The Journal of the Korean Society of Oceanography
Vol. 30, No. 2, pp. 125-137, April 1995

하계 금강 Plume의 구조와 변동

이상호†, 최현용†, 오임상*
†군산대학교 해양학과, *서울대학교 해양학과

Structure and Variation of the Keum River Plume in Summer

SANG HO LEE†, HYUN YONG CHOI†, IM SANG OH*
†*Department of Oceanography, Kunsan National University, Kunsan, 573-701*
**Department of Oceanography, Seoul National University, Seoul, 151-742*

금강하구 외해에서 1991년과 1992년 8월에 관측된 CTD, 광투과도 및 조류자료를 분석하여 담수 plume의 수평이동과 조류에 따른 수직구조의 변화를 파악하였다. 집중호우로 발달된 초기 plume은 하구 서쪽 고군산군도와 연도사이 해역에서 표층에 저염의 렌즈구조를 이룬다. 북동-남서 방향으로 왕복하는 조류에 의해 plume의 축이 이동되며 축의 이동거리는 약 7 km에 달한다. 낙조시의 plume은 3 m 정도의 두께로 저염의 축에 대해 대칭적 구조를 보이나, 창조시에는 plume의 북쪽에 강한 염분전선이 형성되며 전선역에서의 plume 두께는 6 m 까지로 깊어지고 비대칭적 구조를 보인다. 염분전선이 창조류에 의해 북쪽으로 이동되어 하구 북쪽의 해수가 전층에 걸쳐 남쪽보다 고온, 저염화되는 것으로 추측된다. 20일 이상 장기간에 걸쳐 다량의 담수가 유출되었을 때는 plume이 십이동파도까지 렌즈 구조를 유지하며 확장하고 북쪽으로 편향된다.

CTD, light transmission and tidal current data obtained off the Keum estuary in August, 1991 and 1992 were analyzed to look into the plume movement and the vertical structure of the plume changing with tidal currents. When the river plume was developed by a localized torrential downpour, the initial plume showed a surface lens of low salinity in the section south of the Yeon-Do. The axis of surface lens moved with tidal currents which flows mainly northeastward and southwestward in the study area and the excursion of the lens axis reached 7 km. The plume during the ebb period showed a symmetric lens structure of low salinity which extends vertically to 3 m below the surface. During the flood period the plume deepened to 6 m below the surface in its northern side forming a sharp salinity front, which results in an asymmetric lens. We suggest that the salinity front with deepened plume moved to the north repeatedly, resulting in temperature increase and salinity decrease in the northern region off the estuary. When the river discharged continuously the large volume over 20 days, the plume forming surface lens extended to the Sybidongpa-Do and deflected to the north.

서 론

금강하구 인근해역은 비교적 해안선이 단조로우며 해저 지형이 서쪽으로 완만하게 깊어지고 남쪽의 고군산군도 해역을 제외하면 단순한 지형구조를 보이나 큰 조차로 인하여 간사지가 크게 노출되는 지역이다. 최근에 (1994년 9월) 금강 하구언의 수문을 내려 하구역과 금강 상류가 완전 차단되는

*본 연구는 학술진흥재단의 지방대 육성 연구지원에 의해 시작되었으며 새만금 사업단의 지원으로 관측이 일부 가능하였고, 교육부 학술연구조성비(BSRI-94-5409)의 일부지원으로 수행되었다.

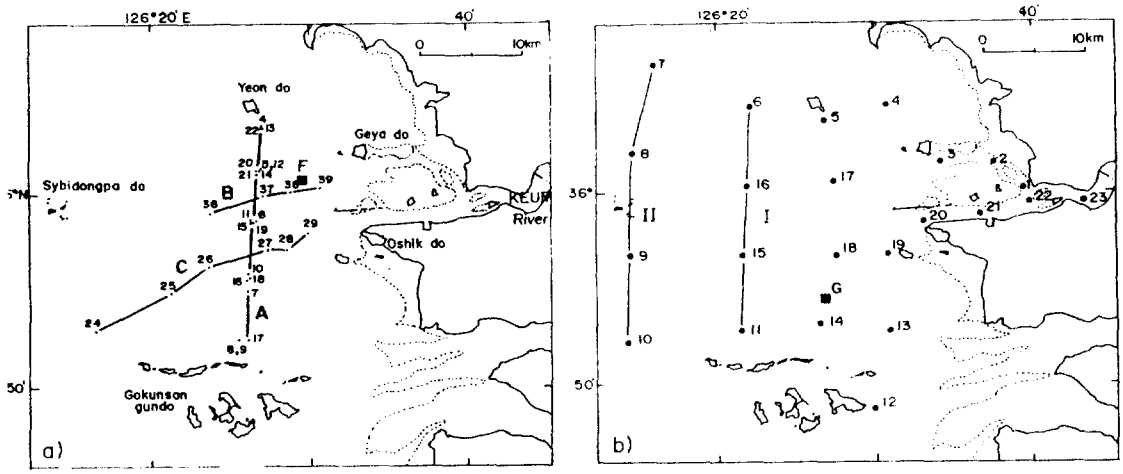

Fig. 1. Locations of CTD stations in August 1992 (a) and 1991 (b). A, B, C and I, II indicate the vertical sections. Observation of section A is repeated four times (see Fig. 6). Current measurement and vertical profiling of CTD were conducted in station F (closed square) in August 1992 (a) and a current was observed at station G (closed square) in November 1992 (b). Dotted line indicates the drying bank.

인위적 환경변화로 인하여 하구의 순환과 인근해역에 미치던 금강 담수의 영향이 사라졌다. 이러한 인위적 환경변화로 인하여 금강상류로 전파되던 조석이 차단되고, 특히 하계 집중호우시에는 불규칙적 담수 방류가 불가피하게 되어 하구 인근해역의 순환이 필연적으로 바뀌게 될 것이다. 본 연구에서는 하구언 수문이 차단되기 전 담수가 유출되던 하계에 금강하구 외해측에서 조사된 자료를 정리하여 인위적 변화요인이 가해지기 이전의 해양환경의 일부를 발표해 둠으로서 앞으로 조사 관측되는 물리해양학적 연구에 도움이 되고자 한다.

하구를 포함하고 있는 연안역의 물리적 환경은 조석운동과 담수유출 등 변화요인이 많은 복합적 환경이다. 금강 하구역은 해수순환에 미치는 조석운동의 영향이 상대적으로 큰 지역이고 (정 등, 1983) 두개의 수로를 통하여 외해와 연결되는데, 하구로 유출입되는 조량은 $270\times10^6\ m^3\sim290\times10^6\ m^3$ 정도로서 남쪽 주수로 (오식도 수로)가 70%, 북쪽 부수로 (개야수로)가 약 20%를 차지한다 (군산항 건설사무소, 1993). 남수로와 북수로 사이에는 유부도를 포함하는 대죽사주의 넓은 간사지가 발달되어 있으며 북수로 북측에는 동서방향의 간사지가 육지에서부터 개야도까지 발달되어 해수의 유통을 제한하고 있다 (Fig. 1 참조). 하구 외측의 조류는 반일주조 특성이 강하며, 수로국 (1989)이 발행한 조류도에 의하면 고군산군도와 연도 사이에서 조류타원이 북동-남서 방향의 장축을 보이고 최강유속은 1.5 knots~2.0 knots 정도이다. 금강 하구로부터 유출되는 담수는 동계에는 적고 하계에 크게 증가하여, 7월부터 9월까지의 유출량이 년간 유출량의 58%에 달한다 (나, 1993; 김과 기, 1987). 년 평균 담수 유출량은 156 m^3/s (Schubel *et al.*, 1984) 정도이나 하계의 강수량의 차이에 따라 년별 유출량이 변화된다 (나, 1993).

금강 담수 유출량의 계절변동은 하구의 순환형태를 변경할 뿐만 아니라 부유사의 퇴적과 이동에 영향을 미쳐 연안의 지질환경에 중요한 역할을 한다. 금강 하구외측의 해역에 대한 연구는 주로 부유사 이동과 저염수 이동에 대해 단편적으로 발표되었다. Chough (1981)와 Chough and Kim (1984)은 하계에 금강 담수가 북쪽으로 이동하여 이에 따른 퇴적물 운반이 일어날 것으로 제안한 바 있으며, Ahn (1989)은 인공위성 원격탐사 자료에서 금강 퇴적물의 이동을 Chough (1981)의 제안에 따라 해석한 바 있다. 최근에 최 (1993)는 기존의 결과와는 달리 금강 퇴적물이 하계에 담수이동에 의해 인근해역으로 이동되는 양보다 동계에 풍랑에 의해 재부유된 퇴적물이 더 활발히 남쪽으로 이동된다고 주장하였다. 한편, 금강 담수의 이동에 대한 물리 해양학적 조사는

Table 1. Obsrvations in August 1991 and 1992

Date	Contents	Discharge(m^3/s)*	Moon's age(day)
Aug. 6-7, 1991	CTD	370	25.3-26.3
Aug. 1, 1992	CTD, L.T. Current at F	74	2.3
Aug. 27-29, 1992	CTD, L.T.	880, 1433, 464	28.3- 1.0
Nov. 12-13, 1992	Current at G		17.3-18.3

*Discharge is calculated from water level at Gongju.

이 등 (1990)이 금강하구를 포함하는 남쪽 해역에서 담수의 영향범위를 단편적으로 추정하였고, Seung *et al.* (1990)은 하구 북쪽 연안역에서 관측된 저염수 (30‰ 이하)를 금강 담수의 영향으로 해석하였다. 최와 이 (1991)는 어청도와 연도 주변에서 8월에 관측된 표층 저염수를 금강 담수 유입으로 해석하였다. 이 (1992)와 최 (1993)는 정기여객선을 이용하여 연안 표층염분의 계절변화를 항로별로 관측하여 하계에 염분 27‰ 미만의 기수는 하구의 남쪽보다 북쪽으로 더 멀리 확장하고 있음을 보여주었다. 이러한 연구들은 연안 저염수의 영향 범위와 기원에 대한 해석에 촛점을 두고 있지만, 최근에 이 (1994)는 하구 외해역에서 하구로부터 유출되는 저염수 구조를 조사하여 plume의 형성을 보고하였다.

강의 유출수가 하구 외해역에서 저염의 표층 plume을 형성하며 주변수와 전선을 이루고, plume과 전선의 수평적 위치가 담수유출량과 조류에 의해 크게 변동하는 현상이 비교적 자세히 관측된 경우는 미국 동부의 Connecticut River plume이다 (Garvine, 1974, 1975, 1977). 금강과 비교하면, Connecticut 강의 담수유출량은 년 평균 약 560 m^3/s 정도이고 우기인 4월말과 5월초에는 2,000 m^3/s 이상의 담수유출이 10일이상 지속되어 (Garvine, 1974) 금강보다 유출량이 많다. 담수 plume의 주기적 이동을 지배하는 조류의 경우는 Connecticut 강 외해역에서 주로 해안선에 평행한 방향으로 흐르는데 비하여 금강하구 외해역에서는 주로 북동-남서 방향으로 흘러 해안선에 평행하지 않은 차이점이 있다.

금강의 경우는 하계 집중호우시에 대량의 담수가 유출되므로 이 시기에 금강 외해역에서 plume의 형성을 기대할 수 있어 조류와 plume의 구조를 조사하였다. 본 연구에서는 금강하구 외측에서 관측된 조류와 수온, 염분자료들을 종합 분석하여 표층 저염수 plume의 조석위상에 따른 변동과 구조변화를 밝히고 하계에 담수 유출량이 증가한 시기에 외해에서 관측된 수온, 염분, 광투과도의 단면구조를 파악하여, 저염수가 인근해역으로 이동하는 경로와 과정을 논의하고자 한다.

자 료

금강하구 외해의 오식도, 연도, 십이동파도 및 고군산군도를 잇는 해역은 담수가 인근해역으로 퍼져 나가면서 형성하는 plume의 구조와 변동을 파악하는데 중요한 열쇠가 되는 해역으로 본 연구에서 조사된 내용은 Table 1과 같다. 1991년 8월 6일~7일에 저염수의 종관적 분포와 외해쪽 십이동파도 부근의 단면구조를 파악하였다 (Fig. 1b). 1992년 8월 1일에 정점 F에서 (Fig. 1a) 해수 수직구조를 30분 간격으로 조사하였으며, 8월 27일~29일에는 연도와 고군산군도 사이 A 단면을 수차례 왕복하면서 수온과 염분 및 광투과도의 단면구조를 관측하였다. 특히, 8월 29일에는 plume의 확장구조를 파악하기 위하여 북동-남서 방향의 B, C 단면에서도 물성을 관측하였다 (Fig. 1a). 연구해역의 조류는 하계와 동계에 2개 지점에서 (Fig. 1, F, G 정점) 조사되었다.

각 관측점의 위치는 GPS를 이용하여 측정하였다. 수온과 염분관측에 사용된 CTD는 SBE19 (Seabird) 이고 광투과도 측정기 (Light Transmitter)를 부착하여 해수중의 상대적 탁도를 측정하였으며, 측정된 수온, 염분, 광투과도 자료는 0.5 m 간격의 깊이별로 정리하여 사용하였다. 조류는 RCM-7 Current Meter를 사용하여 해면아래 5 m 깊이의 유향과 유속을 매 10분 간격으로 관측하였으며, 각 관측시기의 조석위상은 군산외항의 예보조석 (수로국, 1991, 1992)을 기준으로 하였다.

관측이 시행되었던 시기 전후의 담수유출량 변화는 금강상류의 공주에서 관측된 수위자료로부터 계

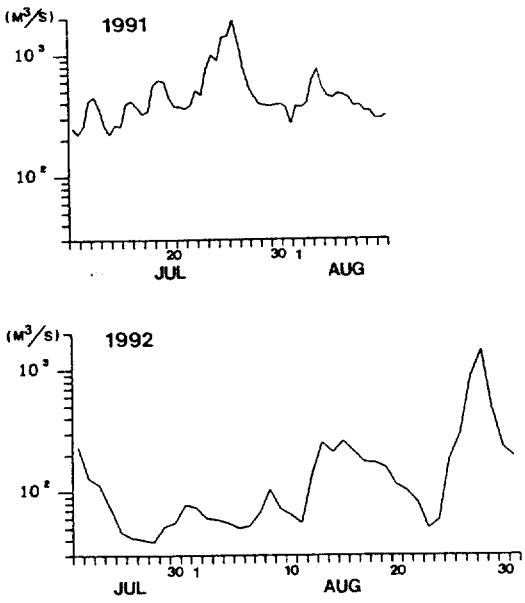

Fig. 2. Keum River discharge (m^3/s) calculated from water level at Gongju in Summer 1991 and 1992.

산되었으며 (Fig. 2) 1991년과 1992년의 유출량 Q 계산에 사용된 식은 각각 $Q=196.8969(H-0.93)^{1.65}$, $Q=156.7506(H-0.58)^{1.7507}$로서 H=h+1이고 h는 관측수위(m) 이다 (한국수자원공사, 1993). 나 (1993)에 의하면 하계 담수 유출량은 1991년에 비교적 많았고 1992년에는 매우 적었던 해이다. 1991년에는 담수 plume 관측이 이루어지기 전의 유출량이 평균적으로 450 m^3/s 정도로서 년 평균치보다 많은 양의 담수가 지속적으로 유출되었고 plume 관측 3일 전인 8월 3일에는 800 m^3/s 정도의 유출량이 기록되었다. 1992년 8월 1일에 정점관측을 했던 시기에는 담수 유출량이 74 m^3/s 정도로 매우 적었으나 8월 28일에 A 단면을 왕복 관측한 시기에는 집중호우로 인하여 유출량이 일시적으로 급격히 증가하여 최대 1,400 m^3/s까지 달하였었다.

1. 정점관측

1.1 조류

금강하구 외측인 관측점 F와 G에서 대조기에 관측된 조류의 시간변화를 20분 간격으로 도시한 결과는 Fig. 3과 같다. F 지점의 관측시기는 8월 1일로서 월령 2일경 이며 G 지점의 관측시기는 동계인

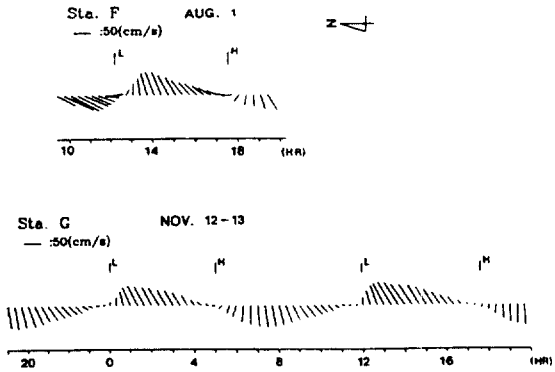

Fig. 3. Time variation of current vectors observed at station F and G. H and L indicate the high and low water in Kunsan outport tide station.

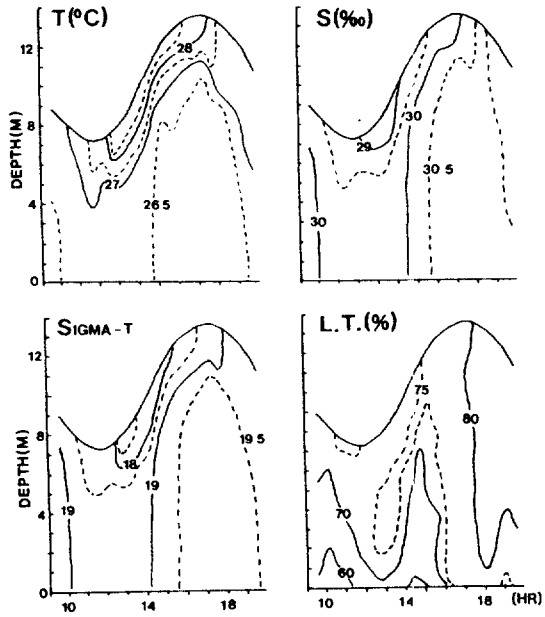

Fig. 4. Time variations of the temperature, salinity, density and light transmission profiles at station F.

11월 12일~13일으로서 월령 17일경이다. 두 지점에서 조류의 시간변화는 유사한 특성을 보이는데, 최대 유속은 약 80 cm/s~90 cm/s에 달하고 유속이 작아지는 때가 군산외항 조위의 저조와 고조시에 발생하여 연구해역의 조석은 정상파의 특성을 보였다.

정점 F에서 관측된 낙조류는 남서방향으로 흐르며 시간이 경과되면서 반시계방향으로 유향이 전류되

고, 창조류 초기에는 동쪽으로 흐르나 최강 창조류는 북동방향이다. 창조류는 다시 반시계방향으로 유향이 바뀌는 특징을 보이며 낙조류 초기에는 북서쪽으로 흐른다. 하구입구에 가까운 관측점 F에서는 유속이 낙조류에서 강하게 나타나며 외해쪽인 관측점 G에서는 유속이 창조류 때 강하다. 또한 낙조류 초기에 관측점 G에서 서쪽으로 향하는 조류는 관측점 F에서보다 오래 지속되며 강하고, 낙조류 중기 이후에 남서쪽으로 향하는 조류는 관측점 F에서 더 강하여 두 지점에서의 낙조류 방향이 차이가 있다.

1.2 수직구조

하계 담수유출량이 매우 적었던 시기에 F지점에서 조류와 동시에 관측된 해수 수직구조의 시간에 따른 변화는 Fig. 4와 같다. 수온이 27℃ 이상이고 염분이 29.5‰ 미만인 고온 저염수가 저조전 1.5시에 나타나기 시작하여 밀도의 수직성층이 표층역에 형성되며, 고조전 1.5시까지 저염수가 나타나는 특징을 보인다. 조사지점에서 최저 염분 (29‰ 이하)이 표층에 나타나는 시기는 저조후 1시~3시 사이로서 조류가 동쪽과 북동쪽으로 향하는 전류시 이후이다. 조류가 창조류로 완전 전류되어 유향이 북동쪽으로 향하면 염분 29.5‰ 이하의 표층수는 두께가 줄어들고, 유속이 증가하면서 표층수가 점차 고염화되어 고조후 1시경에는 표층염분이 최대가 되고 수온은 1℃ 이상 낮아진다. 이 저염수의 출현에 따라 표층역의 밀도 성층의 강도가 변화하는데 저조후 1시부터 고조전 1시 사이에 성층이 강하게 나타난다. 이상의 수직구조 변화는 하구입구 부근의 관측점에서 표층의 저염수가 낙조 후기에 나타나기 시작하여 전류시인 저조후 1시에 최저염분이 되고 창조 동안에 서서히 사라지는 현상으로 파악된다. 한편 수층내의 광투과도는 저층에서 상층으로 향하여 증가하는 경향을 보이나, 유속이 약한 저조와 고조 후 약 1시경에 저층에서 상대적으로 높은 광투과도 (70%)가 나타나며 유속이 강한 시기에 저층에서 낮은 광투과도 (60% 미만)가 나타나는 특징을 보인다.

2. 단면구조

2.1 1992년 8월

집중호우로 인하여 금강에서 일시적으로 담수가 대량 유출될 때 담수 plume이 인근 연안역에서 어떠한 구조와 변동을 보이는지 조사하기 위하여 담수

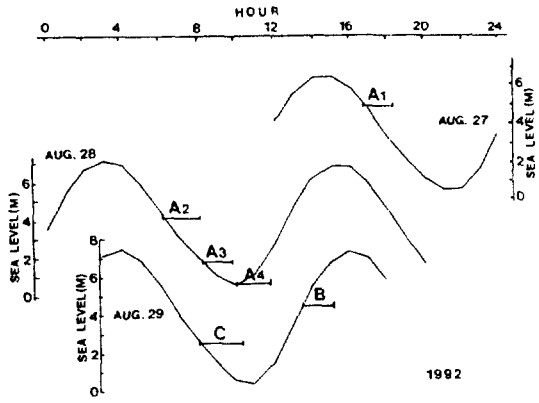

Fig. 5. Predicted sea level at Kunsan outport tide station and observation time of the sections A, B and C in August 1992.

유출방향에 수직인 남북방향으로 단면 A를 반복하여 조사하였다 (Fig. 1a 참조). 각 단면을 조사할 때인 1992년 8월 27일과 28일의 군산외항 조위는 Fig. 5와 같으며 월령이 28일~0일로서 대조기이다. A1 단면을 관측한 시기가 A2 단면 관측시기와 약 12시간 정도의 차이는 있으나 반일주조 조석의 주기성을 고려하면 단면관측은 고조후 약 2시부터 저조후 약 2시 사이에 왕복 관측된 것으로 다루어질 수 있다. 8월 29일에는 낙조시에 조류타원의 장축방향(수로국, 1989)으로 단면 C를 관측하였고, 창조시인 고조전 2시경에 단면 B를 관측하였다.

2.1.1. 단면 A

조석위상에 따라 반복 관측된 수온, 염분, 밀도 및 광투과도 단면구조의 변화는 Fig. 6과 같다. 단면에서 가장 특징적 현상은 저염의 plume이 형성되며 렌즈구조를 보이는 점이다. A1 단면에서는 표층 렌즈구조는 형성되었으나 염분이 29.5‰ 이상으로서 12시간 후에 관측된 단면들의 plume에 비해 상대적으로 고염이다. A2 단면에서부터 저염의 렌즈구조가 확연히 나타나기 시작하고 시간이 지남에 따라 plume 핵이 저염화되며 렌즈구조가 발달하여 A4 단면에서는 최저 염분이 22.0‰ 이하이다. 이러한 plume 핵의 시간에 따른 발달과정은 다음과 같이 추론할 수 있다. 즉, A1 단면이 관측되었던 8월 27일에는 금강의 유출량이 최대에 달하기 전이며 (Fig. 5 참조) 공주에서 금강하구까지 홍수 도달 시간이 약 7시간 정도이므로 plume이 미처 발달하지 않아

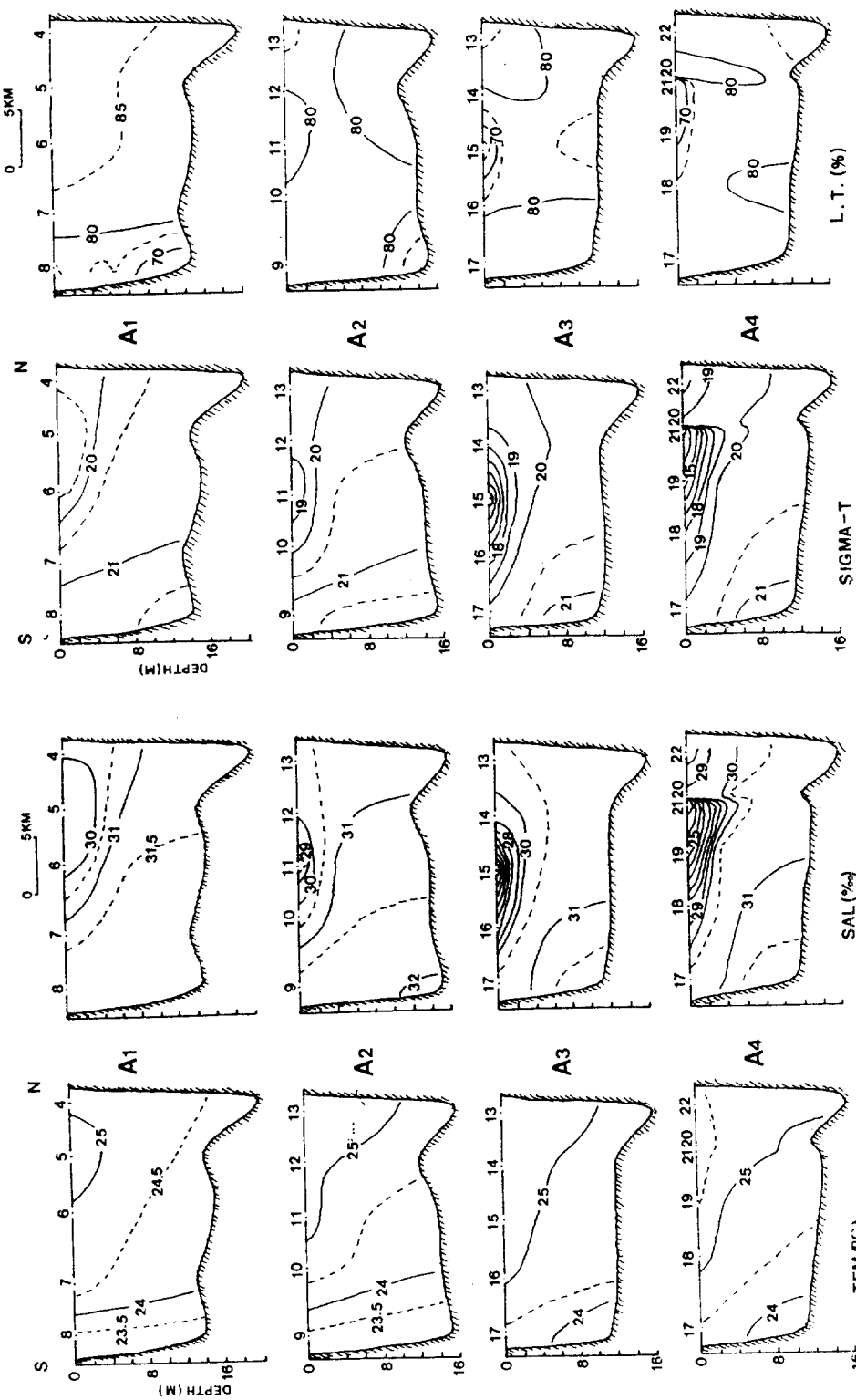

Fig. 6a. Vertical structure of temperature, salinity, density and light transmission observed repeatedly along the section A. Observation begun from A1 and ended at A4. Stations of the section are shown in Fig. 1a and tidal phases for each section are shown in Fig. 5.

단면에까지 도달하지 못하고, A2 단면이 관측될 때 담수유출량의 증가 효과가 비로소 나타나기 시작한 것으로 추측된다. 이 저염의 plume은 주변해수와 확연히 구분되며 해수의 밀도를 결정하는 가장 큰 요소로 작용하여 밀도단면의 구조와 염분단면의 구조가 매우 유사하다. Plume의 광투과도는 표층에서 70% 미만의 낮은 투과도를 보여 주변해수에 비해 혼탁한 해수이다. 렌즈구조의 plume이 발달한 A3 단면에서 염분 29‰ (σ_t=19)를 기준으로 보면 plume의 두께는 2.5 m, 폭은 10 km 정도로서 두께와 폭의 비율은 2.5×10^{-4} 정도로 Connecticut River plume의 경우 (Garvine, 1977)와 비슷하다.

두번째 특징으로는 단면에 나타나는 표층 plume 축의 위치가 시간에 따라 변화하는 현상이다. 고조후 2시 경인 A1 단면에서는 plume 축이 단면의 북쪽인 관측점 5 부근에 위치하나 낙조류가 발달되는 시기에 관측된 단면 A2, A3에서는 plume의 축이 각각 관측점 11, 15에 나타나 남쪽으로 이동되었으며, 저조후 약 2시경인 단면 A4에서는 다시 북쪽으로 이동되어 관측점 21에서 관측되었다. 관측점 간격이 약 5 km 정도여서 plume 축의 위치를 정확히 알수는 없으나 관측기간이 1 조석주기 미만임을 고려하면 조류에 의해 이동되는 plume 축의 변동범위는 남북방향으로 약 7 km 정도에 달하게 될 것으로 추측된다. 또한 표층 plume 아래로 31‰ 등염분선이 단면에 따라 나타나는 위치가 변하고 있다. 이러한 조석위상에 따른 단면구조의 변화에서 plume 뿐만 아니라 주변해수도 조석 위상에 따라 이동되고 있음을 알 수 있다.

세번째 특징은 plume의 이동과 아울러 plume의 렌즈구조가 변화되면서 강한 염분전선이 발달한다는 점이다. 낙조류가 남서쪽으로 향하는 시기인 A2, A3 단면에서는 최저 염분이 관측된 정점을 기준으로 비교적 좌우 대칭인 구조를 보이나, 창조류가 시작된 시기인 A4 단면에서는 관측점 21과 20 사이에 6‰ 이상의 염분차이를 보이며 매우 강한 전선을 형성하고 최저염분이 나타나는 관측점에 대해 비대칭적인 구조를 보인다. 전선역에서 경계밀도선 (σ_t=19)의 기울기는 10^{-2} 정도이다. 단면 A4에서 형성된 강한 염분전선은 현장에서 육안으로 구별될 수 있을 정도로 해수표면 상태가 차이나고 표층 부유물이 띠를 이루고 있었으며, 특히 해수의 색으로 plume과

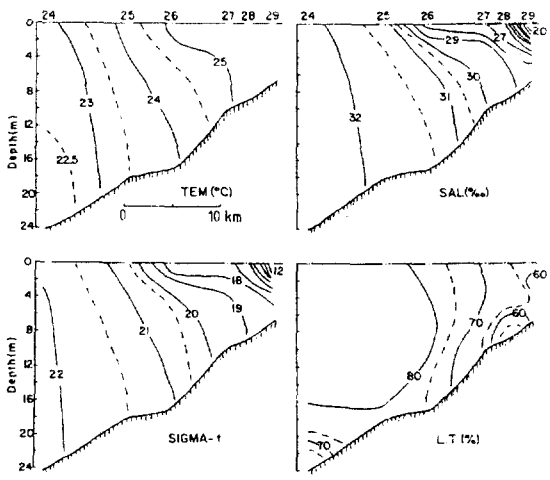

Fig. 7. Vertical structure of temperature, salinity, density and light transmission along the section C.

주변의 해수가 뚜렷이 구분되었다. Plume에서 전선은 σ_t=19를 경계값으로 형성되어 Connecticut River plume 전선의 밀도 경계값과 유사하며 전선에서의 등밀도선 기울기도 비슷하다. 수직적으로는 낙조시에 plume의 두께가 시간이 지남에 따라 깊어져 A3 단면에서 3 m 깊이까지 염분이 30‰ 미만이나 창조류가 시작된 A4 단면에서는 염분전선이 형성된 관측점 21에서 저염수의 두께가 깊어져 해면아래 6 m까지 염분이 30‰ 미만이다. 특히 단면 A4에서는 북쪽의 관측점 22에서도 미약한 표층 저염수가 나타나 두개의 plume이 형성되었다. 광투과도 단면에서도 염분 전선역에서의 투과율은 10% 이상의 차이를 보였으며 관측점 20에서 관측된 80% 이상의 맑은 해수가 두 plume을 구분하고 있다.

네번째 특징으로는 단면의 전체적 구조에서 북쪽인 연도쪽이 전층에 걸쳐 남쪽보다 고온이고, 염분도 수온구조와 마찬가지로 북쪽이 남쪽보다 저염인 특징을 보인다. 즉, 등온선과 등염분선이 단면 전체적 구조에서 전반적으로 북쪽을 향하여 깊어진다. 따라서 plume의 낮은 밀도가 렌즈구조로 나타나는 표층 아래로 중, 저층에서는 북쪽인 연도쪽이 상대적으로 밀도가 낮다. Plume이 발달하기 12시간 전인 A1 단면에서도 남고북저형의 밀도단면이 형성되어 있는 점으로 미루어 보아 연도와 고군산군도의 횡경도 사이의 단면에서는 하계에 기본적 밀도구조가 남고북저형인 것으로 추측된다.

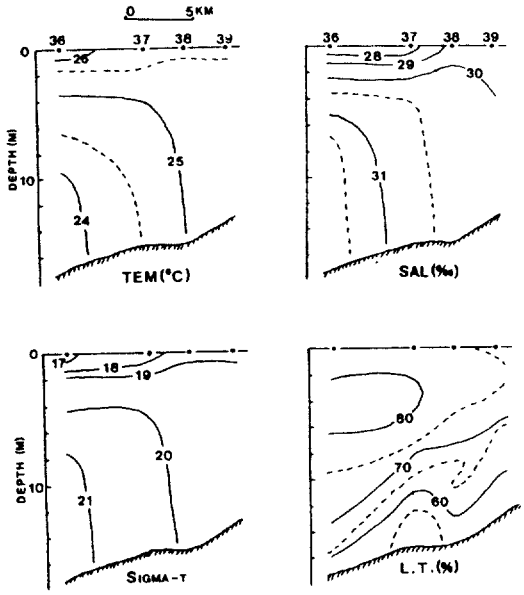

Fig. 8. Vertical structure of temperature, salinity, density and light transmission along the section B.

2.1.2 단면 C와 B

저조전 2.5시부터 저조시까지 낙조류가 흐를 때 관측된 단면 C에서는 plume이 외해로 확장하는 구조를 보여준다 (Fig. 7). 하구 입구인 관측점 29에서 20‰ 이하의 저염수가 표층에 나타나며 저층에서도 29‰ 미만의 염분을 보여 관측점 28과 29 사이에서 급격한 염분차이를 보인다. 표층역에서는 28‰ 미만의 저염수가 2 m 깊이에 걸쳐 외해로 확장하여 관측점 25와 26 사이에서 약 4‰ 이상의 염분차이를 보이며 외해수와 경계를 이룬다. 수온 단면에서 표층 저염수 plume의 수온이 25℃ 이상으로서 상대적으로 고온이며 외해로 확장하는 구조가 나타나고, 표층 염분이 크게 차이나는 지역에서 밀도가 급격히 변화된다. 관측점 25와 26 사이를 plume에 의한 저염수 경계로 보면 저염수가 외해쪽으로 확장하는 거리는 하구입구의 오식도로부터 약 15 km 정도에 달한다. 한편, 단면의 광투과도 분포는 염분과는 다른 단면구조를 보인다. 단면에서 광투과도가 60% 미만인 혼탁한 해수가 하구입구의 저층에서 관측되었는데 이 혼탁수는 염분구조와는 다르게 표층을 통하여 외해로 확장하는 구조를 보이지 않고, 수층 전반에 걸쳐 외해쪽으로 갈수록 점진적으로 광투과도가 높아지고 저층으로 갈수록 광투과도가 낮아지는 경향을 보인다.

창조시인 고조전 2.5시경에 관측된 단면 B에서는 단면 C와는 전혀 다른 단면구조가 관측되었다 (Fig. 8). 단면에서 가장 외해쪽인 관측점 36의 표층수가 가장 고온이고, 염분도 관측점 36과 37의 표층에서 28‰ 미만으로 하구쪽 관측점 39보다 2‰ 정도 저염이며 따라서 밀도가 낮은 표층수는 관측점 36에 나타난다. 단면의 중, 저층에서는 표층과는 다르게 하구쪽이 외해쪽보다 고온, 저염으로 밀도가 낮아 밀도의 수직 성층은 하구쪽보다 외해쪽이 강하다. 광투과도의 경우 저층에서 매우 낮은 투과도를 보이며, 하구쪽으로 갈수록 투과율이 낮아진다. 특히 관측점 38에서는 중층에서 광투과도의 역전현상이 관측되었고, 외해역의 표층 저염수 아래에서도 표층에 비해 아래층의 광투과도가 높은 역전현상이 관측되었다.

2.2. 1991년 8월

2.2.1. 표층 수온과 염분

금강하구와 외해에서 수온과 염분의 종관적 분포를 조사한 이 시기에는 금강에서 400 m^3/s 이상의 담수유출이 20일 이상 지속되었던 시기이다 (Fig. 2 참조). 비교적 좁은 해역에서의 정선관측은 각 관측점에서의 조류위상 차이로 인하여 수평분포가 변형되어 보여질 수 있으므로, 이러한 공간적 분포의 변형을 최소화하기 위하여 본 조사는 조류 이동거리 (tidal excursion)가 작아지는 소조기 (월령 25일)를 택하였다. 조사기간 중의 조류 이동거리는 연안역에서 약 6 km, 외해역에서 약 4 km 정도이다. 따라서 관측점 간격이 7~10 km 정도인 외해측에서는 각 관측지점에서의 조류위상 차이로 인한 수평, 수직 구조의 변형은 미약할 것으로 판단된다.

금강하구를 개야도와 오식도를 연결하는 선의 동쪽으로 보았을 때 하구 상류쪽에서는 표층 염분이 5‰ 미만이고 하구입구에서는 표층 염분이 25‰ 정도로서 하구내 기수역에서는 급격한 염분변화가 일어나고 있음을 보여준다 (Fig. 9). 조사해역의 남서쪽에는 31‰ 이상의 고염수가 나타나며 십이동파도와 고군산군도를 잇는 선을 경계로 염분변화가 매우 크다. 관측시기의 조류 이동거리를 고려할 때 외해역에서의 이러한 공간적 염분변화에 미치는 조

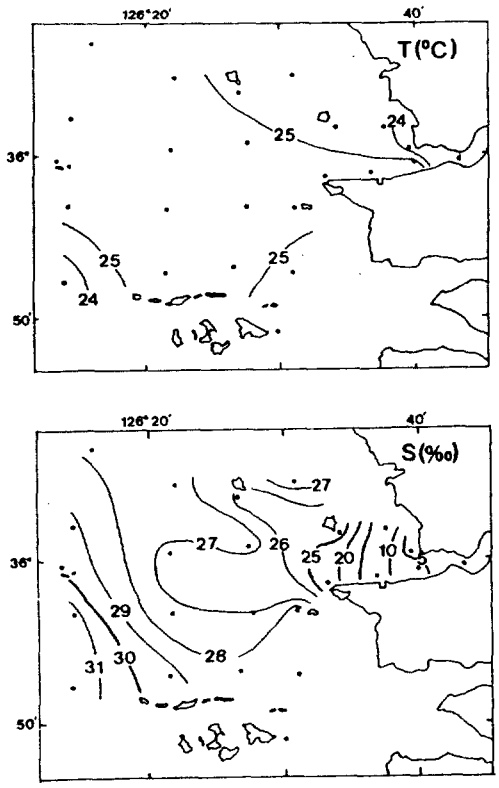

Fig. 9. Horizontal distributions of surface temperature and salinity observed in August 1991.

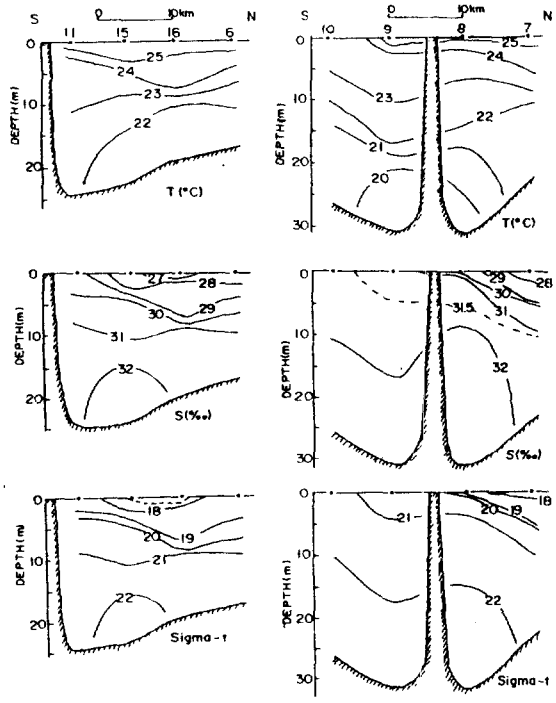

Fig. 10. Vertical structure of temperature, salinity and density in the section I (left) and II (right).

류위상 차이의 영향은 무시될 수 있다. 연도와 고군산군도 사이에서는 26‰~27‰ 정도의 희석된 저염수가 두 갈래의 설상분포로 나누어지는 형태를 보이지만 28‰ 염분선을 기준으로 보면 저염수가 전체적으로 북서쪽으로 향하여 편향되며 확장하는 분포이다. 이러한 분포는 동서방향으로 길게 위치한 고군산군도의 지형적 효과와 조사해역의 남서쪽에 나타나는 상대적 고염수에 의해 표층 저염수의 확장이 남쪽에서는 차단되고 있는 형태이다. 표층 수온은 수평적으로 미약한 차이를 보이며 하구 상류쪽과 조사해역의 남서쪽 고염수가 나타나는 지역에서 상대적으로 저온이다.

2.2.2. 단면 I과 II

조사해역의 서쪽에 남북방향으로 설정된 단면 I (Fig. 10)에서는 관측점 16의 표층에서 27‰ 미만의 저염수가 나타나고, 29‰ 미만, 24℃ 이상의 저염수가 렌즈구조를 하며 8 m 깊이까지 침투하여 plume을 형성하고 있다. 저염수 렌즈 아래에서는 수온과 염분의 수직구배가 증가하여 밀도구조에서도 σ_t<20인 표층수가 렌즈구조를 보인다. 이 단면의 저염수 렌즈구조는 1992년 8월에 관측된 단면 A3의 렌즈구조와 유사한데 단면 I에서 렌즈의 두께와 폭이 A3 단면에 비해 크다.

단면 II에서는 십이동파도 북쪽 표층에 28‰ 미만의 저염수가 나타나며 10 m 깊이까지 31‰ 미만의 해수가 관측되었다. 특히 관측점 7에서는 5 m 깊이에서 염분의 수직구배가 강하고 관측점 8에서는 1.5 m 깊이에서 수직구배가 강하여 표층역의 저염수가 쐐기구조를 보이며 주변수와 확연히 구분된다. 이 저염수는 표층 염분분포 (Fig. 9a)에서 북서쪽으로 확장하는 28‰ 미만의 해수이고, 표층 저염수의 쐐기구조는 렌즈구조의 일부이다. 이 렌즈구조는 단면 I에서 관측된 렌즈구조의 연속으로서 외해쪽으로 확장하는 plume 구조를 유지하고 있는 현상으로 보인다. 단면의 밀도분포는 표층에서 10 m 정도까지는 염분분포와 유사하며 저염수 쐐기구조에 의해

밀도 역시 쐐기구조를 보인다. 10 m 보다 깊은 곳에서는 밀도분포가 수온분포와 유사하여 단면의 북쪽이 남쪽보다 밀도가 낮다. 한편, 심층에서는 32‰ 이상의 고염수가 십이동파도 주변의 깊은 골 주변에 넓게 분포하는데 단면 I의 저층에서는 32‰이상의 해수가 나타나는 면적이 좁은 것으로 미루어 보면 저층 고염수는 단면 II에서 단면 I 쪽으로 역시 쐐기구조를 하고 있음을 알 수 있다.

토의 및 결론

집중호우로 금강 담수유출이 급격히 증가하였을 때 하구내에서 형성되는 저염수는 강한 plume을 형성하며 외해쪽으로 확장하여 조류위상에 따라 plume의 수평적 위치가 변동하고 plume의 구조도 변화되고 있음이 단면 A의 왕복관측으로 확인되었다. Garvine and Monk (1974)와 Garvine (1977)은 Connecticut River plume에 의해 형성된 전선 부근에서는 전선을 따라 표층수가 수렴하는 현상을 관측하였는데 plume의 저염 표층수는 전선이 주변 해수로 이동해 감에도 전선의 이동속도보다 큰 속도로 전선쪽으로 흘러 전선에서 수렴하여 침강하고, 전선외측의 주변 표층수는 전선이 전진해 오면 확장하는 plume의 아래쪽으로 흐르게 된다고 보고하였다. 본 연구에서는 금강 plume의 운동속도를 관측하지 못하여 전선역의 운동을 정량적으로 알 수는 없으나, 전선을 따라 표층 부유물이 띠를 형성한 현상은 표층수 수렴에 의한 것으로 해석되고, 전선 부근에서 plume의 두께가 증가된 현상은 전선에서 침강하는 표층 저염수로 인하여 야기되는 것으로 해석할 수 있다. 이 염분전선은 유출관성이 매우 큰 담수 plume이 발달될 때 주변해수가 창조류에 의해 북동방향으로 움직이는 과정에서 나타났고, 낙조시에는 관측되지 않았다. 이 전선은 plume이 주변수와 접하는 양측면 중에 조류가 흘러가는 쪽 측면(plume의 북측)에서만 관측되었고, 전선의 형성은 plume의 수직구조의 변화를 동반하고 있다. Connecticut River plume에서는 해안선에 평행인 방향으로 조류가 왕복할 때 염분전선이 조류가 흘러오는 쪽 측면에서만 형성되어 (Garvine, 1974) 외해에서의 전선위치가 크게 달라지고 있다. 조류의 흐름방향과 하구에서 저염수가 유출되는 방향을 기준으로 보았을 때 금강 plume에서 관측된 전선의 위치가 Connecticut River plume에서 관측된 전선의 위치와 정반대로 나타나는 현상과 낙조시에는 창조시와 같은 전선이 관측되지 않은 결과는 특기할 사항이며, 앞으로 금강 plume에서 전선의 형성기작과 변동에 대한 조사 연구가 요구된다.

단면 A4에서 나타난 두개의 plume 중에 주 plume은 금강하구의 남수로에서 유출되는 plume이고 전선의 북쪽에 나타난 약한 제 2의 plume은 북수로를 통하여 유출된 저염수 plume으로 해석할 수 있다. 즉, 이 시기는 급격한 일시적 담수유출이 시작되는 시기이므로 초기 plume은 주변해수와 혼합되지 못하여 북수로의 plume과 남수로의 plume이 구분되어 나타난 것이다. 북수로는 남수로에 비해 수심이 얕고 조량이 매우 작으므로 유출되는 담수량과 유출관성이 상대적으로 약할 것이다. 단면 A4보다 약 2.5 시간 앞서 관측된 단면 A3에서 제 2의 plume이 나타나지 않은 것은 북수로 plume의 약한 유출관성으로 인하여 낙조시에도 초기 plume이 미처 단면에까지 도달하지 못한 것으로 해석된다.

단면 A에서 북쪽인 연도쪽이 고온, 저염으로 밀도가 낮은 분포를 보이는 현상은 창조시에 형성된 염분전선과 이로 인한 수직구조 변화에 의한 것으로 해석할 수 있다. 하계에 금강하구에서 표층으로 유출되는 plume이 염분전선을 형성하면서 표층의 저밀도수의 두께를 증가시키고, 조류에 따른 전선의 이동으로 이 저밀도수가 북쪽으로 이동하면 1 조석주기 동안에 평균적으로 보았을 때 북쪽의 깊은 수층까지 저밀도수가 이송되게 된다. 따라서 저밀도수의 반복적 이동으로 단면에서의 전반적인 밀도는 남쪽이 높고 북쪽이 낮아지게 된다. 이러한 단면내 해수밀도의 기본적 수평 구배는 하구 외측의 연도와 고군산 군도사이에서 서쪽으로 향하는 표층 저염수의 흐름을 유지하는 순환형태를 구성하게 된다. 이와 같이 외해로 유출되는 담수가 조류이동에 의해 염분전선을 형성하게 되는 과정은 금강하구 인근 연안역의 물성구조와 저염수 plume의 확장에 매우 중요한 역할을 하는 물리적 과정으로 판단된다.

고조전 2.5시경에 관측된 단면 B에서 외해역의 표층수가 하구 입구역의 표층수보다 2 ‰ 이상 저염인 현상도 plume에 의해 나타나는 것으로 해석된다. 단면 B는 금강하구의 남수로 북측에 동서방

향으로 설정되었다. 이 시기는 담수유출이 증가하여 plume이 강한 관성을 가지고 Jet 형태로 외해로 유출되었던 때이고 (Fig. 2), 남수로에서 유출되는 plume이 강한 창조류에 의해 북쪽으로 이동되는 때이므로 남수로 plume이 북쪽으로 편향되고 이로 인하여 남수로 북측의 동서방향의 단면에서는 외해쪽 표층에 저염수가 나타나게 된다. 단면 B에서 상대적 고염수가 관측된 하구 입구쪽 관측점 38과 39는 정점 관측점 F 가까이 위치한다. 단면 관측시기가 고조전 2.5시경으로서, 관측점 F에서의 표층 염분변화를 보면 (Fig. 4) 이 시기는 최저염분이 지나가고 난 후 염분이 증가하는 시기이나 본 연구에서는 정점 F와 단면 B의 관측시기에 담수유출량이 달라 염분의 시간적 변화와 plume의 단면구조를 연결하여 해석할 수는 없다.

관측점 F에서 조석위상에 따라 나타난 저염수는 북수로의 하구입구 부근에서 형성된 plume의 이동으로 해석할 수 있다. 이 시기는 담수유출이 적었을 때로서 북수로에서 유출되는 저염수는 적은 유출관성으로 인하여 조류를 따라 이동할 것이며, 조류이동거리는 약 11 km 정도이다. 낙조류에 의해 하구로부터 남서쪽으로 유출되는 plume은 낙조 중기까지는 충분히 확장하지 못하여 개야도에서 약 5 km 정도 떨어진 관측위치에 도달하지 못하고, 낙조후기가 되어야 저염수가 도달하여 관측점 F의 표층에 저염수가 나타나게 된다. 조류가 약해지는 전류시까지 plume이 이동하면 관측점에 최저염분이 나타나게 되고 창조류에 의해 plume이 북쪽으로 이동해감에 따라 표층의 염분이 다시 증가하고 저염수의 두께가 얇아지며 사라지는 것으로 판단된다.

한편, 정점 관측점 F에서 가장 낮은 염분이 관측되는 시기에 수층내의 광투과도가 높아지는 특징은 금강 하구내의 혼탁수가 관측지점까지 직접 유출되지 않음을 의미하며, 유속이 증가하였을 때 광투과도가 감소하는 현상은 조류에 의해 저층 퇴적물이 재 부유되어 저층수가 혼탁해지는 것으로 해석된다. 단면 B에서 수층내의 광투과도가 하구 입구부근에서 역전현상을 보이는 것은 관측시기가 창조류가 발달된 때로서 저층 퇴적물이 재부유되면서 발생하는 난류적 현상에 기인하는 것으로 해석될 수 있고, 외해역 표층부근의 광투과도 역전현상은 부유물질을 상대적으로 많이 함유한 plume이 이동되어 와서 나타나는 현상으로 해석될 수 있다. 단기간의 일회적 관측 결과에서 수층내의 광투과도 역전현상의 원인을 파악하기는 어려우므로 수층내의 부유물 분포와 이동에 대해서는 보다 많은 조사가 필요하다. 한편, 표층 저염수 plume이 관측된 A 단면들과 B 및 C 단면에서 plume내의 광투과도는 70% 정도로서 하구 입구역의 저층에서 관측된 60% 미만의 광투과도에 비해 높은 값을 보인다. 따라서 표층 저염수 plume은 하구내의 부유물질을 보존하여 운반하지 않은 것으로 사료된다.

담수가 지속적으로 많이 유출되었던 1991년 8월에는 1992년 8월에 집중호우로 plume이 형성되는 초기와 같은 22‰ 미만의 저염수가 연도 남쪽의 단면까지 확장하지는 않았다. 연도 남쪽으로 27‰ 미만의 등염분선이 두개로 나누어져 설상분포를 보이는 현상 (Fig. 9a)은 금강하구의 남쪽과 북쪽 수로에서 각각 유출되는 plume에 기인하는 것으로 추측된다. 한편, 십이동파도 주변의 단면에서 뚜렷한 염분 전선이 관측되지는 않았으나 염분 29‰ 미만, σ_t<19인 plume의 렌즈구조가 존재하는 점으로 보아 plume의 외해측 표층경계를 29‰의 등염분선으로 볼 수 있다. 십이동파도 남쪽에서 이 경계를 중심으로 표층 수온과 염분이 상대적으로 큰 차이를 보여 plume의 폭과 길이가 길어지고 넓은 해역에 퍼져 있으며 plume의 확장이 북서쪽으로 편향하는 형태이다. 이 경계는 1992년 8월에 관측된 단면 C에서 보이는 plume의 외해측 경계보다 약 6 km 이상 확장되어 있다. Garvine(1974, 1977)과 Fedrov (1983)는 river plume의 경계인 전선에 의해 둘러 쌓인 담수량은 강에서 유출되는 담수량에 비례한다고 하였다. 따라서 지속적으로 많은 양의 담수가 유출된 1991년 8월에는 전선이 1992년 8월의 경우보다 더 외해쪽으로 이동되어 나타났을 것이다.

저염수가 십이동파도 북쪽으로 확장하는 현상은 Seung *et al.* (1990)이 관측한 연도 북서쪽의 저염수와 최와 이(1991)가 관측한 어청도 주변의 저염수가 모두 금강 plume의 확장에 의한 것임을 뒷받침한다. 십이동파도 부근에서 plume이 북서쪽으로 편향되는 현상은 여러 원인으로 야기될 수 있다. 일차적으로 금강하구의 남서쪽에 동서방향으로 길게 분포하는 고군산군도가 plume이 남쪽으로 확장하는 것을 차단하는 효과를 줄수 있다. 다음으로 외해측의

황해 일반순환계에 의한 연안해류에 의해 북쪽으로 편향될 가능성이다. 하계의 황해는 반시계 방향으로 순환되는 것이 부표이동 관측으로 조사되었고(Beardsley *et al.*, 1993), Seung(1987)과 Lee and Beardsley(1995)는 조류혼합 작용에 의해 연안과 외해역의 밀도차이로 우리나라 서해안에서 발생되는 북향하는 해류를 제시한 바 있는데, 십이동파도 주변은 금강하구에서 25 km 정도 떨어진 곳으로서 황해의 일반순환계의 영향을 받을 수 있는 해역이다. 가능한 다른 원인으로는 국지적인 연안역의 밀도분포나 해상풍의 영향을 들수 있다. 관측이 이루어졌던 시기의 풍속은 5 m/s 미만으로 해상풍에 의한 plume의 편향가능성이 매우 작으나 국지적 밀도분포에 의한 편향가능성은 앞으로 조사되어야 할 원인중의 하나이다.

본 연구에서 분석된 금강하구 인근해역에서 하계에 관측된 담수 plume의 구조와 변동에 대한 조사결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 담수유출량이 75 m^3/s 이하로 매우 적은 하계에는 plume이 하구입구 부근에서 조류에 따라 남서-북동 방향으로 확장과 축소를 반복하며 이동한다.

2) 하계 집중호우로 인하여 유출량이 최대 1,400 m^3/s에 달했을 때 발달되는 초기 plume은 고군산군도와 연도사이 해역에서 표층에 저염의 렌즈구조를 이루고 주로 북동-남서 방향으로 왕복하는 조류에 의해 plume의 축이 이동된다. 낙조류에 의해 남서방향으로 확장하는 plume은 하구 입구로부터 약 15 km 정도까지 나타난다. 창조류에 의해 북동쪽으로 plume의 축이 이동되며 남북방향으로의 축이동 거리는 약 7 km에 달하고 남수로에서 유출된 plume은 북서쪽으로 편향된다.

3) 담수가 400 m^3/s 이상 지속적으로 유출된 하계에는 plume이 렌즈구조를 유지하며 십이동파도 부근까지 확장하며 십이동파도 북쪽으로 편향된다.

4) 조류위상에 따라 달라지는 초기 plume의 구조는 낙조류에 의해 확장될 때 3 m 정도의 두께를 가지며 저염의 축에 대해 대칭적 구조를 보이나, 창조류에 의해 북동쪽으로 이동될 때는 plume의 북측에 강한 염분전선을 형성하며 전선역에서의 plume 두께는 6 m 까지 깊어지고 비대칭적 구조를 보인다. 조류에 따른 plume의 수직구조 변화로 인해 plume의 북쪽으로 고온, 저염수가 전달되고 해수가 전층에 걸쳐 남쪽보다 고온, 저염화되는 것으로 판단된다.

5) 금강 plume에서 관측된 염분전선은 조류방향에 비추어 볼 때 Connecticut plume에서 관측된 전선과 위치가 다르며, 앞으로 이 전선의 형성기작에 대한 조사와 연구가 요구된다.

사 사

현장관측이 가능하도록 협조해 준 군산대학교 제3해림호 선원과 선장님께 감사한다.

참고문헌

군산항 건설사무소, 1986, 1988, 1989, 1990, 1993. 금강하구 수리현상 조사 보고서.

김경렬, 기준학, 1987, 금강 하구에서의 화학적, 생물학적 제과정에 관한 연구, 1. 질소계 화합물의 순환: 전반적 고찰. 한국해양학회지, **22**: 191-206.

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

수로국, 1989. 조류도 (군산항 부근). 서지 제1432호.

수로국, 1991, 1992. 조석표. 서지 제1201-1호.

이상호, 1992. 금강하구 및 연안역 표층수의 계절변화. 군산대학교 해양개발연구, **4**: 131-141.

이상호, 1995. 하계 금강 담수 plume의 구조. 군산대학교 해양개발연구, **7**: 1-13.

이원호, 이상호, 장진호, 1990. 고군산군도 주변해역의 해양학적 기초연구, 1. 해수특성, 표층퇴적물 및 식물플랑크톤 군집. 군산대학교 해양개발연구, **2**: 61-81.

정종률, 이재학, 안희수. 1983. 금강하구의 해수 순환역학. 한국해양학회지, **18**: 142-148.

최진용, 이상호, 1991. 한반도 서해해역에서의 동계와 하계의 부유퇴적물 분포와 변화. 군산대학교 해양개발연구, **3**: 135-150.

최진용, 1993. 금강하구 및 인근해역에서 부유퇴적물의 계절적 변동에 관한 연구. 한국해양학회지, **28**: 272-280.

한국수자원공사, 1993. 수문자료집. IPD-93-1, 조사보고서.

Ahn, C.H., 1989. Distribution of tidal flats and suspended materials in Keum river estuaries using LANDSAT data. M.S. Thesis, Inha Univ., 97p.

Beardsley, R.C., R. Limeburner, K. Kim and J. Candela. 1992. Lagrangian flow observations in the East China, Yellow, and Japan Seas. *La mer*, **30**: 297-314.

Chough, S.K., 1981. Dispersal of fine-grained sediments in the southern Yellow Sea: a steady-state model. *J. Sed. Petrol.*, **51**: 721-728.

Chough, S.K., and D.C. Kim, 1984. Further evidence of fine-grained sediment dispersal in the southeastern Yellow Sea. *Sed. Geol.*, **41**: 159-171.

Fedrov, K.N., 1983. The physical nature and structure of oceanic fronts. In Lecture notes on coastal and

estuarine studies(Vol.19). Springer-verlag. 333p.
Garvine, R. W., 1974. Physical features of the Connecticut River outflow during high discharge. *J. Geophys. Res.*, **79**: 831-846.
Garvine, R. W., 1975. The distribution of salinity and temperature in the Connecticut River estuary. *J. Geophys. Res.*, **80**: 1176-1183.
Garvine, R. W., 1977. Observations of the motion field of the Connecticut River plume. *J. Geophys. Res.*, **82**: 441-454.
Garvine, R. W. and J. D. Monk. 1974. Frontal structure of a river plume. *J. Geophys. Res.*, **79**: 2251-2259.
Lee, S. H. and R. C. Beardsley, 1995. Residual tidal currents in the Yellow Sea. *J. Geophys. Res.* (submitted)
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.
Seung, Y. H., 1987. A summer circulation inferred from the density (temperature) distribution in the Eastern Yellow Sea. *J. Oceanol. Soc. Korea*, **22**: 63-70.
Shubel, J. R., H. T. Shen and M. J. Park, 1984. A comparison of some characteristic sedimentation processes of estuaries 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.

Accepted March 27, 1995