

계절별 염분 자료를 이용한 아산만 연안의 담수 영향범위 추정 Estimation on the Regions of Freshwater Influence using the Seasonal Salinity Data in Asan Bay Coastal Zone

조홍연* · 조범준* · 김상준**
Hong Yeon Cho*, Beom Jun Cho* and Sang Jun Kim**

요 지 : 아산만 유역에 건설된 배수갑문 운영양상을 분석하였으며, 유역의 강수량과 배수갑문을 통하여 배출되는 담수량의 결정계수는 0.77~0.89 범위로 비교적 높은 상관관계를 보이는 것으로 파악되었다. 아산만 해역의 염분농도를 분석한 결과 강한 조석의 영향으로 뚜렷한 성층화 현상은 나타나지 않았으며, 유역 유출량과 염분농도의 결정계수는 대산 4 지점을 제외하고는 0.49~0.62 범위로 나타났다. 한편 염분 농도 평균과 표준편차는 강한 상관관계(결정계수 = 0.9936)를 보이는 것으로 파악되었으며, 담수 영향정도가 평균과 더불어 염분의 표준편차에도 직접적으로 반영되고 있는 것으로 판단된다. 염분농도의 평균 및 표준편차를 이용한 담수 영향범위의 정량적인 기준을 적용하여 분석한 결과, 아산 2-4 지점, 대산 1 지점이 아산만 유역의 직접적인 담수 영향범위로 파악되었다.

핵심용어 : 담수 영향범위, 확산범위, 정량적 기준, 염분, 담수 배출, 아산만

Abstract : This study analyzes a general pattern of the gate operation at the Asan bay seadikes and its effects on salinity. The coefficient of determination between precipitation and released freshwater from gate operation turns out to be 0.77-0.89. A stratification is not shown in the analysis of the salinity in upper and lower layers at the Asan bay because of strong tidal effects, and the coefficient of determination between runoff and salinity is in the range of 0.49-0.62 except station Daesan 4. Salinity observations from 8 stations show mean and standard deviation are highly correlated (coefficient of determination=0.9936), and both mean and standard deviation are influenced by freshwater. Eventually it is found that stations Asan 2 to 4 and Daesan 1 are within the regions of the freshwater influences.

Keywords : regions of freshwater influence, diffusion range, quantitative definition, salinity, freshwater discharge, Asan bay

1. 서 론

연안에서의 담수 영향영역(Regions of freshwater influence, ROFI)은 담수 및 오염물질이 유역에서 하구 및 방조제 등을 통하여 연안 해역으로 배출되고 물리적인 과정을 통하여 확산되어 연안의 염분을 저하시키는 영역으로 환경·생태학적인 관점에서 매우 중요하다(Lewis, 1997; McLusky, 1999; Martin et al., 2008). 이 영역(ROFI)은 지속적인 담수유입의 영향으로 형성되며, 담수유입의 장기적인 변화(계절

적인 변화)는 영역의 범위를 확대·축소하고 영향범위를 벗어나는 지역에서는 염분에 대한 유역 담수의 영향이 없기 때문에 염분 농도의 자연적인 변화만이 존재한다. 그러나 대부분의 담수 확산범위 추정연구가 조석주기 또는 2~3일 정도의 단기간의 물리적인 확산과정 관측 및 수치 모형 개발·적용에 중점을 두고 수행되어 왔기 때문에 보다 장기적이고 지속적인 확산범위에 대한 연구는 상대적으로 미흡한 실정이다(Simpson, 1997; Luyten, 1997; Souza & Simpson, 1997; Lagadeuc et al., 1997).

*정회원·한국해양연구원 연안개발연구본부 책임연구원(Corresponding author: Hong Yeon Cho, Coastal Development Research Department, KORDI, Ansan PO Box 29, Seoul, 425-600, Korea, hycho@kordi.re.kr)·건국대학교 겸임교수
**경원대학교 토목환경공학과 교수(Civil and Environmental Engineering, Kyungwon Univ.)

아산만 유역은 삽교천(삽교천 방조제) 유역, 안성천(아산방조제) 유역, 발안천 유역(남양방조제), 역천·당진천 유역(석문방조제), 남양천·자안천 유역(화옹방조제)으로 구성되어 있으나, 유역 하류 지점 및 연안에 모두 방조제가 건설·운영되고 있기 때문에 하천을 통한 자연적인 유출과 하구에서의 혼합과정이 차단되고, 방조제 운영규칙에 의하여 유역에서의 담수유출이 인위적으로 제어되고 있다(건설교통부, 2002; 경기도, 1994). 또한, 아산만 유역 및 해역에서의 대규모 항만개발계획, 산업단지 조성사업, 환경기초시설 건설사업 등은 아산만 해양환경에 직·간접적으로 영향을 미치고 있다. 따라서 아산만의 효과적이고 효율적인 환경관리를 위해서는 아산만의 담수배출 양상 및 담수 영향범위를 파악하는 것이 필요하다. 오염물질 확산 범위는 오염물질 항목에 따라 다소 차이가 있을 것으로 판단되나 담수 영향범위와 직접적인 관련이 있을 것으로 판단되기 때문에 담수 영향범위는 오염물질 확산범위 추정 관점에서 중요하다.

본 연구에서는 아산만 해양환경에 영향을 미치는 인자 중에서 가장 중요한 것으로 판단되는 담수 영향범위 추정에 중점을 두고 수행하였으며, 담수 영향범위에 직접적인 영향을 미칠 것으로 판단되는 아산만 유역의 방조제 운영에 의한 유출량과 수문개방 빈도 등을 분석하고, 담수 배출 영향과 아산만 연안의 계절별 염분농도 변화 양상을 비교·분석하였다. 또한 본 연구는 아산만 유역 유출량과 아산만 연안 염분의 상관관계를 분석하고, 장기적인 염분 변화자료를 이용하여 혼합과정에 의한 아산만의 장기적인 담수 영향범위를 정량적인 담수 영향범위 정의에 근거하여 추정·제시하는 것을 목표로 한다.

2. 담수 영향범위 추정기법 비교·분석

일반적으로 담수 영향범위는 영향범위에 대한 정량적인 정의에 근거하여 추정된다. 담수에 의하여 변화되는 염분은 보존성 물질(*conservative materials*)로 유역에서 배출되어 연안 해역으로 유입되는 물질의 이동을 파악하는 추적자(*tracers*)로 광범위하게 활용될 수 있으나 실질적으로는 영향범위 추정이 수치모형에 크게 의존하고 있기 때문에 담수 영향범위를 추정하는 자료로 활용되는 경우는 관측 자료의 내삽(*interpolation*)을 통한 등농도선(*iso-concentration line*)을 이용한 범위 정도로 제한되는 등 다소 미흡한 실정이다. 또한 대부분의 관측이 조석 주기 규모 정도의 단기간에 집중되어 장기간의 담수 확산범위 추

정에는 한계가 있다. 정확한 담수 확산 범위를 추정하기 위해서는 확산범위로 추정되는 내부·외부의 여러 지점에서의 장기적인 층별 염분 관측자료를 필요로 하지만 시간적·비용적인 제약으로 단기간에 집중된 관측자료 또는 장기간의 간헐적인 자료만이 가용한 실정이다.

담수 영향범위는 정량적이고 구체적인 정의가 우선 제시되어야 한다. 담수 영향범위의 정의에 따라 영향범위가 다르기 때문에 정의가 우선 필요하고, 정의의 근거를 제시하는 것이 필요하다. 본 연구에서 제시한 정의는 엄격한 근거 하에서 도출된 것이 아니라 하나의 제안이다. 실제로 염도 확산범위는 물리적인 측면, 생물학적인 측면에 따라 영향범위가 다르며, 또한 염분농도 유지시간(예, 저염수의 염분농도 유지시간)에 대한 내용도 포함하는 경우에는 정량적인 정의가 매우 어려운 문제이다. Connor et al.(2006)은 영국 연안을 염분농도가 30 psu(*practical salinity unit*, 이하 psu) 이하 영역을 하구(*Estuarine*) 영역, 30~34 psu 영역을 ROFI 영역으로 구분하고 있다. 그러나 아산만은 하구라기보다는 만(*bay*)이 발달한 영역이며, 서해안은 비교적 얇은 해역이기 때문에 30 psu 정도를 기준으로 영역 구분은 적당하지만 34 psu 영역까지 모두 ROFI 영역으로 단정하기에는 무리가 있다고 판단된다. 따라서, 본 연구에서는 염분 농도만으로 영역을 구분하는 방법을 보완한 것으로 염분농도의 변동성(본 연구에서는 표준편차) 인자를 추가하여 정의하는 방법을 제안할 것이다. 염분 농도의 변동성을 어느 정도 반영할 것인가는 연구자 및 연구 목표에 따라 다르겠지만 본 연구에서는 기준농도(30 psu)의 5% 정도의 변동(상한-하한 $\pm 2.5\%$ 정도; 염분농도로는 ± 0.75 psu)을 반영하여 염분 확산범위를 정의한다. 이 정의는 물론 절대적인 것은 아니지만 하나의 기준으로는 사용이 가능할 것으로 판단된다.

또한 담수 영향범위에 대한 정량적인 정의가 미흡한 상태에서 연구자의 주관적·경험적인 의견에 따라 영향범위를 설정하기 때문에 우리나라 연안해역의 담수 확산범위를 상호 비교하는 연구가 곤란한 것으로 판단된다. 담수 확산 범위의 정량적인 정의는 시간적·공간적인 한계 수치로 표현할 수도 있으며, 염분 농도의 변화비율 정도로도 표현할 수 있다(조 등, 2003). 일단 정량적인 담수 영향범위 정의가 제시되면 영향범위를 추정하는 방법은 관측에 의한 방법과 수치모형을 이용한 방법으로 대별할 수 있다(Knowles, 2002). 수치모형은 기본적으로 연안 개발 사업 등에 의한 단기간의 담수 확산범위 추정에 이용되고 있으며, 추정신뢰도를 확보하기 위하여 관측 자료를 이

용한 모형의 보정 및 검증과정을 필요로 하고 있으며, 장기적인 담수 영향범위 추정은 관측 자료를 활용하는 것이 적합하다고 판단된다. 그러나 관측 자료는 관측빈도 및 지점 개수에 한계가 있기 때문에 시간적·공간적인 제약을 크게 받으나 관측 자료를 이용하여 구성된 수치모형은 유역에서의 담수 유출량에 대한 신뢰할 만한 정보가 제공된다면 시간적·공간적 제약을 넘어설 수 있는 장점이 있기 때문에 상세한 범위 추정이 가능하다고 할 수 있다. 실질적으로 수치모형을 이용한 범위추정이 활발하게 수행되고 있으나 모형의 보정 및 검증과정이 다소 미흡하고 장기적인 범위 추정에 취약하기 때문에 담수 확산 범위 추정 기초가 되는 장기적인 염분 관측 자료를 이용한 범위추정 연구와 병행할 필요가 있다. 본 연구에서는 국립수산과학원(www.nfrdi.re.kr; http://portal.nfrdi.re.kr/envirodata [해양수산연구정보])에서 제시하는 아산연안, 대산연안의 10년 동안(1997년~2006년)의 계절별(연 4회 관측; 2, 5, 8, 11월) 관측 자료를 이용하였으며, 염분과 유역 담수 유출량과의 상관관계 분석은 유출량 자료가 가용한 2000년~2006년까지의 자료를 이용하여 수행하였다.

3. 방조제 운영양상 및 강수량·증발량 변화 분석

농업용수 확보를 목적으로 건설된 방조제(배수갑문 포함)는 하계 집중호우로 인한 유역 침수 대비, 수문개방 및 기타 수위조절을 위한 수문운영시기를 제외하고는 폐쇄되어 있기 때문에 해역으로의 담수 유출이 대부분의 기간

동안 차단되어 있다. 본 연구에서는 아산만 하구지역에 건설·운영되고 있는 방조제의 운영양상을 정리하였다. 정리된 내용은 수문개방 빈도, 수문개방시간, 수문개방에 따른 평균 방류량(담수 배출량) 항목이며, 방조제 건설 전·후의 유출양상은 수량의 차이는 있으나 연속적인(continuous) 유출에서 간헐적인(intermittent) 유출로 변화되었기 때문에 간헐적인 유출양상 분석을 위한 월별 평균 수문개방 빈도 등은 중요한 인자로 판단되어 분석에 추가하였다. 또한, 유역 유출에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 강수량, 증발량이기 때문에 아산만 유역에 위치한 서산, 천안, 수원 측후소의 강수량 및 증발량 변화양상을 분석하고, 유역 유출량 및 배수갑문을 통한 방류량과의 상관관계 분석을 위한 참고자료로 이용하였다. 방조제 운영양상은 방조제 관리기관(한국농촌공사)을 방문하여 2000년~2006년 기간의 자료를 수집·정리하였다. 본 연구 분석 대상에 포함된 방조제의 제원 및 기본 정보는 한국농촌공사 자료를 참조하여 정리하였다(Appendix 참조; 한국농촌공사, 2006). 참고로 시화호 방조제 정보를 포함하였으며, 시화호 유역의 일부를 차지하며 아산만 연안으로 담수를 배출하는 탄도 배수갑문도 포함하였으나 유역면적이 상대적으로 작기 때문에 영향분석에서는 제외하였다.

3.1 아산만 유역의 강수량 및 증발량 변화

아산만 유역의 강수량 및 증발량 변화는 서산, 천안(증발량 자료 없음), 수원 측후소 자료를 이용하여 분석하였으며, 분석기간에 해당하는 2000년~2006년까지의 강수량

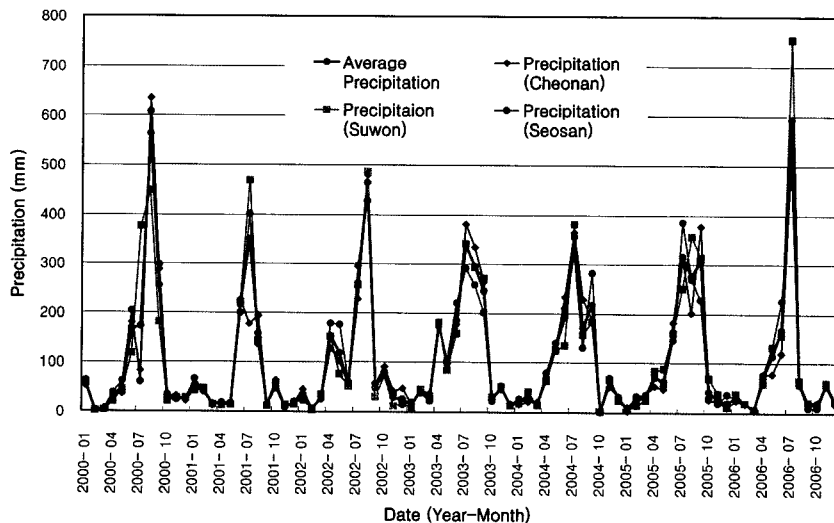


Fig. 1. Monthly precipitation changes in the Asan watershed (2000~2006).

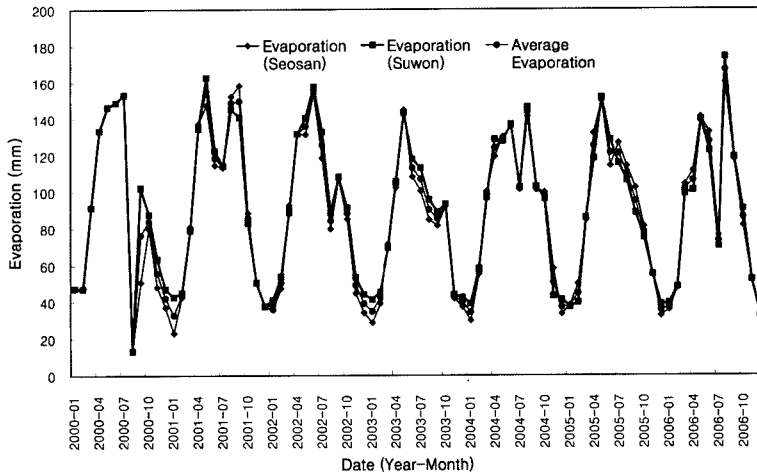


Fig. 2. Monthly pan evaporation changes in the Asan watershed (2000-2006).

변화양상(Fig. 1) 및 Pan 증발량 변화양상(Fig. 2)을 도시·분석하였다. 평균 연강수량은 1,290 mm, 표준편차는 128 mm, 연간 총 Pan 증발량은 1,075 mm, 표준편차는 41 mm로 강수량의 표준편차가 증발량의 표준편차보다 3배 정도 크게 나타났다. 연평균 강수량은 수원, 서산, 천안지점의 경우 각각 1,307 mm, 1,293 mm, 1,272 mm이며, 연평균 증발량은 수원, 서산지점의 경우 각각 1,090 mm, 1,060 mm로 지점별 편차는 30 mm 정도로 파악되었다. 강수량은 하계에 집중되는 전형적인 형태를 보이고 있으며, 증발량 변화도 계절적인 변화양상이 뚜렷한 반면, 하계의 일시적인 감소양상은 강우에 의한 증발량 감소영향으로 판단된다.

3.2 방조제 수문운영 양상 및 담수 배출량 분석

방조제의 수문운영 양상 분석은 월별로 수행하였으며, 수문개방빈도, 수문개방시간, 수문개방에 따른 방류량 자료를 추정하고, 추정자료를 이용하여 평균 수문개방간격(시간)을 계산하였다. 수문개방빈도는 방조제마다 차이가 있으나, 본 연구에서는 아산만 유역 방조제 6개 모두를 포함하여 개방빈도를 분석하였다(Table 1). 분석결과 동계(11월~2월)에는 월 평균 10회 정도로 개방하고 있으며, 하계(6월~9월)에는 월 평균 60회 정도 개방하고 있는 것으로 파악되었다. 따라서, 평균 수문개방간격은 동계에는 3일에 1회 정도(개방간격시간=72시간), 하계에는 하루에 2회 정도(개방간격시간=12시간, 실질적으로 조석주기 정도)로 동

Table 1. Frequency numbers of the gate operations in Asan Seadikes.

| Year \ Month | 2000 | 2001 | 2002 | 2003 | 2004 | 2005 | 2006 | Average | Percentage (%) |
|--------------|------|------|------|------|------|------|------|---------|----------------|
| 1 | 11 | 6 | 3 | 6 | 9 | 11 | 9 | 8 | 2.3 |
| 2 | 9 | 9 | 4 | 9 | 13 | 11 | 14 | 10 | 2.8 |
| 3 | 8 | 13 | 5 | 11 | 11 | 23 | 11 | 12 | 3.4 |
| 4 | 2 | 2 | 7 | 42 | 10 | 19 | 7 | 13 | 3.7 |
| 5 | 3 | 34 | 34 | 51 | 37 | 15 | 31 | 29 | 8.4 |
| 6 | 18 | 24 | 13 | 49 | 58 | 35 | 50 | 35 | 10.2 |
| 7 | 21 | 60 | 56 | 97 | 116 | 87 | 151 | 84 | 24.2 |
| 8 | 78 | 40 | 102 | 81 | 48 | 87 | 19 | 65 | 18.7 |
| 9 | 70 | 9 | 33 | 88 | 75 | 71 | 5 | 50 | 14.4 |
| 10 | 8 | 12 | 24 | 21 | 13 | 31 | 18 | 18 | 5.2 |
| 11 | 6 | 5 | 8 | 17 | 31 | 11 | 13 | 13 | 3.7 |
| 12 | 4 | 3 | 6 | 10 | 28 | 9 | 10 | 10 | 2.9 |
| Sum | 238 | 217 | 295 | 482 | 449 | 410 | 338 | 347 | 100.0 |

계와 하계가 큰 차이를 보이고 있는 것으로 파악되었다. 수문개방 빈도의 연도별 차이는 강수량의 영향으로 판단되며, 월별 수문 개방빈도도 월별 강수량 변화양상과 유사한 것으로 파악되었다.

또한, 유역 월 평균 강수량 정보와 유역면적을 이용하여 유역 수자원 총량을 산정하였으며, 산정된 수자원 총량과 방조제 수문개방을 통한 방류량의 비율에 해당하는 유출율을 산정하여 분석하였다. 방조제 방류량 자료가 없는 구간은 가용한 강수량자료와 방류량자료의 선형회귀분석을 통하여 산정된 결과를 이용하여 계산하였다. 결측자료 추정에 사용한 방정식, 즉 강수량과 방류량자료의 회귀곡선식과 결정계수는 다음과 같다. 한편, 아산만 유역의 월 평균 유출량과 강수량과의 상관관계를 분석한 결과 결정계수는 0.8862로 높은 상관성을 보이고 있는 것으로 파악되었으며, 수문 개방빈도와도 밀접한 관계가 있을 것으로 판단된다(Fig. 3). 자연적인 강수량과 인위적으로 조작되는 방조제 유출량과의 상관관계를 직접적으로 분석하는 것은 논리적인 문제가 있으나, 실질적으로 유역 유출량이 적은 경우를 제외하고는 방조제 수문은 유역에서의 유입 담수량 배제(침수 배제)에 중점을 두기 때문에 강수량과 수문을 통한 배출량이 큰 상관관계를 가지고 있는 것으로 파악되었다.

한편, 본 연구에서 강수량과 각 방조제 방류량의 회귀식은 1차식으로 분석하고, 전체적으로 강수량과 유역 총 유출량의 회귀식은 1차식보다 개선된 추정을 위하여 2차식으로 분석하였다. 그리고 회귀식의 절편이 음수로 추정되어 음수의 방류량이 산정(강수가 없는 경우)되는 물리

적으로 무의미한 현상이 발생하는 경우에는 기술적으로 0.0 또는 최소방류량 등으로 처리하는 방법 등이 필요하다. 회귀곡선식은 단지 오차제곱합을 최소로 하는 최적 곡선이기 때문에 물리적인 적용과정에서 무의미한 결과 또는 불가능한 결과가 계산되는 영역에서는 주의가 필요하다. 전체적으로 가장 적합한 식이라는 의미이지 모든 구간에서 무조건 적용할 수 있다는 의미는 아니다.

- 남양방조제: [방류량(1,000 m³/day)] = 83.24·[일강수량(mm)]+320.9, R² = 0.8862
- 아산방조제: [방류량(1,000 m³/day)] = 659.49·[일강수량(mm)]+10,554.0, R² = 0.8087
- 석문방조제: [방류량(1,000 m³/day)] = 189.64·[일강수량(mm)]-3,335.3, R² = 0.8218
- 삼교방조제: [방류량(1,000 m³/day)] = 935.30·[일강수량(mm)]-10,151.0, R² = 0.7691

추정된 자료로 결측구간을 보완(filling)하고, 연별 방조제 유역 유출을 계산한 결과, 남양, 아산, 삼교천, 석문방조제 유역 유출율은 각각 41.4%, 46.0%, 50.1%, 70.6%이다. 대호방조제 방류량은 남양, 아산, 삼교천의 3개 방조제 유역의 평균 유출율(45.8%)을 적용하여 산정하였다(석문방조제는 우리나라 연평균 유출율 55%를 크게 상회하는 값으로 타 지역과 매우 상이하므로 보다 정밀한 검토가 필요할 것으로 판단되어 평균 유출율 계산에서 배제하였다). 한편, 아산만 염분변화에 영향을 미칠 것으로 판단되는 화옹방조제는 현재 수질개선 목적으로 빈번한 수

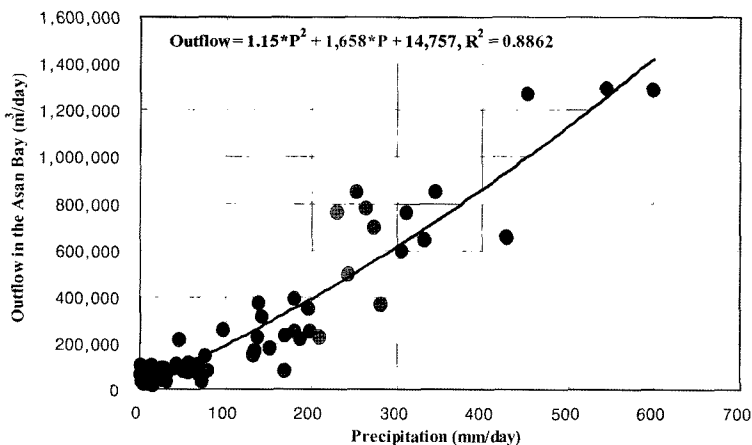


Fig. 3. Regression curve between precipitation and watershed discharges.

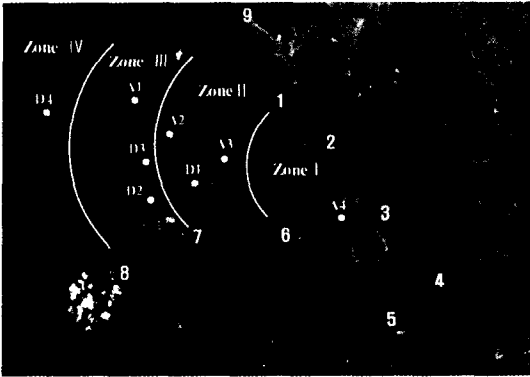


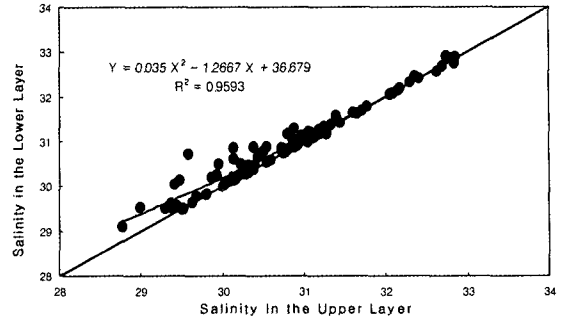
Fig. 4. Location of the salinity measurement stations in Asan Bay. (Ref.) 1: 단도배수갑문 2: 화용방조제 3: 남양방조제 4: 아산방조제 5: 삽교방조제 6: 석문방조제 7: 대호방조제 8: 가로림만 9: 시화방조제.

문조작을 통하여 해수소통을 하고 있기 때문에 수문개방 빈도 및 운영양상이 다른 방조제와 상이하여 분석대상에서 제외하였으며, 유역에서의 유출영향은 유역면적이 유사한 대호방조제 자료로 대체하여 사용하였다. 기타 방조제 유역에서 제외된 지역은 그 면적비율이 상대적으로 작아서 아산만 유역 총 유출량 계산에서 제외하였다.

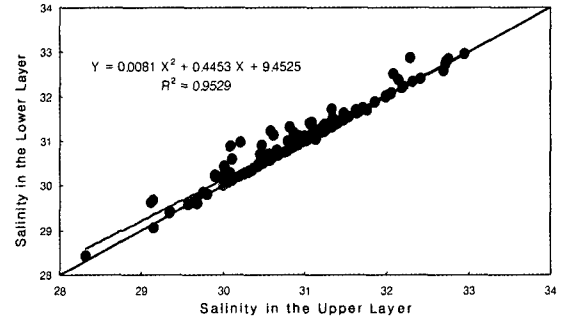
4. 유역 방류량과 해역 염분과의 상관관계 분석

4.1 염분 농도변화

방조제 유역에서 배출되는 담수는 아산만의 염분에 직접적으로 영향을 미칠 것으로 판단된다. 국립수산과학원 염분 관측 지점은 Fig. 4에 제시한 바와 같으며, 창조, 낙조, 대조, 소조에 대한 관측시점의 구별은 없다. 관측의 기본목적이 계절별 변화를 파악하는 것이기 때문에 정기적으로 연 4회(2월, 5월, 8월, 11월) 상층(표층에서 1 m 아래 지점), 하층(바닥 저층에서 1 m 위 지점)에서 해수를 채취하여 수질분석 공정시험법으로 분석하고 있다. 관측 시기가 3개월에 1회 정도이기 때문에 보다 작은 시간 규모의 관측을 구분할 수는 없다. 다만, 장기간의 관측 자료가 있기 때문에 통계적인 분석에는 적합할 것으로 판단되어 본 연구에서 담수 영향범위 분석에 이용하였다. 염분자료의 상관관계 및 유역에서 배출되는 담수유출량과 염분과의 상관관계를 분석하여 영향범위 및 정도를 파악하였다. 우선, 상층과 하층의 염분 차이를 분석한 결과 조석역이 강한 해역이기 때문에 염분 성층화(stratification) 양상은 뚜렷하게 나타나고 있지 않은 것으로 파악되었다(Fig.



(a) Asan stations (1997~2006)



(b) Daesan stations (1997~2006)

Fig. 5. Correlation of the salinities between the upper and lower layers.

5). 상층·하층 염분 변화 분석에서 역성층(상층의 염분농도가 하층보다 뚜렷하게 높은 경우) 등의 자료는 정상적인 자료 또는 잘못된 자료라기보다는 이상자료(outlier)로 판단하는 것이 타당하다고 사료되어 분석에서 제외하였다. 물론 분석에 포함하여도 큰 결과차이는 보이지 않으나, 상층·하층의 염분 분포에서는 제외하였다. 계절별 염분 변화는 상층·하층자료를 평균하여 분석·제시하였다(Fig. 6). 염분은 전반적으로 아산 4 지점에서 매우 낮고 변화가 크게 나타났으며, 하계에는 담수의 영향으로 염분 저하 경향이 뚜렷하게 보이고 있음을 알 수 있다.

4.2 염분의 상관관계 분석 및 통계정보 변화분석

염분의 공간적인 상관관계 분석을 수행한 결과(Table 2), 염분 관측지점의 결정계수는 아산지점(A1~A4)의 경우에는 아산 1 지점을 기준으로 아산 2, 3, 4 지점이 각각 0.8453, 0.6718, 0.4282로 지점간 거리차이가 증가할수록 작아지는 경향을 뚜렷하게 보이고 있다. 대산지점(D1~D4)의 경우에는 대산 4 지점을 기준으로 대산 3, 2, 1 지점이 각각 0.6187, 0.6679, 0.5355로 나타났으며, 대산 1-2 지점, 대산 1-3 지점, 대산 2-3 지점의 결정계수

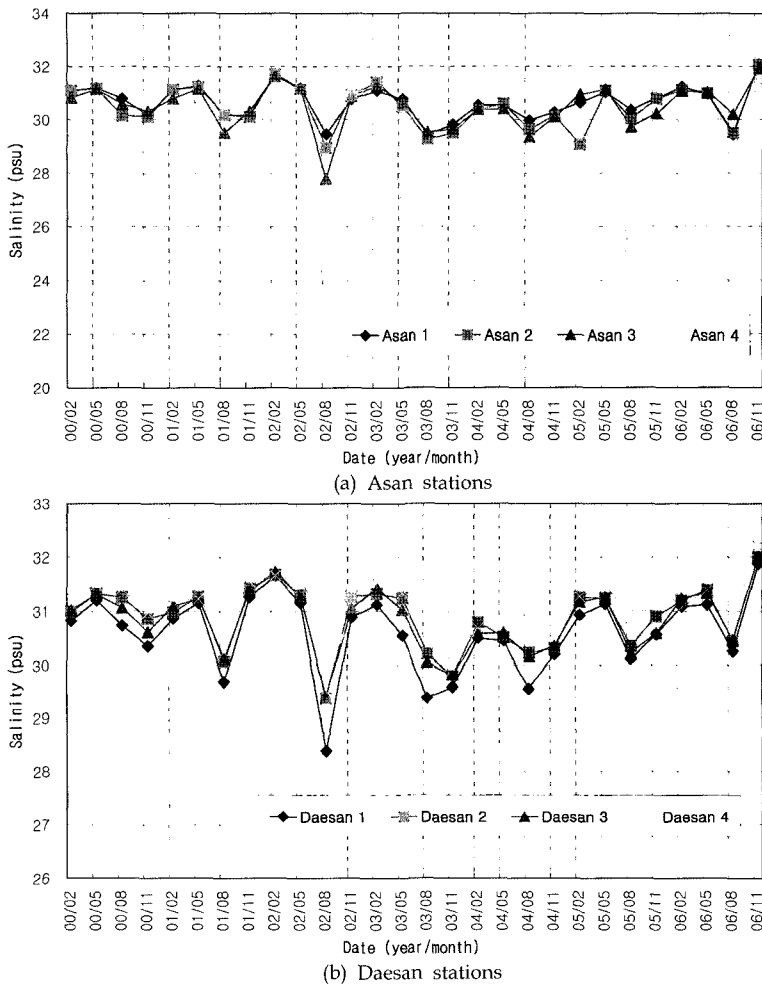


Fig. 6. Time-series plot of the seasonal salinity variations (2000~2006).

Table 2. Coefficients of determination between the Asan and Daesan stations

| | Asan1 | Asan2 | Asan3 | Asan4 | Daesan1 | Daesan2 | Daesan3 | Daesan4 | Salinity | |
|---------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|----------|--------------------|
| | | | | | | | | | Mean | Standard Deviation |
| Asan1 | 1.0000 | 0.8453 | 0.6718 | 0.4282 | 0.7287 | 0.6983 | 0.7178 | 0.5168 | 30.65 | 0.6622 |
| Asan2 | 0.8453 | 1.0000 | 0.7922 | 0.5627 | 0.7498 | 0.7169 | 0.7420 | 0.4268 | 30.50 | 0.9046 |
| Asan3 | 0.6718 | 0.7922 | 1.0000 | 0.7581 | 0.8568 | 0.8552 | 0.8639 | 0.3838 | 30.49 | 0.8658 |
| Asan4 | 0.4282 | 0.5627 | 0.7581 | 1.0000 | 0.6572 | 0.6345 | 0.6373 | 0.2381 | 28.61 | 2.2420 |
| Daesan1 | 0.7287 | 0.7498 | 0.8568 | 0.6572 | 1.0000 | 0.9152 | 0.8851 | 0.5355 | 30.59 | 0.7703 |
| Daesan2 | 0.6983 | 0.7169 | 0.8552 | 0.6345 | 0.9152 | 1.0000 | 0.9484 | 0.6679 | 30.89 | 0.6090 |
| Daesan3 | 0.7178 | 0.7420 | 0.8639 | 0.6373 | 0.8851 | 0.9484 | 1.0000 | 0.6187 | 30.84 | 0.6123 |
| Daesan4 | 0.5168 | 0.4268 | 0.3838 | 0.2381 | 0.5355 | 0.6679 | 0.6187 | 1.0000 | 31.15 | 0.4458 |

는 각각 0.9152, 0.8851, 0.9484로 대산 4지점을 제외하고는 지점간의 인접성으로 인하여 매우 높은 상관관계를 보이고 있는 것으로 파악되었다. 한편, 대산 1,2,3 지점과 인접한 아산 2,3 지점과도 지점간의 인접성으로 0.72~0.86 정

도의 높은 상관관계를 보이고 있는 것으로 파악되었다. 또한, 대산 1,2,3 지점과 인접한 아산 1 지점과도 지점간의 인접성으로 0.70~0.73 정도의 높은 상관관계를 보이고 있다. 그러나 대산 4 지점과 아산 4 지점은 거리차이의 영

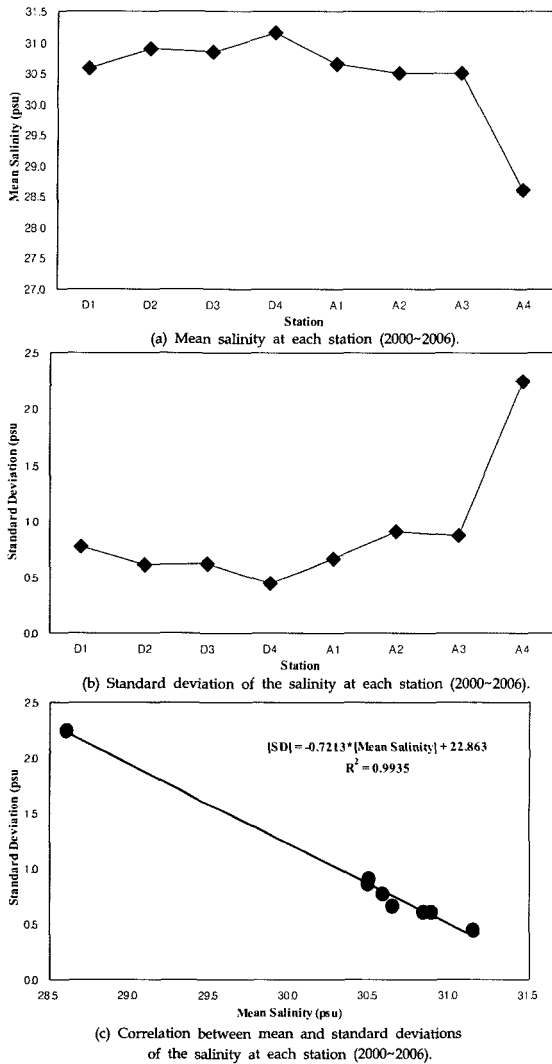


Fig. 7. Statistical information and correlation between mean and standard deviations of the salinity at each station (2000-2006).

향으로 결정계수가 가장 작은 0.2381로 나타났다.

아산지점과 대산지점의 평균 염분을 분석한 결과, 아산 4 지점을 제외한 모든 지점에서 30.5~31.2 psu 범위를 나타내고 있다(Fig. 7). 특히, 아산 4 지점의 평균 염분이 다른 지점보다 낮은 이유는 유역면적이 상대적으로 큰 안성천과 삼고천 유역의 담수 유출에 의한 영향으로 판단된다. 또한 인접한 남양방조제의 배수갑문을 통한 영향도 적지 않을 것으로 판단된다. 특히, 아산 4 지점에서의 평균 염분은 낮았지만, 표준편차는 2.24로 다른 지점보다 상당히 크게 나타나고 있으며, 평균 염분이 높아질수록 표준편차가 낮아지는 뚜렷한 경향을 발견하였다(Fig. 7). 염분의 평균과 표준편차의 결정계수는 0.9935로 상관관계가 매우 크며, 담수 배출에 의한 영향이 염분 감소 정도와 변화 정도에 동시에 영향을 미치고 있는 것으로 추정할 수 있다.

4.3 염분과 담수유출량 상관관계 분석 및 담수 확산범위

담수유출량(m^3/day)은 염분 농도 관측시기 2월, 5월, 8월, 11월에 맞추어 각각 2월, 5월, 8월 11월에 미치는 유출량으로 구분하고, 각각의 유출량은 염분농도 관측시점을 포함하여 이전 3개월 자료를 평균하여 산정하였다. 염분과 담수 유출량 상관관계 분석은 염분자료가 2월, 5월, 8월, 11월의 계절별 자료이기 때문에 담수유출량을 계절별로 산정하여 상관관계를 분석하였다(Table 3). 즉, 상층과 하층의 계절별 염분자료에 의하면, 관측시기 및 기기가상으로 인한 관측의 이상자료(outlier)가 발생하기 때문에 상층과 하층의 염분자료를 그대로 이용하기 보다는 평균한 염분자료를 이용하여 담수유출량과의 상관관계를 분석하였다. 유역 유출량과 염분농도의 결정계수는 대산 4 지점을 제외하고는 0.49~0.62 범위로 강수량과 배출량(유역 담수 유출량)의 결정계수 보다는 작게 나타났다.

Table 3. Correlation analysis between freshwater discharge and salinity

| Measurement Stations | Linear Regression Equation | | R ² |
|----------------------|---|-------------------|----------------|
| | X = Freshwater discharge(1,000ton/day), | Y = Salinity(psu) | |
| Asan 1 | $Y = -2.44 \times 10^{-6} X + 31.21$ | | 0.5506 |
| Asan 2 | $Y = -2.82 \times 10^{-6} X + 31.14$ | | 0.4875 |
| Asan 3 | $Y = -3.20 \times 10^{-6} X + 31.22$ | | 0.5817 |
| Asan 4 | $Y = -7.42 \times 10^{-6} X + 30.29$ | | 0.5271 |
| Daesan 1 | $Y = -2.97 \times 10^{-6} X + 31.26$ | | 0.6165 |
| Daesan 2 | $Y = -2.11 \times 10^{-6} X + 31.37$ | | 0.4921 |
| Daesan 3 | $Y = -2.28 \times 10^{-6} X + 31.36$ | | 0.5684 |
| Daesan 4 | $Y = -1.11 \times 10^{-6} X + 31.40$ | | 0.2544 |

따라서, 아산만 유역 방류의 영향범위는 상관관계 분석에 의하면, 대산 1, 2, 3 지점과 아산 1, 2, 3, 4 지점 정도로 제한되는 것으로 판단된다. 그러나 결정계수로 유역 담수유출과 염분변화의 상관정도를 추정하는 것은 방조제 배수갑문을 이용한 인위적인 제어, 유역에서의 유출지체 효과, 해역에서의 확산 지체효과 등의 영향으로 다소 무리가 있을 것으로 판단된다. 대산 4 지점을 제외한 담수 유출량과 염분의 결정계수는 0.5~0.6 정도의 약한 상관관계(Haldar and Mahadevan, 2000; Yemenis and Stammer, 2004)를 가지고 담수 영향범위를 추정하는 방법보다는 지점별 평균 염분 및 염분의 표준편차 변화를 파악하여 분석하는 것이 보다 적합할 것으로 판단된다. 실질적으로 연안에서의 담수 확산속도가 있기 때문에 배출지점에서 가까울수록 즉각적인 영향이, 멀수록 확산시간만큼의 차이를 두고 그 영향이 나타날 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 3개월 간격의 염분농도 자료로는 확산시간을 고려한 분석이 곤란할 것으로 판단하여, 장기적인 자료를 이용하여 염분 평균농도 및 표준편차 정보를 바탕으로 농도가 낮고 표준편차가 큰 지역은 유역에서의 담수 영향이 큰 지역이며, 농도가 높고 표준편차가 작은 지역은 담수 영향이 미미한 지역(담수영향범위를 벗어난 지역)으로 간주하였다.

이 기준을 오염물질 확산범위 추정에 적용하기 위해서는 오염물질 농도가 높고, 표준편차가 큰 지역은 오염물질 배출의 직접적인 영향지역이고, 오염물질 농도가 낮고 표준편차가 작은 지역은 오염물질 배출의 영향이 미미한 지역으로 간주할 수 있다. 따라서 정량적인 확산범위를 정의하기 위해서는 배출지점의 농도와 배경농도(background)를 고려하여 기준농도를 결정하고 충분히 먼 지역의 배경농도 자료의 통계분석을 통하여 육상에서의 영향이 없

는 자연적인 영향만이 있는 경우로 간주할 수 있는 상태에서의 표준편차를 감안하여 기준 표준편차를 결정할 수 있다.

본 연구에서는 배경농도를 대산 4지점의 30~31psu 정도로 설정하고, 기준 표준편차는 배경농도의 5%(±2.5%) 정도인 ±0.75(=1.5/2) 정도를 영향범위로 정의하면 아산 2, 3, 4지점, 대산 1 지점을 담수 영향범위로 추정할 수 있으며, 기준 표준편차를 배경농도의 1% 정도, 즉 0.3 정도로 규정하면 본 연구 분석대상에서 포함한 모든 지점이 영향범위로 간주될 수 있다(Fig. 4). 본 연구에서는 염분 변화 특성을 고려하여 아산만 해역을 4개의 영역(아산 4지점 - 영역 I; 아산2-3지점+대산1지점 = 영역 II; 대산 2-3지점+아산1지점=영역 III; 대산 4지점=영역 IV; Fig 4)으로 특성별로 구분하고, 담수 영향범위를 추정 제시하였다. 즉, 담수 확산범위를 직접적인 영향권과 간접적인 영향권으로 크게 구분하고, 보다 세분화된 구분에 의하면 영역 I은 담수의 강한 직접적인 영향권, 영역 II, 영역 III은 다소 구분이 모호하지만 각각 담수의 약한 직접적인 영향권, 강한 간접적인 영향권, 영역 IV는 담수의 약한 간접적인 영향권(또는 담수 영향범위를 벗어나는 지역)으로 구분할 수 있다. 용어의 차이는 있으나 영역 II, 영역 III을 하나로 통합하면, 3개의 영역으로 구분할 수 있으며, 각각 담수의 직접적인 영향권(영역 I), 간접적인 영향권(영역 II, III), 영향범위 외부 영역(영역 IV)으로 구분할 수도 있을 것으로 판단된다.

따라서 담수 영향범위는 영향범위에 대한 정량적인 기준(정의)에 따라 크게 차이가 나타날 수 있으나 수치모형의 신뢰수준 및 관측 자료의 분석 신뢰수준, 대표성, 불확실성 등을 적절하게 감안하여 통계적으로 평균±K(표준편차)로 정의하는 것이 합리적일 것으로 판단된다(여기서,

Table 4. Seasonal mean and standard deviation variations of the salinity

| Month | Salinity Mean (psu) | | | |
|-------|--------------------------------------|---------|----------|---------|
| | Zone I | Zone II | Zone III | Zone IV |
| 2 | 29.73 | 30.95 | 31.14 | 31.24 |
| 5 | 29.58 | 30.96 | 31.11 | 31.32 |
| 8 | 26.03 | 29.64 | 30.15 | 30.85 |
| 11 | 29.08 | 30.56 | 30.78 | 31.20 |
| Month | Standard Deviation of Salinity (psu) | | | |
| | Zone I | Zone II | Zone III | Zone IV |
| 2 | 0.7237 | 0.5500 | 0.3442 | 0.3190 |
| 5 | 1.1521 | 0.3081 | 0.2756 | 0.2698 |
| 8 | 2.3322 | 0.7042 | 0.5282 | 0.3123 |
| 11 | 1.0902 | 0.7695 | 0.7323 | 0.6751 |

K=신뢰수준을 반영하는 계수). 즉, 그러나 추가적으로 평균농도 대비 또는 절대 표준편차의 변동정도도 고려할 필요가 있는 것으로 판단된다. 본 연구에서는 배경농도(평균) 30 psu 기준, 변화비율이 $\pm 2.5\%$ (0.75 정도) 변화 범위를 벗어나는 지역을 영역을 영향범위로 정의하였으며, 추가적으로 표준편차의 변화정도가 평균의 $\pm 2.5\%$ 변화비율에 해당하는 영역으로 정의하였다. 이 정의에 의하면 평균 염분농도가 $31 \text{ psu} \pm 0.75 = 31.75 \sim 30.25 \text{ psu}$ 범위를 벗어나거나 염분의 표준편차가 ± 0.75 를 벗어나는 영역을 담수영향 범위로 간주한다. 또한 담수 영향범위는 계절별로 차이가 나기 때문에 계절별 염분 평균 및 표준편차를 정리·제시하였다(Table 4). 하계(8월) Zone I 지역의 표준편차가 큰 이유는 유역에서의 담수유출에 의한 직접적인 영향으로 판단되며, 하계에서 벗어나는 추계(11월) Zone II, III, IV 지역의 표준편차가 Zone I 지역을 제외하고는 하계보다 크게 나타나고 있는 이유는 정확한 추정은 곤란하나 표준편차가 점차 감소하는 경향을 감안하면 유역에서의 담수유출이 장기적으로 미치는 영향으로 판단되며, 추계 염분자료는 하계 관측이후의 영향을 감안할 경우 하계 유역 담수의 장기적인 유출영향으로도 추정할 수 있다. 실질적으로 우리나라의 경우, 강우는 7월~9월에 집중되기 때문에 염분자료에서 하계, 추계 자료 모두 담수 유출량이 큰 시기의 영향을 받을 수 있다고 판단된다.

본 연구에서는 담수유출량과 염분 농도의 상관관계 분석은 수행하였으나, 담수 영향범위 추정은 관측자료의 평균 염분농도와 표준편차 자료를 이용하여 추정하였다. 한편 아산만 유역은 방조제로 유역에서의 유출이 인위적인 영향을 받고 있으며, 해역에서의 확산 지체효과 등은 확산 속도를 의미하는 것이다. 즉 배출지점 입구는 즉시 담수 유출의 영향을 받을 수 있으나 먼 해역에서는 그 영향이 더 느리게 나타날 수 있다.

5. 결론 및 제언

아산만 유역에 건설된 배수갑문 운영양상을 분석하였으며, 유역의 강수량과 배수갑문을 통하여 배출되는 담수량과의 결정계수는 0.77~0.89 범위로 비교적 높은 상관관계를 보이는 것으로 파악되었다. 한편, 아산만 해역의 아산연안 4개 지점, 대산연안 4개 지점의 염분농도를 분석한 결과 강한 조석의 영향으로 하계 일부 지점을 제외하고는 뚜렷한 성층화(stratification) 현상은 나타나지 않았으며, 유역 유출량과 염분농도의 결정계수는 대산 4 지점

을 제외하고는 0.49~0.62 범위로 강수량과 배출량의 결정계수 보다는 작게 나타났다. 또한 염분 평균 농도와 염분의 표준편차는 강한 상관관계(결정계수 = 0.9935, Fig. 7(c))를 보이는 것으로 파악되었으며, 향후 보다 많은 자료를 이용한 분석이 필요하지만 영향정도가 평균과 더불어 염분의 표준편차에도 반영되고 있는 것으로 추론할 수 있다. 한편 염분농도의 평균 및 표준편차를 이용한 담수 확산범위 기준에 의하면 아산 2~4 지점, 대산 1 지점이 영향범위로 추정되지만, 담수 확산범위가 크게 나타나는 하계자료(8월 자료)만을 이용하여 분석하면 평균 염분을 이용하는 경우 대산 4 지점을 제외하고 모든 범위로 담수가 확산되고 있음을 알 수 있다.

따라서 향후 연구에서는 염분이 보다 낮은, 즉 담수유입의 영향이 매우 큰 지역에서의 관측 자료를 많이 이용하는 것이 보다 타당하고 공간적으로 세분화된 결과도출에 기여할 것으로 판단된다. 그러나 이 부분의 관측 자료는 상대적으로 매우 미흡하기 때문에 국립수산과학원의 정기적인 해양환경(염분) 관측망에 지점을 추가하여 자료를 확보할 필요가 있을 것으로 판단된다. 그리고 염분 30.0 psu 이상인 지역이라 할지라도 거의 희석된 지역이라고 판단할 수 있으나 염분의 변동 정도(표준편차)를 보면 그 차이가 구분되기 때문에 절대적인 염분 농도만으로 영역을 구분하는 것보다는 본 연구에서 제시한 염분의 표준편차를 고려하는 기준이 보다 적합할 것으로 판단된다.

담수 확산범위는 담수 확산범위에 대한 정량적인 정의에 따라 결정되기 때문에 실질적이고 합리적인 담수 확산범위 추정에 대한 연구가 필요하다. 본 연구에서는 배경농도로 판단되는 염분농도의 5% 변화 비율을 벗어나거나 표준편차가 기준 염분농도의 5% 범위를 벗어나는 경우로 정의하여 확산 범위를 분석하였다. 이 정의는 통계적인 자료 분석에 근거하고 있기 때문에 객관성을 가지고 있는 것으로 판단되며, 향후 오염물질 확산 범위에 대한 정량적인 정의 등으로 확장할 수 있으며, 변화비율에 대한 기준도 보다 합리적이고 과학적인 근거를 가지는 수치를 파악하는 연구가 필요하다.

감사의 글

본 연구 사업은 한국해양연구원 하구관리 및 복원기술 개발사업(PE-9811A)의 지원을 받아 수행되었습니다.

참고문헌

- 건설교통부, 한국수자원공사 (2002). 우리 가람 길라잡이.
- 경기도 (1994). 발안동화천 수계 하천정비 기본계획 (발안천·동화천·남전천·검곡천·하가등천·어천·구포천).
- 조광우, 맹준호, 신범식, 김병준 (2003). 해수유동 및 부유사 확산의 예측기법 개선에 관한 연구, 제5장, 2. 연구 보고서 RE-19, 한국환경정책평가연구원.
- 한국농촌공사 (2006). 대단위간척사업 2006 사업현황.
- Connor, D. W., Gilliland, P. M., Golding, N., Robinson, P., Todd, D., and Verling, E. (2006). UKSeaMap : The mapping of seabed and water column features of UK seas, Joint Nature Conservation Committee, Peterborough.
- Haldar, A. and Mahadevan, S. (2000). Probability, Reliability, and Statistical Methods in Engineering Design, Sec. 3.4.4, John Wiley & Sons.
- Knowles, N. (2002). Natural and management influences on freshwater inflows and salinity in the San Francisco Estuary at monthly to inter-annual scales, *Water Resources Research*, 38(12), 25-1~25-11.
- Lagadeuc, Y., Brylinski, J. M. and Aelbrecht, D. (1997). Temporal variability of the vertical stratification of a front in a tidal Region Of Freshwater Influence (ROFI) system, *Journal of Marine Systems*, 12, 147-155.
- Lewis, R. (1997). Dispersion in Estuaries and Coastal Waters, Sec. 9.3.3, John Wiley & Sons.
- Luyten, P. J. (1997). Modelling physical processes of haline stratification in ROFIs with application to the Rhine outflow region, *Journal of Marine Systems*, 12, 277-298.
- Martin, G. D., Vijay, J. G., Laluraj, C. M., Madhu, N. V., Joseph, T., Nair, M., Gupta, G. V. M. and Balachandran, K. K. (2008). Freshwater Influence on Nutrient Stoichiometry in a Tropical Estuary, Southwest Coast of India, *Applied Ecology and Environmental Research*, 6(1), 57-64.
- McLusky, D. S. (1999). Estuarine benthic ecology: A European perspective, *Australian Journal of Ecology*, 24, 302-311.
- Simpson, J. H. (1997). Physical processes in the ROFI regime, *Journal of Marine Systems*, 12, 3-15.
- Souza, A. J. and Simpson, J. H. (1997). Control on stratification in the Rhine ROFI system, *Journal of Marine Systems*, 12, 311-323.
- Yemenis, T. and Stammer, D. (2004). Time and Space Scales in the AMSR-E SST Fields, The ECCO Report Series, Report No.35., National Oceanographic Partnership Program.

Received January 25, 2008

Accepted April 16, 2008

Appendix

A. Information of the seadike structures and watersheds

| 내 용 | 남양방조제 | 아산방조제 | 삼교천방조제 | 석문방조제 |
|---------------------------|---------------------|---------------------|--------------------------|--------------------|
| 사업지구 | 평택지구 | 평택지구 | 삼교천지구 | 석문지구 |
| 위치(행정구역) | 화성-평택 (경기도) | 평택(경기도) 아산(충청남도) | 아산-당진 (충청남도) | 당진(충청남도) |
| 관 리 기 관 | 한국농촌공사 수원지사 | 한국농촌공사 평택지사 | 한국농촌공사당진지사 | 한국농촌공사 당진지사 |
| 공 사 기 간 | 1971.4 ~1973.12 | 1970.12 ~1973.12 | 1976.12 ~1979.11 | 1987.8 ~2005.12 |
| 매립면적(ha) | 3,650 | 3,197 | 2,594 | 3,740 |
| 간척지면적(ha) | 2,285 | 397 | 989 | 2,831 |
| 유역면적(ha) | 20,900 | 163,400 | 163,950 | 22,630 |
| 유역의 하천 | 발안천 등 +수로유역 | 안성천 | 삼교천 | 역천+당진천 +수로유역 |
| 하천등급(하천법) | 지방2급하천 | 국가하천 | 국가하천 | 지방2급하천 |
| 총저수량(ha-m) | 3,100 | 12,300 | 8,426 | 1,461 |
| 유효저수량(ha-m) | 1,800 | 8,300 | 6,279 | 910 |
| 관리수위(m) | 0.50 | 2.50 | 2.50 | -1.70 |
| 홍수기 제한수위(m) | 2.10 | 4.50 | 5.10 | 2.78 |
| 제방표고(m) | 8.50 | 8.50 | 8.50 | 8.50 |
| 방조제 길이(m) | 2,060 | 2,564 | 3,360 | 10,556 |
| 배수갑문 규모 (B×H×N, m-m-수) | 4.9×3.0×12 | 10×6×12 | 20×6×6 | 15×10.5×8 |
| 내 용 | 대호방조제 | 우정방조제(화용방조제) | 시화방조제 (시화1, 2방조제) | 시화방조제 (탄도배수갑문) |
| 사업지구 | 대호지구 | 화용지구 | 시화지구 | - |
| 위치(행정구역) | 서산-당진(충청남도) | 화성(경기도) | 시흥, 안산, 화성(경기도) | - |
| 관 리 기 관 | 한국농촌공사 서산지사 | 한국농촌공사 수원지사 | 한국수자원공사 한국농촌공사 | 한국농촌공사 |
| 공 사 기 간 | 1981.4. ~1985.9. | 1991.9 ~2002.3. | 1987.6 ~1994.1 | 1987.6 ~1988.5 |
| 매립면적(ha) | 7,648 | 6,212 | 4,396 | - |
| 간척지면적(ha) | 3,700 | 4,482 | 3,636 | - |
| 유역면적(ha) | 27,900 | 23,580 | 47,650 | - |
| 유역의 하천 | 원천천 등 +수로유역 | 남양천+ 자안천 등 +수로유역 | 안산천, 반월천, 동화천, 신 길천 등 | 탄도호 |
| 하천등급(하천법) | 지방2급하천 | 지방2급하천 | 지방2급하천 | - |
| 총저수량(ha-m) | 12,200 | 5,444 | 34,233 | - |
| 유효저수량(ha-m) | 4,646 | 2,816 | 19,148 | - |
| 관리수위(m) | -0.50 | -1.50 | -1.0 | -1.0 |
| 홍수기 제한수위(m) | 0.40 | -0.57 | 0.09 | 0.42 |
| 제방표고(m) | 8.00 | 8.50 | 7.0~9.0 | 8.0 |
| 방조제 길이(m) | 7,800 | 9,810 | 12,676 | 853 |
| 배수갑문 규모 (B×H×N, m-m-수) | 10×6×6 | 16.7×12.5×6 | 12×6×8 | 6×6×2 |

(주) *: 남양방조제 유역면적은 발안천 유역면적(61.0 km²), 하가등천 유역면적(10.1 km²), 검곡천(또는 금곡천) 유역 면적(9.2 km²) 및 발안천 유역면적이 산정된 지점(검곡천 합류지점)의 하류지점을 포함하여 산정한 유역면적. 발안천 중점은 남양방조제로 설정되어 있으나, 하천정보 등에 제시된 유역면적은 하천중점 기준 면적이 검곡천 합류지점을 기준으로 추정된 면적으로 파악.

B. Gate operation data in Asan Bay

| 남양방조제 | | | | | 아산방조제 | | | |
|--------|------|------|---------|-------|-------|------|-----------|-------|
| 연도 | 개방횟수 | 개방시간 | 유출량 | 강우량 | 개방횟수 | 개방시간 | 유출량 | 강우량 |
| Y-2000 | 43 | 75 | 101,563 | 1,329 | 78 | 281 | 1,062,548 | 1,329 |
| Y-2001 | 34 | 106 | 92,683 | 1,067 | 59 | 199 | 653,029 | 1,067 |
| Y-2002 | 34 | 105 | 91,931 | 1,232 | 79 | 249 | 1,034,709 | 1,232 |
| Y-2003 | 75 | 190 | 141,729 | 1,516 | 112 | 363 | 1,291,673 | 1,516 |
| Y-2004 | 93 | 292 | 115,083 | 1,217 | 114 | 396 | 928,970 | 1,217 |
| Y-2005 | 80 | 262 | 134,394 | 1,437 | 102 | 331 | 1,036,444 | 1,437 |
| Y-2006 | 45 | 151 | 116,546 | 1,363 | 75 | 259 | 920,021 | 1,363 |
| 평균 | 58 | 169 | 113,419 | 1,309 | 88 | 297 | 989,628 | 1,309 |

| 석문방조제 | | | | 삽교천방조제 | | | | |
|--------|------|------|---------|--------|------|------|-----------|-------|
| 연도 | 개방횟수 | 개방시간 | 유출량 | 강우량 | 개방횟수 | 개방시간 | 유출량 | 강우량 |
| Y-2000 | | | 235,593 | 1,425 | 59 | 216 | 1,364,977 | 1,425 |
| Y-2001 | 52 | 130 | 157,271 | 987 | 38 | 92 | 628,448 | 987 |
| Y-2002 | 55 | 148 | 194,423 | 1,388 | 61 | 133 | 943,724 | 1,388 |
| Y-2003 | 87 | 231 | 237,517 | 1,435 | 102 | 227 | 1,520,266 | 1,435 |
| Y-2004 | 69 | 169 | 218,803 | 1,341 | 83 | 314 | 1,180,644 | 1,341 |
| Y-2005 | 78 | 167 | 206,552 | 1,334 | 72 | 170 | 1,138,642 | 1,334 |
| Y-2006 | 45 | 123 | 193,853 | 1,139 | 50 | 105 | 774,276 | 1,139 |
| 평균 | 64 | 161 | 206,288 | 1,293 | 66 | 157 | 1,078,711 | 1,293 |

| 대호방조제 | | | | 화옹(우정)방조제 = 대호방조제 자료 | | | | |
|--------|------|------|---------|----------------------|------|------|---------|-------|
| 연도 | 개방횟수 | 개방시간 | 유출량 | 강우량 | 개방횟수 | 개방시간 | 유출량 | 강우량 |
| Y-2000 | 58 | 77 | 182,064 | 1,425 | 58 | 77 | 182,064 | 1,425 |
| Y-2001 | - | - | 126,095 | 987 | - | - | 126,095 | 987 |
| Y-2002 | 66 | 178 | 177,310 | 1,388 | 66 | 178 | 177,310 | 1,388 |
| Y-2003 | 106 | 145 | 183,393 | 1,435 | 106 | 145 | 183,393 | 1,435 |
| Y-2004 | 90 | 125 | 171,343 | 1,341 | 90 | 125 | 171,343 | 1,341 |
| Y-2005 | 78 | 112 | 170,487 | 1,334 | 78 | 112 | 170,487 | 1,334 |
| Y-2006 | 82 | 131 | 145,569 | 1,139 | 82 | 131 | 145,569 | 1,139 |
| 평균 | 80 | 128 | 165,180 | 1,293 | 80 | 128 | 165,180 | 1,293 |

*단위: 개방시간(Hour), 유출량(1,000 m³), 강우량(mm), 모든 항목은 1년 동안의 값[단위].

*참고: 화옹방조제는 해수소통을 위하여 상시개방을 하고 있기 때문에 아산만 연안 방조제와는 운영양상이 상이. 유역면적 및 유출율이 유사한 대호 방조제 유출 자료로 대체.