

## 하계 서해안 새만금 연안역 주변 저염수와 순환

이상호\* · 최현용 · 손영태 · 권효근 · 김영곤 · 양재삼 · 정해진 · 김종구<sup>1</sup>  
군산대학교 새만금환경연구센터, 해양정보과학과, <sup>1</sup>군산대학교 토목환경공학부

### Low-salinity Water and Circulation in Summer around Saemangeum Area in the West Coast of Korea

SANG-HO LEE\*, HYUN YONG CHOI, YOUNG-TAE SON, HYO KEUN KWON, YONG KON KIM,  
JAE SAM YANG, HAE JIN JEONG AND JONG GU KIM<sup>1</sup>

*Department Oceanography, SERC, Kunsan National University, Kunsan 573-701, Korea*  
*<sup>1</sup>School of Civil & Environmental Eng., Kunsan National University, Kunsan 573-701, Korea*

만경강과 동진강이 담수를 유출하는 서해중부 연안에서 41,000 ha의 하구 천해역을 간척하기 위해 33 km의 새만금 방조제가 건설되고 있다. 이 연안역에 담수의 주 공급원은 방조제 북쪽에 위치하는 금강이다. 현재 고군산군도와 연결되고 있는 방조제는 이 해역을 세 지역으로 나누는데 방조제의 북서, 남서 그리고 동부(새만금) 지역이고, 새만금 지역 해수는 북방조제에 한 곳과 남방조제에 두 곳인 미축조 구간을 통해 교환된다. 이 연안역에서 저염수와 관련된 하계순환을 진단하기 위해 1998년과 1999년에 수온과 염분의 분포와 구조를 관측하였다. 북방조제 외측지역의 표층에서는 저염수의 혀모양 분포가 관측되었는데, 금강하구 입구에서 북서쪽으로 60 km까지 확장하고 외해수와 경계지어지는 강한 풀룸전선을 형성한다. 새만금 방조제 내측에서 염분분포는 두 강물이 병합되고 있으며 저염수가 북방조제 미축조 구간쪽으로 편향되었음을 보여준다. 남방조제 외측지역 표층에서는 곰소만으로부터 북쪽으로 확장하는 다른 저염수의 작은 혀모양 분포가 관측되었다. 이러한 저염수 분포와 전선구조 분석을 바탕으로 새만금 방조제 주변에 반시계방향의 연안수 순환을 제시할 수 있는데, 이는 방조제 내측에서 북방조제 미축조 구간으로 유출되는 하구 수와 남쪽 방조제 미축조 구간을 통하여 외해에서 유입하는 해수로 구성된다. 하지만 방조제 축조가 완성된 후에는 만경강과 동진강 담수 유출이 인위적이고 직접적으로 남방조제 외측으로 변경되기 때문에 방조제 주변 연안역 순환형태는 변화될 것이다.

In the mid-west coast of Korea where Mankyung and Dongjin rivers discharge fresh water, Saemangeum tidal dyke of 33 km long is under construction to reclaim the very shallow estuary region of 41,000ha. Main source of freshwater in this coastal area is Keum River locating closely north of the dyke. At present, the dyke connected with Gogunsan-Gundo separates this area into three regions; northwestern, southwestern and eastern (Saemangeum) region of the dyke, and the water in Saemangeum region is exchanged through one gap in the northern dyke and two gaps in the southern dyke. We have observed distributions and structures of temperature and salinity to examine the summer circulation related with low-salinity water in this coastal area in 1998 and 1999. In the surface layer off the northern dyke a tongue-like distribution of low-salinity extends 60 km long from Keum River estuary mouth to the northwest, forming plume front bounded by offshore water. In the inner region of Saemangeum dykes salinity distributions show that two river waters are merged together and the low-salinity water is deflected toward northern gap of the dyke. In the surface layer off the southern dyke we observed small tongue-like distribution of another low-salinity water extending to the north from Gomso Bay. Based on the analysis of distributions of low-salinity water and frontal structures, we can suggest an anti-clockwise circulation of coastal water around the dyke, composed by the estuarine water outgoing from the inner region of the dyke through the northern dyke's gap and the inflow through two gaps of southern dyke from offshore. After completing the dyke construction, this coastal circulation around the dyke will be, however, changed because fresh water discharge of Mankyung and Dongjin rivers will be routed artificially and directly into the area offshore of the southern dyke.

**Key words:** Saemangeum Tidal Dyke, Low-Salinity Water, Riven Plume, Coastal Circulation

\*Corresponding author: sghlee@kunsan.ac.kr

서론

서해 중부에 위치한 새만금 연안역은 수심이 서쪽으로 완만하게 깊어진다(Fig. 1a). 이 해역의 조석은 대조차가 6m에 달하여 넓은 간사지가 발달하였으며, 조류는 연안역에서 1.5~2 knots의 세기이고 북동-남서방향의 왕복성이 강하지만 해안선 부근에서는 하구수로와 지형에 따라 조류방향이 달라진다(수로국, 1989). 이 연안역은 만경강 및 동진강 그리고 금강하구를 통하여 담수가 유입되는 해역이다. 세 강의 하구는 지리적으로 매우 가까워 각 강에서 기원하는 저염수가 이 연안역에서 상호 유통되거나 합쳐질 수 있다. 금강의 평균 연간 담수 방류량은 대략 60억톤 내외이고, 만경강과 동진강은 각각 금강의 약 1/6, 1/9 정도인 10억톤과 7억톤 내외이다(농어촌진흥공사, 1990; 고 등, 2001). 하계인 6월부터 9월 사이에 연간 담수 방류량의 약 60% 정도가 유출되지만 연별로 장마와 집중호우 등의 강우시기와 양이 달라져 하계 담수방류량이 큰 변화를 보이기도 한다(Fig. 1b참조). 이러한 담수유출은 연안역의 물성분포와 구조를 변화시키고 밀도구조의 변화로 인하여 연안역 순환계와 물질교환 과정에 영향을 주게 된다.

새만금 연안역은 간척사업과 용수확보 등에 의해 인위적으로 환경에 변화가 가해지고 있다. 금강하구는 1994년 8월에 하구언 수문을 작동하여 금강담수유출이 인위적으로 조절되며 상류로의 조석전파와 염확산이 차단되었고(권과 이, 1999) 남과 북 두 개의 수로가 북측 도류제 축조에 의해 연장되었다(Fig. 1a참조). 1991년 말에 착공된 새만금 간척사업으로 길이가 33 km인 새만금 방조제가 완공되면 만경강과 동진강 하구역의 넓은 간사지는 약 28,300 ha의 육지와 11,800 ha의 담수호로 변경되어 연안역 해안선 형태가 바뀌게 된다. 2002년 현재까지 축조중인 방조제와 방조제 서쪽에 동서방향으로 위치한 고군산군도에 의해 이 연안역은 고군산군도 남쪽과 북쪽 그리고 동쪽인 만경강과 동진강 하구역으로 구분될 수 있다. 연안역 해수와 하구내 기수가 세 곳의 미축조 방조제 구간을 통하여 유통되고 있지만 축조된 방조제는 연

안의 물리적 환경에 커다란 변화를 초래 할 수 있다. 따라서 새만금 방조제가 완전히 체절되기 전의 금강기원 저염수와 만경강·동진강 기원 저염수의 유출형태와 연안역에서의 확장과정 그리고 연안역의 순환체계를 파악하는 일은 대규모 간척공사에 따른 연안역 환경변화를 규명하는데 필요한 매우 중요한 부분이다.

연안역의 해수순환은 복잡한 지형과 수심변화, 조류에 의한 이류 및 혼합효과와 바람 그리고 담수유입 등의 여러 요인으로 인하여 일반적으로 매우 다양한 변화를 보인다. 담수공급원을 알고 있는 연안역의 경우 염분은 보존성이 크기 때문에 순환체계를 정성적으로 파악하는데 매우 좋은 추적자로 자주 사용되어져 왔다. 이 등(1999)과 이 등(2001)은 금강하구의 염분구조와 변화를 관측하여 하구유형 및 저염수의 조석동조를 보고하였다. 금강담수 풀림에 관해서는 이 등(1995)이 하구언 축조전, 특히 하계 집중호우로 인한 대량 담수방출시 저염수가 십이동파도 근처에서 북쪽으로 편향되어 황해중부해역으로까지 확장될 가능성을 제시하였으며, 최 등(1999)은 하구언 축조 후 홍수로 인한 대량 담수방출시 금강기원 저염수가 태안반도 주변 조석전선역까지 확장되는 흔적을 관측한 바 있다. Lee et al.(1999)은 다량의 담수가 방출되었을 경우 금강하구입구 북쪽에 저염수 제트류가 형성되고 외해쪽에서는 저염수 축이 북서쪽으로 편향되어 외연도 주변까지 확장된 저염수의 혀모양 분포를 관측하였다. 최근에 신 등(2002)은 관측된 금강 담수풀림 분포와 구조특성을 유발하는 물리적 과정이 조류 이동과 혼합 및 전향력임을 3차원 수치모델 실험을 통하여 밝힌 바 있다. 한편, 금강에 비해 담수유출량이 적은 만경강과 동진강의 하구 및 연안역에 관해서는 물리적 환경에 대한 관측연구가 빈약하다. 새만금 사업추진에 필요한 환경영향평가서(농업진흥공사, 1989) 및 사후환경관리보고서(농어촌진흥공사, 1991-1998) 등이 있고, 이 등(1990)의 고군산군도 주변의 물성분포 조사보고가 있다. 최근에는 김 등(1997)이 새만금 담수호의 담수배출 영향범위를 2차원 수치모델로 연구한 바 있으며, 김 과 김(2002)이 새만금 방조제 내측의 수질특성 및 저질의 용출 부하량을 보고한 바 있다.

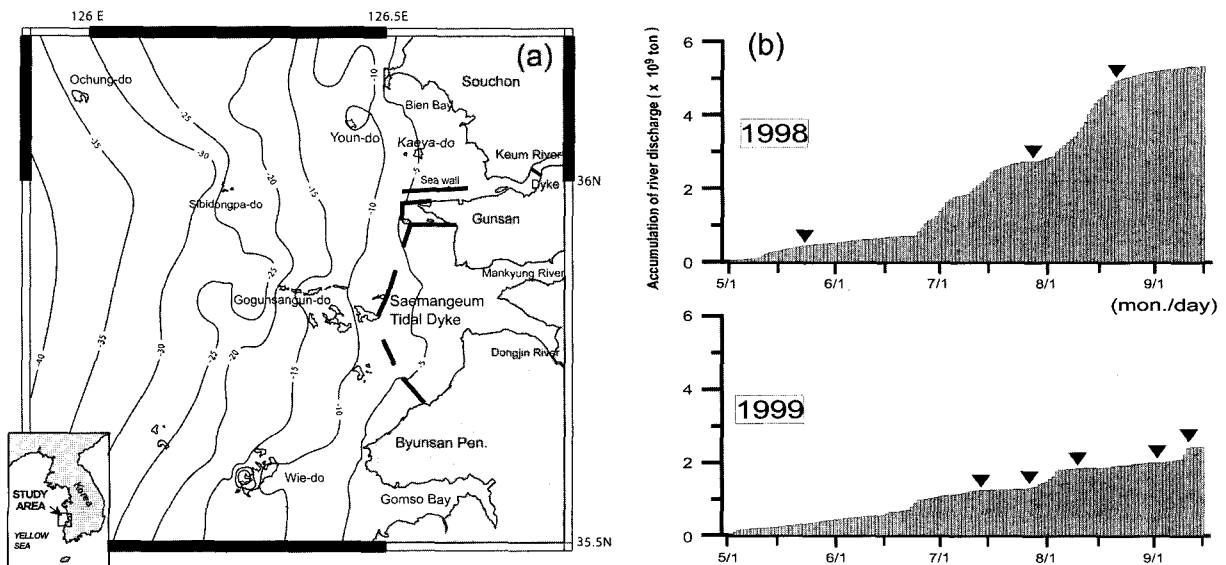


Fig. 1. (a) Study area with bottom contours in meter and (b) accumulated Keum River discharge from May to August in 1998 and 1999. Triangles in (b) indicate dates of hydrographic and anchored observations (see Table 1).

**Table 1.** Summary of hydrographic observations in Keum estuary and Saemangeum coastal area (see Fig. 2 for station locations). Daily mean wind speed at Kunsan meteorological station is used.

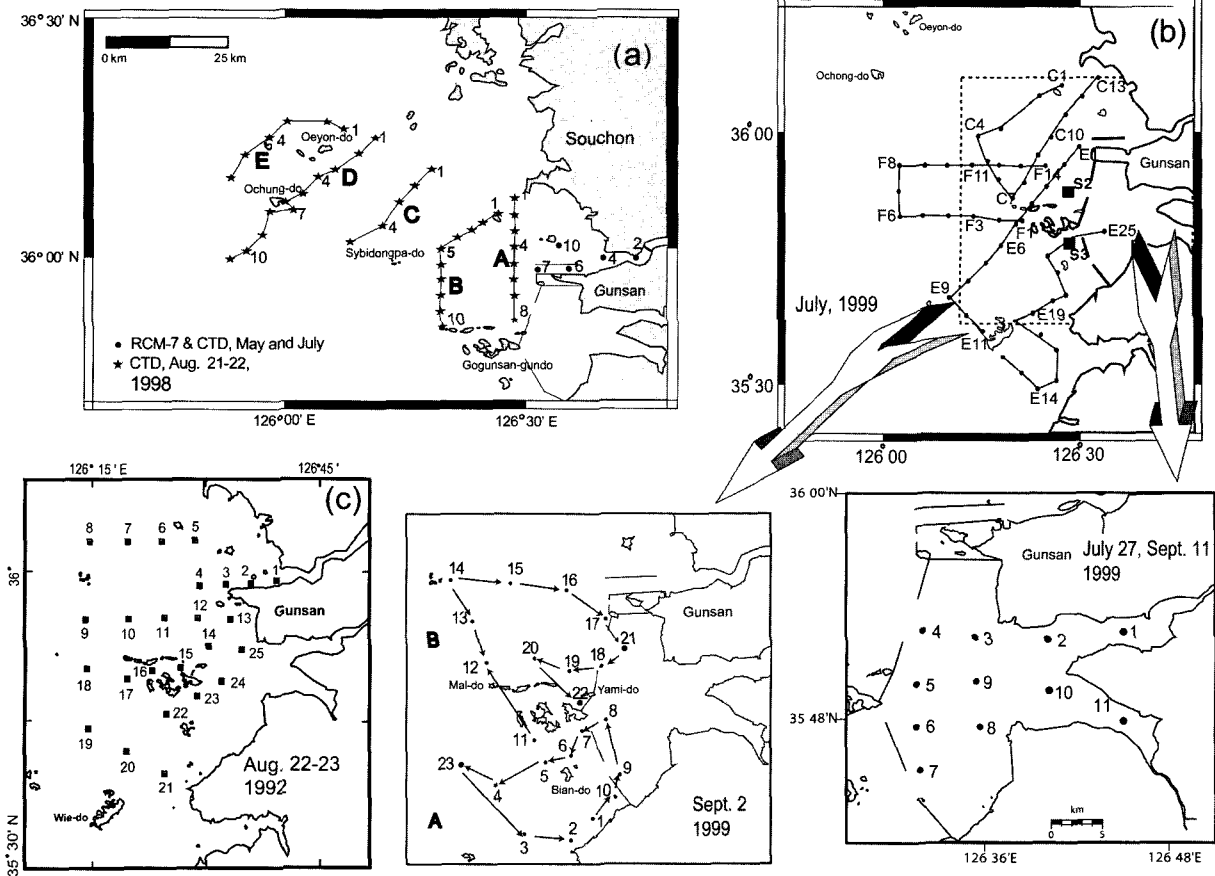
Observation		Moon's Age(day)	Daily Keum River discharge (x10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> )	Daily mean wind speed(m/s)	Area
Date	Type				
1998	5. 23	anchoring	26.6	20,133	Keum River estuary
	7. 28-29	anchoring	4.6	5,636 in July 27	
	8. 21-22	survey	28.6	94,542 in Aug. 21 31,180 in Aug. 22	Offshore plume region
1999	7. 13-15	survey	0.0	9,728 in July 13	Outer region of Saemangeum dyke
	8. 10-11	anchoring	28.0	9,676 in Aug. 10	
	9. 2	survey	21.7	4,983 in Aug. 31	Inner region of Saemangeum dyke
	7. 27	survey	14.0	18,885	
	9. 11	survey	1.2	158,746	

본 연구에서는 새만금 방조제 완공 후의 물리적 연안환경 변화를 예측하는데 도움이 되고자 방조제가 완전히 체절되지 않은 상태인 1998년과 1999년 하계에 담수방류가 많았을 때 집중 조사된 불성자료를 정리하여 금강과 만경강·동진강 하구를 통해 연안역으로 유출되는 저염수가 인근 연안역에서 어떠한 분포와 구조를 이루는지를 분석하였다. 이를 바탕으로 방조제 건설 중의 하계 연안역 순환체계를 진단하고 방조제가 착공되기 이전의 물리적 특성분포와 비교하여 인위적 변화요인인 방조제 건설에 따른 연안

환경 특히 순환체계의 변화를 검토하였다.

자 료

금강담수 영향권역과 새만금 연안역에서의 저염수 거동과 구조 변화를 알아보기 위해 본 연구에서 사용된 자료는 Table 1과 같다. 1998년 5월과 7월에 금강하구에서 정선 정점에서 1시간 간격으로 CTD(SBE19) 관측이 수행되었고 하구외측의 저염수분포는 8월에



**Fig. 2.** Locations of CTD stations taken in (a) 1998, (b) 1999 and (c) 1992. S2 and S3 in (b) indicate the anchored stations taken in August 1999. Station 7 in the mouth of Keum estuary in (a) was taken in October 1997 and used for Fig. 6.

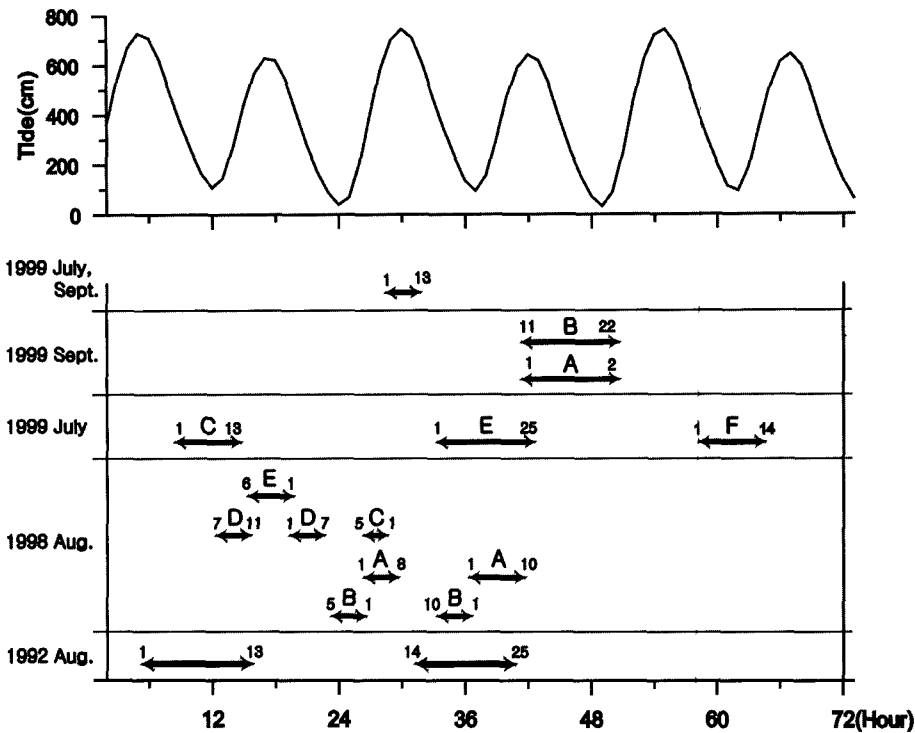


Fig. 3. Tidal phases during CTD surveys taken in 1992, 1998 and 1999 (see Fig. 2). Sea level variation with time is schematically presented using Kunsan tide data. Alphabets denote survey lines and numbers in left and right sides indicate the station number in start and end of the line casting.

조사되었다(Fig. 2a). 1999년 7월과 9월에 새만금 방조제 내측에서 만조 전후에 걸쳐 표층 염분을 관측하였으며 방조제 외측 연안역에서도 방조제 내측 관측시보다 약 10-13일 정도 후에 CTD 관측을 시행하였다(Fig. 2b). 8월에는 고군산군도 북쪽과 남쪽의 방조제 외측 두 정점에서 물성구조의 시간변화를 관측하였다. Table 1에 제시된 자료 외에 하구내의 순환구조를 파악하기 위해 이 등(1999)과 Lee et al.(1999)이 분석한 조류관측자료도 사용되었고, 방조제 축조 이전인 1992년 8월에 관측된 물성분포도 사용되었다(Fig. 2c).

금강담수 유출량을 알기 위해 하구인 수문에서 방류된 일방류량을 사용하였으며 5월부터 방류량을 누적하면(Fig. 1b) 1998년이 1999년에 비해 월등히 많았다. 금강하구인의 수문작동에는 수위조절을 위한 인위적 작용이 포함되어 있으므로 만경강과 동진강의 담수유출 시기가 금강의 경우와는 다소 차이가 있을 수 있지만 유출량은 비례적으로 참고될 수 있다. 바람은 군산 기상대에서의 일평균 풍속을 이용하였다.

연구해역에서 조류이동거리는 대략 8 km 정도로서 하구인근의 물성분포를 조사한 CTD 관측자료 해석에 영향을 줄 수 있다. 본 연구에서 공간적 물성분포 조사시기를 군산외항 조석위상을 기준으로 표현해 보면 Fig. 3과 같다. 1998년 8월에 하구입구부근의 관측선 A와 B는 두 번 관측되었는데 두번째 관측자료가 물성분포(Fig. 7참조) 작성에 사용되었다. 1999년 7월에는 저조를 중심으로 전후 약 3시간씩에 걸쳐 3개의 관측선이 조사되었다. 각 시기별 특성분포의 해석에서 조석위상의 영향이 검토되었다.

### 금강 저염수

#### 하구내 저염수 구조와 거동

서해 중남부 연안역으로 유입되는 담수의 대부분을 공급하는

금강은 연안역 담수플룸 발달과 확장을 지배하게 된다. 금강 하구내 순환구조와 담수 유출형태는 연안역으로의 담수 공급을 좌우하여 플룸형성 과정을 결정하므로 먼저 하구내 저염수 구조와 거동을 살펴보았다.

1998년 5월과 7월에 금강하구의 정점들에서 관측된 염분의 조석주기 평균 수직구조는 Fig. 4와 같다. 표층과 저층의 염분차이가 5월에 10%-13% 정도이고 7월에 4%-6% 정도를 보여 5월 관측일에 많았던 담수유입의 효과를 보여준다(Table 1참조). 두 시기 모두 상류로부터 하구입구 정점으로 갈수록 수층내 염분이 증가하지만 수직 염분구배는 상층부에서 크다. 5월에는 정점 6에서 얇은 표층 저염수가 두꺼운 저층수 위에 얹혀있어 염폐기형에 가깝지만 정점 4의 염분구조는 부분혼합형 구조를 보인다. 7월에는 모든 정점에서 표층부터 저층까지 염분구배가 선형적이며 5월보다 수직혼합이 잘된 염분구조를 보인다. 북수로에 위치한 정점 10에서는 5월과 7월 모두 평균염분이 높고 수직 염분구배가 작아 남수로 정점에 비해 유출된 담수의 영향이 미약함을 알 수 있다.

조석위상에 따른 하구내 저염수 거동은 담수 유출량이 많았던 1998년 5월에 관측된 하구내 종단면 염분분포의 변화에서 볼 수 있다(Fig. 5). 조석주기동안 하구인으로부터 담수유입에 의한 염분구배가 형성되어 있지만 20% 미만의 저염수는 창조동안 상류쪽으로 후퇴하고 낙조동안 하구입구로 확장한다. 수층의 염분구배는 고조에 상류쪽 정점 2에서 증가하고 저조에는 하류쪽 정점 6에서 강해진다. 이러한 종단면 염분구조의 변화는 이 등(2001)이 관측한 표층 저염수의 조석동조 현상과 좋은 일치를 보인다. 특히, 정점 6에서 염분과 염분성층의 조석주기 변화는 하구내 저염수가 낙조류에 의해서만 하구 밖으로 유출되어 연안역 저염수 플룸의 공급원이 됨을 보여준다.

한편, 하계에 금강하구를 부분혼합형으로 분류한 바 있는 이 등

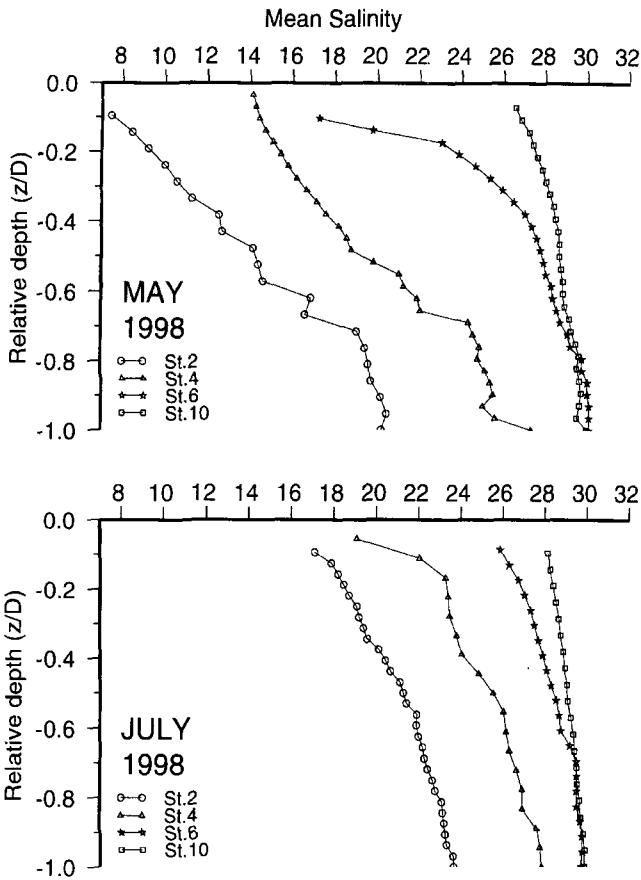


Fig. 4. Profiles of tidally-averaged salinity in the Keum estuary stations in May and July 1998.

(1999, Table 3)의 조석주기 평균된 동서방향의 유속자료를 사용하여 정점의 수층별 흐름을 도시해 보면(Fig. 6), 해수면에서 4 m 정도 깊이까지는 평균흐름이 하구입구로 향하고 5 m 보다 깊은 저층에서는 상류인 하구언쪽으로 향하여 하구내 순환체계가 2층 구조를 보인다. 이러한 평균흐름의 2층 구조는 부분혼합형 하구에서 나타나는 구조로서(Dyer, 1973) 관측된 순환체계가 Fig. 3의 조

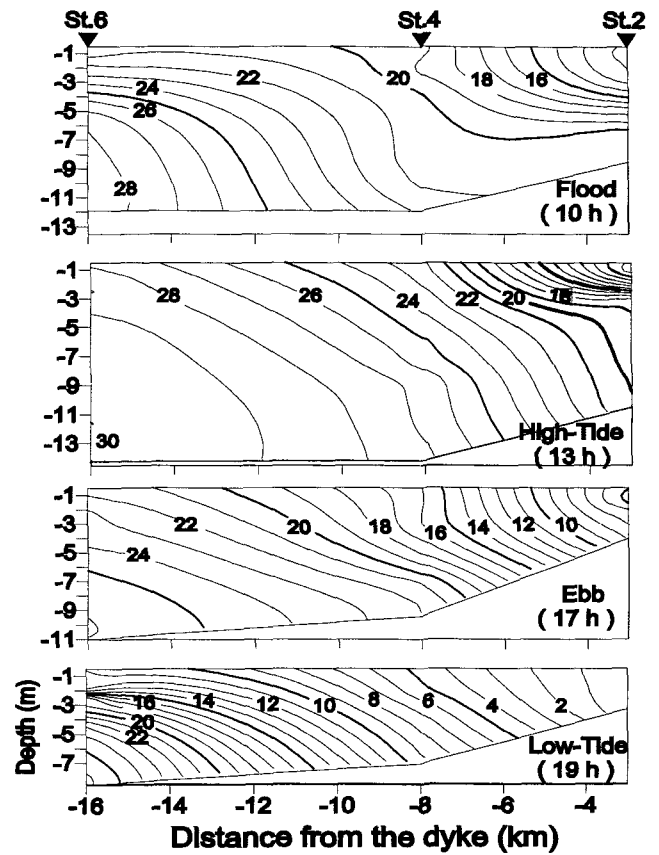


Fig. 5. Salinity sections along the estuary at four tidal phases in May 1998.

석주기 평균 수직염분 구조들과 잘 부합한다. 즉, 상류쪽으로 향하는 저층의 평균흐름이 염을 수송하고, 담수는 상층을 통하여 외해로 유출되는 순환계이다.

하구의 저염수 분포와 구조 특성

1998년 8월에 관측된 표층 염분분포는 금강하구입구 부근과 외해쪽에 걸쳐 두 개의 혀모양의 플룸이 중첩되어 나타났다(Fig. 7). 관측시기에 앞서 금강하구언에서 방류량이 많이 증가하였다 (Fig.

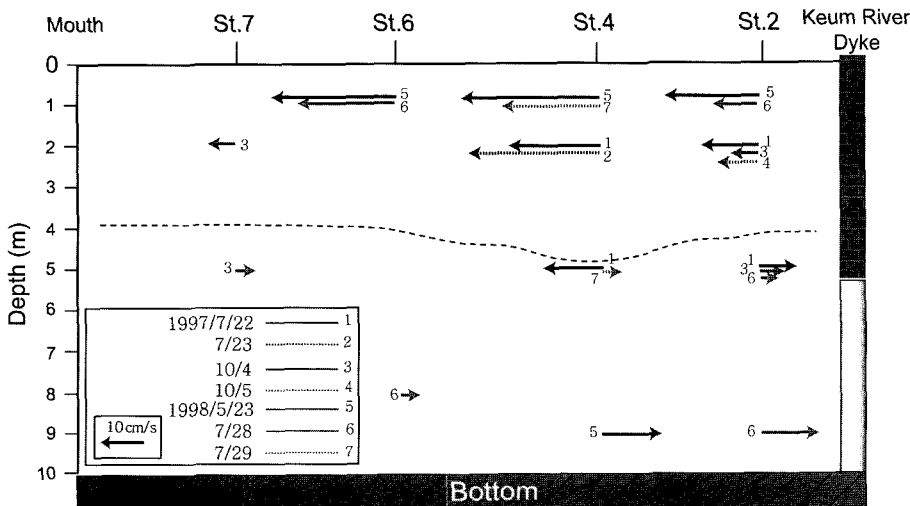


Fig. 6. Tidal averaged eastward currents in the Keum estuary. We used data in Lee et al. (1999, Table 3).

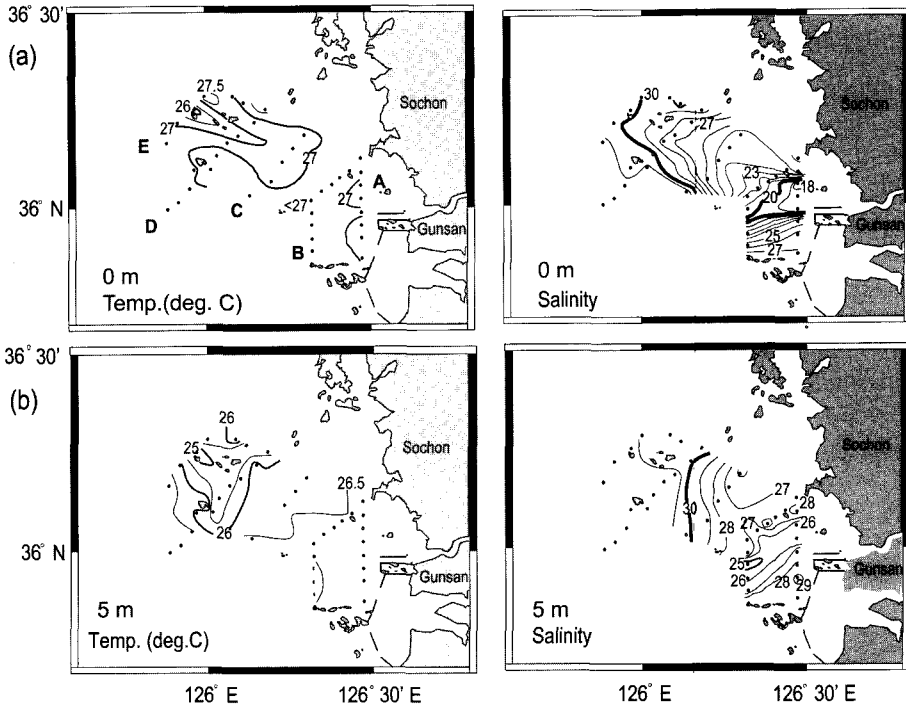


Fig. 7. Distributions of temperature and salinity at sea surface (a) and 5 m depth (b) in August 1998.

1b, Table 1 참조). 하구입구 부근 관측선 A와 B에서 20‰ 미만 저염수의 혀모양 분포는 최저염분이 북수로 입구인 개야도 서쪽에서 관측되고 담수유출 켓트의 형태를 보인다. A 관측선은 창조동안 관측되었고 B 관측선은 낙조동안 관측되었기 때문에(Fig. 3 참조) 혀모양이 다소 남서쪽으로 향하는 것으로 판단되며, 남서쪽 외해역이 관측되지 않아 유출켓트의 서쪽경계를 명확히 알 수는 없다.

30‰ 미만의 저염수는 북서쪽 외연열도로 확장하여 긴 혀모양의 외해플룸을 형성하고 표층 저염수가 관측된 거리는 남수로 입구에서부터 북서쪽으로 60 km에 달한다. 이 외해플룸은 저염수 축이 담수유출 방향인 서쪽으로부터 오른쪽(북쪽)으로 편향되어 있다. C, D와 E 관측선 조사시의 조석위상이 상이하고 관측선이 조류의 주축방향인 북동-남서방향으로 설정되었지만 정점간 이동시간(20분 내외)이 짧고 관측선간의 거리가 조류이동거리보다 충분히 멀어 전반적인 물성분포가 조석위상차이에 의해 변형될 가능성은 매우 적다. 해면아래 5 m 깊이에서는 30‰ 미만의 저염수 범위가 외연열도 남동쪽으로 축소되어 염분분포의 혀모양은 표층에 비해 위축되었다. 하구입구 서쪽에서는 관측시의 조석위상차이로 인하여 25‰ 미만의 저염수가 오히려 서쪽에서 나타나는 분포를 보이지만 이 저염수는 유출켓트가 관측선 B까지 유지될 수 있음을 의미한다.

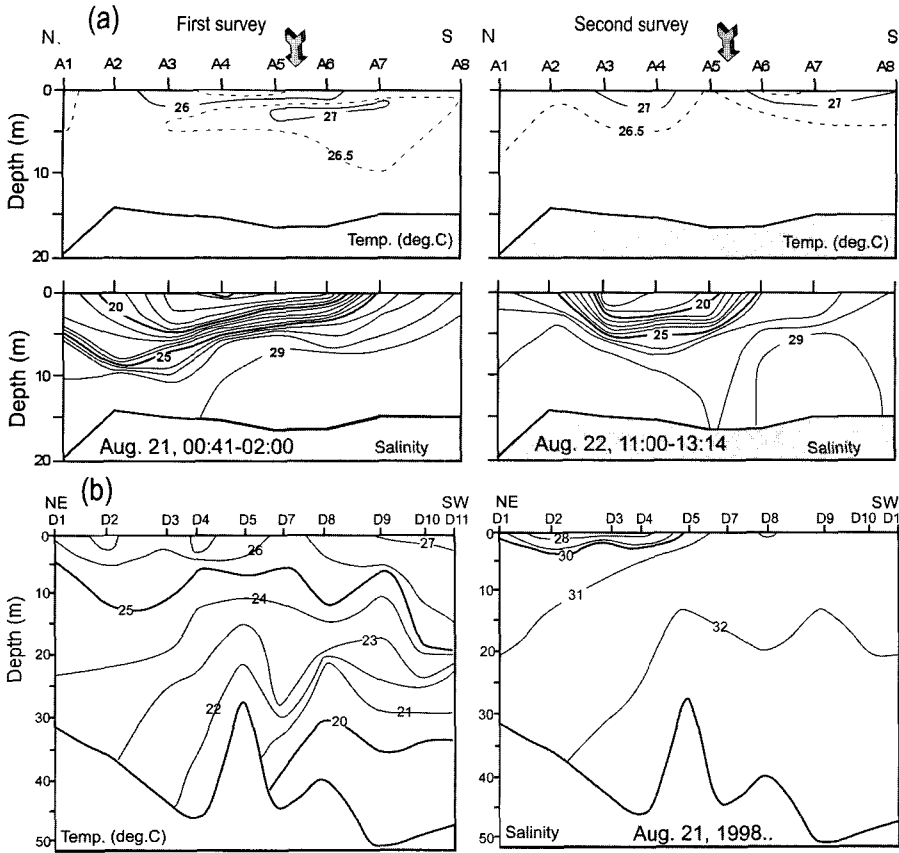
이러한 염분분포는 최 등(1999, Fig. 8 참조)이 관측한 대량 담수방류시 하구입구 부근과 십이동파도 부근의 조류이동, 잔차류 방향 및 저염수 이류와 부합되는 결과이다. 또한 금강 플룸의 분포 특징들은 금강 하구언 수문을 작동하기 전인 1991년과 1992년 8월에 이 등(1995)이 관측한 특징들과 유사한데 이는 하구언 수문 작동에 의해 담수유출이 인위적으로 조절되어도 하구 밖의 플룸 형태와 구조특징은 크게 변하지 않았음을 의미한다.

금강담수 플룸의 수직구조는 Fig. 8과 같다. 하구입구에서 약

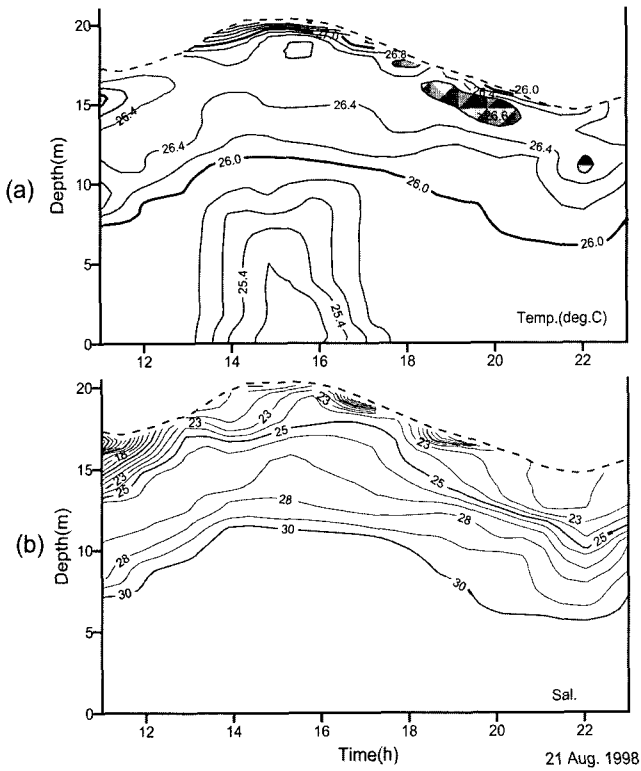
11시간 차이를 두고 창조때 유출켓트를 가로지르는 남북방향으로 두 번 관측된 단면 A는 플룸의 축을 형성하는 25‰ 미만의 저염수가 표층 렌즈형 핵구조를 보인다(Fig. 8a). 첫 번째 관측시보다 두 번째 관측시 담수유출량이 절반이하로 적어져서(Table 1) 단면에서 저염수가 차지하는 면적과 깊이가 감소하였다. 관측된 최저염분의 위치는(정점 A3와 A4 표층) 북수로 입구쪽이고 핵구조의 렌즈중심에서 벗어나 있다. 특이한 현상으로 담수가 대량으로 유출된 첫 번째 관측에서 나타난 저염수 핵구조 내에서 4 m 깊이에 27°C 이상의 고온수가 관측되어 수온역전을 보인다. 단면 표층의 26°C 미만의 수온분포와 18‰ 미만의 염분분포의 유사성으로 보아 이 수온역전은 이전에 유출된 저염수보다 수온이 낮은 표층수가 새로이 금강하구에서 유출되어 발생한 것으로 해석되며 새로이 유출된 표층수의 염분이 충분히 낮아 밀도역전은 발생하지 않았다.

어청도와 외연열도 주변의 북동-남서방향 단면 D에서도(Fig. 8b) 30‰ 미만의 저염수는 표층에서 렌즈구조를 유지하지만 4 m 미만의 두께로 얇아졌고 북동쪽 연안역 고염수 위에 얹혀 있다. 저염수 아래 연안수는 등염분선과 등온선이 연안쪽인 북동쪽으로 깊어져 있는데 이는 연구해역에서 북쪽(태안반도 쪽)과 연안쪽으로 갈수록 강해지는 조류혼합효과에 의한(Seung et al., 1990; Lee and Choi, 1998) 수직혼합 현상으로 볼 수 있다.

관측점 B5에서는 한 조석주기동안 정선하여 매 시간별로 물성구조의 변화를 조사하였다. 관측초기 저조에 10‰ 미만의 저염수가 표층에서 관측되었고 창조동안 표층염분이 증가하지만 낙조동안은 2회에 걸쳐 18‰ 미만의 저염수가 표층에 나타났다(Fig. 9). 25‰ 등염분선의 깊이는 저조시에 깊어진다. 단면 A의 첫번째 관측에서 나타났던 표층부근의 수온역전은 관측기간동안 자주 나타났으며 관측초기 표층 저염수 출현시 역전이 가장 강하였다. 이러한 물성구조의 변화는 조사기간 동안인 8월 21일에 금강담수가



**Fig. 8.** Vertical sections of temperature and salinity along line A (a) and D (b) in August 1998. Arrow in (a) indicates the mouth of southern channel of Keum estuary. The first and second surveys along line A were taken during two flood periods with an interval of eleven hours.



**Fig. 9.** Time variations of temperature (a) and salinity (b) profiles at anchored station B5 in August 21, 1998. Shaded and mosaic area in (a) indicates temperature inversions.

05시 48분과 17시 55분부터 약 2시간 동안  $55,754 \times 10^3$  톤과  $38,788 \times 10^3$  톤이 방류되어 B5 관측점에 영향을 미친 것으로 판단되며, 특히 표층 저염수 아래에서 수온역전이 나타난 현상은 단면 A에서와 같이 하구에서 유출되는 저염수의 수온구조에 의한 것으로 볼 수 있다.

### 만경강 · 동진강 저염수

#### 방조제 내측 저염수 분포

만경강과 동진강 하구는 축조 중인 새만금 방조제 내측에 포함된다. 방조제 내측에서 1999년 7월과 9월에 관측된 표층염분은 두 강하구 상류쪽에서 염분이 급격히 낮아지는 분포를 보여 두 강으로부터의 담수유입의 영향을 반영한다(Fig. 10). 두 시기 모두 북쪽 연안의 표층염분이 남쪽 연안보다 현저히 낮으며 등염분선은 북서-남동방향으로 향하는 분포특성을 보인다. 이러한 하계 만조 때의 염분분포는 두 강에서 유입되는 담수가 방조제 내측에서 병합되고 있으며 또한 방조제내 연안수와 혼합, 희석된 저염수가 주로 북서쪽 방조제 미축조 구간을 통하여 방조제 밖으로 유출되는 형태를 보여준다. 두 강 저염수가 합쳐진 이러한 염분분포는 천해에서 강한 조류혼합에 의한 것으로 볼 수 있다.

방조제 내에서 북쪽 지역의 염분이 낮은 이유로서 먼저 바람을 살펴보면(Table 1참조) 7월 관측일에 북동풍이 강하였지만 9월 관측일에는 약한 서풍이어서 바람의 영향을 주된 원인으로 보기 어렵다. 다음으로 만경강의 담수유출량이 남쪽의 동진강보다 많기

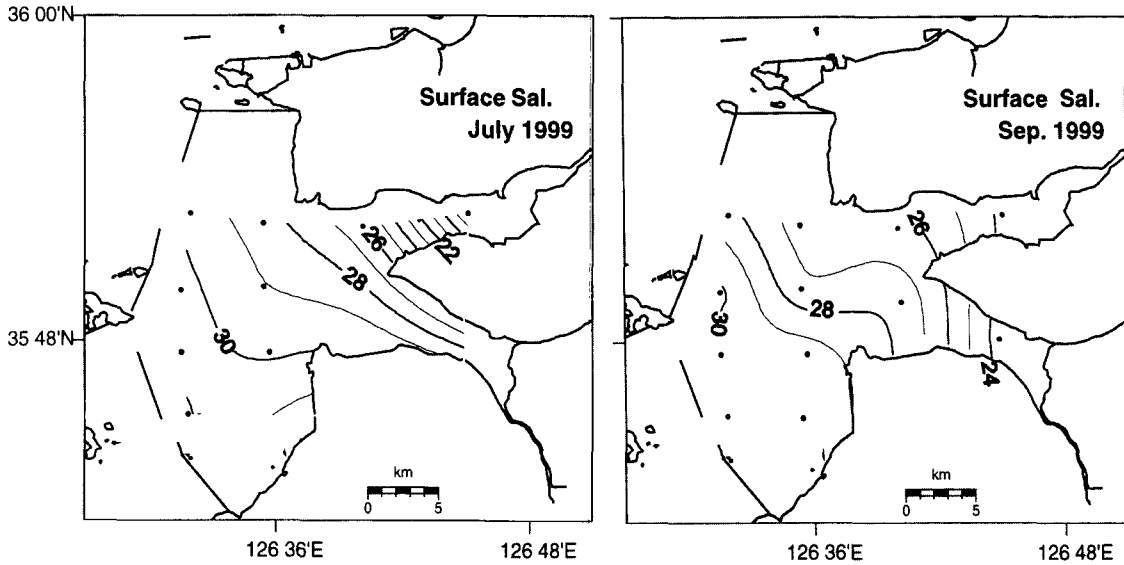


Fig. 10. Surface salinity distributions in the inner region of Saemangeum dyke in July 27 and September 11, 1999.

때문일 수도 있고, 두 강의 담수가 병합되어 방조제 외측으로 이동하는 과정에서 전향력에 의한 편향작용 때문일 수도 있다. 이 지역은 수심이 매우 얇은 반폐쇄 지역이므로 관측된 염분분포 특성의 발생원인을 밝히기 위해서는 수치모델연구와 더 많은 관측이 필요하다.

**방조제 외측 저염수 분포**

1999년 7월에 새만금 방조제 내측을 관측한 시기보다 2주일정도 앞서 관측된 방조제 외측 물성분포는 Fig. 11a와 같다. 금강하구 입구의 서쪽 표층에 30‰ 미만의 저염수가 넓게 분포하고, 남쪽 곰소만 입구에도 31‰ 미만의 저염수가 나타났다. 이 표층 저염수들은 수온이 22°C 이상으로서 고군산군도 주변의 저온, 고염의 표층수에 의해 분리되어 있다. 해면아래 10 m 깊이에서도 수온과 염분분포 특성은 표층과 유사하다. 곰소만 부근에서 관측된 표층 저염수는 만 입구쪽으로 갈수록 염분이 낮아져 있어 곰소만에서 유출된 담수에 기원을 두고 있는 것으로 보이며, 이 저염수도 31‰ 등염분선과 22°C 등온선의 혀모양 분포형태로부터 좁은 범위지만 곰소만에서 북쪽으로 확장된 것으로 해석된다.

금강하구 입구부근 저염수는 서쪽과 남쪽의 주변수와 강한 전선을 이루어 1998년 8월 관측(Fig. 7 참조)에서 명확하지 않았던 폴름의 외해쪽 확장범위를 뚜렷이 보여주고, 염분전선의 분포형태에서 금강 폴름이 북서쪽으로 확장하는 현상이 분명해 진다. 물성분포는 3일에 걸쳐 조사되어 각 관측선의 시작과 끝의 조석위상이 다르지만(Fig. 3 참조), 고군산군도 북쪽에서 염분전선이 나타난 곳을 관측할 때의 조석위상은 저조 직전으로 매우 유사하여 염분전선의 위치와 모양이 조석위상에 의해 변형된 효과는 거의 없다. 한편, 곰소만 입구 및 북쪽 연안역은 창조동안 관측되어 저염수의 혀모양분포가 조류이동에 의해 확대되었을 가능성은 있다. 2주일 정도 차이를 두고 관측되었지만 7월의 방조제 외측(Fig. 11a)과 내측(Fig. 10, 왼쪽) 표층염분분포를 비교하면 고군산군도 북쪽에서 염분전선이 서로 연결되는 방향으로 형성되어 있어 만경강

과 동진강 기원 저염수가 방조제 외측으로 유출된 후 금강기원 저염수에 병합될 가능성이 매우 높다.

9월 2일에는 이러한 하구 저염수들의 병합을 확인하기 위해 주로 낙조동안 고군산군도 남쪽과 북쪽에서 동시에(Fig. 3참조) 수온과 염분을 조사하였으며 방조제 내측을 관측범위에 포함하였다. 이 시기의 적은 담수방류량으로 인하여 염분전선의 강도는 약하지만 등염분선과 등온선의 분포형태는(Fig. 11b) 7월(Fig. 11a)과 유사하다. 특히, 새만금 북측 방조제 내측에 29‰ 미만의 저염수가 나타났다으며 이 저염수는 금강하구 서쪽보다 염분이 1‰ 정도 낮고 수온은 0.5°C 정도 높다. 이 저염수는 방조제 내측의 표층 염분분포 형태(Fig. 10 오른쪽)에 비추어보면 만경강·동진강에서 유출된 담수에 기원을 두고 있음을 알 수 있다. 따라서 9월의 이러한 염분분포는 만경강과 동진강 기원 저염수가 금강기원 저염수에 병합되고 있으며 이로 인하여 표층 염분전선이 새만금 방조제 내측까지도 연결되고 있음을 보여준다.

**물성구조와 변화**

고군산군도 북쪽에서 동서방향으로 염분전선을 가로질러 관측된 1999년 7월의 단면 F(Fig. 2b참조)에서 물성구조는 Fig. 12와 같다. 정점 F12와 F13 사이 표층에서 열·염분전선이 수직으로 해저에까지 발달하였으며, 수온전선과 염분전선이 일치하여 강한 밀도전선이 형성되고 있다. 단면에서 전선 동쪽에 위치한 31‰ 미만의 저염수는 수평분포(Fig. 11a)에서 보여진 폴름의 저염수이고 전선 서쪽인 정점 F9 표층에서의 고온수는 염분이 32‰ 정도로서 저염수 폴름과는 다른 특성을 갖고 있는 외해수이다. 정점 F11에서 등온선이 표층으로 상승되어 표층 열전선이 뚜렷해 보이지만 이러한 구조는 F2, F3에서도 나타나 고군산군도 주변 섬들에 의한 국지적으로 발생하는 현상으로 예상된다(Fig. 11a, 수온분포참조). 한편, 전선은 정점 F14의 10 m 깊이에서 렌즈형 핵구조를 이루는 전선과 해저까지 발달하는 전선으로 나누어지며 이중구조를 이룬다. 이러한 이중구조 전선은 북동-남서 방향으로 설정된 2개



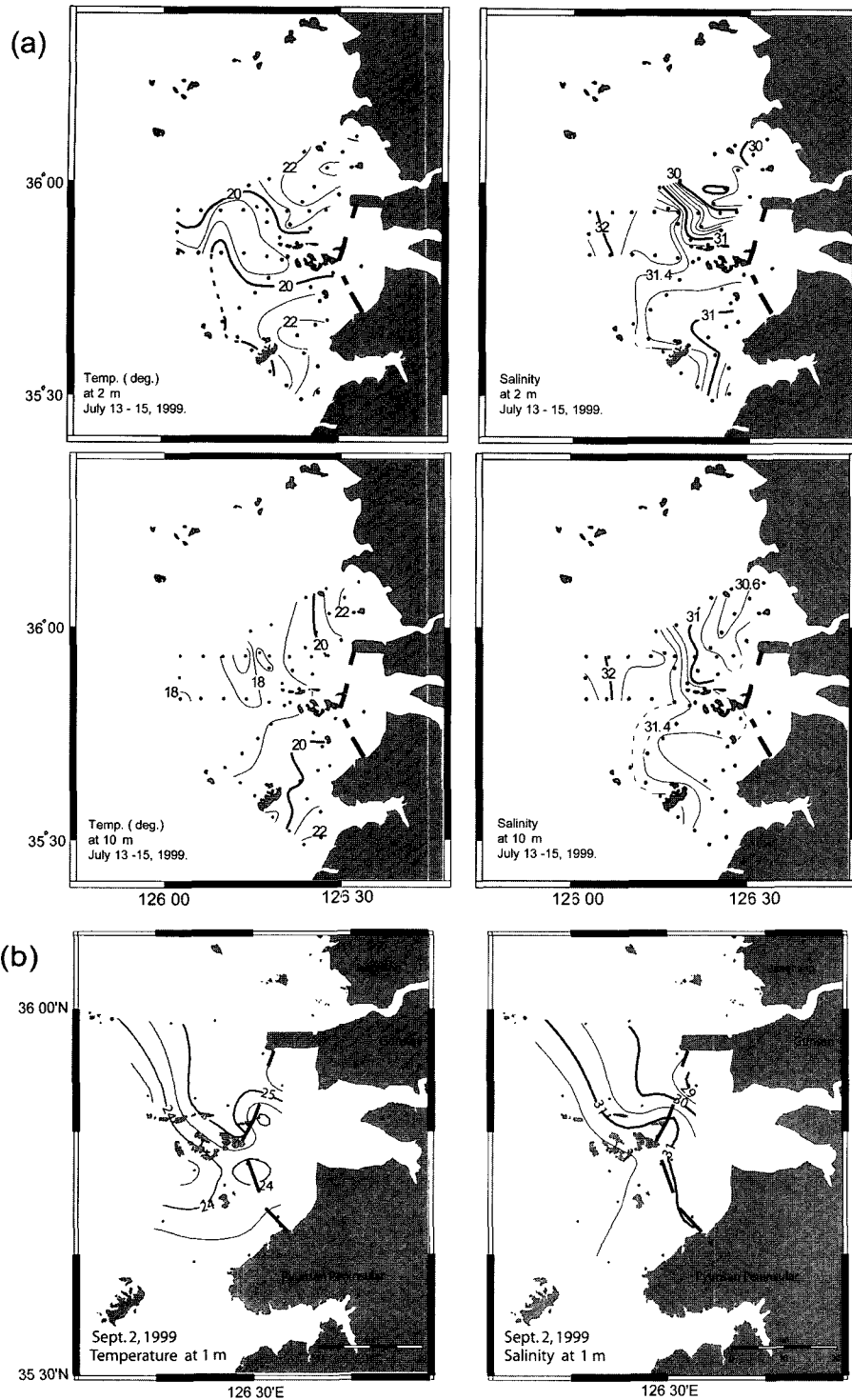


Fig. 11. Temperature and salinity distributions off Saemangeum tidal dyke in July 13-15 (a) and September 2 (b), 1999.

의 단면 C에서도 나타나 저층에서도 외해수와 담수회석수의 경계가 확인하였다.

고군산군도 북쪽과 남쪽에 있는 방조제의 미축조 구간을 통과하는 해수의 물성을 비교해 보기 위하여 방조제 외측 두 정점 S1과 S2에서(Fig. 2b참조) 1999년 8월에 25시간동안 시간단위로 물성구조를 동시에 관측하였다(Fig. 13). 수온과 염분구조는 모두 조석위상과 일치하는 변화를 보이지만, 고군산군도 북쪽인 정점 S2

에서는 저조 때 고온, 저염의 해수가 수층내에 나타나 조석위상에 따른 물성변화가 뚜렷한 반면에 고군산군도 남쪽인 정점 S3에서는 물성변화가 매우 미약하다. 또한 정점 S2에서 저조 전과 후에 수온과 염분의 수직구조 변화로 인하여 수직 성층세기는 다소 강해지지만 정점 3에서는 조석위상에 관계없이 수직 성층이 매우 미약하다. 이러한 결과는 정점 S2에서 저조때 저염수의 영향이 강하게 나타나지만 정점 S3에는 거의 영향을 미치지 않음을 의미한다.

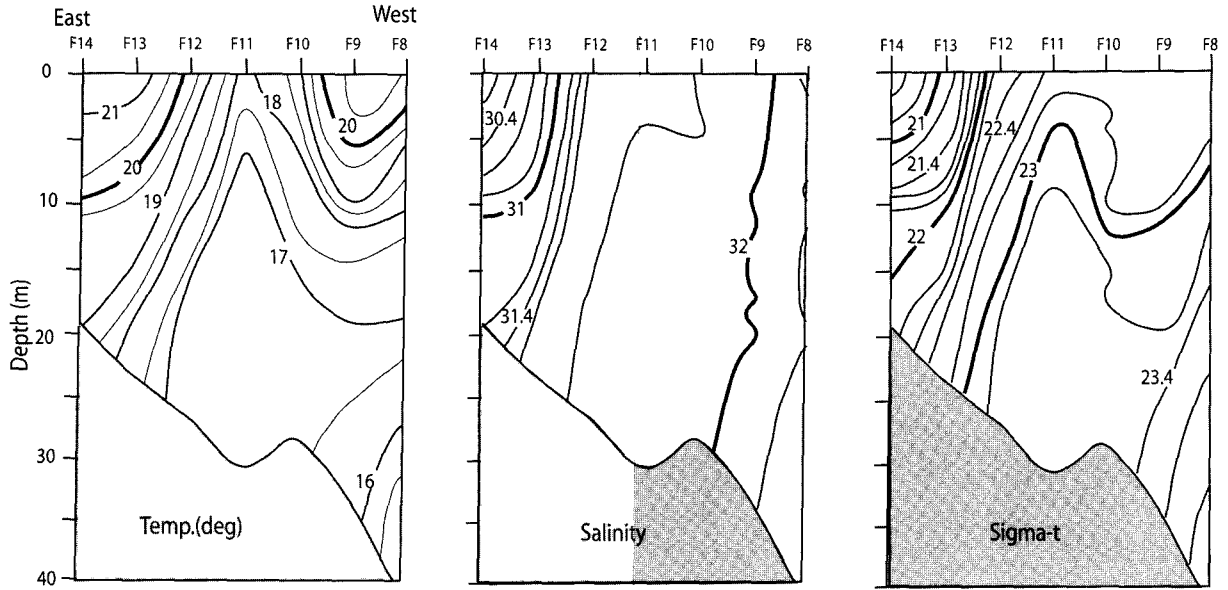


Fig. 12. Vertical sections of temperature, salinity and sigma-t along line F in July 1999.

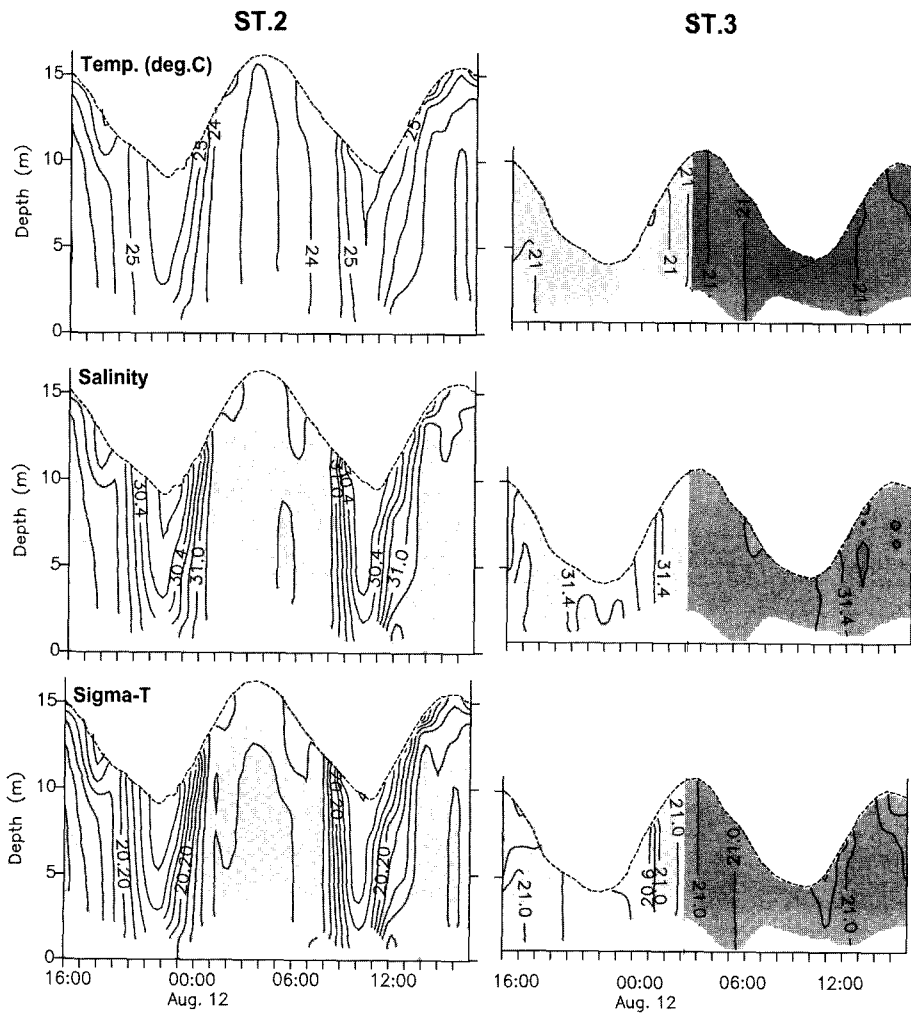


Fig. 13. Time variations of temperature, salinity, sigma-t profiles at anchored station S2 (left) and S3 (right) off Saemangeum dyke in August 1999. Water depth is converted from the bottom using sea level variation of Kunsan tide station. See Fig. 2a for station locations.

정점 S2에서 나타난 고온, 저염수는 풀룸의 염분전선이 서쪽으로 향하는 낙조류에 의해 이동되어온 결과로 해석될 수 있다.

**토의 및 요약**

금강 하구내 정점 4와 2의 하층에서(Fig. 6) 관측된 동쪽방향의 5 cm/sec 이상의 평균흐름은 염을 상류로 공급하는 역할을 할 뿐만 아니라 저층 고농도 부유물을 상류로 이동시키는 역할을 할 수 있다. 하구언 부근에서는 부유물이 침전되어 해저지형을 바꾸게 된다. 이 등(1999)은 금강하구에서 광투과도가 저층으로 갈수록 감소하며 창, 낙조류가 최대가 될 때 광투과도도 최저가 됨을 보여 주었고 이를 해저퇴적물이 재부유되는 현상으로 해석한 바 있다. 서(1999)가 조사한 금강하구언 부근의 퇴적체 형성은 이러한 2층 구조의 하구순환체계에 의해 저층 흐름이 부유퇴적물을 상류 쪽으로 이동시킨 결과를 대변해 준다.

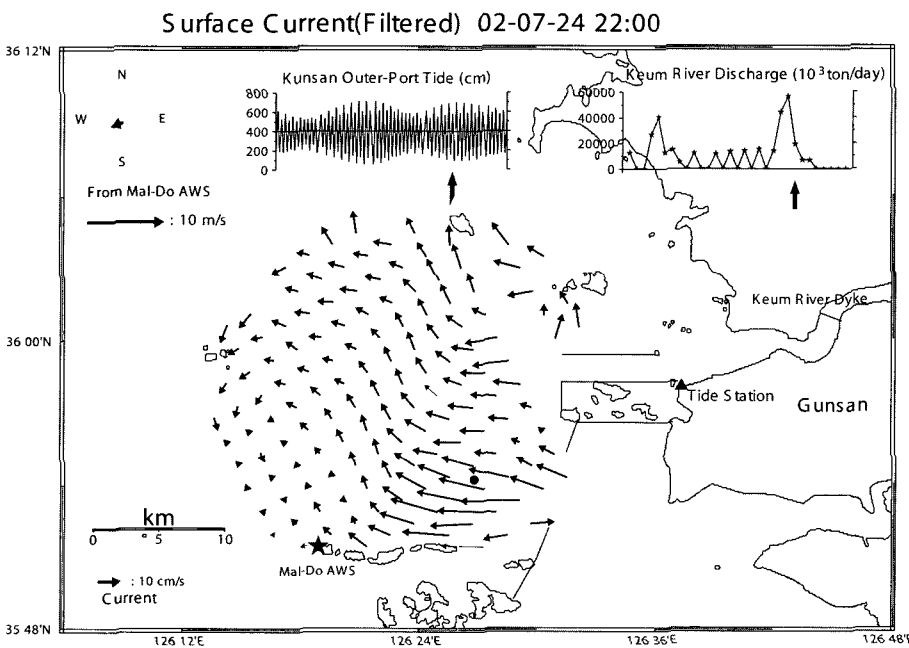
금강하구 밖의 풀룸분포와 구조의 형성기작에 대해서는 신 등(2002)이 수치모델을 통하여 연구한 바 있다. 먼저, 하구입구 부근 단면 A에서 저염수 유출셋트의 핵구조가 창조 때 비인만 입구와 북서로쪽에 치우쳐 있는 현상(Fig. 8a)은 조류에 의한 저염수 이류로 해석된다. 이는 신 등(2002, Fig. 8)이 보여준 수치모델 결과와 일치하는 해석으로서 금강하구 남서로를 통하여 저조에 하구로부터 유출되는 저염수(Fig. 5)가 하구 밖의 창조류에 의해 북쪽으로 이동된 결과이다. 단면 A가 두 번 모두 창조때의 풀룸 구조임이 이러한 해석을 뒷받침한다. 한편, 단면 A의 첫번째 관측에서 25% 등염분선이 A5에서 A2로 갈수록 깊어진 구조는 설명이 필요하다. 금강하구언에서는 일 2회 낙조에 담수가 방류되었는데, 첫번째 관측 이전인 8월 21일 17:55부터 38,788×10<sup>3</sup>톤, 두번째 관측 이전인 22일 06:55부터 19,605×10<sup>3</sup>톤이 각각 2시간정도에 걸쳐 유출되었으며 단면 A 관측들보다 약 6시간 정도 이전이다. 이러한 단속적 담수방류량의 차이로 인하여 단면 A에서의 저염수 핵구조는 변화될 수 있으며, 첫번째 관측단면에서 북쪽으로 갈수록

25% 등염분선이 깊어진 현상은 증가된 담수방류량에 의한 많은 저염수가 북쪽으로 이류되었기 때문으로 해석된다.

다음으로, 저염수가 Fig. 7과 같이 북서쪽으로 확장하게 되는 현상의 물리적 과정에 대해서는 신 등(2002)이 배경혼합으로 작용하는 조류혼합과 표층에서 염분전선을 따라 발달하는 정압적 지형류가 하구 입구의 저염수를 북서쪽으로 공급하여 풀룸이 확장하는 것으로 해석한 바 있다. 신 등(2002, Fig. 8, Fig.13 case 3)은 조석주기 평균이었을 때도 하구입구 북쪽에 저염수 덩어리의 핵구조가 나타났음을 보여주어 이 핵구조는 하구 밖으로 유출된 저염수의 저장고에 해당하며 풀룸의 저염수 공급원인을 보여주었다. 단면 A에서 북쪽으로 치우쳐 있는 저염수양이 담수방류량에 따라 달라지는 현상은 이러한 해석을 뒷받침한다.

만경강과 동진강은 담수유출량이 비교적 적으며, 두 강의 하구역은 축조중인 새만금 방조제의 내측 지역으로서 미축조 구간에 의해 외해와 연결되어 있고 수심이 매우 낮아 해저면 마찰력이 우세할 것으로 판단된다. 이러한 환경조건은 금강하구 외측의 개방된 지역과 달라서 관측된 염분분포 특징(Fig. 9)이 형성되는 과정에 신 등(2002)이 설명한 금강 저염수 풀룸이 발달하는 과정을 대입하여 해석할 수는 없다. 하지만 담수의 기원이 분명하고 보존성이 비교적 큰 염분의 경우 염분분포 특성에서 저염수의 평균적 확장방향은 제시될 수 있다. 따라서 Fig. 10과 Fig. 11b에서 방조제 내측의 만경강과 동진강 기원 저염수는 주로 북쪽 방조제 미축조 구간을 통하여 연안역으로 유출되고 있는 것으로 해석함이 타당하며, 방조제 외측에서는 금강담수 풀룸에 병합되어 강한 염분전선을 형성하는 것으로 해석함이 가능하다. 방조제 내측에서 물성분포가 만조시 관측되었고 만경강이 동진강보다 유출량이 많다는 환경조건은 저염수가 북서쪽으로 확장하는 분포를 만들 수 있는 요인이 되며 특히 전향력도 이에 부합되는 작용을 할 것으로 기대되므로 관측된 저염수분포 특성의 형성기작에 대한 추후 연구가 요구된다.

최근인 2002년 7월에 HF 레이더를 이용하여(Fig. 14) 고군산군



**Fig. 14.** Distribution of sub-tidal surface currents obtained using HF radar (CODAR) in July 24, 2002 (after Son *et al.*, 2003). Arrows in upper part small figures indicate wind vector, tidal phase and Keum river discharge in the observation day.

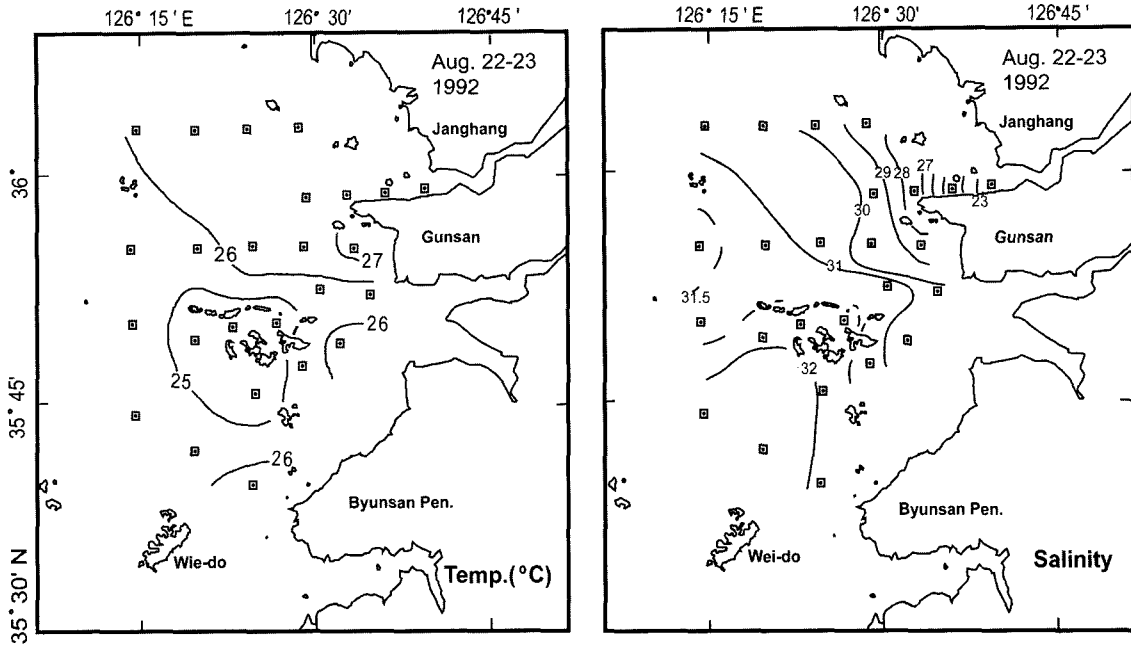


Fig. 15. Surface temperature and salinity distributions in August 1992 before Saemangeum tidal dyke construction.

도 북쪽 해역에 대해 1 km 간격으로 획득된 표층흐름 관측결과 (Son et al., 2003)는 이러한 하계 저염수 이동과정에 대한 해석을 뒷받침한다. 이 표층의 유동장은 40시간보다 짧은 주기운동을 제거(filtering)한 후 얻어진 것으로서 금강 방류량이  $5 \times 10^7$ 톤/일 이상 크게 증가한 후 2일 정도 지난 시기의 표층 흐름이다. 관측시기에 말도에 설치된 AWS에서 관측된 바람은 1 m/s 정도로 미약하였다. 새만금 북방조제 미축조 구간주변과 금강하구 입구부근에서 관측된 서쪽으로 향하는 흐름은 하구의 저염수 유출효과로 해석될 수 있다. 특히, 관측구역의 중앙부에 걸쳐 북서쪽으로 향하는 연안역의 흐름장이 형성되어 있다. 동일 연도는 아니지만 많은 담수가 유출되었을 때에 관측된 Fig. 7과 Fig. 11의 하계 염분분포와 Fig. 14의 표층흐름을 비교해 보면 북서쪽으로 향하는 이 흐름은 외해수와 경계를 이루는 염분전선을 따라 발생하는 것으로 유추할 수 있다.

한편, 만경강과 동진강 기원 저염수가 북방조제쪽으로 유출되는 현상은 새만금 남쪽 방조제 미축조 구간을 통한 평균적 흐름에 대한 해석을 요구한다. 남쪽 방조제 외측의 정점 S3에서 조류에 의한 저염수의 이동은 관측되지 않았다(Fig. 13)는 점과 곰소만 북쪽에서 나타난 31‰, 21°C 이상의 표층수가 분포하는 형태(Fig. 11a)로부터 고군산군도 남쪽해역에서 표층수가 새만금 방조제 내측을 향하여 유입될 가능성을 제시할 수 있다. 새만금 남쪽 방조제 미축조 구간을 통해 외해수가 유입된다면 북쪽 방조제 미축조 구간을 통한 하구수 유출과 함께 새만금 연안에서 반시계방향의 하계 순환이 구성된다. 하지만 고군산군도와 변산반도 사이 해역에 대한 하계 평균적 흐름을 알기 위해서는 더 많은 물성분포 및 구조 관측과 더불어 장기간에 걸친 해류관측이 요구된다.

연구해역에서 새만금 방조제가 축조되기 전인 1992년 8월에 본 연구팀에 의해 관측된 표층 수온과 염분분포는 Fig. 15(농립수산부, 1994 참조)와 같다. 이 분포를 방조제 축조이후 하계 표층수

온과 염분분포(Fig. 11)와 비교해보면 곰소만에서 유출되는 저염수 분포는 나타나지 않았지만 조사해역의 기본적인 물성 분포특성은 매우 비슷하다. 즉, 방조제 축조 전에도 금강기원 저염수가 우세하며 북서쪽으로 확장하고 만경강과 동진강 기원의 저염수는 금강기원 저염수와 병합되고 있었으며, 고군산군도 주변 표층에서 수온이 낮고 염분이 높았다. 관측시의 조석위상을 살펴보면(Fig. 3 참조) 고군산군도 남쪽과 북쪽해역이 2일에 걸쳐 나누어 관측되었으며 방조제 구역 내측(정점, 12, 13, 23, 24, 25, Fig. 2c참조)에서는 창조동안 주로 관측되었고 금강하구 및 북쪽 지역은 낙조에 관측되었다. 따라서 남쪽과 북쪽 방조제 축조구역에서 조석위상에 의한 물성분포의 변형은 거의 없지만 금강하구 입구부근에 비해 외해역 고염수가 이동되었을 가능성은 있다. 하지만, 이러한 물성분포로부터 연구해역에서 하계 표층순환계는 방조제 축조전과 비슷하게 유지되고 있는 것으로 판단할 수 있으며 이는 방조제가 축조되고 있어도 미축조 구간을 통하여 해수교환과 저염수 유출이 유지되고 있기 때문인 것으로 해석된다.

새만금 간척사업은 1단계로 2006년까지 방조제를 완전체질하고 동진강 하구역과 만경강 하구역을 방수체로 분리한 후 동진강 하구역을 먼저 간척지로 개발하기로 계획되어 있다. 이 단계가 완성되면 만경강 하구는 기수역으로 남겨 놓고 동진강 하구는 담수호로 개발될 예정이며, 만경강과 동진강 담수가 남쪽 방조제에 설치되는 두 곳의 수문을 통하여 연안역으로 유출될 예정이다. 두 강의 담수유출량이 금강에 비해 작지만 고군산군도 남쪽에서 새로운 저염수 풀뭉을 형성하게 되며 금강 저염수 풀뭉과는 분리된다. 방조제를 완전히 체질하면 방조제에 직각인 방향으로 흐르던 조류는 차단되어 해수유동에 큰 변화가 발생하게 되며 이와 더불어 인위적인 담수유출 경로 변경에 따른 저염수 분포 및 순환체계도 크게 변화될 것으로 예측된다. 김 등(1997)의 수치모델 연구는 2차원모델을 사용하였고 금강담수유출을 충분히 반영하지 않

아 저염수 풀름의 구조 및 확장범위와 분리병합 등이 적절히 재현되지 못하였으며, 특히 저염수 풀름과 관련된 연안역 순환체계를 파악하지 못하였다. 이러한 인위적인 순환계 변화와 그에 따른 물성분포 변화에 대한 3차원적 예측연구는 새만금 간척공사로 인한 연안역 환경변화를 파악하는데 필수적으로 요구된다.

본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다. 새만금 방조제가 완전히 채절되지 않은 상태인 1998년과 1999년 하계에 금강과 만경강·동진강 하구에서 유출되는 저염수는 고군산군도 북쪽 해역에서 병합되어 북서쪽으로 확장하는 풀름분포를 보인다. 담수유출량이 많을 때 이 저염수에 의한 전선은 수직으로 발달하여 외해수와 경계를 이룬다. 고군산군도 남쪽 해역에서는 외해수 혹은 곰소만에서 유출된 저염수가 북동쪽으로 유입될 가능성이 있다. 이러한 저염수 분포와 구조로부터 새만금 방조제 내측에서는 반시계방향의 하계 순환이 제시될 수 있다. 새만금 방조제의 축조단계에 따라 동진강 담수와 만경강 담수를 단계적으로 고군산군도 남쪽 지역으로 유출시켰을 때는 만경강과 동진강담수가 금강 저염수와 분리되어 각각의 풀름을 형성할 것이므로 새만금 연안역의 하계 저염수 분포와 이에 따른 순환계는 변화될 것으로 예상되며 이에 대한 3차원적 예측연구가 요구된다.

## 사 사

본 연구는 과학기술부와 한국과학재단이 지정하고 전라북도가 후원하는 군산대학교 새만금환경연구센터의 지원으로 수행되었다.

## 참고문헌

- 고재원, 정신택, 김철, 조흥연, 2001. 지리정보체계를 이용한 만경강·동진강의 유역정보 및 오염부하량 분석. 한국해양학회지, **13**(3): 237-244.
- 권효근, 이상호, 1999. 하구연 수문작용으로 인한 금강 하구역의 물리적 환경변화 I. 평균해면과 조석. 한국 해양학회지 바다, **4**: 93-100.
- 김대근, 서일원, 백경오, 선우중호, 1997. 새만금 간척지구 담수호 건설에 따른 담수배출의 영향범위 예측. 한국수자원학회 논문집, **30**(6): 649-659.
- 김종구, 김양수, 2002. 새만금 사업지구의 연안해역에서 부영양화 관리를 위한 생태계모델의 적용 1. 해역의 수질특성 및 저질의 용출부하량 산정. 한국수산학회지, **35**(4): 348-355.
- 농림수산부, 1994. 새만금 종합개발사업 어업피해 보상조사연구 제 II편 물리해양학적 조사. 농림수산부, 299pp.
- 농어촌진흥공사, 1989. 새만금지구 간척종합개발사업 환경영향평가서.
- 농어촌진흥공사, 1990-1998. 새만금지구 간척종합개발사업 사후환경영향 조사보고서.
- 서기석, 1999. 군산한 및 장항항의 수심변화. 수로기술연보, 한국 해양조사원
- 수로국, 1989. 조류도(군산항 부근). 서지 제1432호.
- 신은주, 이상호, 최현용, 2002. 금강풀름의 구조와 분포에 대한 수치모델 연구. 한국해양학회지(바다), **7**(3): 157-170.
- 이상호, 최현용, 권 근, 2001. 하구연 수문작용으로 인한 금강하구의 물리적 환경변화 III. 저염수의 조석동조, 한국해양학회지 (바다), **6**(3): 115-125.
- 이상호, 권효근, 최현용, 양재삼, 최진용, 1999. 하구연 수문작용으로 인한 금강 하구역의 물리적 환경변화 II. 염분구조와 하구 유형. 한국해양학회지, 바다, **4**(4): 255-265.
- 이상호, 최현용, 오임상, 1995. 하계 금강 plume의 구조와 변동. 한국해양학회, **30**: 125-137.
- 이원호, 이상호, 장진호, 1990. 고군산군도 주변해역의 해양학적 기초 연구 1. 해수특성, 표층 퇴적물 및 식물플랑크톤 군집. 군산대학교 해양개발연구, **2**: 61-81.
- 최현용, 이상호, 유광우, 1999. 금강하구연 대량방류시 황해 중동부 해역의 염분분포. 한국해양학회지 바다, **4**: 1-9.
- Dyer, K. R., 1973. Estuaries; a Physical Introduction. A summary of the descriptive and dynamic oceanography of estuaries. Wiley, p. 140.
- Lee, S. H. and H. Y. Choi, 1998. A numerical model study of residual tidal currents in the mid-eastern Yellow Sea - initial stratification. *The Yellow Sea*, **3**: 58-70.
- Lee, S. H., H. Y. Choi, H. K. Kwon and E. J. Shin 1999. Estuary type and plume structure of the Keum River Estuary. In: *Progress in Coastal Engineering and Oceanography*, Vol. 1. edited by B.H. Choi. Korean Soc. Coastal and Ocean Eng. Seoul, pp. 143-155.
- Son, Y. T., S. H. Lee, J. C. Lee and D. H. Kim, 2003. Surface currents variability observed by HF radar off Keum River estuary in the west coast of Korea in summer, 2002. Extended abstract in Proceedings of 12th PAMS/JECSS, April 2003.
- Seung, Y. H., J. H. Chung and Y. C. Park, 1990. Oceanographic studies related to the tidal front in the Mid Yellow Sea off Korea: Physical aspects. *J. Oceanogr. Soc. Korea*, **25**: 84-95.

2003년 3월 11일 원고접수

2003년 5월 9일 수정본채택

담당편집위원: 이재학