

금강하구언 대량방류시 황해 중동부 해역의 염분분포

최현용 · 이상호 · 유광우¹

군산대학교 해양학과, ¹한국전력공사 에너지환경고등연구소

Salinity Distribution in the Mid-eastern Yellow Sea during the High Discharge from the Keum River Weir

HYUN-YONG CHOI, SANG-HO LEE AND KWANG-WOO YOU¹

Department of Oceanography, Kunsan National University, Kunsan 573-360, Korea
¹Korea Electric Power Research Institute, Taejon 305-380, Korea

금강에서 유출된 담수의 거동 특성을 파악하기 위해, 금강하구에서 담수가 대량 방류된 1997년 7월 7일에서 7월 12일 사이에 한국 서해 중부의 금강하구에서 태안 반도에 이르는 해역에서 해양조사를 실시하였다. 금강하구에서 북서쪽으로 약 60 km 떨어진 어청도 사이의 해역은 30.0 psu 이하의 저염수가 분포하였으며, 어청도 이북해역에서도 부분적으로 금강 담수 기원으로 해석되는 저염수가 관측되었다. 특히 금강 담수 플룸에 의한 것으로 추정되는 염분전선이 십이동파도 인근에서 관측되었으며, 48 시간 후에는 북서쪽으로 약 25 km 떨어진 어청도 근방에서도 관측되어 염분전선의 위치가 시간에 따라 이동하는 결과를 보였다. 담수 플룸에 의해 수직성층이 잘 된 십이동파도 북측해역에서 20 시간 연속 관측된 조류를 분석한 결과 담수 플룸 내인 상층에서 평균유속이 0.2 m/s 이상인 북서방향의 흐름이 관측되었다. 관측된 평균흐름 및 염분전선의 위치변동은 금강 담수 플룸이 외해로 확장되는 과정으로 해석되며, 금강하구에서 유출되는 담수가 금강하구 인근 연안역의 표층해수 순환에 크게 영향을 줄 수 있음을 제시한다.

Hydrographic survey was carried out in the mid-eastern Yellow Sea from Keum River to Taean Peninsula in order to study the motion of the freshwater from the Keum River during July 07—12, 1997 when a large volume of freshwater was discharged from the Keum River weir. The low-salinity (less than 30.0 psu) plume was distributed over the large area between the Keum River and Ochong Island, 60 km northwest off the Keum River mouth. A band of relatively low saline water, originating from the Keum River, was also observed to the north of Ochong Island. The strong haline front had advanced from near Sibidongpa Island to Ochong Island, 25 km northwest of Sibidongpa Island, for 48 hours. A northwestward flow of a speed greater than 0.2 m/s was observed in the surface plume layer to the north of Sibidongpa Island where the water column was strongly stratified. The observed mean flow and the change of the frontal position are interpreted as resulting from the spreading of the Keum River plume. These results suggest that the discharge from the Keum River plays an important role in the coastal circulation of the mid-eastern Yellow Sea adjacent to the river.

서 론

강 하구를 통해 연안역으로 배출되는 담수는 연안역의 물리적인 특성 외에도 생물, 화학 및 지질학적인 특성을 지배하는 중요한 물리적 인자이다. 바다로 대량 유출된 담수는 고염의 외해수 위에 부유하는 플룸(plume)을 형성하고, 주위 해수와의 압력차에 의해 수평적으로 확장되며(O'Donnell and Garvine, 1983; Garvine, 1984), 플룸의 가장자리에서 주위 해수와의 확산에 의해 소멸된다. 강 하구에서 유출되는 담수가 플룸을 형성하고, 플룸의 위치가 조류 및 담수 유출량에 따라 달라지는 물리적인 특성은 Garvine(1974)에 의해 미국 동부의 Connecticut 강에서 비교적 상세히 관측되었지만, Bowman and Iverson(1977), O'

Donnell(1990) 및 Fedorov(1983) 등이 지적한 바와 같이 유출된 담수의 거동 특성은 담수유출량, 담수가 유출되는 연안역의 해수순환, 수평혼합 및 해저마찰력 그리고 지구자전효과 등의 물리적 변수에 따라 달라질 수 있으므로 강 하구에서 유출된 담수의 거동은 지역에 따라 서로 다른 특성을 지닌다.

한국 서해 중부 연안에 위치하는 금강은 1994년 9월에 금강하구언이 체절된 후 금강하구언의 수문 개방 시에만 담수가 대량 방류되는 일시적 하구환경으로 변하였다. 즉, 금강하구언 체절 전에는 금강을 통해 연평균 약 156 m³/s(Schubel *et al.*, 1986)의 담수가 연속적 방출의 형태로 서해 중부 연안역으로 유출되었지만, 금강하구언 체절이후에는 낙조시에만 간헐적으로 담수가 유출되고 있다. 이와 같은 담수 유출 형태의 변화로 인해 금

강하구역을 포함한 서해 중부연안역의 물리적 해양환경 역시 금강하구언 체절 이전에 비해 달라졌을 것으로 예상된다.

금강하구언이 체절되기 이전에도 금강은 서해 중부 연안역의 해양환경에 영향을 미치는 중요한 물리적 인자 중의 하나로 인식되었다. Seung *et al.*(1990)은 금강에서 태안반도 사이의 비교적 넓은 해역에서 하계에 관측한 염분 분포로부터 금강담수의 영향이 금강하구 입구에서 서쪽으로는 약 10 km, 북쪽으로는 약 50 km까지 나타남을 제시한 바 있으며, Lee *et al.*(1990)은 금강하구역을 포함한 남쪽해역에서 금강 담수의 영향범위를 추정하였고, Choi(1993)는 금강하구 유출수의 계절적인 변동특성을 제시하였는데 유출량이 적은 동계에는 금강하구 남쪽해역으로 더 멀리 확장하고, 유출량이 많은 하계에는 금강하구 이북해역으로 더 멀리 확장하는 것으로 보고한 바 있다. 하지만 이들의 연구도 Seung *et al.*(1990)을 제외하면 연구 대상 해역이 넓지 않아서, 금강에서 유출된 담수의 영향범위를 정량적으로 추정하지는 못했다. 특히 금강하구역의 담수 플룸에 대한 연구는 Lee *et al.*(1995)이 유일한데, 이들의 연구는 담수 플룸의 확장 및 공간적인 분포보다는 하구 인근해역에서 조석위상에 따른 플룸의 구조변화에 중점을 두었다. 이들은 염분 29.0 psu를 담수 플룸의 경계로 해석하였으며, 특히 1991년 하계에는 금강하구에서 서쪽으로 약 30 km 떨어진 십이동파도 북측해역에서 관측된 담수 플룸을 보고하였다. 염분이 29.0 psu 이하인 금강하구 기원 저염수는 강우량이 많았던 1987년 8월에도 금강하구에서 어청도까지 분포했음이 Choi and Lee(1991)에 의해 보고된 바 있는데, Lee *et al.*(1995)은 어청도해역의 저염수 및 Seung *et*

al.(1990)이 관측한 금강 하구 이북의 저염수를 금강 담수 플룸의 확장에 의한 것으로 해석하였다. 이러한 연구들은 금강하구역에 인접한 해역에서 금강 담수의 영향 범위 및 거동 특성을 부분적으로 제시하였다. 그러나, 금강에서 유출된 담수로 인한 저염수가 금강하구역을 포함한 광범위한 서해 중동부 해역에서 어떻게 분포하는지와 어떠한 과정을 통해 외해로 이동되는지에 대한 연구는 아직 이루어지지 않고 있다.

금강하구언에서는 하계 홍수기를 맞아 1997년 7월 1일부터 7월 12일 사이에 15억 m³ 이상의 담수를 대량 방류하였는데, 이 시기에 금강하구에서 유출된 담수가 금강하구역을 포함한 서해 중동부 해역에 미치는 영향을 파악하기 위하여 해양조사를 실시하였다. 본 연구에서는 금강하구의 북측에 위치한 십이동파도, 어청도, 격렬비열도 및 태안반도 인근해역을 포함한 서해 중동부역에서 관측된 염분자료를 분석하여 금강하구언에서 방류된 담수 희석수의 분포 범위를 알아보고, 금강하구 외해에서 관측된 조류 자료를 이용하여 금강 담수 플룸의 경계로 추정되는 염분전선의 이동에 대해 논의하고자 한다.

관 측

본 조사는 1997년 7월 7일에서 7월 12일 사이에 수행되었으며, 조사해역의 관측점은 Fig. 1과 같다. 금강하구에서 유출된 담수의 공간적인 분포범위를 파악하기 위하여, 서해 중부 외해역을 중심으로 A에서 H까지 8 개의 관측선을 따라 각 관측선별로 표층염분을 관측하였고, 관측선을 따라 설정된 26 개 정점에

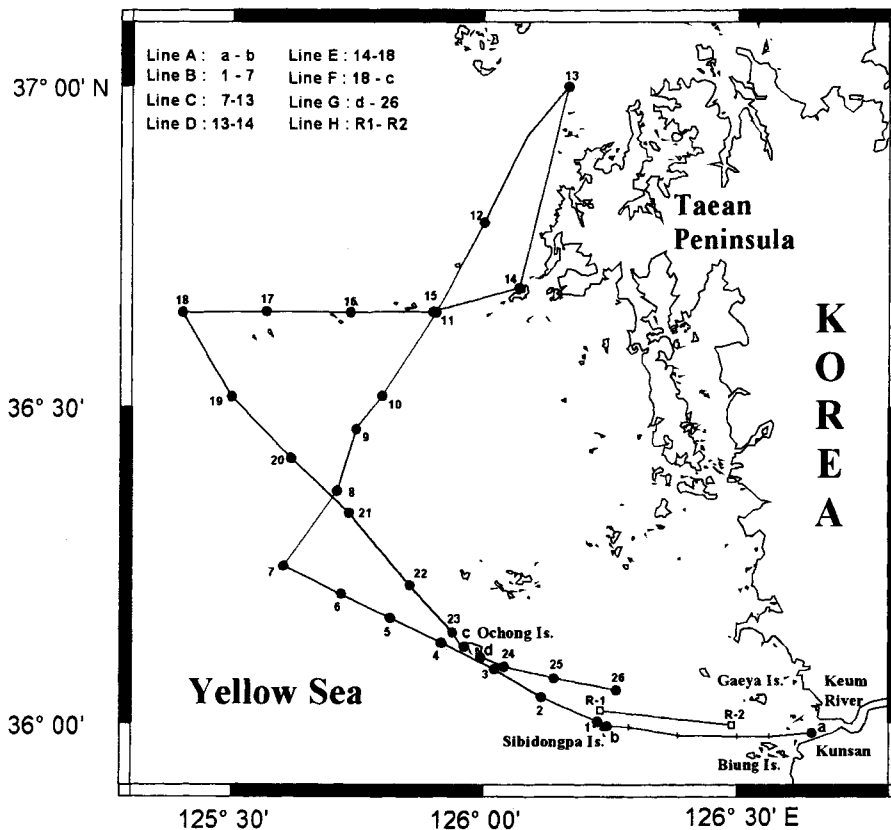


Fig. 1. The map shows the study area. Surface salinity was measured along Lines A to I. CTD castings were made at stations (solid circles) numbered from 1 to 26. Squares marked with R-1 and R-2 denote the positions of current observation.

Table 1. Hydrographic surveys in July 1997

Date	Line	Observation
July 07	A	Surface salinity
July 08	B, C, D	CTD, surface salinity
July 09	E, F	CTD, surface salinity
July 10	G	CTD, surface salinity
July 11	H	Surface salinity

서 CTD 관측을 실시하였다(Table 1). 또한 금강하구에서 유출된 담수의 직접적인 영향을 받는 십이동파도와 비응도 인근 해역에서는 유속계를 표층과 저층에 제류하여 각각 약 20 시간 동안 조류를 연속 관측하였다(Table 2).

표층염분자료는 염분관측기가 부착된 Aanderra RCM-7 유속계를 수조에 설치한 후 조사선에 부착된 해수펌프를 이용하여 표층 2 m 아래의 해수를 수조에 연속적으로 통과시키면서 2 분 간격으로 취득된 자료이고, CTD 관측자료는 자료취득간격이 0.5 초인 Sea-Bird사에서 제작된 SBE-19를 이용하여 취득된 자료이다. 유속의 시계열 자료는 계류된 조사선에서 정해진 관측 깊이에 각각 수온 염분 관측기가 부착된 Aanderra RCM-7을 내려 5 분 간격으로 취득한 자료이다.

조사전인 1997년 6월 한 달 동안 금강하구언을 통해 서해 중부 연안역에 유출된 담수는 $6.0 \times 10^8 \text{ m}^3$ 이하인데 비해, 1997년 7월 1일부터 7월 12일 사이에는 하루 평균 약 $1.2 \times 10^8 \text{ m}^3$ (약 $1400 \text{ m}^3/\text{s}$)씩 약 15 km^3 의 담수가 대량으로 유출되었으며, 특히 7월 2일과 7월 7일에는 하루 최대 약 $2.0 \times 10^8 \text{ m}^3$ (약 $2300 \text{ m}^3/\text{s}$)이 유출되었다(Fig. 2). 이 시기의 담수방류량은 Lee et al. (1995)이 십이동파도 북측해역의 저염수 플룸을 관측 보고한 1991년 하계의 방류량보다 많은 양이다. 조사기간의 풍속은 5 m/s 이하로서 해상상태는 양호하였다.

결과 및 고찰

염분 분포

8 개의 관측선을 따라 측정된 표층염분은 Fig. 3에 도시하였으며, 각 관측선별로 최고 및 최저 표층염분은 Table 3에 수록하였다. 관측치 중 최저 염분은 금강하구의 0.72 psu, 최고 염분은 어청도 북방(관측선 B의 정점 4와 5 사이)에서 관측된 32.54 psu이다. 총 8 개의 관측선 중에서 어청도, 십이동파도 그리고 금강하구를 잇는 어청도 이남해역은 염분이 30.0 psu 이하이고 (관측선 A, 관측선 B의 정점 1과 2 사이, 관측선 G, H), 어청도 이북해역은 염분이 31.0 psu 이상이다(관측선 B의 정점 2와 7 사이, 관측선 C, D, E, F). 어청도를 중심으로 염분의 차가 뚜렷하여 두 해역으로 나누어 염분분포를 살펴보았다.

어청도-금강하구 해역: 관측선 B의 정점 1과 2 사이에는 염분이 28.0 psu에서 31.0 psu로 급격히 증가하는 강한 염분전선이 형성되어 있으며(Fig. 3b), 관측선 F의 정점 c와 관측선 G의

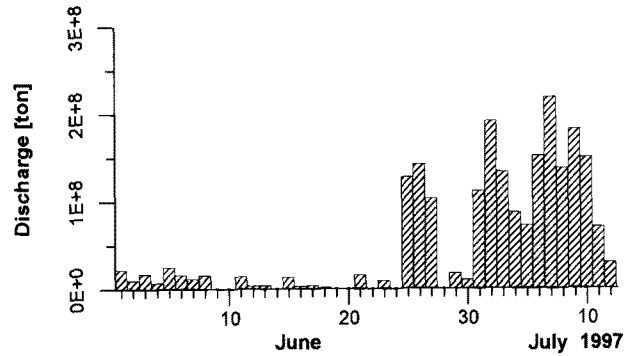


Fig. 2. Daily discharge of freshwater from the Keum River weir from June 1 to July 12, 1997.

정점 d 사이에서도 염분이 약 3.0 psu 이상 차이가 나는 강한 염분 전선이 형성되어 있다(Figs. 3f, 3g). 또한 염분전선과 금강하구 사이에 위치한 관측선 A, G, H(Figs. 3a, 3g, 3h)의 표층염분은 염분전선으로부터 금강하구쪽으로 가면서 염분이 점진적으로 감소한다. 강 하구에서 형성되는 담수 플룸은 외해 고염수와 의 경계에서 강력한 염분전선을 형성하고 염분이 하구 쪽으로 갈수록 감소하는 일반적인 특성을 고려하면, 어청도와 금강하구 사이에서 관측된 표층 염분의 분포는 금강하구 플룸의 특성을 보이고 있는 것으로 해석된다.

어청도와 십이동파도 사이의 관측선 G 및 조류관측점 R-1에서 취득한 CTD 자료는 고염수 위에 저염수가 부유하는 염분의 수직구조를 뚜렷하게 보이고 있다. 즉, 어청도와 십이동파도 사이의 해역에 염분이 30.0 psu 이하인 저염수가 약 5~6 m의 두께로 고염의 외해수 위에 부유하는 형태의 염분 수직구조(Fig. 4a)를 보이고 있으며, 십이동파도 북측의 조류관측점 R-1에서 20 시간 동안 1 시간 간격으로 관측한 CTD 자료 역시 약 5~6 m 두께의 저염수(염분 30.0 psu 이하)가 32.0 psu 이상의 고염수 위에 조석위상에 관계없이 계속하여 부유하는 양상(Fig. 5)을 보이고 있다. 관측시기에 이 해역에서 조류에 의한 이동거리가 북동-남서방향으로 7~8 km(Fig. 8 참조)임을 감안할 때 외해 고염수 위에 약 5~6 m 두께로 부유하는 30.0 psu 이하의 저염수는 관측점 R-1을 중심으로 적어도 반경 7~8 km 이내의 해역 및 십이동파도에서 어청도에 이르는 해역에 분포하는 것으로 추측되며, 이 저염수는 금강 담수 플룸의 일부로 해석된다.

금강하구 유출담수로 인해 연안역에서 형성되는 담수 플룸의 물리적인 특성에 대한 조사는 수행된 바 없지만, 부분적으로 금강하구와 어청도 사이 해역에서 금강 담수 플룸으로 추정되는 구조는 보고된 바 있다. Lee et al.(1995)은 1991년 하계에 본 연구 조사시기 방류량의 약 60%인 $800 \text{ m}^3/\text{s}$ 의 담수가 금강에서 유출될 때 십이동파도 북측에서 담수 플룸 구조를 지닌 염분구조를 관측 보고하였고, 이보다 앞선 1987년 하계의 집중호우 발생시기에도 금강하구에서 어청도에 이르는 해역에서 염분이

Table 2. Details of current observation

Station	Location	Observation period	Mean water depth	Measured depth
R-1	36.020°N, 126.231°E	July 10 10:40—11 05:40	31 m	4 m, 22 m
R-2	35.997°N, 126.489°E	July 11 07:00—12 06:00	12 m	4 m, 10 m

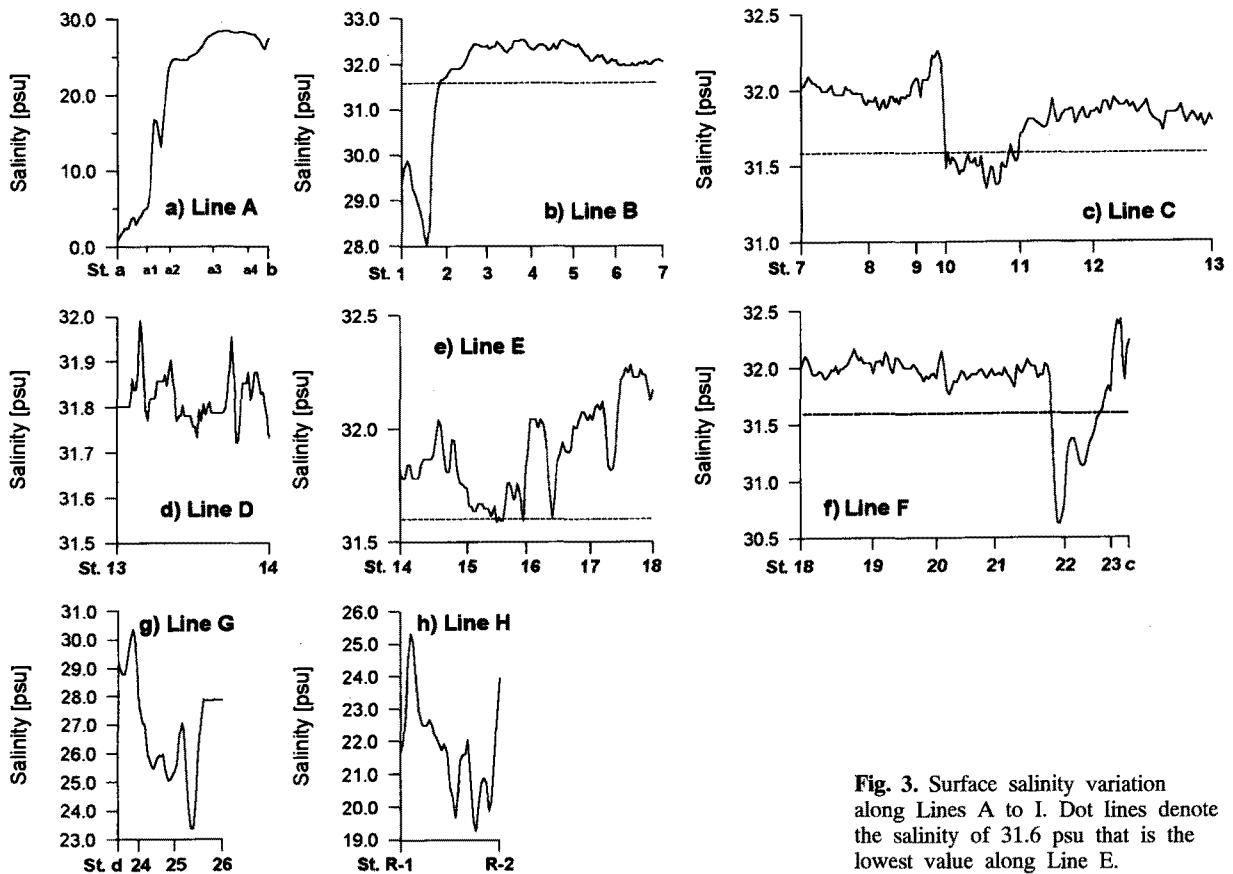


Fig. 3. Surface salinity variation along Lines A to I. Dot lines denote the salinity of 31.6 psu that is the lowest value along Line E.

Table 3. The minimum and maximum values of surface salinity along the ship track

Line	Salinity (psu)		Line	Salinity (psu)	
	Min.	Max.		Min.	Max.
A	0.72	28.41	E	31.59	32.28
B	28.02	32.54	F	30.61	32.42
C	31.35	32.26	G	23.36	30.35
D	31.72	31.99	H	19.28	25.32

30.0 psu 이하인 저염수가 표층에 분포했던 관측 결과가 제시된 바 있다(Choi and Lee, 1991). 이들 기존의 관측결과 및 본 관측 결과는, 금강하구에서 담수가 대량 방류되는 경우 담수 플룸의 범위가 적어도 어청도까지 이를 수 있음을 제시하고 있다. 본 연구해역의 조류의 주방향인 북동-남서 방향임을 고려할 때 조류에 의해 담수 플룸이 어청도 해역까지 직접 이루어질 수는 없으므로, 금강하구에서 서측으로 약 60 km 떨어진 해역까지 금강 담수 플룸의 분포를 가능케 한 다른 물리적 기작에 대한 고찰이 필요한 것으로 사료된다.

어청도 이북해역: 어청도 이북해역인 관측선 C와 F에서는 주위해수에 비해 급격하게 염분이 낮아지는 저염 해역(31.6 psu 이하의 해역)이 관측되었다. 이 저염해역은 금강하구 입구에 위치한 비응도에서 직선거리로 각각 100 km(정점 10과 11 사이), 70 km(정점 22와 23 사이) 떨어진 해역이며, 그 폭은 관측선 C의 경우 약 17 km, 관측선 F의 경우 약 11 km로서 비교적 넓게 분

포하고 있다. 관측선 C의 염분 단면(Fig. 4b)에서 보면, 항적자료에서 저염이 관측된 범위 내에 위치한 정점 10 주위에 상대적으로 저염의 해수가 표층에서 10 m 이상 깊이까지 분포하고 있고, 관측선 F와 G의 염분의 단면구조(Fig. 4c)에서도 정점 22에서 주위 해수에 비해 상대적으로 저염인 해수가 분포하고 있어 표층향적과 일치하는 결과를 보이고 있다. 저염해역의 수평적 규모 및 수직적 규모는 이와 같은 저염수가 다른 해역으로부터 이루어져 왔을 가능성을 시사하고 있다. 어청도 이북의 관측선 C와 F에서 관측된 상대적인 저염수는 이 저염해역 주위의 염분 분포로부터 그 기원을 추정할 수 있다. 연구해역의 염분분포에 영향을 미치는 대규모 담수의 유입원으로 북쪽에는 한강, 남쪽에는 금강이 위치하고 있다. 이외에도 동쪽으로 천수만과 같은 군소 하천 등이 있지만 이들 군소 하천의 담수 유출량은 규모가 한강이나 금강에 비해 매우 작으므로, 이 해역의 염분은 금강 및 한강에서 유출되는 담수의 영향을 크게 받을 것으로 예측된다. 만일 이 저염수가 연구해역의 북측에 위치한 한강 기원이라면 이 저염지역의 북측에서 이보다 낮은 염분이 관측되어야 한다. 하지만 관측선 C와 F에서 관측된 저염해역의 염분보다 낮은 염분은 저염해역의 북측에 위치한 관측선 D, E(Fig. 3) 상에서는 관측되지 않았다. 이와 같은 표층염분의 공간적인 분포로부터 관측선 C와 F에서 관측된 저염수의 기원은 관측해역의 남쪽에 위치한 금강에서 유출된 담수의 영향으로 해석된다.

Seung et al.(1990)은 본 연구해역이 위치한 서해 중부 연안역에서 금강하구인 체절전인 1989년 하계에 조사한 염분 자료를

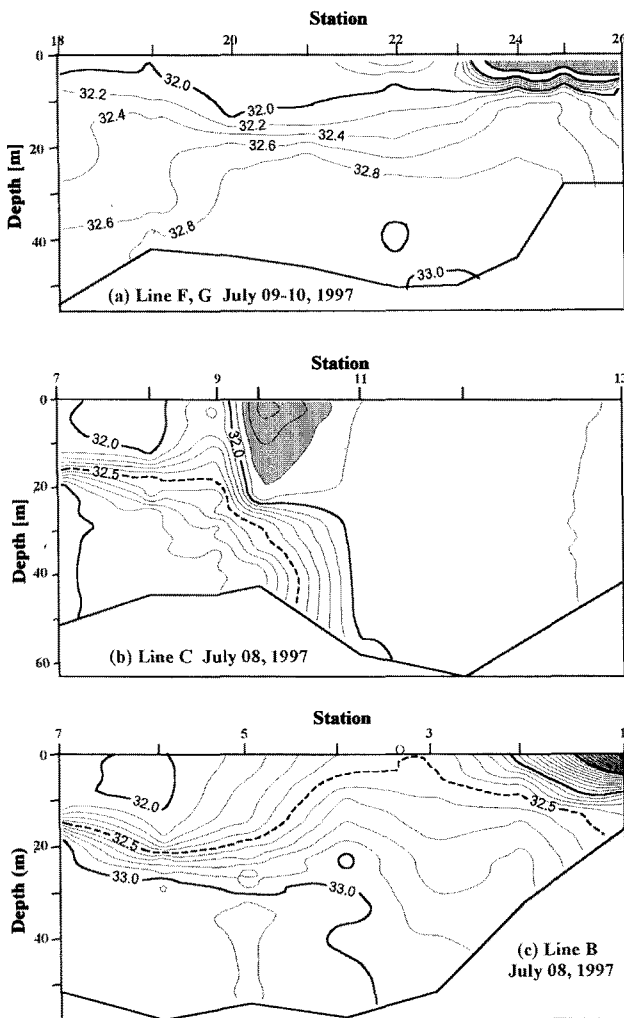


Fig. 4. Vertical sections of salinity along (a) Lines F and G, (b) Line C, and (c) Line B. Shaded zone represents the lowest salinity in each section with values of 24.0–30.0 psu, 31.5–31.8 psu, and 29.8–30.0 psu, respectively.

분석하여 금강에서 유출된 담수가 하구로부터 북쪽으로 약 50 km 떨어진 해역까지 영향을 미친다는 연구결과를 제시한 바 있다. 본 조사 결과와 Seung *et al.*(1990)의 결과는 관측시기 및 관측당시의 물리적인 환경이 다르기 때문에 정량적으로 비교할 수는 없지만, 두 결과 모두 금강에서 유출된 담수가 금강에서 북쪽으로 멀리 떨어진 해역까지 영향을 미침을 제시하고 있다. 하계에 금강하구에서 유출된 담수가 북쪽으로 확장될 가능성은 Choi(1993)와 Lee *et al.*(1995)에 의해서도 언급된 바 있지만, 이와 관련된 물리적 기작은 명확하게 설명되지 않고 있다. Seung *et al.*(1990)은 금강에서 유출된 담수가 북쪽으로 영향을 미칠 수 있는 가능성을 지닌 물리적 기작으로 금강 담수의 유출에 의해 생성된 연안포획류(coastal trapped wave)를 언급하였고, Lee *et al.*(1995)은 금강하구역의 지형적인 요인 및 서해 일반 순환계 등을 언급하기도 하였지만 아직까지 확인되지는 않고 있다.

염분전선의 이동

하구에서 형성된 플룸 내에 담수의 공급이 계속되면 주위 외

해수와와의 압력의 구배가 커져 이로 인해 플룸의 범위가 점점 확장되는데, 이 확장속도는 플룸과 외해수와의 밀도차 및 플룸의 두께 등에 따라 달라지며(Bowman and Iverson, 1977), 플룸 내에 Eulerian 유속계를 설치하여 관측할 수 있다.

어청도와 십이동파도 사이에서 48 시간 간격으로 2 회 관측된 표층염분자료는 금강담수 플룸으로 추정되는 염분이 30.0 psu 이하인 저염수의 범위가 크게 달라진 결과를 보인다. 즉, 1997년 7월 8일 오전에 십이동파도에서 어청도 사이에서 조사한 표층염분은 정점 1과 2 사이에서 30.0 psu 이하의 저염수가 고염의 외해수와 강한 염분전선을 형성하였지만(Fig. 3b), 이보다 48 시간 후인 7월 10일 오전에 어청도와 십이동파도 사이에서 조사한 관측선 G의 표층염분은 모두 30.0 psu 이하였다(Fig. 3g). 이 관측결과는 담수 플룸의 공간적 분포가 48 시간 동안에 크게 달라졌음을 의미하는 것으로 금강하구에서 유출된 담수에 의해 형성된 염분전선이 북서쪽으로 확장하였음을 제시하고 있다.

강 하구에서 형성되는 담수 플룸의 공간적인 분포는 조류나 항류 혹은 바람 등에 의한 이유 및 플룸과 주위 해수와와의 압력 구배에 의한 플룸의 확장 등의 상호작용의 결과로 해석할 수 있다. 하지만 조사기간의 풍속이 5 m/s 이하로 기상상태가 양호하였고 또한 이 해역의 조류의 주방향이 북동-남서 방향임을 고려할 때 표층 저염수가 북서쪽으로 확장된 물리적 원인은 조류나 바람 등에 의한 이유 효과보다는 주위 해수와와의 압력구배에 의한 플룸 자체의 수평적인 확장기작일 가능성이 크다. 만약 이와 같은 수평적인 확장기작이 일어날 경우 플룸 내의 수층은 수직적으로 유속이 달라지게 된다.

Fig. 6은 십이동파도 북측의 관측점 R-1에서 1997년 7월 10일에서 11일까지 표층하 4 m(상층 저염수 플룸 내에 위치)와 22 m(하층 고염수)에서 유속계를 이용하여 20 시간 동안 연속 관측한 염분과 조류의 시계열 및 산포도이다. 관측기간 동안 상층의 염분은 최저 24.83에서 최고 30.88 psu까지 변화가 심하였지만(평균염분 28.40 psu), 하층의 염분은 최저 32.50에서 최고 32.85 psu(평균염분 32.66 psu)까지 변화가 작아 상층과 하층의 염분차가 크게 나타났다. 같은 지점에서 1 시간 간격으로 관측한 CTD 자료(Fig. 5)는 30.0 psu의 등염분선 깊이가 표층하 4~10 m까지 변하고 있어 표층하 4 m 깊이에 위치한 상층 유속계에

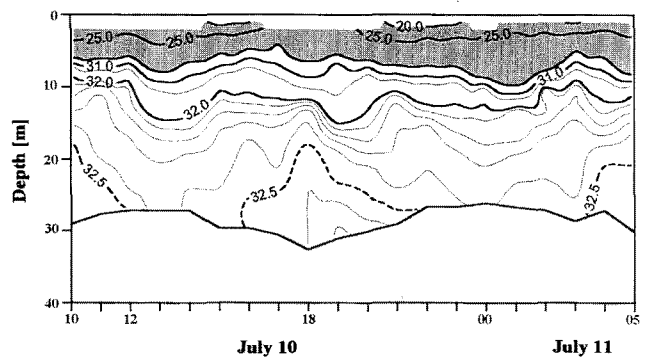


Fig. 5. Time-depth variation of salinity restructured from the 20 CTD profiles observed at Station R-1 with 1 hour interval. The diluted water of low salinity (shaded zone) existed over the saline water during the observation period. Shaded zone's isohalines are drawn with an interval of 5.0 psu from 20.0 to 30.0 psu.

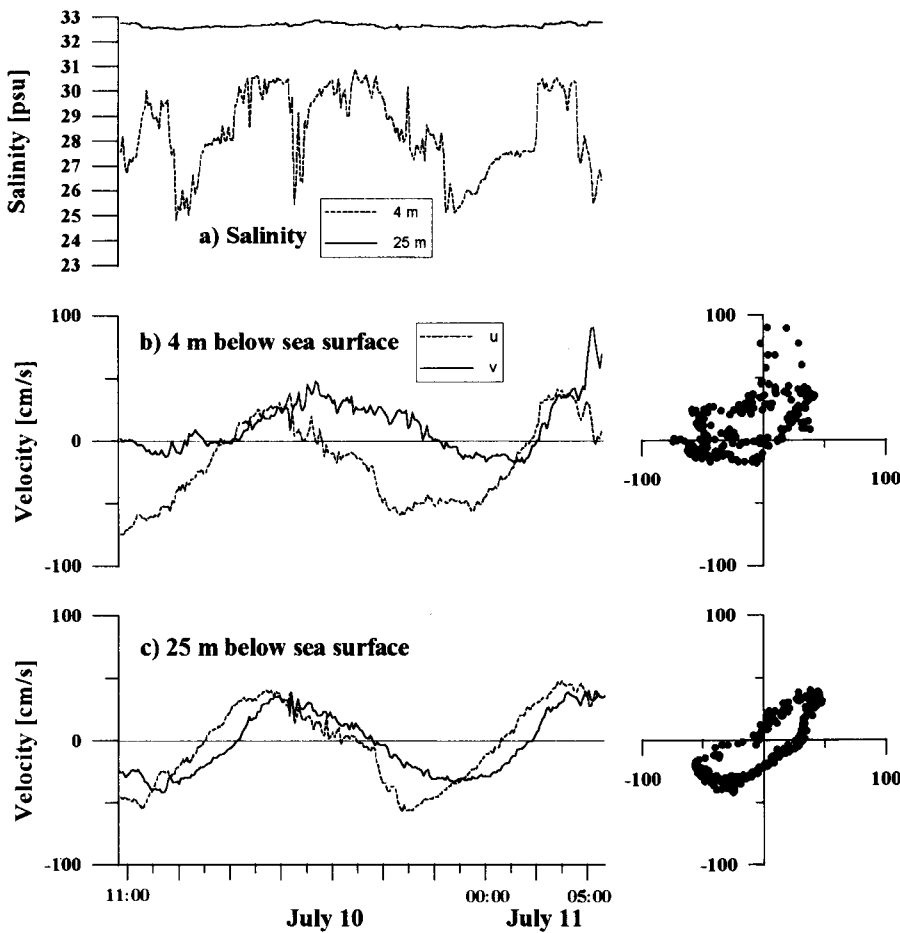


Fig. 6. Time series of salinity and current measured at Station R-1. u and v denote the eastward and northward velocities, respectively.

기록된 큰 염분 변화는 염분약층의 깊이 변화와 관련이 있는 것으로 사료된다. 각 층의 조류타원은 상층과 하층 모두 북동-남서방향으로 장축이 형성되었지만 상층의 경우에는 북서쪽 방향의 향류 성분이 관측되었다. Fig. 7은 1997년 7월 11일에서 12일 사이에 저조시 수심이 약 11 m인 개야도 남쪽의 관측점 R-2의 표층아래 4 m와 10 m에서 관측한 약 22 시간의 염분과 조류 시계열 자료 및 유속산포도이다. 관측점의 위치가 하구 입구임에도 불구하고, 각 층에서 관측한 염분의 시계열자료는 상층과 하층의 염분차이가 매우 커서 성층이 잘 되어 있다. 조류의 주 방향은 하층의 경우 북동-남서 방향으로 관측점 R-1의 조류방향과 일치하지만, 상층에서는 조류의 장축 방향에 수직인 서쪽에서의 흐름이 강하게 관측되었다.

관측점 R-1에서 고염수인 하층의 관측기간 동안의 평균유속은 2 m/s 이내로 작은 반면에 저염수인 상층에서는 조류타원 장축에 수직방향인 북서쪽으로 20 cm/s 이상의 강한 향류성분이 존재하는 것으로 분석되었다(Table 4). 따라서 저염수인 상층의 수립자는 이 유속에 의해 관측기간 동안 북서쪽으로 약 15 km 이동할 수 있으나 하층에 위치한 수립자는 남서쪽으로 약 2.5 km 이동할 것으로 분석되었다(Fig. 8a). 이와 같은 유속구조는 북동-남서방향의 조류가 지배적인 하층의 고염수 위에 부유하는 저염수가 북서쪽으로 이동하는 과정에서 관측된 것으로 해석할 수 있다. 담수 플룸 내에서 저층의 고염수와 상층의 저염

수 사이의 서로 다른 유속구조는 금강하구 입구에 가까운 관측점 R-2에서 더욱 뚜렷하게 나타난다. 관측점 R-2에서는 저염수인 상층의 경우 조석위상에 관계없이 서쪽방향의 향류성분이 지배적인 반면에 고염수인 하층에서는 남동방향의 향류성분이 강해 상층과 하층의 향류 방향이 서로 반대여서 상층의 수립자는 관측기간 동안 서쪽으로 약 25 km를 이동하는 반면에 하층의 수립자는 오히려 하구 쪽으로 약 8 km를 이동할 수 있는 것으로 분석되었다(Fig. 8b). 이와 같은 유속구조는 관측정점이 하구입구에 가까워 상층에서는 하구에서 유출되는 담수의 유출관성이 조류보다 강하게 나타나고, 하층에서는 조류가 지배적이지만 하구에서 상층을 통해 외해로 유출되는 질량을 보충하기 위해 하구 쪽으로 고염수가 유입되는 과정으로 해석된다.

관측점 R-1, R-2에서의 유속관측 결과는 금강에서 유출되는 담수에 의해 플룸이 형성되어 수직적으로 성층이 되는 경우 저층의 순환은 조류에 의해 지배되는 반면에 상층에서는 조류 외에 담수의 유출관성이나 주위해수와 압력구배와 같은 플룸 자체의 물리적 요인이 작용하고 있음을 의미한다. 따라서 상층 저염수 내에서 관측된 북서방향의 향류성분과 표층염분 관측자료에서 밝혀진 저염수 해역의 북서쪽 확장은 금강하구에서 형성된 담수 플룸이 외해역으로 확장되는 과정에서 일어나는 물리적인 현상일 가능성이 큰 것으로 해석된다.

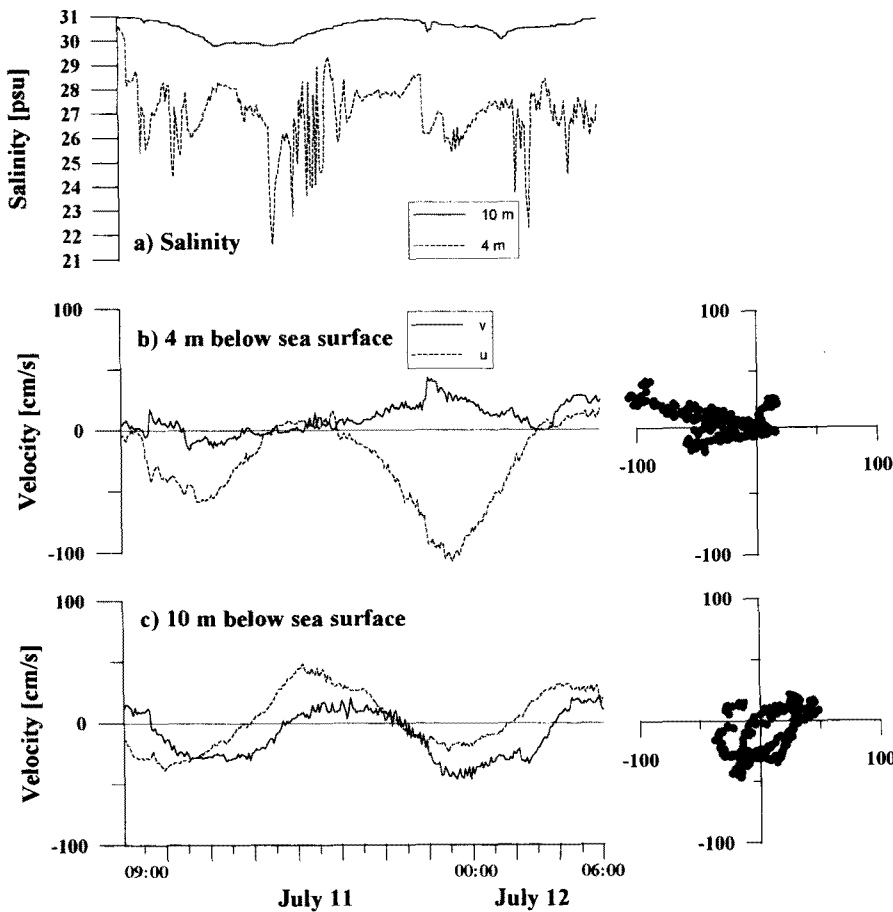


Fig. 7. Time series of salinity and current measured at Station R-2. u and v denote the eastward and northward velocities, respectively.

Table 4. The statistical values of currents observed at Stations R-1 and R-2

Station	Measured depth (m)	Duration (hr)	East (cm/s)		North (cm/s)	
			mean	s.d.	mean	s.d.
R-1	4	19	-17.5	32.4	12.3	21.1
	22	19	-1.5	31.7	-2.3	25.1
R-2	4	22	-28.3	33.0	9.2	12.1
	10	22	3.4	23.6	-10.1	19.3

요약 및 결론

금강하구언에서 다량의 담수가 방출되는 시기에 관측한 염분 및 조류를 분석한 결과는 다음과 같이 요약되며, Fig. 9에 금강의 영향을 받은 것으로 추정되는 저염 해역과 향류 성분을 도시하였다.

(1) 금강하구에서 어청도 사이의 해역은 표층염분이 30.0 psu 이하로 금강하구에서 유출되는 담수의 영향을 강하게 받는 해

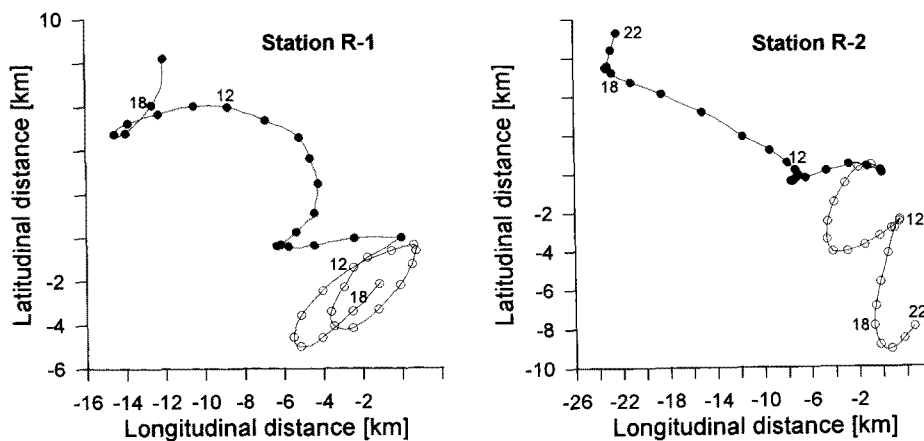


Fig. 8. Progressive vector diagrams at Stations R-1 and R-2. Solid and open circles denote the particle's displacement in the surface and bottom layers, respectively. Numbers by the circles mean the elapsed time in hour from the initial observation.

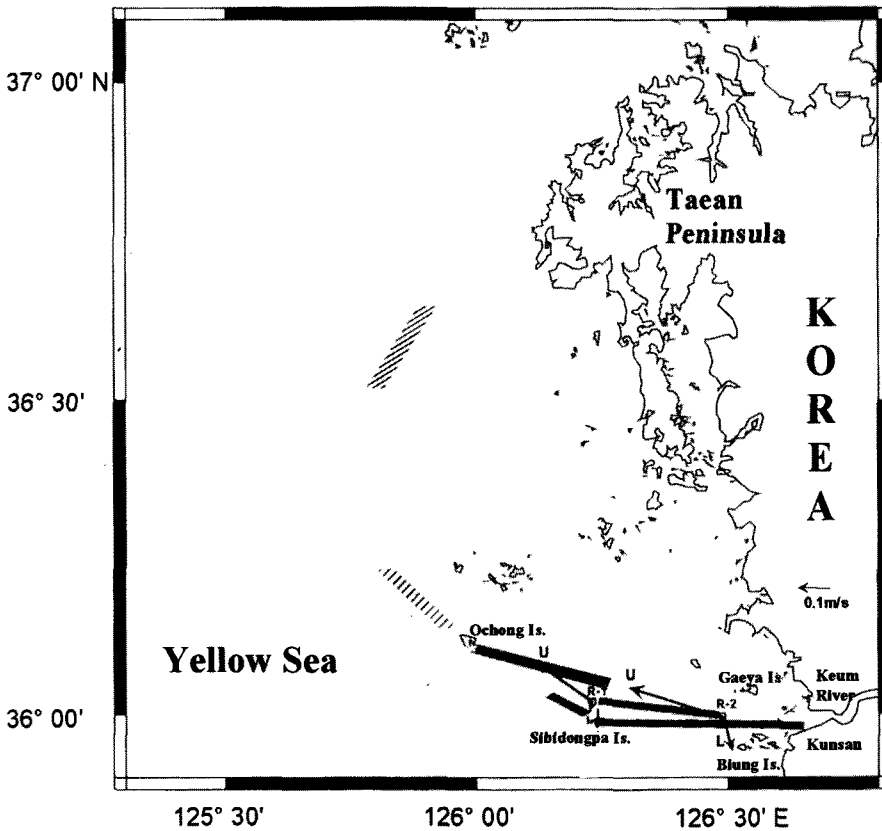


Fig. 9. The observed low-salinity areas influenced by freshwater discharge from the Keum River; the salinities of shaded areas are less than 30.0 psu, and the salinities of gridded areas are less than 30.6 psu. The mean current vectors measured at Stations R-1 and R-2 are indicated by arrows; U and L denote the upper and lower layers, respectively.

역으로 해석된다. 또한 어청도와 격렬비열도 사이, 그리고 어청도와 태안반도 사이에서 관측된 저염수 역시 금강 기원으로 해석되어, 금강에서 유출된 담수는 관측기간중 적어도 북서쪽으로 약 100 km 정도까지 그 영향을 미치고 있는 것으로 분석되었다.

(2) 어청도와 십이동파도를 잇는 해역에서 48 시간에 걸쳐 2회 관측한 염분자료는 금강 담수 플룸의 일부로 해석되는 염분 30.0 psu 이하인 저염수의 분포해역이 십이동파도에서 어청도까지 빠르게 확장된 결과를 보였다.

(3) 십이동파도 북측 해역에서 유속계 및 CTD를 이용하여 20시간 연속 관측한 조류 및 염분 자료 분석결과 이 해역은 5~6 m 두께의 저염수가 고염의 외해수 위에 부유하는 형태의 염분 성층구조를 보였으며 이 성층은 관측기간 동안 계속되었다. 또한 향류성분이 거의 없는 하층의 고염수와는 달리 상층 저염수 내에서는 조류타원의 장축방향에 수직인 북서방향으로 20 cm/s 이상의 향류성분이 관측되었다. 이와 같은 향류성분은 저염수해역의 북서방향 확장을 뒷받침하는 근거이다.

본 연구에서 금강 담수의 수평적인 분포 범위 및 금강하구에서 유출된 담수가 금강하구를 포함한 서해 중부 연안역의 해수 순환에 직접적인 영향을 미칠 수 있는 증거를 제시하였지만 관측된 자료가 시공간적으로 한정된 자료이기 때문에 금강하구에서 유출된 담수가 연안역의 물리적인 환경에 미치는 영향을 정량화할 수는 없었다. 하지만 금강에서 배출되는 담수의 총량이 같더라도 하구언 가동 이후에는 방출형태의 차이로 인해 단위 시간당 담수유입량이 크게 증가하게 되므로, 조류 및 바람 등에

의한 수직혼합이 억제되어 수층 내의 수직적인 밀도차가 증가하게 된다. 이로 인해 하계에 금강하구언에서 일시적으로 대량 방출된 담수는 하구언 가동 이전에 비해 플룸의 형성 및 확장 과정이 달라질 것으로 예상된다. 본 연구 결과는 금강하구 및 십이동파도를 포함한 서해 중동부 연안역의 해양환경이 금강 방류 유무에 따라 영향을 크게 받을 가능성을 제시하고 있어, 보다 체계적이고 광범위한 조사를 통한 정량화 작업이 필요하므로 사료된다.

사 사

이 연구는 1996년도 한국학술진흥재단의 대학부설연구소 연구비 지원에 의하여 수행되었습니다. 현장관측을 도와주신 군산대학교 실습선 제 1 해림호 선원 및 선장님께 감사드리며 본 논문이 개선될 수 있게 해주신 심사위원 두 분께 감사드립니다. 또한 현장조사를 도와준 군산대학교 권효근 군과 김창희 군에게도 고마움을 표합니다.

참고문헌

- Bowman, M.J. and R.L. Iverson, 1977. Estuarine and plume fronts. In: *Oceanic Fronts and Coastal Processes*, edited by Bowman, M.J. and W.E. Esaias, Springer-Verlag, Berlin, pp. 87-104.
- Choi, J.Y., 1993. Seasonal variations of suspended matters in the

- Keum estuary and its adjacent coastal area. *J. Oceanol. Soc. Korea*, **28**: 272-280.
- Choi, J.Y. and S.H. Lee, 1991. Suspended particulate matters on the West Sea of Korea: the distribution and the variations during the summer and winter seasons. *Mar. Dev. Res. (Kunsan Nat'l Univ.)*, **3**: 135-150.
- Fedorov, K.N., 1983. The Physical Nature and Structure of Oceanic Fronts. Lecture Notes on Coastal and Estuarine Studies, Vol. 19, Springer-Verlag, Berlin, 333 pp.
- Garvine, R.W., 1974. Physical features of the Connecticut River outflow during high discharge. *J. Geophys. Res.*, **79**: 831-846.
- Garvine, R.W., 1984. Radial spreading of buoyant, surface plumes in coastal waters. *J. Geophys. Res.*, **89**: 1989-1996.
- Lee, W.H., S.H. Lee and J.H. Chang, 1990. The oceanographic studies in the vicinity of Gogunsan-Gundo; 1. Seawater properties, surface sediments and phytoplankton community. *Mar. Dev. Res. (Kunsan Nat'l Univ.)*, **2**: 61-81.
- Lee, S.H., H.Y. Choi and I.S. Oh, 1995. Structure and variation of the Keum River plume in summer. *J. Oceanol. Soc. Korea*, **30**: 125-137.
- O'Donnell, J., 1990. The formation and fate of a river plume: A numerical model. *J. Phys. Oceanogr.*, **20**: 551-569.
- O'Donnell, J. and R.W. Garvine, 1983. A time dependent two-layer frontal model of buoyant plume dynamics. *Tellus*, **35A**: 73-80.
- 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. Oceanol. Soc. Korea*, **25**: 84-95.
- Schubel, J.R., H.T. Shen and M.J. Park, 1986. Comparative analysis of estuaries bordering the Yellow Sea. In: *Estuarine Variability*, edited by Wolfe, D.A., Academic Press, New York, pp. 43-62.

1998년 6월 17일 원고 접수

1998년 7월 27일 수정본 채택