

하구언 수문 작동으로 인한 금강 하구역의 물리적 환경변화: III. 저염수의 조석동조

이상호* · 최현용 · 권효근

군산대학교 해양정보과학과, 새만금환경연구센터, 해양개발연구소

Physical Environment Changes in the Keum River Estuary Due to Dike Gate Operation: III. Tidal Modulation of Low-salinity Water

SANG-HO LEE*, HYUN-YONG CHOI AND HYO-KEUN KWON

Department of Oceanography, SERC, CRC, Kunsan National University, Kunsan 573-701, Korea

금강하구언에서 낙조동안 인위적으로 방류된 담수의 하구 내 거동을 파악하고자 1997년 5월과 1998년 7월에 각각 수로방향으로 설정된 3개 지점에서 표층 염분변화를 관측하였으며, 1999년 7월에는 군산-장항간 도선항로를 따라 18일간 표층염분과 수온을 관측하였다. 관측된 염분변화의 특징으로부터 방류된 담수가 하구 내에서 거동·소멸하는 과정을 분석하였다. 담수가 방류되면 저염수는 하구 폭 전반에 걸친 강한 염분전선을 형성하며 담수거동은 기본적으로 조석운동에 동조되어 수로를 따라 왕래하고, 이 전선의 통과로 염분은 급격한 변화를 보인다. 수문개폐로부터 한 조석주기 이후의 하구 폭 평균염분의 시간적 변화로부터 해석된 수로방향의 공간적 분포는 전선역에 담수희석수가 응축되며 표층염분이 상류쪽으로 갈수록 점진적으로 증가하는 것으로 제시되었다. 이러한 염분의 전선역 분포는 두 시간정도의 하구언 수문 개방에 의한 급작스런 담수공급과 중단에 의해 발생한 것으로 해석되었다. 매일 담수방류의 반복은 수문 개방시기에 의해 이전의 전선과 새로운 전선의 분리(이중전선) 혹은 병합을 만들고, 담수공급이 2일 이상 중단되면 염분이 증가되며 전선이 소멸한다. 또한, 표층염분 변화에 나타나는 변동과 변이는 하구언에서 인위적으로 행해지는 담수 방류량 차이에 의해 발생하는 염분전선의 세기와 통과시기의 공간적 차이, 그리고 일시적인 하구수로 방향을 따른 염분전선 등에 의한 것으로 해석되었다.

To examine the movement of the freshwater discharged artificially into the estuary during ebbing period in the Keum River dike we observed surface salinity variations in three stations along the estuary channel in May 1998 and July 1997 and surface temperature and salinity along the ferry-route between Kunsan and Changhang during eighteen days in July 1999. Based upon the typical features of observed salinity variation, we analyzed the excursion and decay processes of the discharged water. When freshwater is discharged, the low-salinity water forms strong salinity front over the entire estuary width, which basically moves forth and back by tidal modulation along the channel, producing the sudden change of surface salinity with the front passage. Salinity distribution along the channel, which is deduced from time variation of mean salinity over the estuary width, after one tidal period from gate operation suggests that diluted low-salinity water is trapped to the front and surface salinity increases gradually toward the upstream region. This frontal distribution of salinity is interpreted to be produced by the sudden gate operation supplying and stopping of freshwater within about two hours. Daily repeat of freshwater discharge produces separation (double front) or merge between decaying and new-generated fronts depending on dike-gate opening time, and the front decays with salinity increasing if the freshwater supply is stopped more than two days. In addition, the observed fluctuations and deviations in surface salinity variation is explained in terms of the differences of fronts intensity, their transition time and temporal salinity front running along the channel, which can be generated due to artificial gate-operation for the discharging time and water volume in the estuary dike.

1. 서 론

금강은 한반도 서해 중부에 위치하는 하천으로 군산과 장항 사이의 하구를 통하여 서해로 연결된다(Fig. 1). 금강하구는 군산항

검조소의 대조차가 약 7.5 m 정도인 지역으로 조석과 조류는 정상과 특성에 가까우며 반일주조가 우세하다(국립해양조사원, 1999). 폭 2 km 정도의 하구는 수심이 10 m 미만이고 유부도 부근의 대죽사주에 의해 남쪽과 북쪽의 2개 수로로 나뉘어진다. 북쪽 수로는 저조에 대부분 간사지로 변하여 해수 및 담수의 통과량이 매우 적다. 하구언 축조전의 담수 유출량은 연간 약 60억 ton 이었

*Corresponding author: sghlee@kunsan.ac.kr

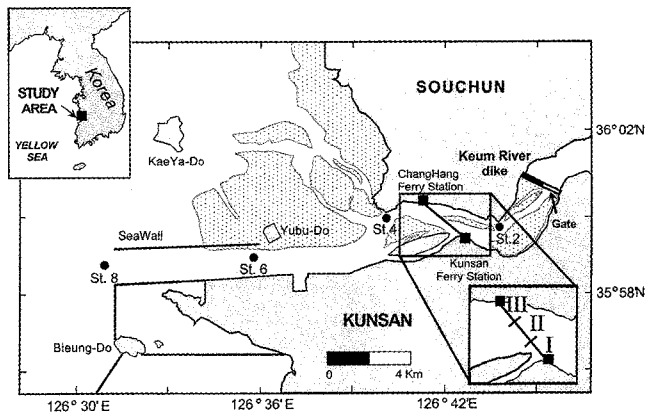


Fig. 1. Station map of surface salinity observation in the Keum River estuary in July 1997 (St. 2, 4 and 8) and May 1998 (St. 2, 4 and 6), and observation line of surface temperature and salinity along the ferry route between Kunsan and Chanhang in July 1999. Dotted area indicates the dry bank at low tide and roman characters in the ferry route denotes the subset of the observation line.

으며(Schubel *et al.*, 1984), 7월부터 9월까지의 유출량이 연간 유출량의 60% 정도에 달한다(나, 1993; 김과 기, 1987). 1994년 8월 31일에 하구언 수문작동으로 담수호가 형성되고 담수호는 하구의 기수와 완전 분리되었다. 이로 인하여 하구길이가 20 km 정도로 줄었으며 금강상류의 염분 확산과 조석전파가 차단되었고(최와 안, 1985; 최와 오, 1987), 담수호의 수위조절을 위하여 주기적 혹은 간헐적으로 낙조 때에만 2시간정도 담수가 하구로 방류되는 인위적 조절환경으로 변화되었다.

하구언 건설로 인해 변화된 물리적 환경에 대한 연구를 살펴보면, 권과 이(1999)가 금강하구의 비조석 해수면변동과 조석변화를 분석하여 근산내항 검조소의 평균해수면이 약 9 cm 정도 하강하였으며 M2와 S2 분조의 진폭이 각각 16 cm와 11 cm 정도 증가하였음을 보여주었다. 하구언 건설 이후의 하구유형은(이 등, 1999; 최 등, 1995; Lee *et al.*, 1999) 하계 풍수기에 부분 혼합형, 추계 갈수기에 완전 혹은 부분 혼합형의 유형을 나타내어 조류에 의한 난류혼합이 우세한 환경을 유지하고 있는 것으로 조사되었으며, 담수 방류량이 많을 때 하구상류에서는 성층계수가 높아져 염쇄 기형 하구가 될 수 있는 가능성을 보였다.

하구 내에서 담수가 외해로 유출되는 형태에 따라 하구유형이 달라지며 또한 순환기작이 결정되므로 하구 내에서의 담수거동은 하구 역학적으로 매우 중요하다. 하지만, 하구유형이 조석주기 평균 유속구조와 염분구조에 의해 분류되었을 때는 조석주기동안의 하구 내 담수거동과 물성변화의 특징은 표현되지 못한다. 정 등(1983)은 하구언 건설이전의 하구특성으로 조위와 표층염분 변

화의 위상이 같은 정상파형(standing-wave type)의 하구이며 염분 변화곡선이 단순파동 형태임을 보여주었다. 이 등(1999)에 의하면 하구언 완공이후에는 조류세기가 달라지고 수문이 낙조시 2시간 내지 3시간 정도만 불규칙적으로 개방되므로 하구 내로의 담수유입 양과 시기가 인위적으로 결정되어 조석위상에 따른 염분변화 특성이 하구언 건설이전에 비해 달라졌을 가능성이 제시된바 있다.

한편, 금강하구는 지리적으로 굽어져 있으며 하구 폭 방향으로 수심이 크게 변하고 하구언 수문이 남쪽에 치우쳐 있다(Fig. 1). 이러한 자연적인 조건과 인위적 담수방류 등의 조건들은 하구 폭 방향으로의 물성변동을 초래할 가능성이 있으나 금강하구에서 하구 폭 방향의 물성변화에 대해 연구된 바는 아직 없다. 폭이 좁은 하구에서도 담수에 의한 전선이 형성될 때 조석위상에 따라 하구 폭 방향에서의 물성변화와 전선이 관측된 바 있다(Simpson and James, 1986). 특히 하구단면 특성이 한 관측점에 의해 대표될 수 있는지 여부는 관측자료로부터 하구순환과 유형을 파악하는 데 매우 중요하다.

본 연구에서는 하구언 수문작동으로 낙조 때에만 주기적 혹은 간헐적으로 단기간 동안에 방류된 담수가 금강 하구 내에서 어떠한 거동을 하는지를 조사하였다. 1997년 7월과 1998년 5월에 관측된 표층염분 자료를 분석하여 금강하구 내 표층수의 조석주기 동안의 물성변화 특성을 규명하고, 1999년 7월에 18일 간에 걸쳐 근산과 장항간 정기왕복 도선을 이용하여 장기간 관측한 표층염분 자료를 분석하여 담수 희석수의 소멸과정과 담수방류 유무 및 조석위상에 따른 담수거동의 특징을 파악하고자 하였다. 이와 더불어 하구내 한 정점에서의 표층염분 변화가 하구 수로방향으로의 담수이동만에 의한 것인지 또한 하구 폭 전반에 걸친 표층염분 변화를 대표할 수 있는지를 추정하고자 하였다.

자 료

본 연구에서는 금강하구에서 관측된 표층수온 및 염분과 각 관측시기의 조위 및 담수 방류량 자료를 사용하였다. 1997년 7월과 1998년 5월에 표층수(해면하 1 m)의 물성이 동시에 조사된 3개 관측위치는 Fig. 1과 같고, 정점 2와 4는 두 시기 모두 관측되었으며 정점 8은 1997년에, 정점 6은 1998년에 관측되었다(Table 1). 정점관측에서는 CTD(SBE-19)와 RCM-7(Aanderra)을 이용하여 각각 25시간과 13시간 동안 동시 관측하였으며, 특성치의 시간변화와 더불어 하구 수로방향의 변화특성을 분석하였다. CTD 관측은 정점 2와 8에서 1시간 간격으로 시행하였고, 정점 4와 6에서 계류된 RCM-7은 3분 간격으로 수온과 염분을 기록하였다.

1999년 7월에는 9일부터 26일까지 18일간 매일 6시 30분부터 21시 30분까지 30분 간격으로 출항하는 근산과 장항간 여객도선을 이용하여 금강 하구의 표층수온과 염분을 왕복 관측하였으며,

Table 1. Surface temperature and salinity observation in the Keum River estuary and data sources of fresh water discharge and tide.

Component	Obs. period	Source	Remark
Salinity and temperature	1997. 7. 22.7. 23	Lee <i>et al.</i> (1999)	25 hrs (St. 2, 4, 8)
	1998. 5. 23		13 hrs (St. 2, 4, 6)
	1999. 7. 9 7. 26 (18 days)	Kunsan-Changhang Ferry RCM-7	06:30-21:30
Discharge		Korea Agricultural Rural Infrastructure Corporation	see Table 2
Tide		National Oceanographic Research Institute	hourly

Table 2. Gate operation time and fresh water discharge in the Keum River dyke.

Date	High-Water Time	Gate-Open Time	Gate-Close Time	Total Discharge ($\times 10^3 \text{ m}^3$)	Discharge Flux ($\times 10^3 \text{ m}^3/\text{min}$)	Moon's age
97/07/22	16:55	18:35	21:03	32,704	220.97	17.3
98/05/23	13:16	14:27	17:52	20,133	112.47	26.6
99/07/08	10:12	11:31	13:46	12,591	93.27	24.3
09	11:36	12:29	15:32	22,139	120.97	
10	12:46	13:32	17:06	28,249	132.00	
11	13:43	15:06	16:58	10,056	89.78	
12	14:32	16:04	17:48	10,731	103.18	
13	15:17	17:05	18:41	9,728	101.33	0.0
16	05:18	07:55	09:35	10,438	104.38	
18	06:39	09:02	10:28	7,608	88.46	
23	11:29	11:57	13:39	9,576	93.88	10.0
26	14:12	14:45	17:21	16,866	108.11	

이 자료를 사용하여 하구 폭 방향의 물성변동을 파악하였다. 여객선 운항경로는(Fig. 1) 정점 2와 4 사이에 있으며, 하구언에서 약 5 km 정도 서쪽이고 하구언과 거의 평행하지만 하구언 수문에서의 직선거리는 군산 쪽이 장항 쪽보다 가깝다. 군산과 장항간 편도 운항시간은 10분 정도로서 매일 30회 운항되었고, 해면하 50 cm에서 수중펌프로 연속 취수한 표층수가 RCM-7(Aanderaa)을 통과하게 하여 30초 간격으로 수온과 염분을 자동기록 하였다. 사용된 RCM-7의 수온과 염분 측정 오차는 $\pm 0.2^\circ\text{C}$, $\pm 0.2\%$ 로서 물성변화 폭이 큰 하구역 관측에는 무리가 없었다. 16일과 24일에는 수중펌프의 고장으로 각각 7시간과 12시간동안 관측이 중단되었다. 도선 운항회차별 매회의 공간적 평균과 표준 편차를 구하여 조석위상과 담수방류에 따른 관측항로상의 수온과 염분변화 및 통계적 변화 폭을 파악하였다.

조위는 국립 해양조사원의 군산내항 검조소에서 실측된 값을 사용하였다(Table 2). 1997년 7월 정선관측 때 조석은 대조기이고, 1998년 5월은 중조기였다. 1999년 7월 14일이 대조이고 21일은 소조이며 조차는 최대 7 m, 최소 2.4 m 이었다(Fig. 4참조). 하구언에서 방류된 담수량과 방류시기를 파악하기 위하여 농업기반공사 금강사업단에서 제공한 일별 방류량을 사용하였다(Table 2). 1997년 7월에는 대규모 방류가 있었다. 1999년 7월 8일부터 13일까지 매일 일회씩 약 $10 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{day}$ 이상의 많은 담수가 주기적으로 방류되었고, 소조기인 20일 부근에는 4일간 방류가 중단된 기간이 있었다. 일 최대 방류는 10일에 $28,249 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{day}$ 이었고 최소 방류는 18일에 $7,608 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{day}$ 이었다. 일별 담수 방류시작은 군산내항 조석기준 고조 후 0.5시에서 2.5시 사이에 시작되어 낙조 초반에 주로 이루어졌다(Fig. 4참조). 1999년 7월의 강우는 관측 첫날인 7월 9일에만 5.75 mm가 측정되었고 이후 관측기간 내내 강수가 없어 하구 내 염분변화에 대한 강수의 영향은 무시하였다.

하구 내 표층염분 변화특성

1997년 7월과 1998년 5월에 하구의 남쪽 수로방향으로 설정된 3개 정점들에서 조사된 표층 염분은 관측시기와 담수방류량이 서로 다름에도 불구하고 하구 안쪽의 정점들인 정점 2, 4 그리고 6에서 기본적으로 조석위상에 따라 변하고 있다(Fig. 2). 동일시간

에는 하구입구에서 상류쪽으로 염분이 대부분 감소하는 하구역 표층염분 구배의 일반적 특성을 보인다. 정점별 염분변화를 조석위상과 비교해보면 정점 4와 6에서는 고조 때 염분이 가장 높아지지만 하구언에 가까운 정점 2에서는 고조 전 1시경에 염분이 가장 높아져 상류쪽에서 조위와 염분변화 위상이 다소 어긋나 있다. 5월과 7월 관측시기 모두 담수가 방류된 낙조 후반부터 정점 4에서는 10% 미만의 담수희석수가 나타났으며, 정점 2에서는 1% 이하의 담수가 관측되었다. 정점 2와 4에서 염분변화 폭은 16% 정도이며, 정점 6은 10%정도이다. 정점 8에서는 매우 적은 변화 폭을 보이는데, 이는 하구로 방류된 담수의 영향이 관측기간동안 하구 외측까지는 미치지 못한 결과로 해석된다.

한편, 두 조석주기 미만의 관측자료지만 염분변화 곡선을 자세히 살펴보면 하구 안쪽인 정점 2와 4에서는 다음과 같은 특징들이 나타난다. 1) 담수가 방류되는 낙조동안보다 방류이후의 창조나 낙조동안에 더 급격한 염분변화가 관측되었으며, 1997년 7월 23일에 정점 4에서 고조 이후에 급격한 염분변화가 다시 발생하였다(Fig. 2, 화살표 F). 2) 7월 23일 낙조중반 이후부터 정점 2와 4에서는 염분이 오히려 증가하여 염분곡선이 조위곡선과 다른 변화를 보인다(Fig. 2a, 화살표 S). 염분이 증가하는 시각은 정점 4보다 정점 2에서 1시간 이상 빠르다. 3) 1998년 5월에는 정점 2와 4에서 담수가 방류되는 낙조 동안에 일시적으로 염분이 증가하는 현상이 나타났으며(Fig. 2b, 화살표 D), 정점 2에서 염분이 증가하는 시각이 정점 4의 경우보다 약 1시간 이상 빠르다. 1997년 7월 22일에는 담수가 방류되는 낙조 동안에 정점 4에서 일시적으로 염분의 변화가 거의 없었다.

이상의 염분변화 특징들은 두 세시간 정도만 담수를 방류하는 인위적인 하구언 수문작동으로 인하여 염분변화 양상이 하구언 건설전의 정상과형 하구(정 등, 1983)에서 부분적으로 변동되었음을 의미한다. 특히 상류로부터 담수유입의 형태와 시기 및 양이 인위적으로 조절되어 조석주기에 따른 염분변화 특징이 자연적 담수유입 상태에 비해 달라진 것으로 예상된다. 고정점에서 관측된 염분변화 특징의 변동은 담수방류 조건뿐만 아니라 조석위상에 따른 담수거동 및 하구 내의 수평적 해수순환 등에 의해 결정될 수 있으므로 1999년 7월에는 하구 폭 방향의 표층수 특성을 장기간에 걸쳐 조사하였다.

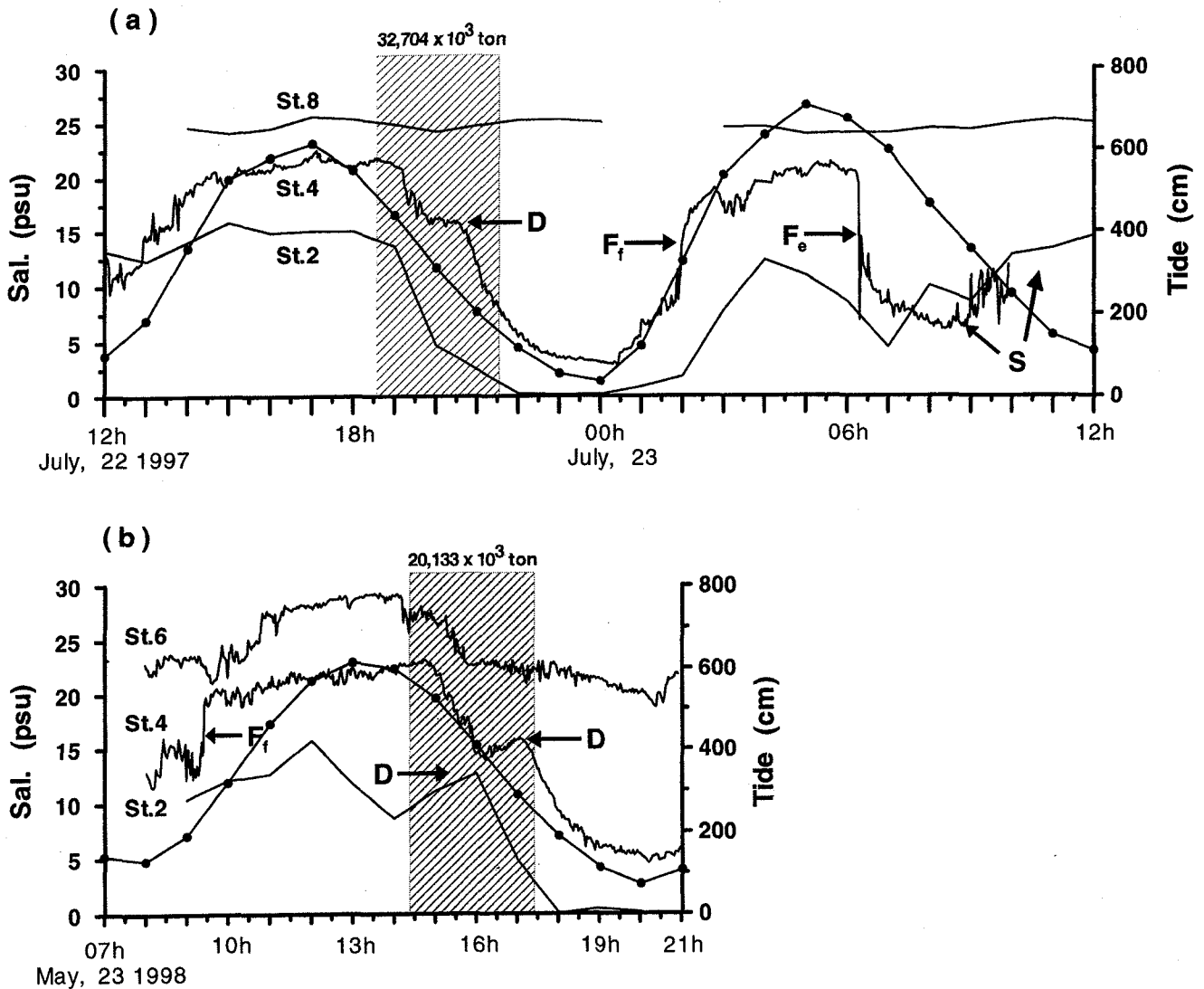


Fig. 2. Variations of surface salinity in the stations and tide level (dot and line) at the Keum River tide station (a) in July 1997 and (b) in May 1998. The dashed block with discharged freshwater volume denotes the period of gate-open in the Keum River dike. The arrows with F, D and S indicate the typical features of salinity variations explained in the text.

관측항로 표층 특성치의 변동

담수방류와 조석위상에 따른 하구 내 표층수 특성치 변화를 알아보기 위하여 1999년 7월에 군산-강항간 항로를 따라 왕복 관측된 표층수온과 염분 자료로부터 운항 회차별로 항로를 따라 공간적으로 평균한 수온과 염분을 구하였다. 항로 평균수온과 염분의 관계도는 Fig. 3과 같다. 전체 관측기간 동안 표층수의 수온은 23~29°C, 염분은 2~27‰의 범위에서 변한다. 관측일별로 구성된 수온-염분 관계도를 보면, 10% 미만의 저염수는 담수가 방류된 날에만 관측되었으며, 5% 이하의 저염수는 20% 이상의 기수보다 수온이 약 2.5°C 정도 높아 담수가 하구 내 기수보다 더 가열되었음을 알 수 있다.

Fig. 4는 운항 회차별로 항로를 따라 평균한 수온과 염분의 시간에 따른 변화를 보여준다. 매일 일회씩 주기적으로 담수가 방류된 9일부터 14일 사이에는 염분의 변화폭이 20% 이상이며, 담수 방류에 따른 급속한 저염화 혹은 그 이후의 고염화로 인해 염분

변화는 조위변화에 비해 정현적이지 않다. 담수방류가 없었던 19일에 관측이 시작된 고조 때는 염분이 23‰ 정도이지만 낙조가 시작되면서 18일의 담수방류로부터 두 조석주기 이후 반복되는 저염화 현상을 보이고, 이후에는 낙조가 계속되면서도 염분은 오히려 점진적으로 증가하여 최저염분이 나타나는 시기가 조석위상과 다름을 보여준다. 한편, 정점 2와 4에서의 염분시계열 자료에 나타난 세 가지 염분변화 특징을 Fig. 4에서도 재확인할 수 있다. 첫 번째 특징(Fig. 2, 화살표 F)은 7월 16일과 18일, 19일의 염분변화 곡선에서 확인되는데 급격한 저염화가 담수방류로부터 한 조석주기 이후에도 반복되는 현상임을 알 수 있다. 두 번째 특징(Fig. 2 화살표 S)은 12일부터 14일 사이에 매일의 관측시작 때인 낙조 중·후기부터 담수방류 직전의 고조까지 점진적으로 염분이 증가하는 반복적인 현상에서 확인되는데 이러한 현상은 전일의 담수방류로부터 한 조석주기가 지난 기간이다. 또한 7월 17일과 19일의 조석위상과 어긋나는 염분증가는 전일의 담수방류로부터 두 조

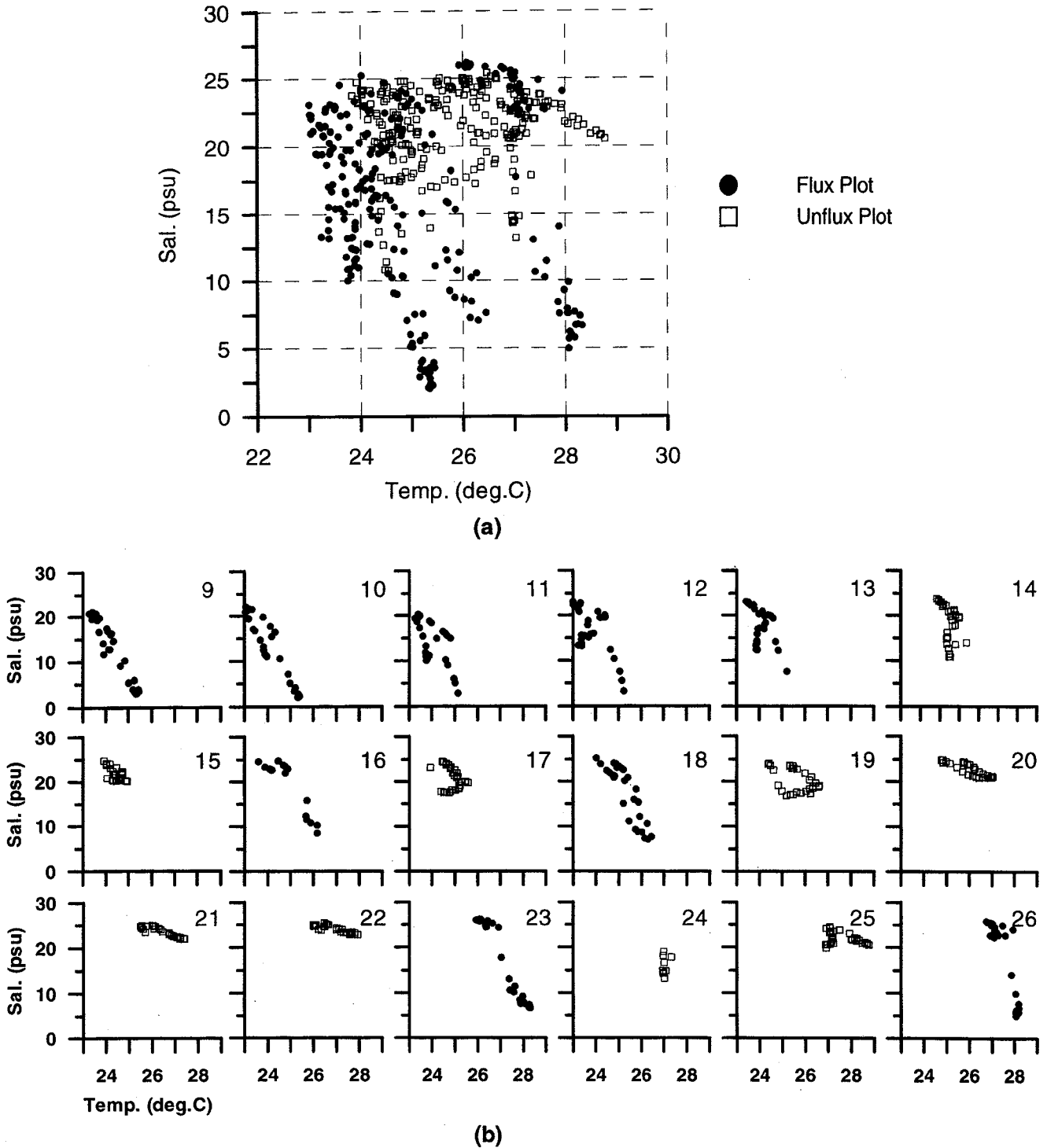


Fig. 3. Temperature and salinity diagrams plotted (a) for eighteen days and (b) for each day observation during July 1999. The spatially averaged temperature and salinity of every ferry route surface observation is used.

석주기 후도 계속되는 현상임을 보여준다. 세 번째 특징(Fig. 2b, 화살표 D)은 7월 9일, 10일, 12일, 그리고 13일 담수가 방류되는 동안에 염분이 거의 변하지 않거나 7월 11일에는 일시적으로 증가하는 현상으로 나타났다(Fig. 5a참조). 이러한 관측결과는 정점 2와 4에서 관측된 현상이 일회적인 것이 아님을 의미한다.

항로평균 표층수온의 변화를 살펴보면 전반적으로 고조 때 저온이 되고 저조 때 고온이 되는 변화형태가 전반적으로 나타나며 저염화 발생 때에는 약간의 수온변동을 보인다. 조사전반기에 최저수온이 관측된 시각이 정오 무렵임을 감안하면 수온의 변화는 하구입구에서 상류쪽으로 수온이 높아지는 수온의 공간적 구배가

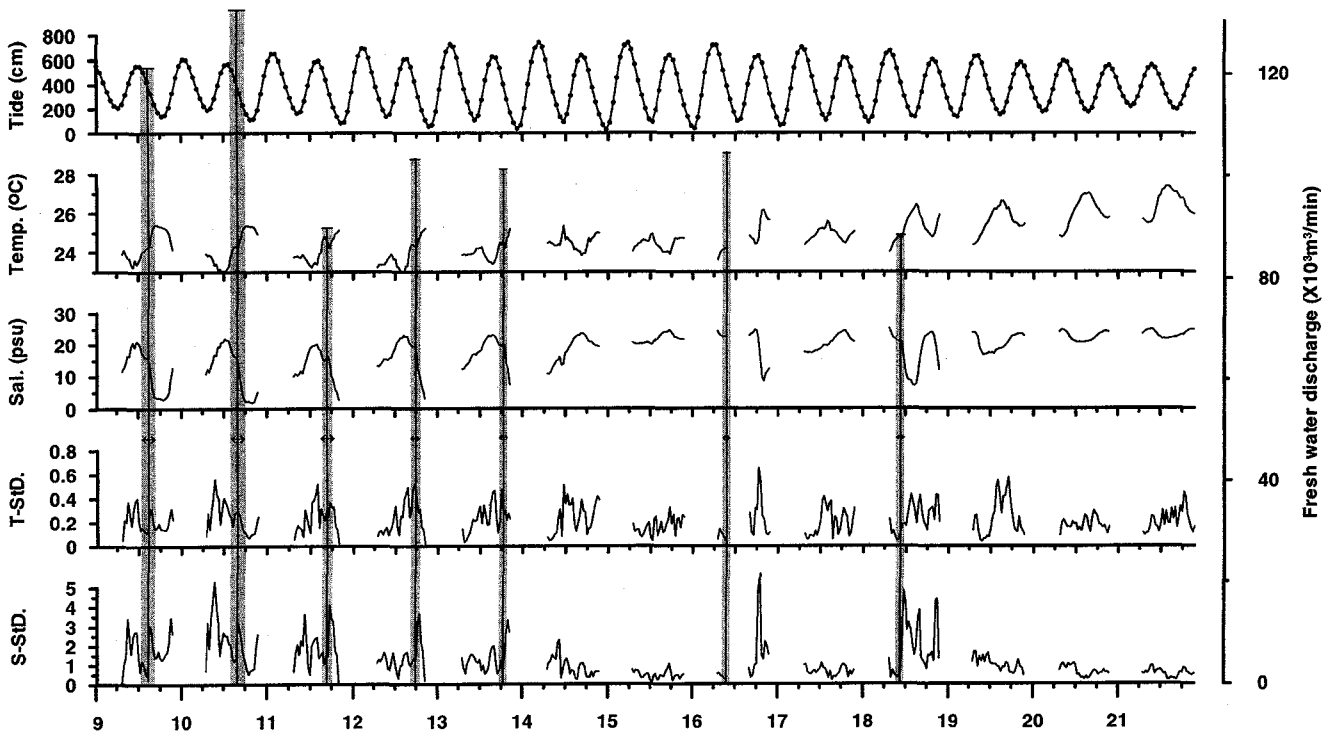


Fig. 4. Variations of tide level, mean surface temperature and salinity, and their standard deviations (top to bottom) in July 1999. Mean and standard deviation of temperature and salinity denote the spatial average of each ferry route data and deviations from the averaged values. The shaded blocks indicate the freshwater flux (see axis in the right side) and discharging period in the Keum River dike.

주로 조류이동에 따라 이루어지는 과정에 의해 지배되고 있으며 상대적으로 고온인 담수의 영향을 부분적으로 받고 있는 것으로 해석된다. 하지만, 담수방류가 중단된 18일 이후에는 변화폭이 2°C 이상으로 현저히 증가하였다. 이 기간에는 오전 6~7시경의 고조에 수온이 가장 낮고 오후 2시경의 저조에 높은 수온이 나타나는 점으로 보아 조석위상에 따른 변화에 표층을 통한 하계 열수지의 일변화에 의한 영향이 증첩되는 것으로 해석된다.

운항 회차별로 항로상 염분의 공간적 표준편차는 담수가 방류된 날에 크고(최대 5%정도) 방류가 중단된 날에는 현저히 작아진다(1%미만). 일별로는 급격히 염분이 변하는 창조나 낙조시에 공간적 표준편차가 증가한다. 전 관측기간동안 운항 회차별 항로상 수온의 표준편차는 0.5°C 정도이다. 이러한 염분과 수온의 공간적 편차는 조석위상과 담수방류에 따른 시간적 변화 폭에 비하면 최대 25% 정도에 달한다.

조석운동과 담수방류가 하구 쪽에 걸친 염분의 공간적 변동에 어떠한 영향을 미치는지 파악하기 위하여 운항노선과 시간을 축으로 표층염분의 시공간적 변화를 도시하였다(Fig. 5). 염분변화를 편리하게 기술하기 위하여 군산에서 출발 후 1분부터 3분까지를 "I(군산측)"로, 4분부터 6분까지를 "II(하구중앙)"로, 7분부터 9분까지를 "III(장항측)"으로 하여 하구 쪽을 세 구역으로 구분하였다. 담수방류 시작으로부터 약 2시간 이후에 군산-장항간 항로 폭 전체에 걸쳐 급격히 염분이 낮아져 5%미만의 저염수가 관측되었다. 급속한 저염화 발생시기는 하구언에서 방류된 담수의 전면부(염분전선)가 관측항로를 통과하는 시기임을 의미하며, 하구언에서 방류된 담수가 약 6~7 km 거리를 이동하는 평균속력이 약 0.5 m/

sec 임을 알 수 있다. 이 저염수는 저조 2시간 후에 급격히 사라지며 저염수의 출현지속 시간은 약 4~5시간이다.

조사전반기를 보면(Fig. 5a) 관측 항로상 염분변동 특성은 다음과 같이 정리된다. 1) I 구역에서 저염수가 나타나는 시기는 III 구역보다 30분 정도 빠르고 사라지는 시기는 늦어 군산 쪽에서 저염수가 관측되는 기간이 장항 쪽보다 1시간이상 길다. 방류된 담수의 전면부가 관측항로를 통과할 때는 II구역과 III구역 사이에 일시적으로 염분전선이 형성되어 있는 시기이다. 2) 담수 방류량이 많았던 9일부터 11일 사이에는 5%미만의 저염수가 항로 전반에 걸쳐 나타났으나 방류량이 감소한 12일과 13일에는 5%미만의 저염수가 III 구역에서 나타나지 않아 III구역에 담수희석수의 영향이 적다. 이러한 현상들은 조석위상에 따른 담수이동과 더불어 담수 방류량의 차이에 따라 관측항로 방향으로 염분차이가 발생하며 염분전선이 형성되고 있음을 제시한다. 3) 7월 11일부터 14일에 걸쳐 III구역(혹은 II구역까지)에서 저조이전(전일의 담수방류시작으로부터 한 조석주기 이후의 낙조후기)에는 상대적인 고염수가 patch 형태로 나타나 관측항로의 표층염분이 공간적으로 큰 차이를 보인다. 고염수 patch의 출현은 발생시기로 볼 때 1997년 7월 23일에 정점 2와 4에서 관측된 두 번째 특징인 낙조중반 이후의 염분증가와 관련되는 현상으로 판단되며, 이 patch로 인해 II와 III 구역에서 염분의 변동이 크게된다. 4) 7월 9일과 11일부터 13일까지 고조이후 담수가 방류되는 낙조동안에 관측항로상에 염분의 공간적 차이가 없거나 III 구역에서 염분이 일시적으로 증가하는 현상이 뚜렷이 보인다. 이는 고조이후 낙조동안 두 개의 염분전선이 관측항로상에 존재함을 의미하며 1998년 5월 정점 2

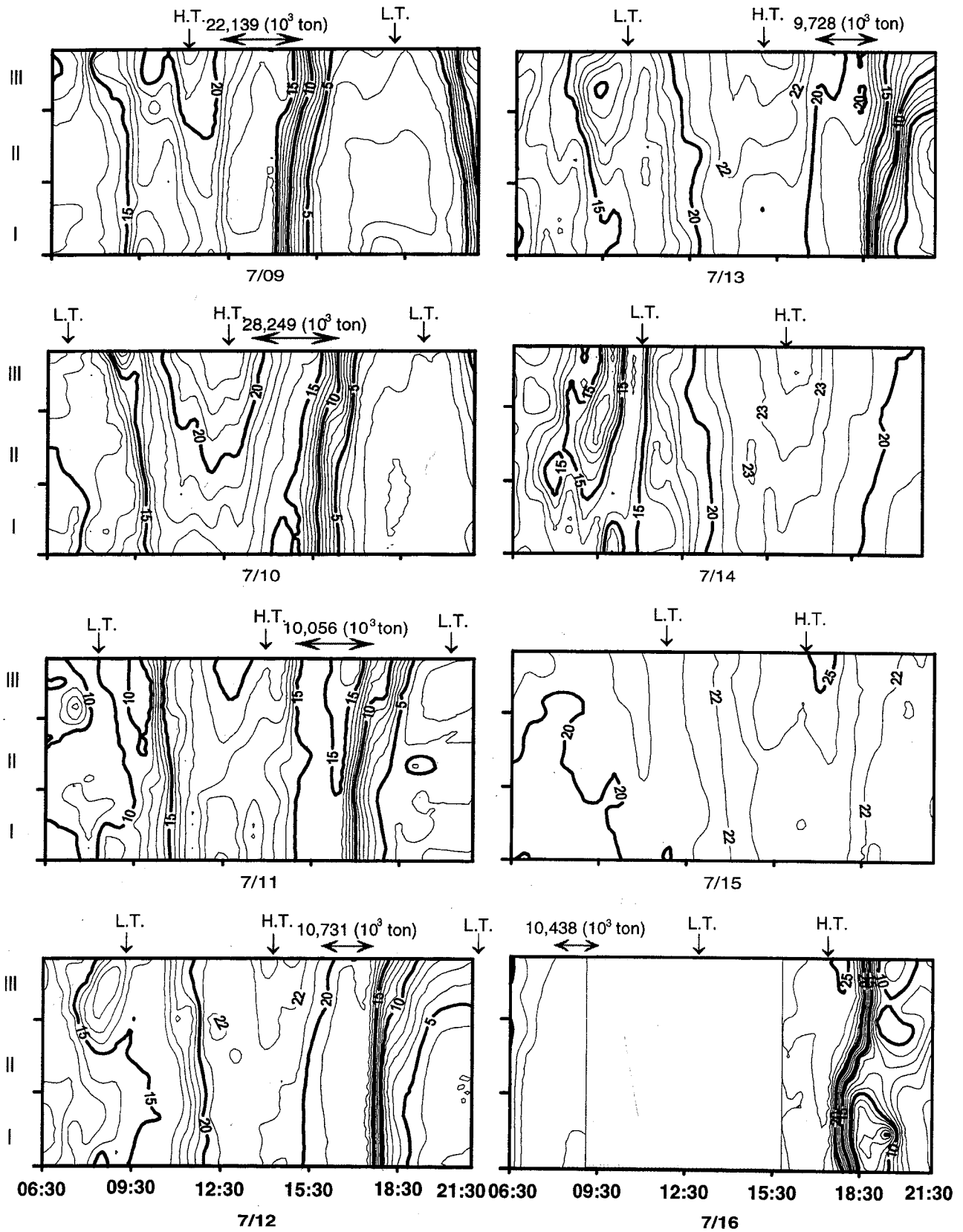


Fig. 5a. Time-distance plots of surface salinity observed along the ferry route from July 9 to 16, 1999. H.T. and L.T. indicate high and low water time, roman characters denote the subset of the ferry route, and symbol '<=>' with discharge volume indicates period of freshwater discharge.

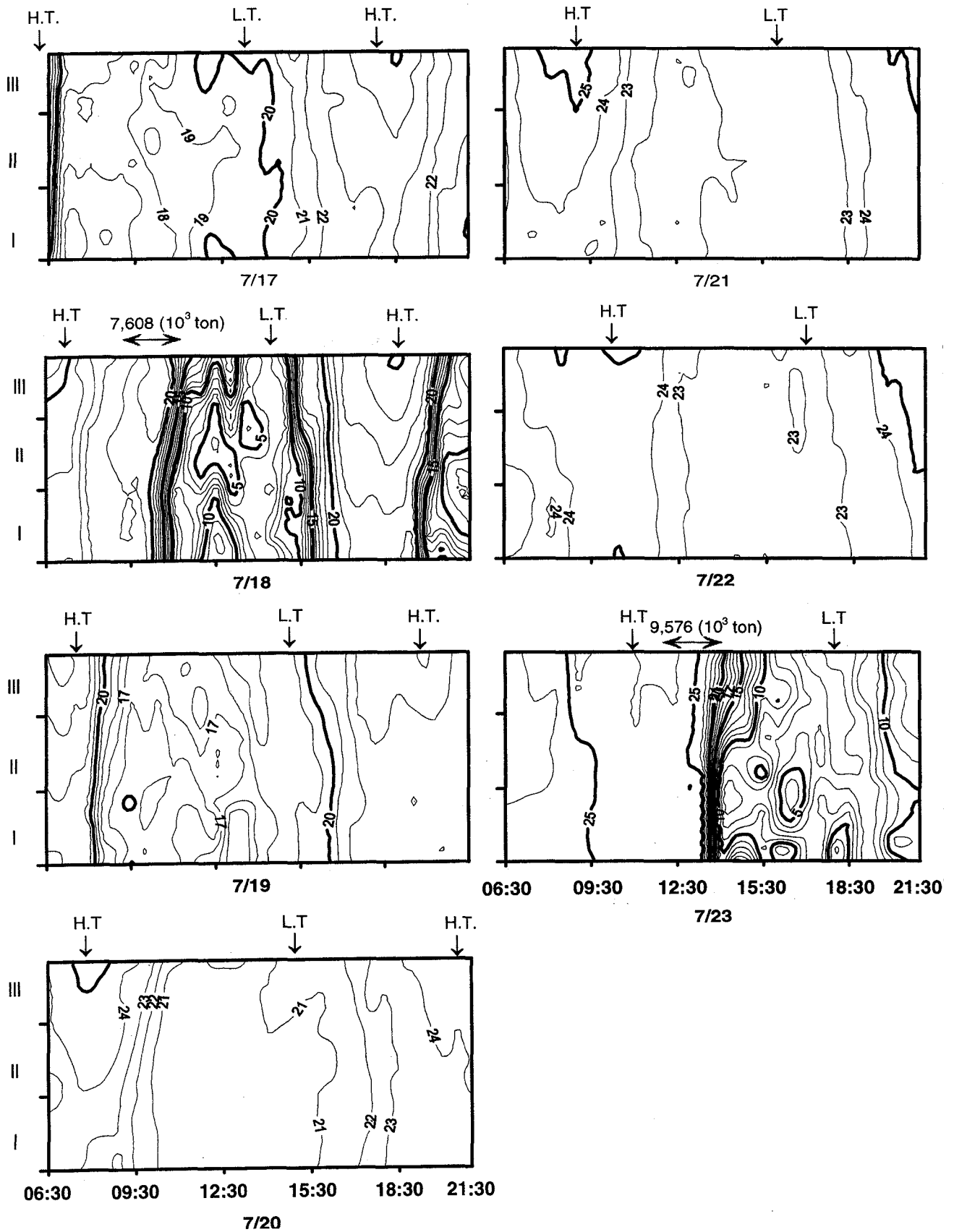


Fig. 5b. As in Fig. 5a except for July 17 to 23.

와 4에서 관측된 세 번째 특징인 일시적 염분증가와 같은 현상 (Fig. 2 화살표 D)이고, 염분변화 특성이 전 관측항로에 걸쳐 나타남을 보여준다.

조사 후반기인 7월 18일에 담수가 방류된 후에는 담수방류가 중단되었다가 7월 23일에 다시 담수를 방류하였다. 이 기간동안에 염분변화는(Fig. 5b) 방류된 담수가 하구 내에서 소멸하는 과정을 보여준다. 7월 18일 9시경에 소규모로 방류된 담수로 인하여 저염화가 발생하며, 저조이후 고염화와 19시경의 고조직후에는 다시 급속한 저염화가 항로 전체에 걸쳐 반복되었다. 19일에도 7시경 고조직후에 저염화가 하구 폭 전체에 걸쳐 발생하지만 염분은 전구간에서 15‰ 이상이어서 저염수가 하구 내 기수와 희석되었음을 알 수 있다. 관측항로 방향의 염분변동이 큰 시기는 7월 18일과 23일 담수 방류이후의 낙조 때이며 최저염분이 하구 중앙부인 II 구역에서 주로 나타났고, 7월 18일과 23일 담수 희석수가 통과하는 동안에는 관측항로 상에 수 개의 염분전선이 발생하였음을 알 수 있다.

토의 및 결론

금강하구의 수로방향으로 설정된 정점과 장기적으로 하구 쪽을 왕복하며 관측된 표층염분은 기본적으로 조석위상에 따른 변화를 보였다. 하구언에서 담수는 짧은 기간이지만 낙조 동안 방류되므로 하구 내 담수의 이동과 조류의 위상은 매우 유사하게 된다. 이로 인하여 표층염분의 변화는 일차적으로 조석에 동조되며 급격한 저염화나 고염화는 담수의 통과(강한 염분전선)을 의미한다. 따라서 관측자료에서 분석된 표층염분의 공간적, 시간적 변화를 종합하면 하구 내의 담수거동과 소멸과정을 파악할 수 있어 본 질에서는 정성적으로 이를 재구성해 보고자한다. 담수거동과 소멸과정에 대한 정량적인 해석을 위해서는 추후 직접적인 유동장 관측과 수치모델 연구가 요구된다.

조석동조

담수방류로부터 한 조석주기 이후에 나타나는 급격한 저염화 현상으로부터 낙조 때에 방류된 담수가 외해로 완전히 유출되지 못하고 창조류에 의해 다시 하구상류로 이동되었다가 고조이후의 낙조 초기에 이완(release)되며 나타나는 담수거동을 해석할 수 있다. 이러한 해석은 하구 쪽을 통과하는 표층수 평균염분의 시간변화(Fig. 4)에서 일회의 담수방류 이후 담수방류가 중단되었을 때 7월 18일과 19일에 걸쳐 고조 직후마다 세 번이나 반복되는 저염화 현상에 바탕을 두고 있다. Fig. 5에서 7월 16일과 18일의 시간-거리 염분변화는 금강담수가 한 조석주기 이후에 이완되는 현상이 하구 내에서 전 표층에 걸쳐 발생하는 과정임을 제시한다.

이 등(1999)에 의하면 정점 4와 6에서 조류세기는 각각 최대 1.5 m/s와 1 m/s 정도 되어 조류이동거리는 8~10 km 정도이다. 하구언에서 정점 2, 4와 6까지의 거리는 각각 약 3 km, 8 km와 16 km 정도이므로 정점 4 혹은 군산-장항간 관측항로 부근에서 담수 통과 후 창조 때에 관측되는 급격한 고염화는 하류에서 상류로 이동되어 온 담수 전면부(전선)의 통과로 해석함이 타당하다. 저염화 현상에서 계산되는 담수이동속력을 사용하면 담수방류 중단 직후(낙조중반이후)에 하구언을 출발한 담수가 군산-장항간 관측항

로에 도달하는데는 적어도 2시간이상 소요될 수 있으므로 하구언에서 방류된 담수가 관측항로를 모두 통과하기 전에 조류는 이미 전류되므로 담수의 일부가 상류쪽으로 이동된다. 한편, 남쪽 수로 상의 정점 6, 4 및 2에서 관측된 최저염분은 20‰, 5‰ 및 0‰ 정도이고 최고염분은 29‰, 23‰, 17‰이다(Fig. 2b). 따라서 정점 4의 최고염분 23‰은 정점 6의 최저염분 20‰보다 높아 하류의 표층수가 조류에 의해 이동된 것으로 해석할 수 있음을 반영한다.

담수의 소멸

7월 18일 이후 관측된 일별(두 조석주기 간격) 항로 평균 표층염분 변화를 저조시 기준으로 중첩시켜보면(Fig. 6) 염분변동 폭이 지수함수적으로 감소하며 담수희석수가 시간에 따라 소멸하는 현상을 확연히 볼 수 있고, 18일 일회의 담수방류 영향이 최소한 2일 이상 지속되고 있음을 알 수 있다. 7월 19일부터의 염분변화 곡선에서 최저 염분이 저조 전 3시~4시경에 나타난 공통적인 특성을 보인다. 특히 19일의 염분변화 곡선은 담수희석수가 염분전선에 응축되어(trapped) 이동하고 있음을 의미하며, 저염화 발생시각이 18일의 경우보다 약 2시간 정도 빨리 나타난 현상은 담수 희석수가 조석동조(조류이동)와 하구역 표층 저밀도수 유출력(순압적 압력 구배)의 중첩에 의해 이동하고 있음을 제시한다.

Fig. 6에서 매일 저조전 7시부터 저조후 5시경까지 관측항로를 통과한 표층수의 조석주기 평균된 염분의 변화는 두 조석주기동안 담수 희석수의 소멸을 의미하며, 소멸과정은 담수가 하류나 하층으로 공급(이류)되고 또한 하구 내 기수와 혼합·희석되는 과정이다. 담수 희석수의 소멸율은 관측 항로상의 기수염분과 항로 및 조석주기 평균된 표층염분의 차이(표층수의 염분 부족량)의 변화에서 구해질 수 있다. 18일부터 관측기간 동안의 최고 염분(25‰)을 기수의 기준염분으로 가정하고 기수와 담수 희석수의 염분차

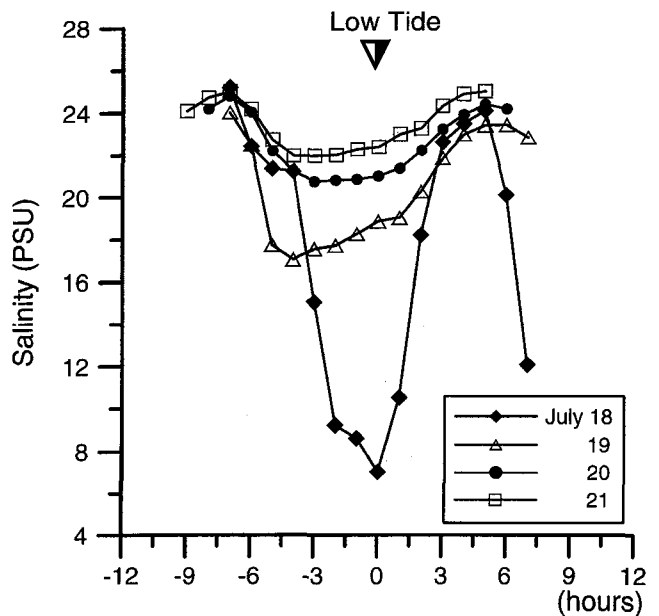


Fig. 6. Pile up of variations of mean salinity obtained from the spatial average of each ferry route from July 18 to 21, 1999. Low tide times are used in the reference to overlap each day variations in time domain.

Table 3. Variation of time-space mean surface salinity obtained by tidal average of space-mean salinities along the ferry-route in Fig. 6. The salinity deficiency due to freshwater indicates the salinity difference between time-space mean salinity and reference salinity of the breakish water (25‰).

Days in July, 1999	18	19	20	21
Time-space mean surface salinity (TMS, ‰)	17.45	20.43	22.59	23.45
Salinity deficiency: 25‰-TMS	7.55	4.57	2.41	1.55
Ratio of salinity deficiency to 18th day	1.0	0.60	0.32	0.20
Ratio of salinity deficiency to a day before		0.60	0.53	0.64

이의 변화를 구해 보았다(Table 3). 7월 18일은 담수방류로 7.5‰ 정도의 평균염분 차이를 보였으며 이후로 염분차이는 전일에 비해 약 60%의 감소율을 보였다. 이러한 표층 담수 희석수의 소멸율은 일회의 담수방류 후에는 담수 희석수의 일간 소멸율이 거의 일정한 수준임을 제시하지만 조류 이동거리와 혼합을 그리고 담수 방류량과 주기 및 기간 등에 의해 달라질 가능성이 있다.

수로방향으로의 염분분포와 이중 염분전선

담수의 소멸율을 고려하면서 7월 18일과 19일의 낙조와 창조 동안 연속적인 변화과정으로부터 각각 관측항로로부터 상류역과 하류역의 기본적인 염분분포를 유추해 볼 수 있다. 먼저, 19일의 낙조동안 염분변화(Fig. 6)는 하구의 상류역의 염분분포를 대변하는데, 수로방향으로는 희석수가 전선역에 응축되어있고, 염분이 전선역에서 상류로 갈수록 높아지는 것으로 해석할 수 있다. 정점관측의 두 번째 특징적 현상인 낙조중반 이후 염분이 점진적으로 증가하는 특징(Fig. 2a, 화살표 S; Fig. 4의 7월 12일, 13일, 14일 참조)이 이를 뒷받침한다. 특히, 정점 2와 4에서 낙조동안 나타난 점진적인 염분상승의 시간차이는 전선에 저염수가 응축된 표층염분의 수로방향 분포가 하류로 이동되는 과정에서 발생하는 것으로 설명될 수 있다. 즉, 염분의 절대치는 다르지만 7월 19일 낙조시 염분의 시간변화와 같은 형태의 공간적 염분분포가 낙조류에 의해 하류로 이동하면 상류쪽인 정점 2에서 저염화 및 이후의 점진적인 염분증가가 정점 4에서보다 먼저 발생하게 되고 시간이 경과함에 따라 정점 2의 표층염분이 정점 4의 염분보다 높게 된다.

다음으로 창조동안의 염분변화로부터 하류쪽으로 이동되었던 담수희석수의 염분분포를 다음과 같이 해석할 수 있다. 희석수 전면부(염분전선)는 정점 4와 6사이에서 전선의 형태는 유지하지만, 담수를 하류쪽으로 공급하며 또한 혼합과 확산과정을 거치므로 전선이 관측항로를 통과할 때보다 염분은 높아지고 전선의 염분구배도 다소 약해진다. 이러한 담수공급과 희석과정에 의해 전선의 위치는 하류쪽으로 많이 전진하지는 못하며, 전류되는 조류에 동조되어 염분전선이 상류쪽으로 이동되는 것으로 판단된다. Fig. 2의 정점 6에서 염분변화 폭과 변화율이 정점 4에서보다 작고, 정점 4에서 창조 때 관측된 고염화(화살표 F)가 이러한 해석을 뒷받침한다.

담수거동의 조석동조에 수반되어 나타나는 세 번째 특징인 매일 일회씩 담수가 방류되는 동안에 염분이 일시적으로 증가하거나 변화가 없는 현상(Fig. 2b, 화살표 D)도 담수희석수의 하구 내 거동과 소멸과정에 의한 것으로 해석할 수 있다. 일일 일회씩 담수가 방류되는 동안의 낙조초기 전일에 방류된 담수가 하구 내에서 두 조석주기 동안 희석되며 왕복 이동한 후 약해진 염분전선이 상류쪽에서 하류로 이동하는 도중이 된다. 이 때 수로방향으로

의 표층염분 분포는 7월 19일의 낙조 때 시간적 염분변화형태와 유사하게 되어 있는데 당일에 담수가 방류되면 새로 만들어지는 강한 염분전선에 의해 염분분포는 수정되어진다. 만약 당일의 고조 후 늦게 적은 양의 담수방류가 시작되면 이전의 약해진 염분전선과 새로운 강한 염분전선은 분리될 것이므로 관측항로상 염분의 시간적 변화에서 당일의 담수 방류기간에 염분이 일시적으로 증가되는 현상이 나타나며 두 번의 뚜렷한 염분전선 통과(이중 염분전선)를 관측하게 된다. 당일의 담수방류가 고조직후 이른 시기에 많이 방류되었다면 새로운 전선은 이전의 약해진 전선에 병합되어 하나의 전선으로 관측된다. Fig. 5a에서 고조를 기준으로 했을 때 7월 10일의 담수방류는 9일 혹은 11일보다 일찍 많이 방류되었는데 9일과 11일의 담수 방류기간동안에 두 번의 전선통과가 뚜렷한 반면 10일에는 두 전선의 구분이 뚜렷하지 않은 점이 이러한 해석을 뒷받침한다. 또한, 이러한 이중 염분전선은 Fig. 2b에서 보이는 바와 같이 조류이동에 의해 상류쪽에 위치하는 정점 2에서는 낙조초기에 통과하며 정점 4에서보다 일찍 나타나야 한다.

하구 폭 방향으로의 염분변화

군산-장항간 관측항로 방향으로의 염분차이는 조석주기 동안 염분변화량의 25% 미만이었다. 하지만 공간적 염분차이가 크게 발생하는 현상으로는 담수희석수 전면부 통과시간(저염화 혹은 고염화 발생시간)의 공간적 차이, 담수방류 이전 낙조 중·후기에 나타나는 장항쪽의 고염수 patch 그리고 2일 이상 담수방류 중단 후 재방류될 때(Fig. 5, 7월 16일, 18일, 23일) 저염수 통과기간 동안 나타나는 관측항로상의 소규모 염분차이 등으로 요약된다.

저염화 발생시간의 공간적 차이는 하구언 수문이 군산 측에 위치하고(Fig. 1참조) 금강하구가 굽어져 있기 때문에 하구언 수문에서의 직선 거리가 군산 쪽이 짧은 지형 및 지리적 영향에 의한 것으로 해석된다. 즉, 군산-장항간 관측항로는 하구의 수로방향과 직각이 아니기 때문에 하구언에서 남쪽으로 치우친 수문에서 담수가 방류되면 담수가 군산 쪽인 I 구역에 먼저 도달할 것이며, 창조시에는 고염화가 늦게 발생하게 된다. 이와 더불어 7월 12일과 13일(Fig. 5a)의 저염화 형태가 7월 9일부터 11일까지의 저염화 형태와 달리 III 구역에 담수희석수의 영향이 상대적으로 적게 나타난 결과에서 담수방류량의 차이도 저염화 발생시간의 공간적 차이에 기여하는 것으로 해석된다.

고염수 patch의 원인에 대해서는 본 연구에서 관측된 자료로부터는 명확한 해석을 하기 힘들지만 다음과 같은 두 가지 발생 가능성이 제시될 수 있다. 1) patch는 전일의 담수방류 시작으로부터 약 15시간정도 이후에 나타나는 현상이다. 매일의 주기적 방류 시 담수량이 감소하면 담수방류 후 두 번째 저염화 과정에서 하

구언에서 거리가 상대적으로 먼 III 구역에 저염수의 영향은 더욱 줄어들 수 있고 고염수 출현의 가능성을 높게 한다. 즉, 저염화 발생시각의 공간적 차이가 III 구역에서 관측된 고염수 patch의 형성에도 관련되는 것으로 판단되며 하류쪽의 상대적 고염수가 창조 때에 III 구역에 먼저 도착하게 된다. 2) 이와 함께 patch가 나타나는 지역이 금강 하구의 남수로와 북수로가 나누어지는 접합 지점과 매우 가깝다는 지형적 원인이 고려될 수 있다. 만약, 저조 직전에 북수로와 남수로 쪽의 조류가 전류되는 위상이 차이를 보인다면, 두 수로의 접합지점 부근에서는 하류의 고염수가 일시적으로 하구 상류쪽으로 유입될 가능성이 있다. 이상의 두 가능성을 요약하면, 하구 폭에 걸쳐 저염수 이동속도가 차이나면서 수평적인 순환이 강하게 발생하거나 조류 전류시기가 달라질 때 고염수 patch가 나타날 수 있는 현상으로 해석할 수 있다. 고염수 patch의 발생과정과 원인을 구체적으로 밝히기 위해서는 남·북수로의 접합지점 부근의 조류이동과 조류위상차이에 대한 조사와 공간적 담수이동 차이를 알아보기 위한 부표 추적실험이 필요하다.

결 론

본 연구에서 분석된 바를 바탕으로 하구 내의 담수거동을 정리하면 다음과 같다. 하구언에서 담수를 낙조동안 짧은 시간 내에 대량으로 공급한 후 갑자기 담수 공급을 차단하기 때문에 하구 내 염분의 시간변화는 일차적으로 하구 폭 전부에 걸친 강한 염분전선이 형성된다. 이 전선이 조석에 동조되어 하구를 왕복하며 하류로 담수를 공급하고 또한 기수와 혼합되어 염분이 증가한다. 하구 수로방향으로는 담수가 염분 전선역에 응축(trapping)되고 상류쪽으로 염분이 증가하는 기본적인 분포형태를 만들고 고조 이후 다시 전선이 하류로 이동하면 전선통과 직후부터 점진적인 염분증가가 발생하는 것으로 분석되었다. 이상의 담수거동이 조석위상에 따라 반복되며 담수가 소멸되는 과정에서 매일 일회적의 담수방류가 있을 때는 당일의 담수방류 시기에 따라 소멸되는 염분전선과 새로이 형성되는 염분전선이 연결되기도 하고 분리되어 나타나기도 한다. 담수방류가 중단되었을 때는 표층염분이 전일에 비해 약 60%씩 회복된다. 따라서 염분변화 곡선은 담수가 방류될 때는 저염화와 고염화의 반복(염분전선의 왕복), 담수 방류량에 따른 전선세기의 변화, 소멸되는 전선과 새로 형성되는 전선의 병합 혹은 분리 등에 의해 조석위상과 일치하지 않게 되기도 하며 조위곡선의 변화형태에서 벗어나는 결과를 보인다. 이러한 단기간 집중 방류된 담수의 조석동조는 금강 하구언이 건설되기 전인 상류에서 연속적으로 담수가 공급될 때에 관측된 정상파형 염분변화 특성(정 등, 1983)이 많이 변화되었음을 나타낸다. 한편, 관측된 하구 폭 방향으로의 염분차이는 방류된 담수가 공간적으로 다른 이동속력으로 거동하고 있음을 제시하며 하구 내에서 수로방향으로의 염분전선이 일시적으로 형성되고 있음을 보여준다. 하지만, 하구 내의 담수 거동은 일차적으로 전 하구 폭에 걸쳐 일어나며 조석위상과 담수 방류량 및 방류시각에 의해 우선적으로 지배되고 하구폭 방향으로의 염분 변동량은 조석주기 동안 염분변화량의 25% 미만이므로 하구내 한 정점에서 표층염분 관측결과는 정점을 포함하는 하구 폭에 걸친 평균 표층염분의 기본적 변화를 대표할 수 있는 것으로 판단된다.

사 사

이 논문은 군산대학교 연구년제 지원과 과학기술부·한국과학재단에서 지정하고 전라북도가 지원하는 새만금환경연구센터(RRC), 대학부설 해양개발연구소 그리고 교육부 과학기술 중점연구소과 제(98-015-H000-2)의 일부 지원으로 완성되었다.

참고문헌

권효근, 이상호, 1999. 하구언 수문작동으로 인한 금강하구역의 물리적 환경변화 I. 평균해수면과 조석. 한국해양학회지 바다, 4(2): 93-100.

국립해양 조사원, 1999. 조석표. 256 pp.

김경렬, 기준학, 1987. 금강하구에서의 화학적, 생물학적 체과정에 관한 연구, 1. 질소계 화합물의 순환: 전반적인 고찰. 한국해양학회지, 22: 191-206.

나태경, 1993. 금강 및 금강 염하구에서 부유퇴적물의 이동과 미량금속원소들의 변화성. 석사학위논문, 서울대학교, 89 pp.

이상호, 최현용, 오임상, 1995. 하계 금강 Plume의 구조와 변동. 한국해양학회지, 30: 125-137.

이상호, 권효근, 최현용, 양재삼, 최진용, 1999. 하구언 수문작동으로 인한 금강 하구역의 물리적 환경변화 II. 염분구조와 하구 유형. 한국해양학회지 바다, 4(4): 255-265.

정종률, 이재학, 안희수, 1983. 금강 하구의 해수순환역학. I 염분 경계층의 변화성. 한국해양학회지, 18: 142-148.

최병호, 안원식, 1985. 금강 감조구간의 조석전파. 한국수문학회지, 18: 67-73.

최병호, 오형근, 1987. 금강 하구둑에 의한 조석변화의 초기추정. 한국해양학회지, 20: 161-168.

최진용, 최현용, 서만석, 1995. 하구언 갑문폐쇄 후 금강하구의 물리, 퇴적학적 특성변화. 한국해양학회지, 30: 262-270.

최현용, 이상호, 유광우, 1999. 금강하구언 대량방류시 황해 중동부 해역의 염분분포. 한국해양학회지 바다, 4: 1-9.

Lee, S.-H., H.Y. Choi, H.K. Kwon and E.J. Shin, 1999. Estuary type and plume structure of the Keum River estuary. Proceedings of international symposium on progress in coastal engineering and oceanography. Vol. 1 Coastal oceanography of asian seas. Korean Soc. Coastal and Ocean Eng., 143-156.

Schubel, J.R., H.T. Shen and M.J. Park, 1984. A comparison of some characteristic sedimentation processes of estuarine entering the Yellow Sea. In: Marine geology and physical processes of the Yellow Sea. Proceedings of Korea-U.S. seminar and workshop, ed. Chough. S.K., 286-308.

Simpson, J.H. and I.D. James, 1986. Coastal and estuarine fronts. In Baroclinic processes on continental shelves, ed. C.N.K Moores, Coastal and Estuarine Sciences, 3: 63-94.

2001년 3월 10일 원고접수

2001년 7월 31일 수정본 채택

담당편집위원: 이동규

신속게재