축하기 위하여 2011년부터 2012년까지 한국농어촌공사(KRC[2011b, 2012])에서 관측한 수온 및 염분 자료를 이용하여 계절별 성층 수괴 분포 특성을 연도별로 비교하였으며, 관측한 자료는 크리깅 기법을 이용하여 그 분포 특성을 파악하였다. 이 때 수온 및 염분 자료를 통한 σ_t 와 성층계수를 함께 분석하였다.

2. 연구 지역 및 방법

2.1 연구 지역

연구 지역은 군산시를 비롯한 4개의 시와 1개의 군이 인접하고 있으며, 유역의 주하천인 만경강과 동진강이 여러 지류와 합류한 후 새만금호로 유입하고 있다(Fig. 1). 하천 주변으로는 도시 및 산업 지역뿐 아니라 대규모의 농경 및 축산지역의 활성화로 점 및 비점오염원이 산재되어 있어 다양한 오염배출 특성을 보이고 있다. 또한 2010년 4월 준공된 33.9 km의 방조제와 새만금호 내부 수위 조절 및 적정 수질 유지를 위해 현재 운영 중인 가력 및 신시배수 갑문으로 인하여 개방해역이었던 과거와 달리 체류시간의 변화와 상류로부터의 유입량과 수질 변화, 배수갑문 운영 이력에 따라 호 내 수리동역학적 특성 변화는 크게 영향을 받고 있다. 지형적으로도 배수갑문 인근을 제외하고 모든 수심은 0~10 m 내로 낮게 분포하고, 경사도는 1° 이하의 지역이 전체면적의 90% 이상을 차지하므로(Oh *et al.*[2013]), 이 또한 호 내 환경적 변화를 유발할 요인 중 하나로 판단된다.

2.2 연구 방법

한국농어촌공사 새만금사업단에서는 내부개발 본격화, 관리수위 운영 등 공사로 인한 수질영향을 파악하고, 장래 농업용수 확보를 위한 기초자료를 확보하기 위하여 새만금 호 내 수질 9지점, 수온 및 염분 25개 지점(Fig. 1)에서 모니터링을 수행하고 있다. 본 연구에서는 새만금사업단에서 측정한 2011년 1월부터 2012년 12월, 총 2년 동안(3~4회/월 조사)의 수온 및 염분 자료를 활용하여 계절적 성층수괴 분포 특성을 연도별로 비교하였다. 이 때 수심별 염분 및 수온을 측정하기 위해서 YSI사의 CastAway-CTD 장비를 사용하였으며, 대표지점인 M2에서 M4까지의 측정심도는 각각 최대 3 m, 4 m, 10 m이며, D2에서 D4까지의 측정심도는 각각 최대 4 m, 3 m, 10 m 내외이다(Fig. 1). 연구지역의 밀도 성층 분석을 위하여 2011년과 2012년의 기상 특성 및 하천 유입량을 분석하였고, 호 내에서

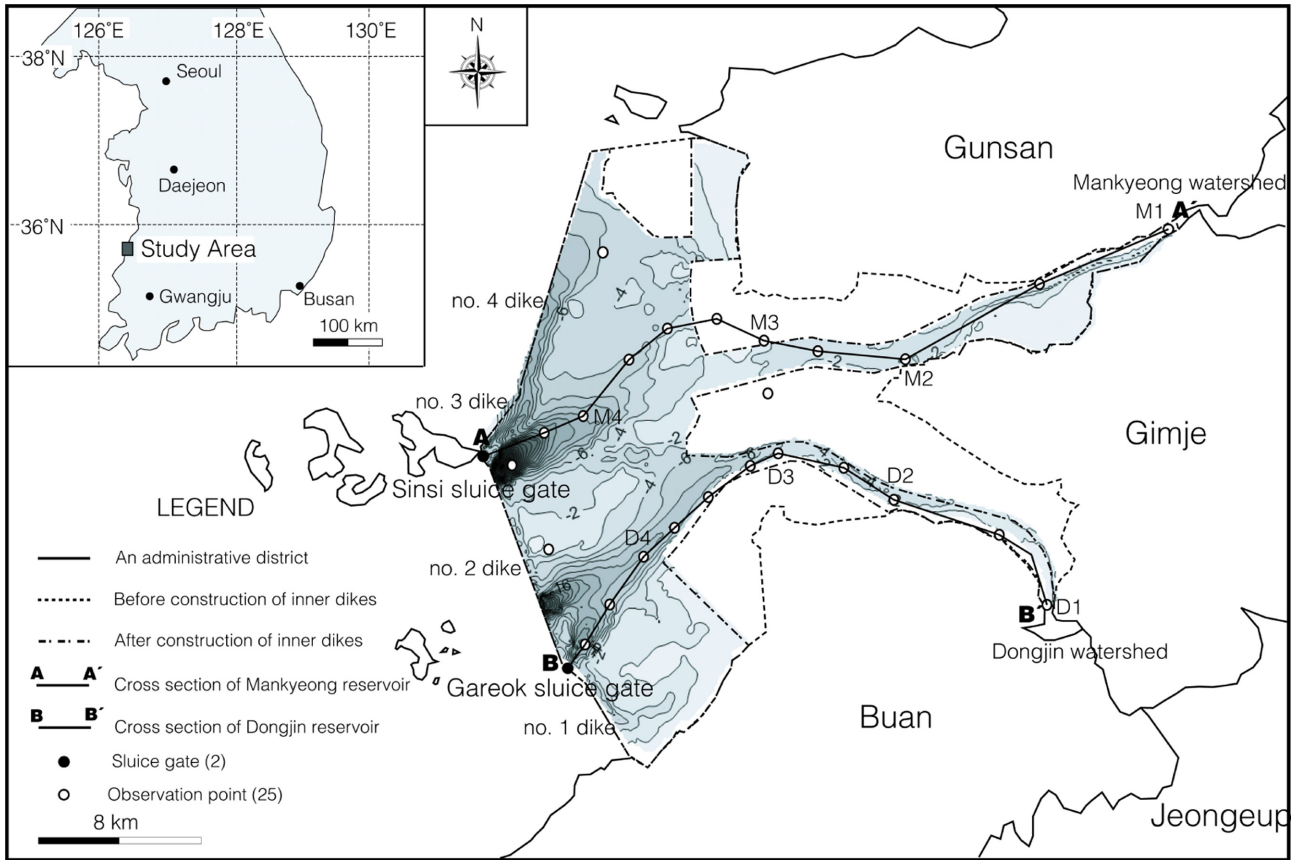


Fig. 1. Locations of the study area and water depth distribution with cross section lines of A-A' and B-B' for stratification analysis.

관측한 염분 및 수온 자료는 측정 날짜에 따라 측정 위치와 심도가 불규칙하므로 지구통계학 방법 중 주로 활용되는 크리깅(Kriging) 기법을 이용하여 그 분포 특성을 파악하였다. 모든 수심에서 측정된 수온 및 염분 자료를 통한 σ_t (sigma-t)와 성층계수를 함께 산출하였으며, 이 중 σ_t 는 현장 수심별로 관측된 수온-염분 간 등밀도선을 표기하고 분석하기 위해 산출하였으며, 여러 대표관측지점 중 가장 수심이 깊고 관측 자료가 많은 M4와 D4 지점을 선정하여 월별 수직적인 수온, 염분 및 σ_t 변화 양상을 분석하였다.

3. 연구 결과

3.1 새만금 기상 특성 및 하천 유입량

새만금 상류 유역의 기상자료는 기상청(www.kma.go.kr)의 전주 기상관측소부터 수집하였으며, 수집 항목은 강수량, 기온, 바람 등이다. 2011~2012년의 기간 동안 전주기상관측소 자료의 월 강수량, 월평균 기온, 월평균 풍속 및 월 일사량을 각각 Fig. 2a, b, c 및 d에 도시하였다. 전주기상관측소 자료의 2011년과 2012년의 연강수량은 각각 1621.8 mm와 1359.7 mm이며(Fig. 2a), 전자는 7월과 8월에 강수가 집중되는 현상이 나타나고 후자는 7~9월에 고루 집중되는 특성이 나타난다. 평균 기온(Fig. 2b)과 풍속(Fig. 2c)은 두 해당 연도에 각각 13.2 °C와 1.9 m/s로 동일하게 나타났고, 월 풍속은 1월부터 4월

까지는 강하고 8월부터 겨울까지는 점차 약해지는 특성을 보인다. 월 일사량(Fig. 2d)의 경우, 2011년과 2012년 모두 3~6월 가장 많은 것으로 나타났으며, 연도별 평균 일사량은 각각 13.6 MJ/m²과 13.3 MJ/m²으로 관측되었다. 전반적으로 해당 연도의 기상 특성은 강우량을 제외하고 거의 동일한 패턴을 보이는 것으로 조사되었다.

새만금 수역 내 수리동역학적 특성은 만경강 및 동진강 하구로부터 새만금호로 유입되는 하천유량에 크게 영향을 받는다. 따라서 이에 대한 영향을 파악하기 위해서는 하구별 유입유량 특성 분석(Fig. 2e)이 필요하고, 본 연구에서는 환경부 수질유량측정망시스템의 총량관측지점, 만경B와 동진A 지점을 선정하였다. 만경B 지점의 2011년 관측 유량은 4.32~77.61 m³/s이며, 2012년은 4.27~392.57 m³/s로 관측되었다. 연도별로 여름철 집중호우에 따른 하천 유량이 급증하는 추세를 보이고 있다. 한편 동진A 지점의 2011년 유입유량 범위는 2.61~56.55 m³/s이며, 2012년은 1.85~250.33 m³/s이다. 앞서 언급한 바와 같이 2011년의 강수량은 2012년에 비해 300 mm 정도 크고, 그 외의 다른 기상 조건은 비슷함에도 불구하고 총량관측지점에서의 측정된 유량은 2012년도가 2011년에 비해 월 평균 3배 내외 큰 것으로 관측되었다. 만경강 유역의 물의 흐름은 만경강 분류에 소양천, 전주천, 익산천, 탐천 등의 지천과 용담댐 방류량이 합류되어 새만금호 내로 방류되게 되는데, 이 중 주요 외부유입 수원은 용담댐이다. 2011년과 2012년의 용담댐 방류량(KRC[2013])은 각각

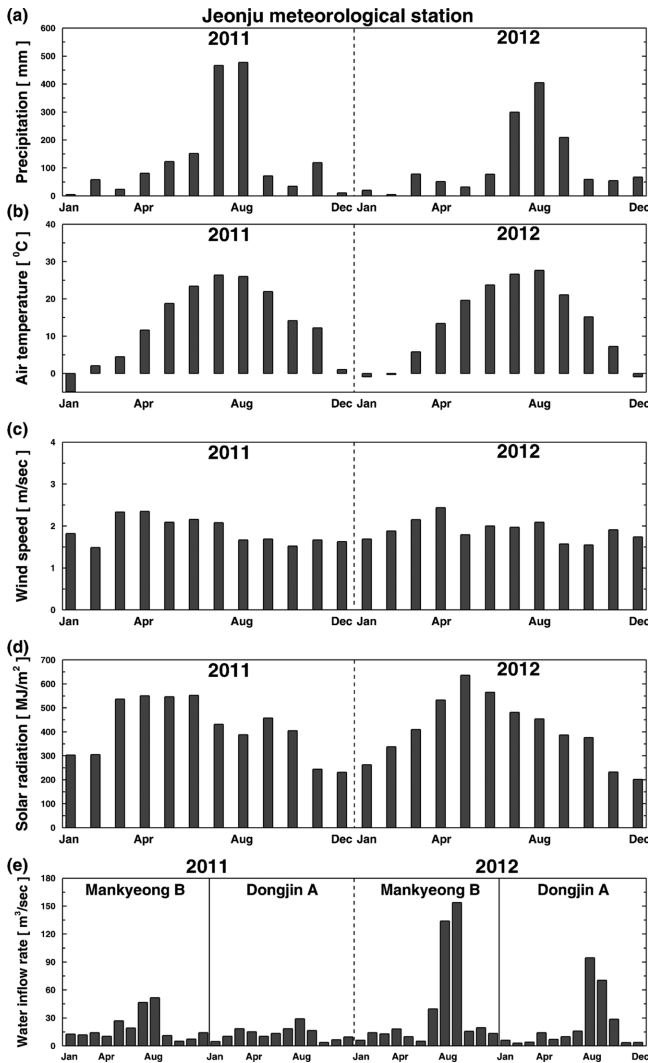


Fig. 2. Annual comparisons of meteorological data and water inflow rate in 2011 and 2012: (a) monthly precipitation, (b) monthly mean air temperature, (c) monthly mean wind speed, (d) monthly solar radiation and (e) water inflow rate at Mankyeong B and Dongjin A.

$946.4 \times 10^6 \text{ m}^3$ 과 $828.9 \times 10^6 \text{ m}^3$ 이며, 동진 유역도 마찬가지로 주요 외부유입 수원인 섬진강댐 방류량(KRC[2013])은 각각 $851.8 \times 10^6 \text{ m}^3$ 과 $723.1 \times 10^6 \text{ m}^3$ 로 관측되어 이 또한 2011년의 방류량이 더 크게 조사되었다. 즉, 새만금 유역에서는 강수량과 세부 유역(만경 및 동진) 간 최상류 유입량의 변화가 유역 하구 말단 유입량 변화에 직접적인 영향을 미치는 것은 아니라 유역 내 복잡한 용·배수체계와 맞물려 복합적인 특성의 결과로 사료되므로, 향후 이에 대한 세부 조사를 통한 원인 규명이 수반되어야 할 것으로 판단된다.

3.2 새만금호 내 유동특성

새만금호 내 유동 특성은 성층 분포를 파악하고 이해하는데 주요 기초자료가 되며, 이에 대한 연구는 최근까지 이루어지고 있다(Suh *et al.*[2010]; Suh and Lee[2011]; KRC[2011a]; Yoo *et al.*[2012];

KRC[2013]; Oh *et al.*[2013]). KRC[2011]는 새만금호 관리수위를 -1.6 m로 유지하는 조건에서 새만금호 내 유동을 모의하였다. 모델 구동에 따른 해수의 흐름 분석결과, 가력갑문을 통하여 들어온 해수는 지형적 특성상 동진 수역 상류 유역까지 곧바로 영향을 미치는 반면, 신시 갑문에서 유입된 해수는 만경수역 상류로 유입되는 길목의 얇은 수심(M3 지점)에 의해 물의 흐름이 선회하여 새만금호 북측 부분을 돌아 만경강 유입부 쪽으로 올라가는 흐름을 나타낸다고 보고하였다. KRC[2013]은 새만금호 내 유동 특성을 해수 유입과 담수배제의 두 경우로 나누어 유동해석 계산을 실시하였다. 해수유입 시, 신시갑문으로부터 유입되는 해수는 만경강 하구로 밀려 이동하지만 가력갑문으로부터 유입되는 해수는 M2 지점 5 km 하류에서 분기되어 만경 및 동진 하구로 이동하는 양상을 보인다. 한편 담수배제 시는 해수유입 시와는 반대의 유동현상을 보여준다고 보고하였다. 특히 Suh *et al.*[2010]은 배수갑문 운영 영향으로 평상시 호 내부 중앙부 및 만경과 동진강 입구의 외해수와 혼합되기 보다는 갑문 주위에만 제한적으로 교환되며, 홍수기에만 하천 유량이 외해로 방류되어 호 내부 혼합은 만경 및 동진유입유량에 지배적으로 작용한다고 하였다. 한편 Suh and Lee[2011]는 새만금호 내에서 입자추적 실험을 한 결과 방조제 완공 후 호 내 수체의 연직 혼합능력 감소로 밀도 성층에 대한 하천 유량의 영향이 상대적으로 커지고, 입자의 연직운동이 새만금호 내 표층에 국한되는 것으로 확인하였다. 또한 Yoo *et al.*[2013]은 내부개발로 인하여 평상시 저층의 수괴는 외해로 방류가 원활하지 못하고 호 내에 장기간 체류할 가능성과 함께 성층발달을 가속시킬 개연성이 있다고 하였으며, 만경 수로부의 연직방향의 유속 특성을 분석해보면, 평상시 표·저층간 반대의 흐름이 나타난다고 언급하였다. 게다가 Oh *et al.*[2013]은 상류 구간에서 하류 구간으로 갈수록 지형구배가 급하고 수심이 깊기 때문에 구간별로 M2-M3, D2-D3 구간보다는 M3-M4, D3-D4 구간에서의 흐름이 더 빠르다고 하였다.

즉, 새만금호 내에서의 해수유동 및 담수 유입의 결과로 형성된 유동 분포는 첫째, 호 내 지형과 신시 및 가력 갑문의 위치적 특성에 영향을 받는다. 만경 수역 중앙부에 형성된 지형은 해수와 담수의 흐름을 제한하고, 신시와 가력 갑문의 위치가 동진 수역에 가깝게 위치하여 이러한 위치적 특성이 해수 유입 및 담수 배제 시의 유동 흐름에 영향을 미치는 것으로 판단된다. 둘째, 만경 및 동진강 하구로 유입되는 유량 차이로 인하여 수역별 다른 유동 특성을 보이게 된다. 이들 유량은 새만금호 내 전체 유량의 약 2%이하로 적은 양이나 여름철에 일시적으로 강하게 유입되는 서로 다른 유량 차이가 밀도 성층 규모와 및 형태를 달리할 수 있다. 셋째, 수심별 유속은 표층에서 저층으로 갈수록 유속이 느리게 되며, 새만금의 내부개발은 호 내 연직 혼합을 약화시키고 배수갑문의 운영으로 인한 표층, 중간부, 저층에서의 유동 흐름은 서로 다르게 나타난다. 이 외에 바람 등으로 인하여 발생하는 표층 순환의 경우는 유속이 빠르며, 저층일수록 바람의 영향보다는 수괴의 밀도 차이에 의하여 심층 순환이 형성되기 때문에 표층보다 유속이 느리게 나타난다.

3.3 해수유통량

새만금 수역에 영향을 미치는 또 다른 원인은 해수유통이다. 방조제가 체결된 이후부터 배수갑문을 통한 해수유통 조건에서 수질이 관리되고 있으며, 특히 2010년 말부터 새만금호 내 방수제 공사의 원활한 진행을 위해 새만금호 내 관리수위를 EL. (-)1.6 m로 유지하고 있기 때문에 이로 인한 성층 형성을 더욱 강해질 것으로 예상된다. 2011년과 2012년 가력 및 신시갑문에서의 실제 측정수위 자료와 갑문별 개방률, 해당 연도 상류 유입량과 강수량 및 증발산량 등의 변화에 따른 배수갑문에서의 유출입량을 계산하는 방식으로 해수유통량을 산정하였다. 새만금 수역의 월별 해수유통량 변화는 Fig. 3과 같다. 조사기간인 2011년 동안(Fig. 3a), 가력배수갑문의 해수유입량은 $2,698 \times 10^6 \text{ m}^3$ 으로 나타났으며, 담수유출량은 $4,153 \times 10^6 \text{ m}^3$ 으로 산출되었다. 신시배수갑문에서의 해수유입량은 $3,203 \times 10^6 \text{ m}^3$ 으로 나타났으며, 담수유출량은 $5,617 \times 10^6 \text{ m}^3$ 이 새만금 외해로 유출되었다. 한편 2012년 동안(Fig. 3b), 가력배수갑문의 해수유입량은 $951 \times 10^6 \text{ m}^3$, 담수유출량은 $2,287 \times 10^6 \text{ m}^3$ 으로 나타났으며, 신시배수갑문의 해수유입량은 $1,071 \times 10^6 \text{ m}^3$, 담수유출량은 $2,597 \times 10^6 \text{ m}^3$ 으로 산출되었다. 전체적으로 가력보다는 신시갑문으로의 해수유통이 더 많은 것으로 나타났고, 2012년이 2011년에 비해 해수유통량은 작게 계산되었다. 2012년에 비해 더 많은 강수량을 보이는 2011년에 해수유통량은 더욱 증가하였으며, 각 연도별 강우패턴(2011년 7~8월 사이, 2012년 8~9월 사이)에 따라 해

수유통량은 변화하는 것으로 나타났다. 따라서 낮은 관리수위 운영으로 해수가 제한적으로 유입되는 현 시점의 해수유통량은 강우량에 주된 영향을 받는 것으로 판단된다.

3.4 수온, 염분 및 σ_t 의 계절 변화

2011년과 2012년의 수온과 염분의 계절적 변동을 파악하기 위하여, 각 연도별(2011/2012) 춘계(5월 24일/21일), 하계(8월 23일/29일), 추계(11월 16일/26일) 및 동계(2월 22일/27일)에서 모든 수온 및 염분 수직 분포 자료를 Fig. 4에 도시하였으며, Fig. 4a는 만경수역(A-A' 단면), Fig. 4b는 동진수역(B-B' 단면)에 대한 수온 및 염분 분포를 나타낸다. 춘계의 수온은 만경수역에서 2011년에 6~18 °C, 2012년에는 12~21 °C 사이에 변화하는 한편 동진수역에서는 2011년에 14~18 °C, 2012년에는 16~20 °C 사이에 분포한다. 염분은 만경수역에서 2011년에 22~32 psu, 2012년에 27~33 psu로 분포하며, 동진수역에서는 2011년에 22~26 psu, 2012년에 23~30 psu 범위로 분포한다. 전반적으로 동진수역보다는 만경수역에서의 수온 및 염분 변화가 크게 나타나며, 측정된 최대 염분 농도도 만경수역에서 더 높게 관측되었다. 또한 2011년이 2012년보다는 더 낮은 수온 및 염분 분포를 보이는데 이는 만경수역(최대 EL. (-)42 m)과 동진수역(최대 EL. (-)17 m)에서의 수온 및 염분 관측 수심에 따른 차이와 2011년과 2012년의 해수유통량 차이(Fig. 3)로 인한 해수 순환 효과 범위가 다르게 나타나기 때문으로 판단된다. 또한 만경 수역과 동

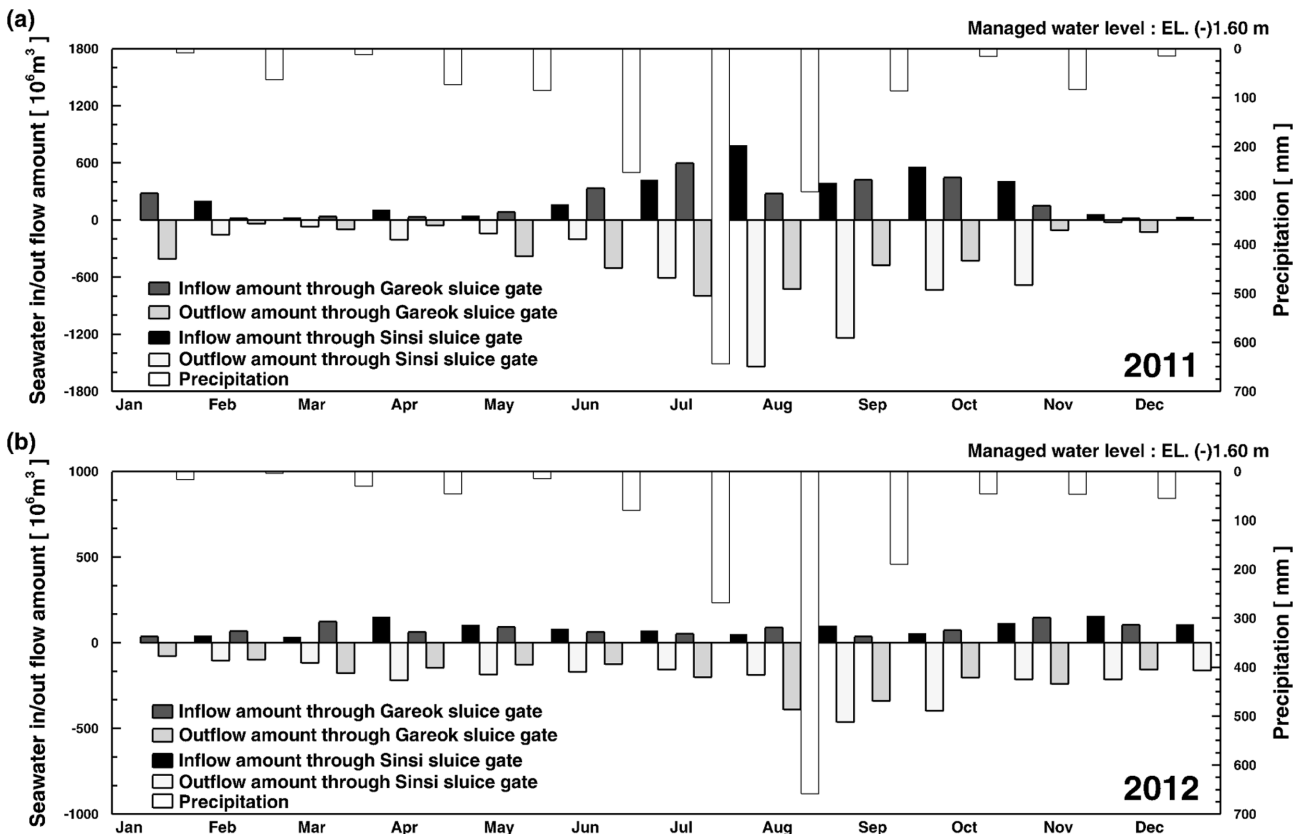


Fig. 3. Annual comparisons of seawater in/out-flow amounts from Gareok and Sinsi sluice gates in (a) 2011 and (b) 2012.

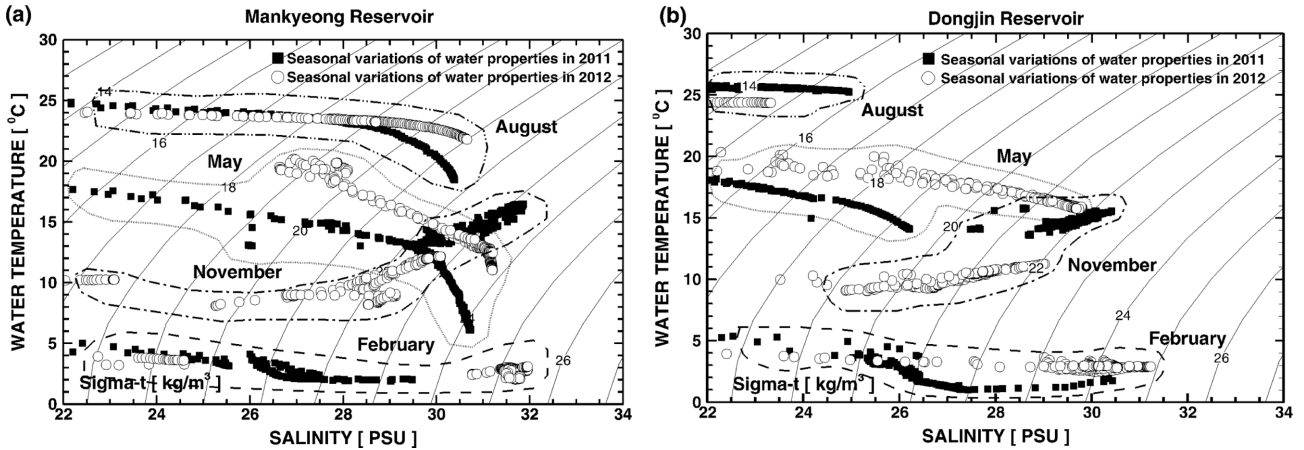


Fig. 4. Seasonal distributions of water temperature and salinity at (a) Mankyong and (b) Dongjin reservoirs in 2011 and 2012.

진 수역의 지형적인 특성에 따른 해수유동의 변화 차이도 기인한다. 하계의 수온 및 염분은 다른 계절에 비해 고온 및 저염 분포가 뚜렷하게 나타난다. 수온은 만경수역과 동진수역에서 20~25 °C와 24~26 °C 사이에 분포하며, 염분은 24~30 psu와 22~25 psu 사이에 각각 분포한다. 하지만 하계임에도 불구하고 만경수역에서는 고농도(28~30 psu)의 염분이 측정되었는데, 이는 대부분 저층에서 관측된 농도이며, 다른 계절에 비해 표·저층간 염분 성층이 탁월하게 발달한 것으로 판단된다. 동계의 수온은 모든 연도에서 5 °C 이하로 분포하고 변화 자체도 거의 없지만, 염분의 경우는 고른 분포를 보이는 2011년과는 달리 2012년은 고농도(31~32 psu)가 한 지점에 집중되는 양상을 보인다. 이는 동계의 적은 해수 유출입량 차이에도 연도별 특성이 다르게 나타남을 의미하며, 전체적인 수온 및 염분의 수직 성층은 나타나지 않는 것으로 보인다. 한편 추계의 수온은 만경수역과 동진수역에서 2011년에 각각 13~17 °C, 14~16 °C, 2012년에는 8~13 °C, 9~12 °C 사이에 분포하여 2012년도에 더 낮은 수온 분포를 보이는 것으로 나타났다. 이 시기는 특징적으로 고농도로 갈수록 수온은 상승하는 수온 역전 현상이 뚜렷이 나타나, 호 내 물질 순환이 다른 계절에 비해 빠를 것으로 예측되며, 수직 성층 또한 약화되는 시기로 판단된다.

Fig. 5는 새만금호 내 만경 및 동진 수역에서의 현장 자료를 이용한 염분 및 수온 분포를 도시한 것이다. A-A' 단면(Fig. 1)은 신시갯문에서부터 M1 지점까지 총 10개의 측정 지점을 연결한 것으로 염분 및 수온 분포는 상기 지점의 모든 수직 분포 자료를 크리킹 기법 이용하여 내삽하여 나타내었다. B-B' 단면도 마찬가지로 가력배수갑문에서부터 D1 지점까지의 총 11개 측정 지점을 연결한 것으로 해당 지점의 수직 자료를 크리킹하여 그 분포를 도시하였다. 이 때 크리킹 기법에 활용된 자료는 측정 지점별 모든 수직 분포 자료를 사용하였으므로, 2012년 만경수역 기준 측정 날짜별로 2월은 296개, 5월은 292개, 8월은 271개 및 11월은 229개, 동진수역 기준 2월은 258개, 5월은 260개, 8월에 261개 및 11월에 233개의 자료를 이용하여 염분 및 수온 분포를 산출하였다.

모든 연도에서 강우 및 배수갑문 조작에 의한 담수 유입 및 해수

유입 시기에 따라 배수갑문을 시점으로 거리에 따라 다양한 염분 분포 특성을 보인다. 특히 배수갑문으로 갈수록 염분이 크게 증가되는 양상을 보이며 표층에서 하층으로 갈수록 염분 농도가 높아진다. 또한 만경 및 동진 수역은 비슷한 염분 분포 패턴을 보이고 있다. 여름철을 제외하면 수심에 따른 염분 농도 변화가 거의 일정한 수준으로 나타나며, 만경 수역은 30 km(M2 지점), 동진 수역은 25 km(D2 지점) 부근까지 높은 염도가 형성하는 것으로 나타났다. 또한 동진 수역 상류가 만경 수역 상류 보다 염분 켜기(salt wedge) 현상이 보다 강하게 나타나는데 이는 해당 지점이 담수-해수 전이대이며(Oh et al.[2013]), 지형적인 원인으로 만경 수역 중 M3 부근에 형성된 둔덕으로 인하여 자유로운 해수 이동을 제한하기 때문으로 판단된다. 이러한 현상은 춘계(5월에 뚜렷하게 나타나 15 psu 등염분선에 해당하는 염분 켜기가 신시배수갑문으로부터 30 km까지 진행되고 있는 것으로 관측되었다. 따라서 봄과 여름철에 만경 수역이 동진 수역에 비해 염분에 의한 염분성층이 더욱 강하게 나타나고 가을철과 겨울철에는 비슷한 분포를 보이고 있어, 만경수역이 동진수역에 비하여 여름철 염분 성층의 발달로 인하여 상대적으로 수질이 나빠질 수 있는 개연성이 있을 것으로 판단된다. 여름철의 경우, 표층에서 낮은 염분 분포를 보이며, 2011년에는 염분의 수직적 성층 현상이 수심 5~10 m 이내에서 강하게 나타나고 2012년은 3~5 m 지점에서 성층 현상이 강하게 나타나고 있는데 이는 집중호우로 인한 해수의 희석 효과를 포함하여 갑작스런 상류 유입량 증가가 주된 원인으로 판단된다. 풍수기 이후 지속된 해수 유입으로 인하여 가을철에도 염분 켜기는 강하게 나타나고 있으며, 2011년이 2012년에 비해 갑문 부근에서 높은 염분 농도를 형성하는 것으로 나타났다. 또한 이 시기는 수온 역전 현상과 파랑으로 인하여 염분 약층(halocline)이 일시적으로 파괴되어 배수갑문으로부터 유입된 해수가 만경 및 동진 수역 20 km까지 직접적으로 영향을 미치는 것으로 해석된다. 한편 겨울철에는 가을철 보다 상대적으로 해수유통량이 감소하므로(see Fig. 3) 수직적인 염분 분포가 나타나게 되며, 이로 인해 상류 지역에서는 상층과 하층의 혼합이 활발하게 나타나므로 염분 성층은 나타나지 않았다.

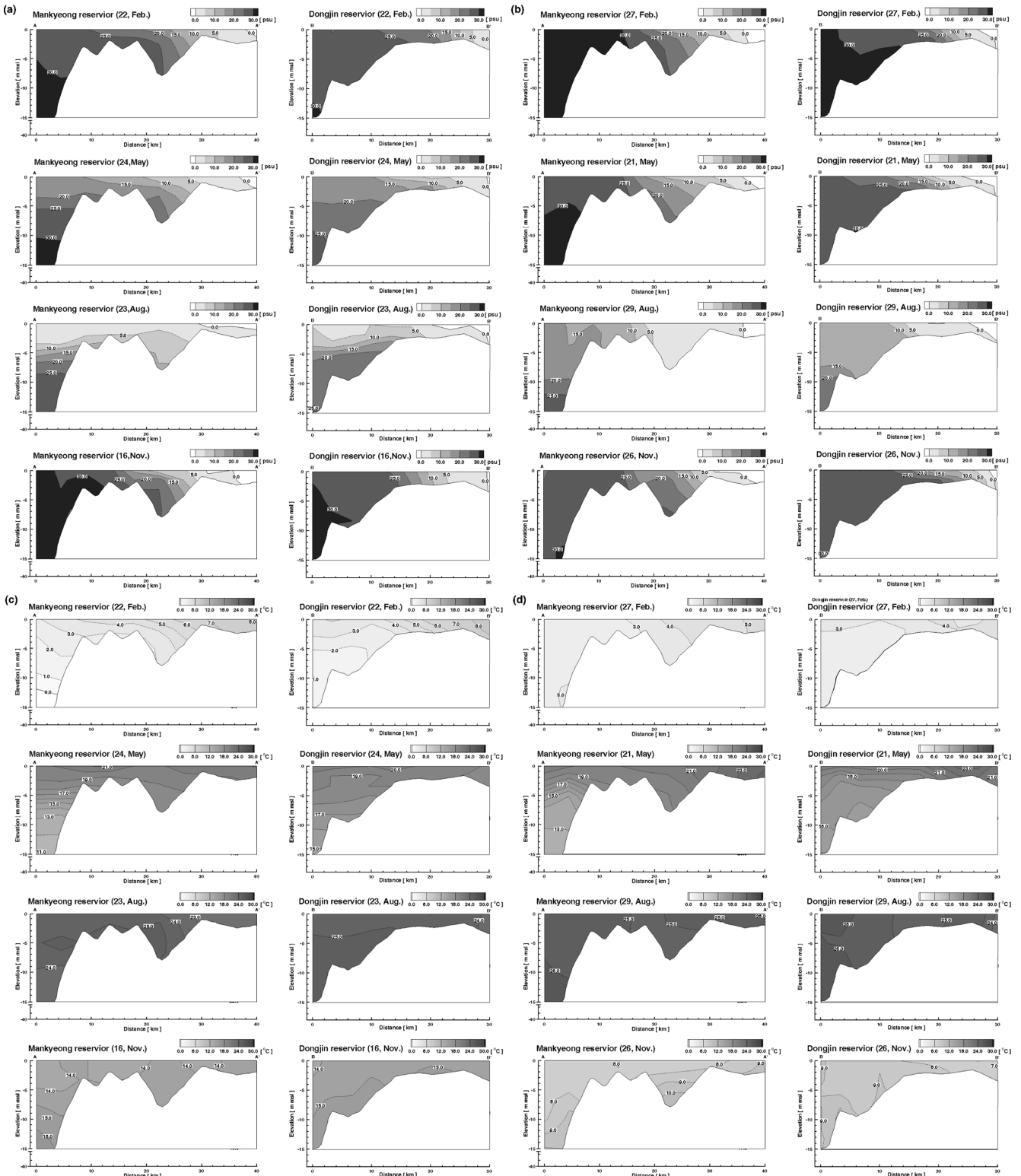


Fig. 5. Vertical cross sections of A-A' and B-B' at Mankyeong and Dongjin reservoirs showing salinity and water temperature of 2011((a) and (c)) and 2012((b) and (d)).

Fig. 5c와 5d는 각각 2011년과 2012년이며, 각 연도별 2월(겨울), 5월(봄), 8월(여름) 및 11월(가을)의 수온 분포를 도시하였다. 겨울철 새만금호 내 표층 수온은 가장 낮아 4~8°C로 유지하고 있으나,

5월부터 표층은 최대 23°C, 저층의 경우도 15°C까지 급격하게 상승하고 있다. 따라서 이 시기에는 높은 표층온도와 낮은 저층온도를 유지해 표층과 저층의 수직운동이 없이 안정화되는 성층화현상이

발생하고 있다(KRC[2012]). 여름철의 경우, 표층 및 저층 수온은 수직적으로 큰 차이를 보이지 않고 봄철과 마찬가지로 안정적인 수온구배를 보여주고 있으나, 가을철에 접어들면서 새만금호의 표층 수온은 급격하게 떨어지며 저층의 수온이 오히려 표층보다 높아지는 양상을 보여 수온에 의한 전도현상으로 성층이 약화될 수 있는 시기로 판단된다. 시화호의 경우도 해수의 유입이 없었던 1995년 10월부터 1996년 3월까지의 수심 수온자료로부터 저층수온이 표층수온보다 높은 수온역전현상이 발생하였는데 이러한 현상은 겨울철 수온강하가 표층에서 먼저 일어나며 저층 표층수가 고염 저층수의 열손실을 막고 있는 것으로 해석하였다(Park *et al.*[1997]). 한편 만경 수역이 동진 수역에 비해 수온의 변화 폭이 다소 크게 나타나는데 이는 만경 수역으로 유입되는 유량이 동진에 비하여 크기 때문이며, 이로 인한 해수유통량의 증가가 원인으로 판단된다. Shin *et al.*[2012]은 새만금호에 영향을 미치는 수원의 대부분은 배수갑문에 의해 조절되며 만경 수역이 동진 수역에 비해 유입유량이 50%가량 더 많은 것으로 보고하였다.

새만금호의 만경 및 동진 수역 중심부에 위치한 M4와 D4(Fig. 1) 지점은 배수갑문 개방에 의한 해수의 영향과 상류 강우에 의한 담수의 영향을 복합적으로 받고 있을 것으로 판단되어 상기 지점에서의

2011년과 2012년의 염분, 수온 및 σ_t 의 수괴특성을 파악하였다(Figs. 6 and 7).

Fig. 6은 2011년과 2012년 해당 지점에서의 여름철(8월) 수직적 염분 변화를 나타낸다. 8월은 새만금호 내 담수유입이 증가하여 해수유동이 적극적으로 추진되는 시기이며, Fig. 2와 같이 연중 가장 많은 강수량을 보인다. 전주 기상대에서 측정된 강수량은 2011년 7월/8월이 각각 467.0 mm/ 477.8 mm, 2012년 7월/8월이 각각 300 mm/405.5 mm로 나타나 상기 두 지점에서의 표층 염분은 2011년(10 psu 이하)이 더 낮은 분포를 보인다. 수직적 염분 변화는 강수량의 영향을 받아, 2011년 8월 10일(195 mm)에 100 mm 이상의 집중강우 영향으로 표층과 저층의 염분 농도 저하가 가장 크게 나타난다. 또한 2011년과 2012년 모두 다량의 담수가 유입되는 시기에는 밀도차에 의한 썰기 형태의 담수/염수 전이대가 형성은 제한적으로 나타나 대부분의 표층에는 염분 농도가 낮은 담수 특성을 보이거나, 해당 지점의 저층에서는(EL. (-) 8 m이하) 연중 20 psu 이상의 염수층이 존재하는 것으로 나타났다. 또한 2011년과 2012년 M4와 D4 지점의 수직적 염분은 분포는 서로 비슷한 양상을 보여 상기 두 지점은 강우량과 홍수방지를 위한 배수갑문 운영이력에 동일한 영향을 받는 것으로 판단된다.

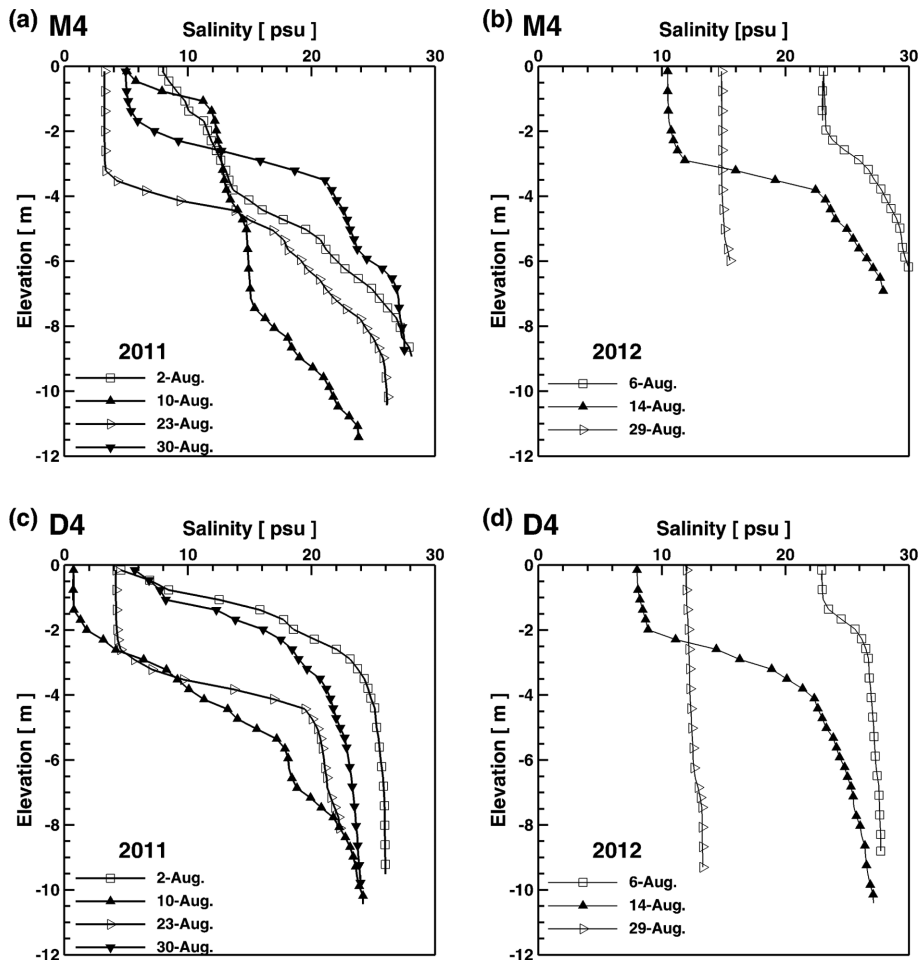


Fig. 6. Vertical profiles of salinity of 2011 ((a) and (c)) and 2012((b) and (d)) at monitoring points of M4 and D4.

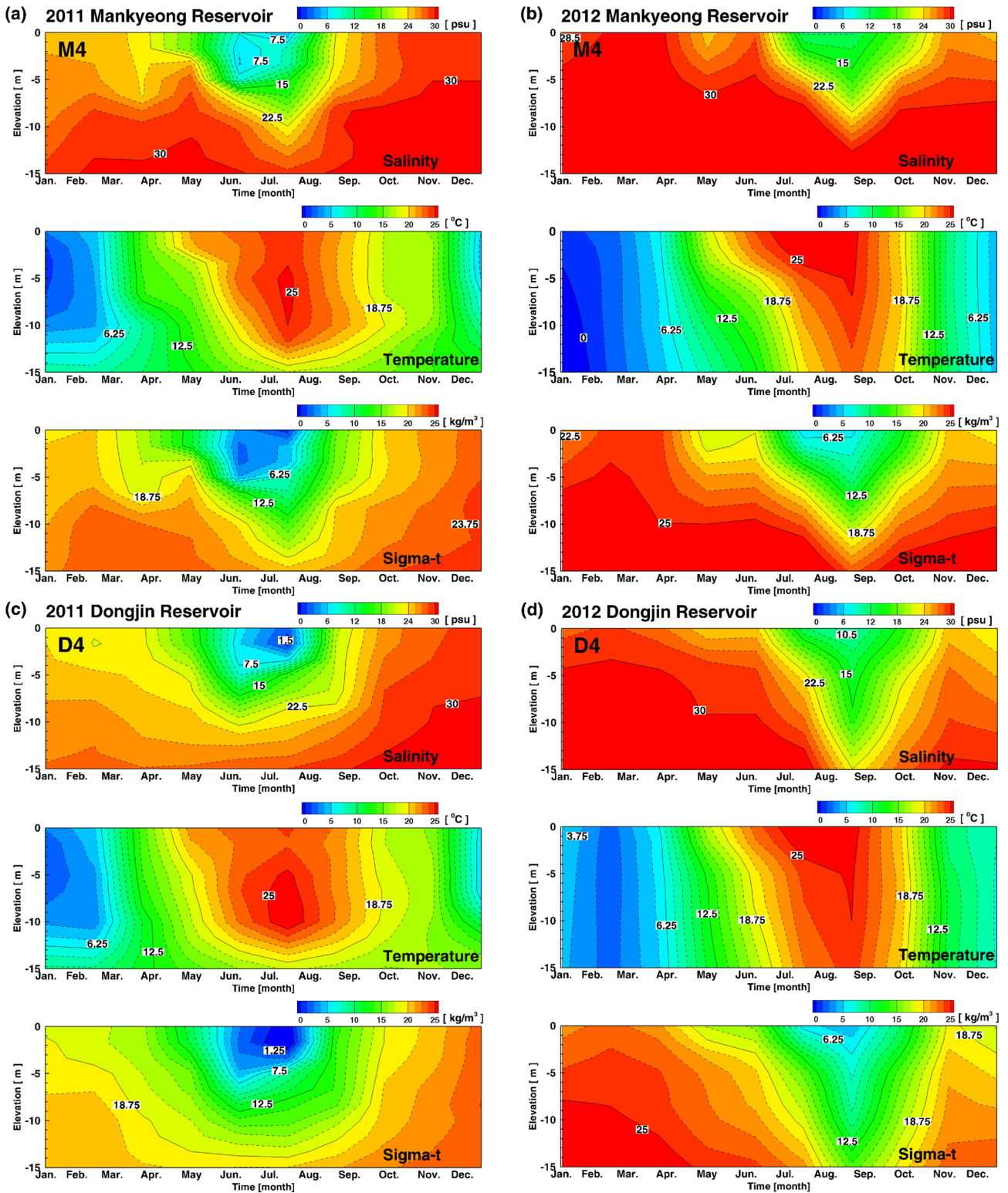


Fig. 7. Temporal and spatial distributions of salinity, water temperature and sigma-t of 2011((a) and (c)) and 2012((b) and (d)) at monitoring points of M4 and D4.

Fig. 7은 Fig. 6에 도시된 바와 같이 수온 및 염분 자료의 관측 수심이 10 m 내외이므로 상기 수심까지의 모든 수직 분포 자료를 활용하고 이를 크리깅 기법으로 도시하였다. 각 연도별 비교·분석

결과는 다음과 같다. 염분 농도 비교 결과, 표층에서 저층으로 갈수록 염분 농도가 높아지며, 여름철 표층에서는 낮은 염도를 보이지만 나머지 계절에서는 수심에 따른 염분 농도 변화는 거의 일정

한 수준을 보이는 동일한 경향이 나타난다. 하지만 전반적으로 2012년의 염분 농도가 2011년에 비해 높은 분포를 보이며, 2011년에는 6월부터 8월경에, 2012년은 8월부터 9월경에 염분성층이 강하게 형성되어 있다. 이는 여름철 풍수기 기간 동안 강수량의 차이와 이로 인한 해수유통량의 변화가 그 원인으로 판단된다. 수온 비교 결과, 두 기간 동안 수온의 수직적 성층 현상은 여름철에 일시적으로 발생하였으며, 수층 상·하간의 온도차는 2~3 °C로 성층 강도는 크지 않은 것으로 판단된다. 주로 수심에 따른 수온 변화를 보이며, 여름철의 경우는 수심 5 m 이내에서 수온이 급변하는 현상이 나타난다. 한편 sigma-t 분석 결과, 두 시기는 모두 새만금호 내 관리수위를 EL. (-)1.6 m로 낮추게 되어 해수의 유입이 줄어든 상태이다. 따라서 상류 유역으로부터의 담수 유입이 거의 없는 5월 중순까지 밀도변화가 크지 않고 밀도 성층이 나타나지 않는다. 또한 2011년이 2012년에 비해 밀도 변화는 크게 나타나지 않으나, 풍수기 기간에 성층이 집중되는 현상은 동일하게 나타난다. 만경 및 동진 수역 모두 염분 분포와 그 양상이 동일하게 나타나므로 새만금호는 염분에 의해 sigma-t 값이 지배를 받으며, 이에 따라 수온도 염분의 지배를 받는 것으로 보인다.

3.5 밀도 성층 계수 분석

밀도 성층은 수온 또는 염분의 수직적인 차이가 커서 상·하층간의 밀도를 구분하게 된다. 하구에서의 성층해석은 수질과 밀접한 관련이 있으며 연구해역내의 해수물성의 수직적인 분포특성을 파악하기 위해 M1~M4 및 D1~D4, 총 8지점의 자료로부터 potential energy anomaly(PEA; Simpson *et al.*[1978])를 아래의 식으로 계산하여 해수 성층 정도를 판별하였다.

$$V = \int_{-H}^0 (\rho' - \rho) z dz$$

여기서 ρ' 은 수층이 완전히 혼합되었을 경우의 밀도이고, H는 수심(m)이다. PEA(V)는 관측된 수층이 지닌 위치에너지와 이 수층이 수직적으로 완전 혼합되었을 경우의 위치에너지의 차로써, V가 0이면 완전혼합이고 성층이 강할수록 V는 커진다. 그리고 수직적으로 밀도가 역전되어 있으면 음의 값이 된다.

PEA 개념을 도입한 밀도 성층 변화에 관한 연구는 많은 연구자들에 의해 진행되어왔다(Simpson and Bowers[1981]; Simpson *et al.*[1990]; Choi *et al.*[2000]; Lie *et al.*[2002]; Kim *et al.*[2006];

Kang *et al.*[2011]). Choi *et al.*[2000]은 시화호에서 배수갑문 개방 이전 시기(1997년 4월)에 $\log[-V]$ 가 -0.41~1.89 J/m³이며, 배수갑문을 개방한 이후(1997년 8월)에는 1.55~2.30 J/m³로 나타나 이전 시기에 비해 성층강도가 강해졌다고 언급하고 있으며, 1997년 11월은 0.06~1.42 J/m³, 1998년 3월에는 0.23~0.47 J/m³로 나타나 이전 시기는 전 수층에서 성층 정도는 비슷해졌다고 언급하고 있다. Kim *et al.*[2006]은 새만금에서 4호 방조제 차단 이후부터 신시 및 가력 개방구간 차단 이전까지의 밀도 성층의 계절적 변동을 파악하였으며, 호 내 중심부 인근에서 2003년부터 2005년의 추계, 동계, 춘계에 $\log[-V]$ 가 0.69 J/m³ 이하로 나타나 성층은 완전 혼합에 가깝다고 하였다. 하지만 하계인 7월과 8월에는 1~1.60 J/m³로 나타나 성층이 강해지며, 이는 관측일에 일평균 풍속이 약하며, 만경 및 동진 하구에서 유입되는 유량이 커졌기 때문이라고 하였다. 한편 Kang *et al.*[2011]은 광양만 및 진주만 해역에서 담수유입으로 인한 밀도 성층 변화를 연구하였으며, 2007년 하계 40일 동안 평균 성층계수 공간 분포는 1.54~1.60 J/m³로 형성되는 것으로 분석하였다. 또한 이렇게 성층강도가 강해지는 원인을 섬진강 유량 증가와 함께 남강댐 담수 방류라 하였으며, 유량이 상대적으로 작고 방류가 없었던 시기에는 지속적인 태양복사에너지의 영향으로 표층 수온상승에 의한 효과로 사료된다고 하였다.

본 연구에서는 Table 1에서부터 4까지 각 관측지점에서 계절별 측정 심도와 표층 및 저층에서의 온도와 염분값을 제시하였으며 이와 함께 성층계수도 나타내었다.

2011년 2월(Table 1), 5월(Table 2), 8월(Table 3) 및 11월(Table 4)의 PEA($\log[-V]$)는 각각 0.54~1.45, 0.61~1.73, -2.43~2.01 및 0.54~1.14 J/m³의 분포를 보이고 있으며, 2012년은 해당 월별로 각각 -1.07~1.19, -2.02~1.34, -1.66~1.17, -1.96~1.69 J/m³의 분포를 보인다. 2월과 11월에 담수 유입에 따른 영향을 가장 많이 받는 M2와 D2 지점을 제외하고는 1 J/m³ 이하의 값을 보여 완전 혼합 또는 수직적으로 밀도가 역전된 현상이 나타나는 것으로 보인다. 한편 5월과 8월에는 2011년과 2012년 모두 2월 및 11월보다는 상대적으로 높은 성층계수를 보이며, 특히 2011년 8월에는 M4와 D4 지점에서 2.01 J/m³과 1.79 J/m³로 성층이 형성되었다. 하지만 2012년에는 각각 0.02 J/m³와 0.72 J/m³로 완전 혼합의 성층 특성이 나타났다. 이는 2012년을 2011년과 동일한 시기에 성층계수를 비교하기 위해 선택한 월이며, 실제 2012년에 강우량이 많았던 9월 10일에 계산한 성층계수는 이들 지점에서 각각 1.64 J/m³ 와 1.82 J/m³로 나타나 모

Table 1. Comparisons of water properties with stratification parameters ($\log[-V]$) at the monitoring points in 2011 (22, Feb.) and 2012 (27, Feb.)

Monitoring point	Observed depth [m] (2011/2012)	Surface temp. [°C] (2011/2012)	Bottom temp. [°C] (2011/2012)	Surface sal. [psu] (2011/2012)	Bottom sal. [psu] (2011/2012)	Stratification parameter [J/m ³] (2011/2012)
M2	8.97/6.42	5.75/4.43	3.16/3.62	15.38/12.26	25.55/24.58	1.45/1.19
M3	4.09/2.17	4.62/2.90	2.38/2.19	19.61/31.54	27.48/31.56	0.99/-1.07
M4	7.31/3.08	3.66/2.33	1.92/2.60	26.29/31.58	29.01/31.67	0.91/-0.79
D2	3.15/2.69	6.53/4.39	3.75/3.44	19.54/14.95	26.39/24.96	0.93/0.98
D3	2.74/1.72	4.89/2.94	2.67/2.98	23.03/28.99	26.24/29.84	0.54/-0.20
D4	10.28/7.92	3.94/3.33	1.36/2.93	25.13/29.37	27.23/30.79	0.93/0.62

Table 2. Comparisons of water properties with stratification parameters (log[-V]) at the monitoring points in 2011 (24, May) and 2012 (21, May)

Monitoring point	Observed depth [m] (2011/2012)	Surface temp. [°C] (2011/2012)	Bottom temp. [°C] (2011/2012)	Surface sal. [psu] (2011/2012)	Bottom sal. [psu] (2011/2012)	Stratification parameter [J/m ³] (2011/2012)
M2	8.67/6.99	19.73/20.82	18.47/18.86	3.17/7.49	21.48/20.23	1.55/1.33
M3	2.78/1.55	19.93/19.90	19.18/19.86	12.70/27.87	17.37/27.85	0.61/-2.02
M4	8.82/6.10	19.89/20.02	12.56/13.55	16.83/27.35	29.66/30.82	1.73/1.12
D2	2.60/1.76	19.77/21.76	19.27/20.48	2.74/2.89	16.32/14.33	1.03/0.91
D3	2.00/3.58	20.26/20.41	19.22/17.38	6.69/15.86	16.91/27.37	0.84/1.18
D4	10.17/9.05	20.20/20.11	16.55/15.76	16.69/23.50	24.20/29.73	1.52/1.34

Table 3. Comparisons of water properties with stratification parameters (log[-V]) at the monitoring points in 2011 (23, Aug.) and 2012 (29, Aug.)

Monitoring point	Observed depth [m] (2011/2012)	Surface temp. [°C] (2011/2012)	Bottom temp. [°C] (2011/2012)	Surface sal. [psu] (2011/2012)	Bottom sal. [psu] (2011/2012)	Stratification parameter [J/m ³] (2011/2012)
M2	7.08/6.75	24.00/25.14	25.29/24.27	1.20/0.32	9.74/1.84	1.19/0.54
M3	4.82/2.61	24.98/25.61	25.52/25.50	3.28/14.73	12.84/14.84	1.29/-0.80
M4	10.43/5.98	24.87/25.77	23.84/25.59	3.24/14.83	26.10/15.50	2.01/0.02
D2	0.70/0.92	23.97/24.44	23.94/24.57	0.12/0.09	0.12/0.09	-2.43/-1.66
D3	3.44/4.80	24.59/24.41	25.42/24.65	5.00/0.86	17.94/11.68	1.26/1.17
D4	8.10/9.30	24.59/25.93	25.60/25.33	4.17/11.97	22.27/13.32	1.79/0.72

Table 4. Comparisons of water properties with stratification parameters (log[-V]) at the monitoring points in 2011 (16, Nov.) and 2012 (26, Nov)

Monitoring point	Observed depth [m] (2011/2012)	Surface temp. [°C] (2011/2012)	Bottom temp. [°C] (2011/2012)	Surface sal. [psu] (2011/2012)	Bottom sal. [psu] (2011/2012)	Stratification parameter [J/m ³] (2011/2012)
M2	7.26/4.94	14.55/7.39	14.68/9.87	26.04/1.91	28.06/24.16	1.14/1.69
M3	5.37/1.48	13.02/8.08	14.70/8.05	28.36/29.01	31.30/29.01	0.99/-1.96
M4	9.77/5.61	13.93/7.57	15.56/7.45	29.93/27.52	31.55/28.59	0.91/0.38
D2	1.82/1.77	14.12/7.55	15.82/8.34	21.75/12.28	28.57/22.98	0.93/0.80
D3	1.51/4.52	14.09/8.18	14.16/8.44	27.47/23.96	27.65/26.46	0.54/0.71
D4	9.92/8.77	14.12/8.34	15.33/7.96	28.88/26.33	30.10/26.59	0.93/0.07

든 연도에서 하계에는 성층 강도가 강하게 나타난다. 즉, 담수 유입이 거의 없는 시기(2월, 11월)에는 담수 영향이 가장 큰 유입부 지점에서 성층강도는 강해지는 반면 담수 유입이 증가되는 시기(5월, 8월)에는 배수갑문 인근 지점이 다른 지점에 비해 강한 성층이 형성되는 것으로 나타났다. 일반적으로 담수영향이 큰 연안 지역일수록 성층강도는 크고, 외해역일수록 상대적으로 성층강도가 작아지나(Kang *et al.*[2011]), 풍수기 시 일시적으로 배수갑문 인근 해수가 담수로 모두 치환되는 새만금호 특성상 이러한 현상이 나타나는 것으로 판단되며, 담수 영향이 지배적이며 수심이 깊을수록 성층 강도는 강하게 나타나는 것으로 보인다. 전반적으로 2011년이 2012년에 비해 성층강도가 모든 계절에서 높게 나타났다. 특히 2011년 여름철의 성층강도 범위는 가장 높게 나타났으며, 마찬가지로 수심이 깊어질수록 성층강도는 증가되는 것으로 보인다. 결국 여름철에 상류로부터 유입되는 강우의 영향으로 인하여 표층 5 m(Fig. 5)까지 담수의 영향을 지대하게 받고 있는 시기에 염분 성층이 형성되어 향후 수질관리에 유의해야 할 것으로 판단된다.

4. 토의 및 결론

본 연구에서는 장기적인 관점에서 새만금 수역 특성과 관련한 실시간 자료를 분석하고, 장래 농업용수 확보를 위한 기초자료를 구축하기 위하여 2011년부터 2012년까지의 수온 및 염분 자료를 이용하여 계절별 성층 수괴 분포 특성을 연도별로 비교하였다.

(1) 환경부 수질유량측정망 시스템에서 측정한 2011년과 2012년의 관측유량은 여름철 집중호우에 따라 급증하는 추세를 보이고 있으며, 후자가 월평균 최대 3배 이상 큰 것으로 조사되었다. 하지만 2011년이 2012년에 비해 강우량이 많은 것을 감안할 때 새만금 수역에서는 강수량과 세부 유역 간 유입량의 변화가 유역 하구 말단 유입량 변화에 직접적으로 영향을 미치는 것은 아니라 상류의 복잡한 용-배수체계 등 복합적인 특성이 함께 반영된 결과이므로 향후 이에 대한 세부 조사가 더 필요할 것으로 판단된다.

(2) 2011년과 2012년의 수온, 염분 및 sigma-t 변화 차이는 수심, 해수유통량 차이에 의한 해수 순환 효과 범위 및 지형적 특성에 기인하며, 특히 여름철의 경우는 주된 집중호우 시기를 달리하여 이로 인한 해수의 희석 효과를 포함한 갑작스런 상류 유입량 증가 시기가 다르기 때문이다.

(3) 성층계수 분석 결과, 담수 유입이 거의 없는 시기(2월, 11월)에는 담수 영향이 가장 큰 유입부 지점에서 성층강도는 강해지는 반면 담수 유입이 증가되는 시기(5월, 8월)에는 배수갑문 인근 지점이 다른 지점에 비해 강한 성층이 형성되는 것으로 나타났으며, 전반적으로 2011년이 2012년에 비해 성층강도가 모든 계절에서 높게 나타났다.

(4) 일반적으로 담수의 영향이 큰 지역일수록 성층강도는 강해지지만 새만금호는 풍수기 때 일시적으로 배수갑문 인근 해수가 담수로 치환되는 특징이 나타나기 때문에 담수 유입부 보다는 배수갑문 인근의 성층 강도가 다소 강한 것으로 나타났다. 또한 이러한 특성은 배수갑문 인근의 깊은 수심과 배수갑문 운영 이력, 만경 및 동진으로부터 유입되는 유동 특성에 따라서도 많은 영향을 받는다. 따라서 이 시기에는 염분 성층이 형성되어 향후 수질관리에 유의해야 할 것으로 판단되며, 새만금호 내의 좀 더 정량적인 특성을 파악하기 위해서는 추가적인 장기 관측을 통한 연구가 지속적으로 필요하다고 판단된다.

후 기

본 연구는 한국농어촌공사 농어촌연구원의 2014년도 새만금 수질예측 모델 연구의 연구지원에 의해 수행되었습니다. 아울러 본 연구의 심사 과정에서 발전적인 조언과 비판을 해주신 익명의 심사자님들께 깊은 감사를 드립니다.

References

- [1] An, K.G., 2001, "Seasonal patterns of reservoir thermal structure and water column mixis and their modifications by interflow current", *Kor. J. Limnol.*, Vol. 34, No. 1, pp. 9-19.
- [2] Choi, J.H., Kim, K.Y. and Hong, D.B., 2000, "Impact of seawater inflow on the temperature and salinity in Shihwa lake, Korea", *J. Kor. Ear. Sci. Soc.*, Vol. 21, No. 5, pp. 541-552.
- [3] Choi, J.H. and Kim, M.O., 2001, "Impact of seawater inflow by the operation of sluice gates on the DO and pH in the lake Shihwa, Korea", *J. Kor. Ear. Sci. Soc.*, Vol. 22, No. 3, pp. 195-207.
- [4] Choi, J.H., Oh, C.S., Cho, Y.K. and Ann, C.H., 2013, "Consideration on the operation of water level management and environmental changes associated with inner dike constructions in Saemangeum reservoir", *J. Kor. Soc. for Env. and Ener.*, Vol. 16, No. 4, pp. 290-298.
- [5] Choo, H.S., Lee, G.H. and Yoon, Y.H., 1997, "Variations of temperature and salinity in Kugum Suro channel", *J. Kor. Fish. Soc.*, Vol. 30, No. 2, pp. 252-263.
- [6] Kang, Y.S., Chae, Y.K. and Lee, H.R., 2011, "Variation of density stratification due to fresh water discharge in the Kwangyang Bay and Jinju Bay", *J. Kor. Soc. Coastal and Ocean Eng.*, Vol. 23, No. 1, pp. 126-137.
- [7] Kang, Y.S., Chae, Y.K. and Lee, H.R., 2013, "Changes in sea water characteristics due to operation of Shihwa tidal power plant", *J. Kor. Soc. Coastal and Ocean Eng.*, Vol. 25, No. 4, pp. 219-235.
- [8] Kim, B.R. and Kang, B.S., 2013, "Parameter sensitivity analysis for spatial and temporal temperature simulation in the Hapcheon Dam reservoir", *J. Kor. Water Res. Assoc.*, Vol. 46, No. 12, pp. 1181-1191.
- [9] Kim, J.W., Yoon, B.I., Song, J.I., Lim, C.W. and Woo, S.B., 2013, "Spatial and temporal variability of residual current and salinity according to freshwater discharge in Yeoungsan River estuary", *J. Kor. Soc. Coastal and Ocean Eng.*, Vol. 25, No. 2, pp. 103-111.
- [10] Kim, T.I., Lee, R.L. and Chang, K.I., 2006, "Seasonal variation of density stratification in the Saemangeum waters, Korea", *Ocean and Polar Res.*, Vol. 28, No. 3, pp. 339-352.
- [11] Korea Rural Community Corporation (KRC), 2011a, "Model study on water quality for Saemangeum water area", KRC publication No. SH-01-11-06-11.
- [12] Korea Rural Community Corporation (KRC), 2011b, "Report for water quality monitoring network in Saemangeum reservoir", KRC publication.
- [13] Korea Rural Community Corporation (KRC), 2012, "Report for water quality monitoring network in Saemangeum reservoir", KRC publication.
- [14] Korea Rural Community Corporation (KRC), 2013, "Model study on water quality for Saemangeum water area", KRC publication No. SH-01-11-06-13.
- [15] Lie, H.J., Lee, S., Cho, S.H. and Kim, C.H., 2002, "Tidal front in the main tidal channel of Kyunggi Bay, eastern Yellow Sea", *J. Kor. Soc. Oceanogr.*, Vol. 37, pp. 10-19.
- [16] 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.
- [17] 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 environmental in lake Shihwa", *J. Kor. Soc. Oceanogr.*, Vol. 2, No. 2, pp. 53-68.
- [18] Schroeder, W.W., Dinnel, S.P. and Wiseman, W.J., 1990, "Salinity stratification in a river-dominated estuary", *Estuaries*, Vol. 13., pp. 145-154.
- [19] 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.
- [20] Simpson, J.H., Allen, C.M. and Morris, N.C.G., 1997, "Fronts on the continental shelf", *J. Geophys. Res.* Vol. 83, pp. 4607-4614.
- [21] Suh, S.W. and Lee, H.Y., 2011, "Analysis of hydrodynamic change around the Saemangeum Area using a particle tracking method", *J. Kor. Soc. Coastal and Ocean Eng.*, Vol. 23, No. 6, pp. 442-450.
- [22] Suh, S.W., Lee, H.Y. and Yoo, S.C., 2010, "Simulation of water quality changes in the Saemangeum Reservoir induced by dike

completion, J. Kor. Soc. Coastal and Ocean Eng., Vol. 22, No. 4, pp. 258-271.

- [23] Simpson, J.H. and Bowers, D., 1981, "Models of stratification and frontal movement in the shelf seas", *Deep-Sea Res.*, Vol. 28, pp. 727-738.
- [24] Simpson, J.H., Brown, J., Matthews, J.P. and Allen, G., 1990, "Tidal straining, density currents and stirring in the control of estuarine stratification", *Estuaries*, Vol. 13, pp. 125-132.

- [25] Yoo, S.C., Suh, S.W. and Lee, H.Y., 2012, Impacts on residence time and water quality of the Saemangeum reservoir caused by inner development, *J. Kor. Soc. Marine Env. Eng.*, Vol. 15, No. 3, pp. 186-197.

Received 13 October 2014

1st Revised 22 December 2014, 2nd Revised 23 March 2015

Accepted 2 April 2015