

하구언 수문작동으로 인한 금강 하구역의 물리적 환경변화 II. 염분구조와 하구유형

이상호 · 권효근 · 최현용 · 양재삼 · 최진용
군산대학교 해양학과

Physical Environment Changes in the Keum River Estuary by the Dyke Gate Operation II. Salinity Structure and Estuary Type

SANGHO LEE, HYOKEUN KWON, HYUNYONG CHOI, JAESAM YANG AND JINYONG CHOI
Department of Oceanography, Kunsan National University, Kunsan 573-701, Korea

금강하구언 수문작동 이후 물성구조와 하구유형을 조사하기 위하여 1997년 6월, 7월 및 10월, 1998년 5월과 7월에 CTD와 조류관측을 하였다. 조석과 조류의 관계는 고조전에 조류가 전류되어 낙조가 창조보다 1.5시간 정도 길다. 풍수기에는(5월부터 7월) 낙조시에 하구언에서 담수를 간헐적으로 대량 방류하여 하구 상류쪽의 수직적 염분차이와 염분의 시간변화가 커지고 하계 홍수시 2‰ 미만의 염분이 나타난다. 유출담수에 의한 염분약층의 발달로 2층구조를 보이며, 약층의 세기와 깊이는 저조시에 증가한다. 조석위상과 표층염분 변화의 관계는 하구 상류쪽에서 약 2.5 시간의 위상차이를 보이나 하구 하류쪽에서는 정상과 관계를 보인다. 하구 상류쪽에서의 위상차이는 낙조시 2~3시간 정도 방류된 담수에 의해 생성된 저염수가 조류에 의해 이동된 것을 의미한다. 갈수기에는 수직염분차이가 현저히 줄어든다. 관측된 표층유속과 염분구조 및 담수방류량을 사용하여 성층계수, 순환계수를 산출하였다. 금강하구는 부분혼합형 하구이고 풍수기와 갈수기에 따라 성층계수가 달라진다. 관측된 조류의 평균적 흐름은 상층에서 바다쪽으로, 저층에서 육지쪽으로 향하여 부분혼합형 하구의 전형적 순환형태와 일치하였다. 이러한 하구언 수문작동 후의 금강하구 유형과 순환은 하구역에서 저층부유사가 상류쪽으로 이동하며 퇴적되는 환경임을 제시한다.

CTD castings and current observations are taken in June, July and October, 1997 and May and July, 1998 to investigate the effect of the Keum River dyke on the structure of physical properties and the type of the Keum River estuary. Tide and tidal current relation shows that the ebbing is longer than the flooding by 1.5 hours with the early current reversing before high tide. In the rainy season (May to July), frequent large fresh water discharge during the ebbing from the dyke changes vertical salinity difference and time variation of salinity greatly near the head of the estuary, where salinity becomes lower than 2‰ in summer fresh water flooding. Halocline developed by the fresh water discharge makes two-layer structure, of which strength and depth increase in the low tide. The relationship between tide phase and surface salinity variation shows the phase lag of 2.5 hours near the head of the estuary but the standing wave relation down the estuary. This phase lag implies that a low salinity water diluted by the fresh water discharge for 2-3 hours in the ebb period moves with tidal excursion. In the dry season, vertical salinity difference reduces significantly. We calculate stratification and circulation parameters using the observed salinity structure, surface current and fresh water discharge. The Keum River estuary shows a partially mixed type, changing the stratification parameter from the rainy to the dry season. Mean flows of observed tidal current at lower and upper layer are landward and seaward, which are consistent with the circulation of a partially mixed estuary. Based upon the estuary type and circulation we suggest that the suspended materials will move toward the upstream due to low-layer mean flow and then the Keum River estuary will be a deposit environment.

서 론

금강은 한반도 서해 중부에 위치하며, 집수 면적이 약 10,000 km²이고 연간 5.0~6.4×10⁹ m³의 담수를 서해로 유출하며

(Shubel *et al.* 1984; 권과 이, 1999) 연간 유출량의 80% 이상이 하계 풍수기에 집중된다. 대조차가 약 7.5 m인 금강하구는 폭이 약 2 km, 수심은 평균해면하 4~10 m이고(국립해양조사원, 1996), 1990년과 1992년부터 시작된 남·북측도류제 공사로 인

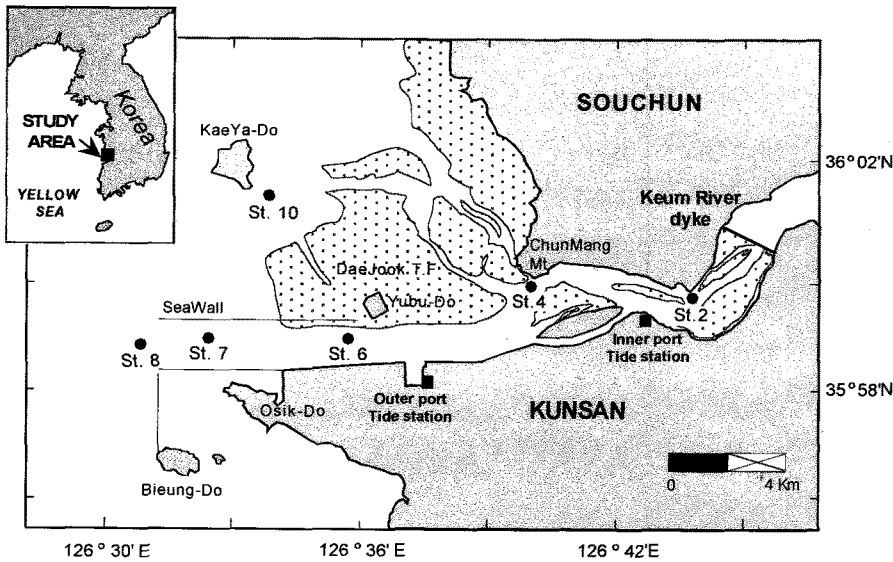


Fig. 1. Location map of CTD and current stations (closed circles) in the Keum River estuary. Dotted area denotes the tidal flat (T.F). Thick line denotes the Keum River dyke, and thin straight lines indicate the seawalls.

하여 남수로와 북수로로 확연히 나뉘게 되었다(Fig. 1참조). 남수로와 북수로 사이에는 유부도를 포함하는 대죽사주가 발달되어 있으며, 북수로 북측에는 동서방향의 간사지가 육지에서부터 개야도까지 발달되어 해수의 흐름을 제한하고 있다.

군산내항 검조소의 상류 4 km 지점에 건설된 금강하구언은 1983년 착공되어 1988년에 완성되었으나, 하구언 수문을 작동하지 않다가 1994년 8월 31일 이후로 수문을 정상 가동하여 하구언으로서의 역할을 시작하였다(이 시기를 하구언 완공이라 하자). 이로부터 약 1.5×10^8 톤의 담수를 저수하는 금강호가 형성되어(금강홍수통제소, 1996) 금강호의 수위에 따라 매일 소량의 담수를 방류하며 하계 장마나 집중호우시기 전후에는 홍수조절을 위한 수문작동으로 다량의 담수를 낙조시에 집중 방류하고 있다. 하구언 완공 전에는 금강하구에서 약 63 km 상류인 규암까지 조석진동이 영향을 미쳐(최와 안, 1985) 금강상류로 염분이 확산되었으나, 하구언 완공 이후 담수와 해수가 서로 차단되어 남수로의 염하구 길이는 약 20 km 정도로 축소되었다. 이러한 인위적 하구환경의 변화는 하구역의 조류 및 하구순환유형의 변화를 유발할 것으로 기대되어 하구역의 물리적 환경을 조사하게 되었다.

하구언 완공 후 수문작동으로 인해 금강하구는 창조시에 상류쪽이 완전히 막힌 형태의 수로가 되고 낙조시의 간헐적인 담수방류로 인하여 반체절된 하구가 되는 독특한 하구환경이 되었다. 국립해양조사원(1997)에 의하면 정상파(standing wave)의 성격을 보이던 조위와 조류의 위상관계는 하구언 완공 후 변화되지 않았지만 하구역의 조류는 크게 감소되었는데, 하구언 완공 이전에는 최강유속이 3.5~3.8 kt 정도였던 것이 완공 이후에는 1/2 정도로 감소하여 대조기 최강유속이 1.5~2.2 kt로 흐른다고 한다. 일반적으로 하구의 물성구조와 순환체계를 결정하는 가장 중요한 요소는 담수 유출량과 조량이다(Knauss, 1997). 하구언 수문의 인위적 작동은 상기 중요요소의 변화를 야기하므로 금강하구의 물성구조와 순환체계에 변화를 가져올 수 있을 것으로 기대된다. 최근 Yih *et al.* (1997)가 금강하구의 적조에 대한 연구에서 보고한 바와 같이 하구언 완공 이후 금강

하구 조류의 감소로 하구의 성층 및 혼합작용과 순환이 바뀌어 적조가 나타나는 원인이 될 수도 있다. 본 연구와 동시에 진행된 하구역의 해면변화에 대한 연구에 의하면(권과 이, 1999) 하구언 완공시기를 기준으로 전과 후의 연평균 해수면이 군산내항에서 9.6 cm 정도 감소하여 하구역의 평균해수면 구배가 변화되었다. 평균해수면 구배의 변화는 염하구 순환의 중요 원인력인 순압적 압력경도력의 변화를 의미하므로 하구순환형태의 변화를 예견할 수 있다.

하구언 완공 이전의 금강 하구유형에 대해서 정 등(1983)은 조석위상에 따른 염분변화양상을 조사하여 'standing wave type' 하구로 보고한 바 있다. 하구유형을 염분구조에 의해서만 구분한다면(Dyer, 1977), 정 등(1983, Fig. 3)이 관측한 하구언 건설 이전의 금강하구는 상류쪽이 완전혼합형, 하류쪽이 부분혼합형 하구로 구분될 수 있다. Oh *et al.*(1995)은 하구언 완공 이전에 조류와 물성구조를 관측하고 Hansen and Rattray(1966)의 분류에 따라 금강하구의 유형을 'Type III'인 Fjord 유형의 하구로 구분하였으나 금강 하구역과 같은 대조차 해역에서는 나타나기 어려운 하구유형으로 생각된다. 최 등(1995)은 하구언 완공 직전과 직후에 조류와 물성구조를 관측하여 비교하였으며, 완공 이전의 완전혼합형(well-mixed type) 하구로부터 완공 이후에는 부분혼합형(partially-mixed type) 또는 염쇄기형(salt-wedge type) 하구로 변이한다고 하였으나 체계적인 하구유형 분류는 하지 않았다.

본 연구의 목표는 금강하구언 완공 이후인 1997년과 1998년에 조사된 물성과 조류자료를 분석하여 담수 방류 및 조석위상에 따른 염분구조의 변화 특징을 파악하고, 이를 바탕으로 성층-순환계수를 산출하여 금강하구의 하구유형을 체계적으로 분류함으로써 하구의 순환체계를 밝혀 보고자 한다.

관측 및 자료

하구언 방류량의 차이에 따라 하구역 내의 물성구조가 어떻게 변화되는지를 파악하기 위하여 1997년에 풍수기인 6월과 7월, 그

Table 1. Summary of CTD and currents observations in the Keum River estuary. We used the current meters (RCM) and the sea-level recorders (WLR and T.G) having temperature and conductivity sensors.

| Date | | St. 2 | St. 4 | Mouth region | |
|------|----------------------------|----------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|----------------------------|
| 1997 | June 7th 12:00~8th 11:00 | RCM (5 m)/CTD | RCM (2, 5 m) | St. 6 | WLR (2 m)/CTD |
| | July 22th 12:00~23th 12:00 | RCM (2, 5 m)/CTD | RCM (2, 5 m) | St. 8 | WLR (5 m)/CTD |
| | Oct 4th 12:00~5th 12:00 | RCM (2, 5 m) WLR (Bottom) | | St. 7 | RCM (2,5 m)/CTD |
| Date | | St. 2 | St. 4 | St. 6 | St. 10 |
| 1998 | May 23th 08:00~21:00 | RCM (1 m)/CTD | RCM (1, 9 m) T.G (5 m)/CTD | RCM (1 m) WLR (5 m)/CTD | RCM (1,5 m) CTD |
| | July 28th 07:00~20:00 | RCM (1, 5, 9 m) T.G (1 m)/CTD | | RCM (1, 8 m) WLR (5 m)/CTD | |
| | July 29th 07:00~20:00 | | RCM (1, 5 m) T. G (1 m)/CTD | | RCM (1 m) WLR (5 m)/CTD |

리고 갈수기인 10월의 3회에 걸쳐 수온, 염분, 광투과도 및 조류를 관측하였으며, 1998년에는 풍수기인 5월과 7월에 관측하였다 (Fig. 1, Table 1). 조류는 1997년에 각 시기마다 하구내측인 정점 2(소치곶)와 중간지점인 정점 4(전망산) 그리고 하구 입구쪽의 세 정점에서 25시간동안 동시관측을 시행하였고, 1998년에는 개야도 부근 정점 10이 추가되어 4개 지점에서 12.5 시간씩 관측하여 담수의 영향범위와 조석위상에 따른 물성변화를 조사하였다. 하구 내측인 정점 2와 중간부분인 정점 4는 하구인 담수 방류의 직접적 영향을 받는 지역으로서 5회의 관측시 모두 CTD 정점관측을 하였으나, 정점부근에 수심이 깊은 골이 있어 각 관측시기마다 CTD관측 깊이가 다소 차이났다. 하구 입구에 위치한 정점은 담수방류량의 차이에 따른 물성의 시공간적 차이를 보기 위해 1997년에 6월은 정점 6, 7월은 정점 8, 10월은 정점 7로 관측점 위치를 변경하였고, 1998년에는 정점 6으로 고정하였다.

수온, 염분 및 광투과도의 수직구조는 CTD(SBE-19 & Valeport 730CTP)를 이용하여 1시간 간격으로 관측하였다(Table 1). 조류와 물성의 동시관측을 위해 각 정점마다 상층(해면하 1 m 혹은 2 m), 중층(5 m) 혹은 저층(8 m 혹은 9 m)에서 조위계(Aandera, WLR-7, T.G), 계류식 해류계(Aandera, RCM-7 and 9)를 이용하여 조류와 수온, 염분을 5분 간격으로 관측하였다. 관측시 파고는 모두 0.5 m 미만으로 표층역 관측조류에 오차를 야기하는 파랑의 효과는 무시 가능하였다. 조위는 국립해양조사원의 군산내항 검조소에서 실측된 값을 이용하였다.

관측시기의 담수 방류량은 하구연을 관리하는 농어촌진흥공사 금강사업단에서 계산한 방류량을 이용하였다(Table 2). 1997년 풍수기인 7월 관측때에는 약 3,000 만톤 정도를 방류하여 풍수기인 6월 관측시기보다 일방류량이 2배정도 많았고, 갈수기인 10월에는 관측 하루 전에 600 만톤 정도의 방류가 있었으나 관측 당일에는 담수방류가 없었다. 1998년에는 5월 관측때에 2,000 만톤의 담수방류가 있었고, 7월에는 관측 이틀전에 600 만톤의 방류가 있어 1997년 10월의 경우와 비슷하다. 조사시기의 월령을 보면 1997년 관측시는 대조기이고, 1998년에는 모두 중조기에 해당한다.

Table 2. Fresh water discharge in the Keum River dyke and moon's age during CTD and current observations

| Season | Date | Moon's age | Gate-open Time | Gate-close Time | Discharge ($\times 10^3$ m ³) |
|--------|-------------|------------|----------------|-----------------|--|
| Rainy | 1997/ 6/ 7 | 1.8 | 07:06 | 09:13 | 11,803 |
| | 6/ 8 | | 07:37 | 10:07 | 16,033 |
| Rainy | 7/ 22 | 17.3 | 18:35 | 21:03 | 32,704 |
| | 7/ 23 | | 19:35 | 21:38 | 25,533 |
| Dry | 10/ 3 | | 06:34 | 07:52 | 6,274 |
| | 10/ 4-5 | 2.4 | — | — | — |
| Rainy | 1998/ 5/ 23 | 26.6 | 14 : 27 | 17 : 26 | 20,133 |
| Rainy | 7/ 27 | | 08 : 04 | 09 : 25 | 5,630 |
| | 7/ 28-29 | 4.6 | — | — | — |

조 류

풍수기인 1997년 7월 22일~23일에 걸쳐 정점 4에서 연속 관측된 조류와 물성은 Fig. 2와 같다. 군산내항의 조위를 기준으로 보았을 때 고조 후 2.5시부터 담수가 방류되었으며, 해면하 2 m에서 관측된 조류는 고조 2시간 전과 저조시에 전류되고 5 m에서는 고조와 저조시 전류되어 층간의 유향과 유속이 차이 났다 (Fig. 2b, c). 유속은 창조시보다 낙조시에 더 강하고 해면하 2 m에서는 낙조시간이 창조시간보다 길다. 두 조석주기에 걸쳐 고조전 3시경부터 창조류의 세기가 현저하게 감소하였는데(Fig. 2d) 이러한 현상은 정점 2에서도 유사하게 나타났으며, 조류의 비대칭을 나타낸다. 군산내항에서 관측된 조위변화도 비대칭을 보여 관측된 조류와 연관성을 보인다. 7월 23일 낙조시에는 5 m 깊이의 유속이 2 m 깊이의 유속에 비해 현저히 작았다. 각 깊이에서의 수온과 염분은 조석주기에 따른 변화를 보여 고조시에 저온, 고염수가 나타나고 저조시에 고온, 저염수가 관측되었다(Fig. 2f, g). 담수방류직후인 7월 22일에는 각 층에서 염분이 뚜렷이 낮아지며 염분변화폭이 약 23%에 달한다. 하지만 23일 6시경에는 담수방류가 없었음에도 표층에서 급격한 저염화가 관측되었으며, 이 시기에 표층수온이 높아지고 표층조류도 증가하는 특

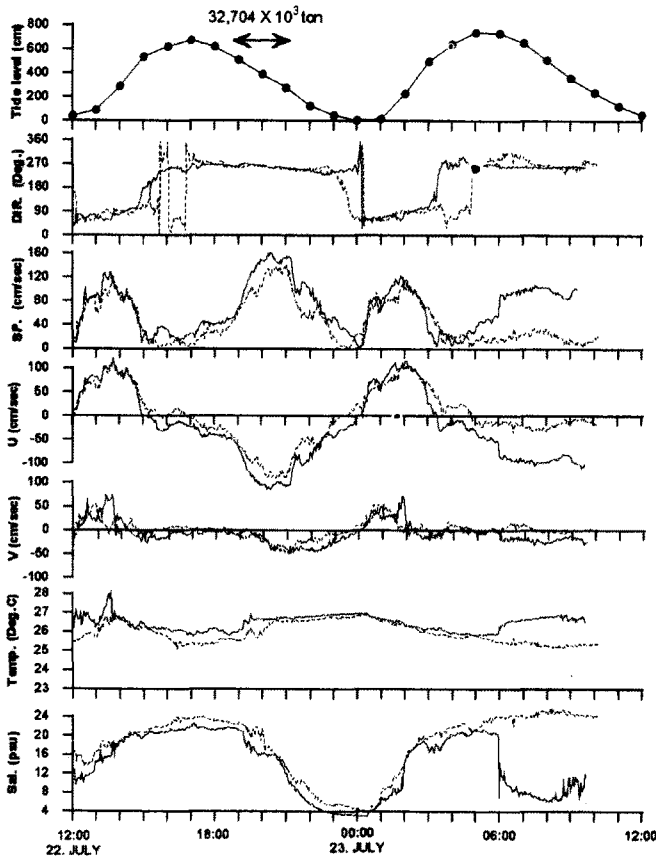


Fig. 2. Time series of (a) tide level at Kunsan inner port, (b) and (c) current direction and speed, (d) and (e) east and north current components, (f) temperature and (g) salinity observed at 2 m (solid line) and 5 m (dashed line) depths in St. 4 in July, 1997. Arrow in (a) indicates the duration of fresh water discharge in the Keum River dyke.

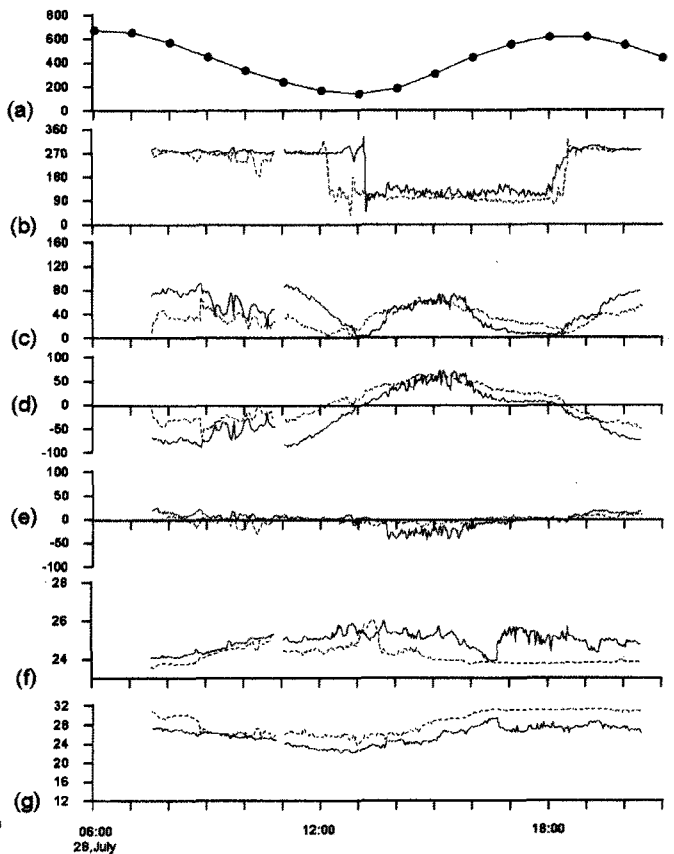


Fig. 3. Time series of (a) tide level at Kunsan inner port, (b) and (c) current direction and speed, (d) and (e) east and north current components, (f) temperature and (g) salinity observed at 1 m (solid line) and 8 m (dashed line) depth in St. 6 in July, 1998.

이한 현상이 관측되었다.

담수방류가 없었던 1998년 7월 28일에 금강하구 남쪽수로상의 정점 6에서 관측된 조류는 수로를 따른 동서방향의 왕복성을 보인다(Fig. 3b, d, e). 균산내항 조석이 저조일 때 해변하 8 m 깊이의 조류가 해변하 1 m에서보다 약 1 시간정도 먼저 전류되었으며, 낙조시간은 저층보다 표층이 1 시간정도 길다(Fig. 3b). 유속은 낙조류가 창조류보다 크고, 낙조시에 표층이 저층보다 40 cm/s 정도 크다. 각 층의 수온은 조석위상에 따른 변화가 뚜렷하지 않으나 염분은 창·낙조에 따른 변화를 보이며 변화폭은 약 5‰ 정도이다.

염분구조의 변화

1997년 풍수기

6월에 하구 상류인 정점 2와 하류인 정점 6에서 관측된 염분구조의 조석위상에 따른 변화를 보면(Fig. 4a) 두 정점에서 염분약층은 고조전후에 표층 가까이에서 형성되고 저조전후에 점차 깊어지는 2층구조를 보이고 최저염분은 저조전 1시경에 표층에서 관측되었다. 수층내 최고염분은 각각 고조후 2시와 고조시에 저층에서 관측되어 하구상류쪽(정점 2)에서 2 시간정도 늦게 나타났다. 이러한 최고염분 출현시기의 차이는 하류에서 상류로의 염

분확산과 이동이 저층을 통하여 일어나고 있음을 의미한다. 정점 2에서 표층과 저층의 염분차이는 저조후 2시경에 최소가 되고 낙조시에 증가하며, 8일 7시 이후에는 담수방류로 표층에서 염분이 1‰ 이하로 현저히 낮아졌으며 10시에 최대 염분차이가 14.5‰에 달한다. 정점 6에서는 표층과 저층의 염분차이가 저조시에 10‰ 정도에 달하며 고조이후에 오히려 감소하여 정점 2와는 달리 염분구조변화 위상이 차이난다. 특히 정점 6의 경우 7일 저조시에는 앞서 방류된 담수(Table 2참조)의 영향으로 표층 저염수가 관측되었으나 8일 낙조시에 방류된 담수의 영향은 관측이 종료될 때까지 나타나지 않았다.

7월에 관측된 하구상류인 정점 2와 하구외측의 정점 8에서 조석위상에 따른 시간적인 염분변화는(Fig. 4b) 서로 다른 수직구조를 보인다. 정점 2에서는 6월과 비슷하게 고조후 낙조기에 비교적 강한 염분약층을 형성하며 저층에 최고염수가 나타났다. 22일에 대량 담수방류로 인하여 2 시간정도 관측이 중단되었으나, 23시경부터 익일 2시까지 전 수층에서 2‰ 이하의 염분이 관측되었다. 표층과 저층의 염분차이가 고조후 2~3 시경의 낙조시에 최대가 되는 현상도 6월의 경우와 유사하다. 하구외측인 정점 8에서 염분의 수직구조 변화를 보면 정점 2와 같은 강한 염분약층이 나타나지 않으며, 수층내에 최고염분은 고조시에 나타

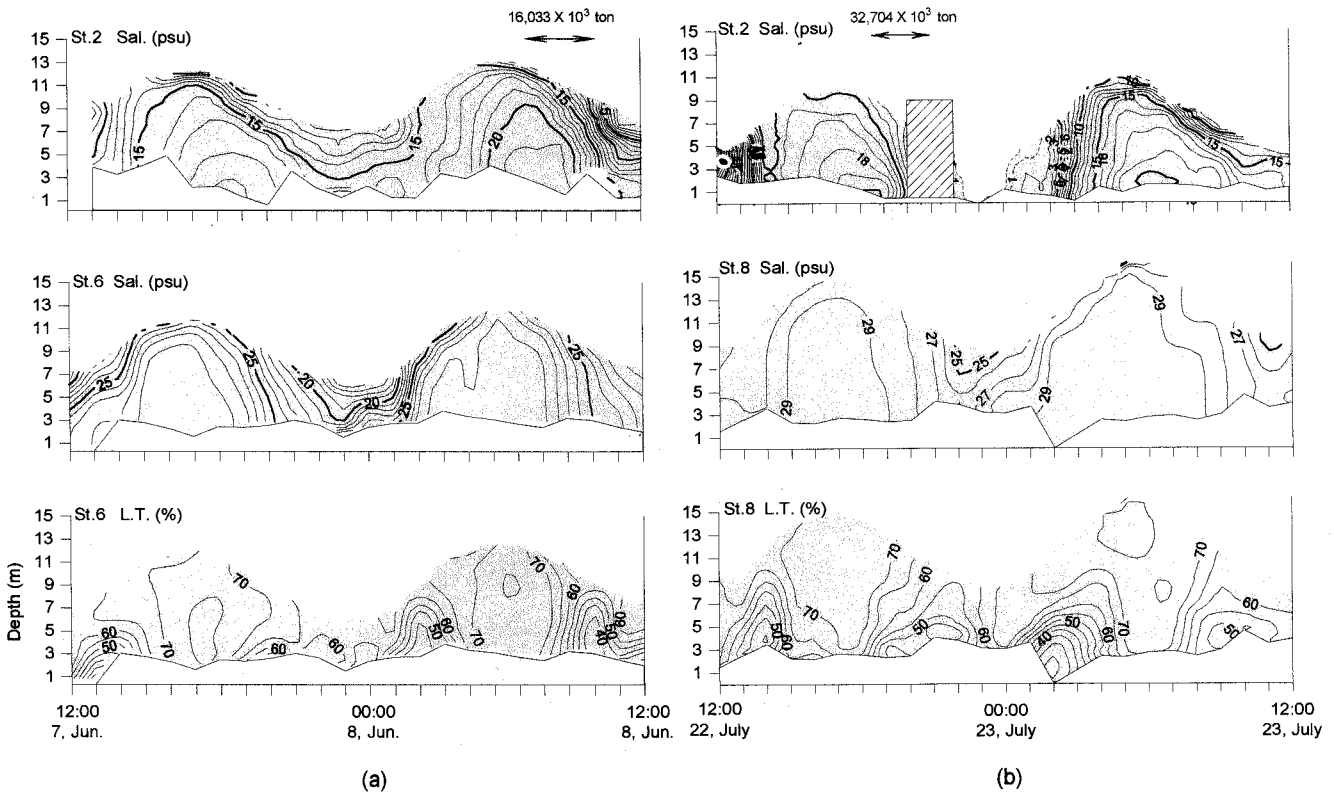


Fig. 4. Time variations of (a) salinity structures at Sts. 2 and 6 and light transmission structures at St. 6 for two tidal cycles in June, 1977, and (b) at Sts. 2 and 8 in July, 1997. Arrows indicate the durations of fresh water discharge in the Keum River dyke and the shaded block in (b) denotes the data losing.

나 정점 2와 다르며 6월 정점 6의 경우와 유사하다. 저조시에 표층 염분이 가장 낮아지고 약한 염분약층이 형성되어 표층 저염수의 두께가 증가하나 창조시에 염분약층의 깊이가 얕아지며, 하구의측에서 조석위상과 전층의 물성변화가 정상과 관계를 보인다. 22일 대량방류된 담수의 영향은 한 조석주기 후에도 정점 8에 나타나지 않았다. 이는 담수영향이 하구입구인 정점 8에 도달하는데 한조석주기이상 소요됨을 의미한다.

한편, 6월과 7월에 정점 6과 8에서 관측된 광투과도의 수직구조변화를 살펴보면(low panels in Fig. 4a, b) 저층에서 광투과도가 창조 초기와 낙조 중, 후기에 현저히 감소하며, 고조 전후시에 증가한다. 저층 광투과도가 감소하는 시기는 각각 유속이 최대가 되는 시기와 일치하여(Fig. 3b참조) 해저 경계층을 통하여 퇴적물이 재부유하는 과정으로 해석될 수 있다. 즉, 담수방류 직후인 6월 8일 10시경과 7월 22일 22시경에는 매우 낮은 광투과도가 관측되어 담수방류에 의한 육상기원 부유사의 영향을 고려할 수 있으나 이 시기에 각 관측점의 염분구조에서 담수의 영향이 강하지 않은 점으로 미루어 낮은 광투과도의 발생은 주로 재부유 현상일 가능성이 높다.

1998년 풍수기

중조기인 5월에 4개 정점에서 관측된 조석위상에 따른 염분구조 변화를 살펴보면(Fig. 5a), 정점 2에서는 낙조시의 담수방류로 고조후 4시경에 2% 미만의 담수가 전수층에서 관측되었으며 고조후 1~2시경에 표층의 염분약층과 저층의 고염으로 수층내 염

분차이가 17%에 달하였다. 담수방류의 영향으로 정점 4와 6에서 저조시 저염수 두께가 1 조석 주기 전에 비해 깊어졌다. 정점 2와 6에서 조석위상에 따른 수층내 최고염분이 관측된 시기는 1997년 6월의 경우(Fig. 4a)와 유사하다. 표층과 저층의 염분 차이가 최소가 되는 시기는 정점 4에서는 고조전 2시경이고 정점 6에서는 고조후 2시경이며, 수층내 가장 강한 염분약층이 나타나는 시기는 정점에 따라 다소 다르다. 북수로 외측의 정점 10에서는 수층내 최고염분과 최저염분이 나타나는 시기가 조석위상과 일치하지만 수직적 염분차이는 4% 미만이며 담수방류의 직접적 영향은 없다.

풍수기임에도 불구하고 관측당일에 담수방류가 없었던 7월에는 각 정점에서 수직적 염분차이는 6% 미만으로(Fig. 5b) 5월에 비하여 감소하였다. 조석위상에 따른 염분구조의 변화를 살펴보면, 표층과 저층의 염분차이가 최소가 되는 시기가 모든 정점에서 고조전 3시경의 창조시에 나타나 5월의 경우와 다르다. 특히 정점 2에서는 20% 미만의 표층수 두께가 창조시를 제외하고는 모두 4~5 m로 변화가 적어 2층구조가 오래 지속되며, 표층의 최저염분은 관측초기의 고조시에 나타났다. 정점 4와 6 및 10에서는 표층 저염수 두께가 저조때 증가하여 조석위상에 따른 변화 특성이 나타났으며, 정점 10에서는 표층염분의 조석주기동안 변화가 2% 정도이다.

1997년 갈수기

10월에는 갈수기로서 당일 하구언의 담수방류는 없었고 하류

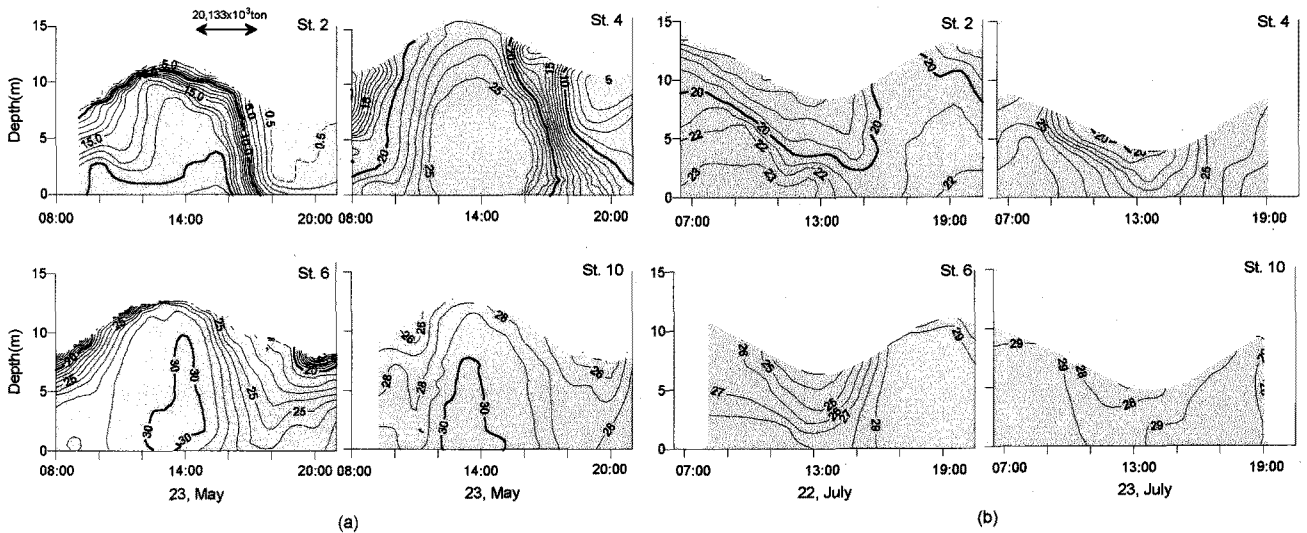


Fig. 5. Time variations of structures of salinity in psu at Sts. 2, 4, 6 and 10 for a tidal cycle in May (a) and July (b), 1998. Arrow in (a) indicates the duration of fresh water discharge in the Keum River dyke.

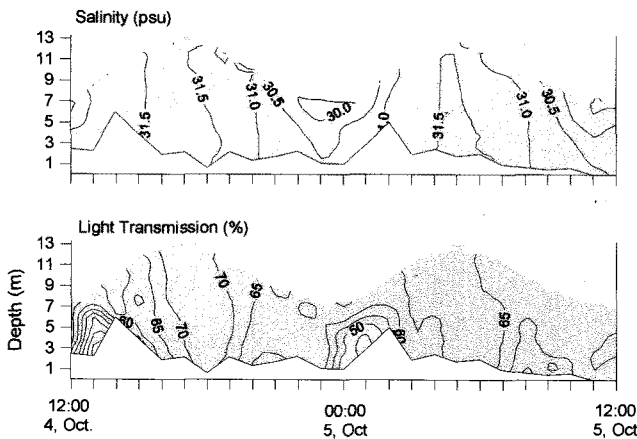


Fig. 6. Time variations of salinity and light transmission structures at St. 7 for two tidal cycles in October, 1997.

전인 10월 3일 06시에서 08시 사이에 630 만톤의 소량 담수방류가 있었다(Table 2). 하구 입구쪽인 정점 7에서 조사된 염분 및 광투과도의 수직구조는 Fig. 6과 같다. 최저염분은 표층에서 저조시에 관측되어 조석위상에 따른 염분변화를 보이지만 수직적 염분차이는 매우 작고 풍수기에 비해 수직적으로 균일하다. 광투과도의 구조변화는 풍수기의 경우와 유사하다. 이러한 갈수기의 염분 수직구조는 풍수기와는 매우 다른 양상으로써 하구내의 수층이 잘 혼합되었음을 의미한다. 즉, 풍수기에 비해 하구내 담수유입이 격감하였고 해수면을 통한 복사가열이 여름철보다 적었으며, 또한 대조기의 강한 조류에 의한 활발한 수직혼합 작용으로 성층이 발달되지 못하였기 때문으로 해석된다

표층저염수의 이동

하구의 남쪽 수로상의 정점과 하구상류의 정점 2와 4에서 동

시에 관측된 염분을 이용하여 수로를 따른 방향으로 저염수가 이동하는 양상을 살펴보았다. 정점 2와 4는 각 정점위치의 하구단면에서 수심이 가장 깊은 곳으로 단면의 염분변화 특성을 대표하는 곳으로 판단되나 본 조사에서는 하구쪽 방향으로의 물성변화는 관측하지 못하였다. 본 절에서는 각 정점들이 각 하구단면의 표층염분을 대표하며, 하구쪽 방향의 표층염분변화는 무시가능하다고 가정하였다.

1997년 6월 3개 정점의 해면하 2 m 깊이에서 저염수 이동을 살펴보면(Fig. 7a), 담수방류 후에 10‰ 미만의 저염수가 정점 2에서 나타나므로 10‰ 미만의 저염수는 담수방류의 직접적 영향을 나타내는 담수희석수로 구분하기로 한다. 정점 2에서는 조석위상에 따른 염분변화가 뚜렷하지 않고, 하구언에서 약 8 km 범위까지 염분구배가 크며 20‰ 미만인 저염수의 조석위상에 따른 이동거리는 적다. 하류쪽에서는 조석위상에 따른 등염선의 이동거리가 크다. 담수방류의 직접적 영향이 나타나는 정점 2를 제외하고는 조석위상과 표층염분 변화위상이 일치하여, 하류쪽의 염분변동은 정 등(1983)이 분석한 바와 같은 정상과 유형의 하구임을 알 수 있다. 한편, 7월에 표층 2 m에서 관측된 저염수의 이동을 보면(Fig. 7b) 대량의 담수유출로 인한 10‰ 미만의 담수희석수가 하구언에서 약 9~10 km 범위까지 확장하였다. 창조시에는 정점 2까지 범위가 축소되어 담수희석수가 조석위상에 따라 이동하는 거리는 10 km 이상이고, 한 조석주기 후에도 10‰ 미만의 담수희석수가 하구 상류에서 반복하여 확장하는 현상을 보인다. 이로 인하여 정점 2에서 정점 4까지 조석위상에 따른 염분의 변화가 15‰ 이상에 달한다. 담수의 대량방류 후 한 조석주기가 지난 낙조시에 정점 2에서는 고조 후 2시경에 최저염분이 나타나고, 정점 4에서는 고조 후 3시경에 나타났다. 즉, 염분의 변화가 조석위상과 2~3 시간의 위상차이를 보여 대량방류 후에는 하구 상류에서 정상과 하구유형이 확연히 변화되었다. 앞에서 언급된 가정이 성립한다면 하구 상류쪽의 표층염분변화 특성은 7월 22일에 대량 방류된 담수가 방류중단된 이후

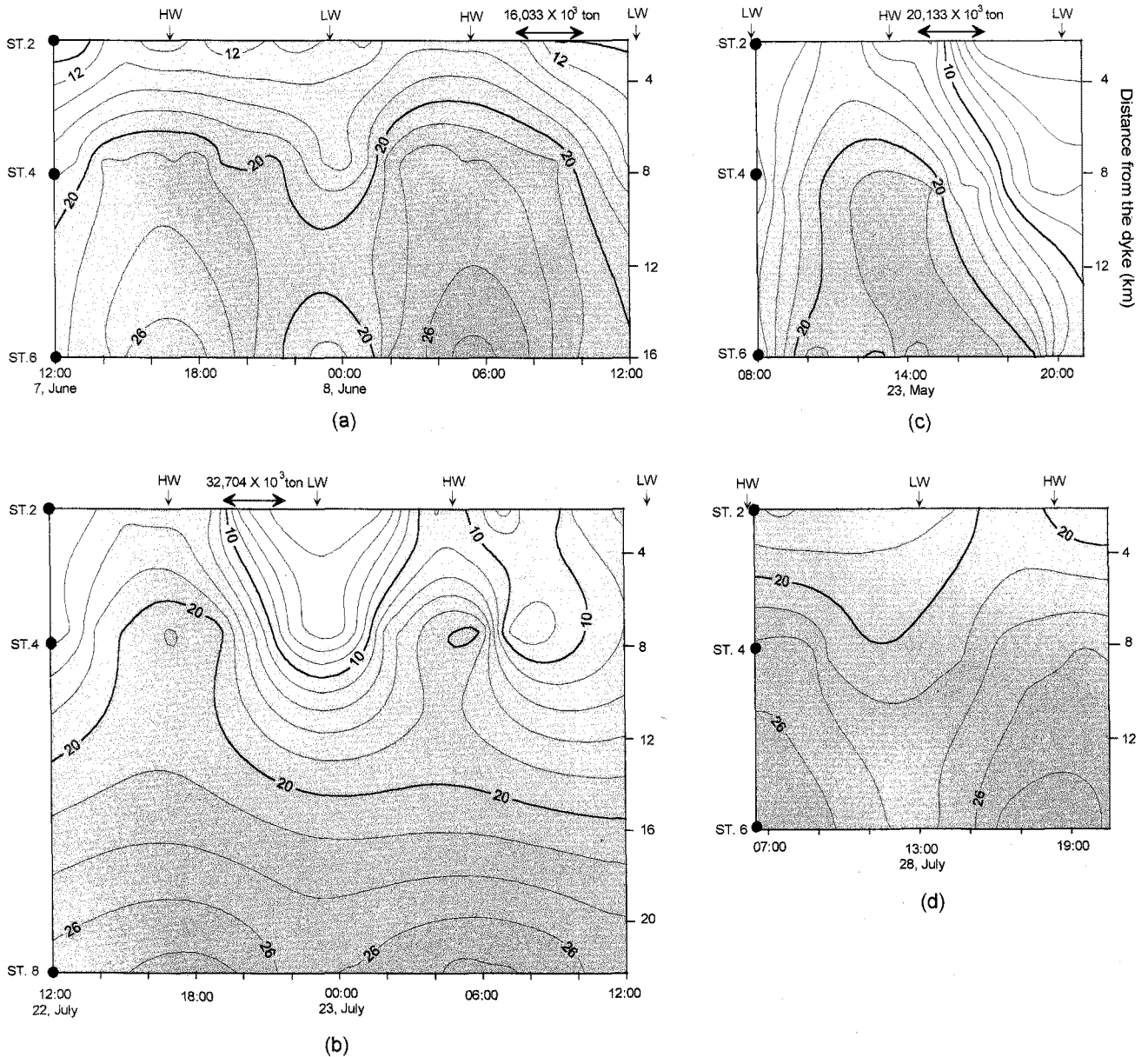


Fig. 7. Distance-time plots of 2 m-depth salinity in psu observed in June (a) and July (b), 1997 and 1 m-depth salinity in psu observed in May (c) and July (d), 1998. LW and HW denote the low and high water time at Kunsan inner port and the distance in km from the dyke is presented on the right-side of each panel. Arrows in (a), (b) and (c) indicate the duration of fresh water discharge in the Keum River dyke.

창조류에 의해 하구 상류로 이동되었다가 낙조초기에 하류로 이동한 결과로 해석할 수 있다.

1998년에 해면하 1 m 깊이에서 조석위상에 따른 저염수의 확장범위를 살펴보면, 5월에는(Fig. 7c) 관측초기 저조시에 정점 2와 6사이의 염분차이가 적으나 고조이후 담수방류로 염분차이가 크게 증가하였다. 10‰ 등염선이 담수방류이후 하구언에서 하류 쪽으로 약 12 km까지 이동하여 1997년 7월의 경우보다 이동거리가 크나 정점간에 내삽된 이동거리이므로 직접 비교는 어렵다. 조석 위상에 따른 등염분선의 변동은 하구 상류인 정점 2에서 정상과 유형에서 벗어나 있지만 하구의 하류 쪽으로 갈수록 정상과 유형을 보인다. 관측당일 담수방류가 없었던 7월에는 10‰ 미만의 담수희석수가 정점 2에도 나타나지 않았다(Fig. 7d). 정

점 2에서 관측초기의 고조 때 염분이 낮았고 저조 후 4시경에 높은 염분이 관측되어 정상과 하구유형에서 벗어나 있다. 하구 상류에서 거리에 따른 염분변화가 조석위상과 차이를 보이는 것은 1997년의 경우와 같이 담수방류 이후 표층 저염수가 희석되면서 조석위상에 따라 하구내를 왕복 이동하다가 한 조석주기 이상에 걸쳐 하류 쪽으로 점차 빠져나기 때문에 나타나는 현상으로 판단된다.

하구유형

하구역의 물성구조는 계절적 담수방류에 따른 변화외에 조류 특성과 조석위상에 따라 크게 변화되므로 하구의 순환특성과 유

Table 3. Calculated stratification($\Delta S/S_0$) and circulation (U_s/U_r) parameters. U_s , U_m and U_b denotes the tidal mean flow at the surface, mid-depth and bottom layer. Mean cross-section velocity is calculated by $U_r = Dis/Sect$ where Dis and $Sect$ denotes the tidal averaged river discharge and the section area. ΔS denotes the tidal mean salinity difference between surface and bottom, and S_0 is the tidal mean of the vertically averaged salinity at each stations.

| Date | Station | \bar{U} (cm/s) | Dis (m ³ /s) | $Sect$ (m ²) | U_r (cm/s) | U_s/U_r | $\Delta S/S_0$ | |
|---------------|---------|------------------|---------------------------|--------------------------|--------------|-----------|----------------|-------|
| 1997/ 7/22 | St. 2 | U_s | -12.0 | 578.98 | 5950 | 9.73 | 1.233 | 0.695 |
| | | U_m | 7.17 | | | | | |
| | St. 4 | U_s | -20.25 | 578.98 | 14260 | 4.06 | 4.987 | 0.440 |
| | | U_m | -12.68 | | | | | |
| 7/23 | St. 4 | U_s | -30.91 | 741.59 | 14260 | 5.20 | 5.944 | 0.155 |
| 10/ 4 | St. 2 | U_s | -4.69 | 142.27 | 5950 | 2.39 | 1.960 | 0.030 |
| | | U_m | 3.96 | | | | | |
| | St. 7 | U_s | -5.37 | 142.27 | 9420 | 1.51 | 3.556 | 0.014 |
| | | U_m | 2.95 | | | | | |
| 10/ 5 | St. 2 | U_s | -7.78 | 142.27 | 5950 | 2.39 | 3.254 | 0.086 |
| 1998/ 5/23 | St. 2 | U_s | -21.59 | 456.53 | 5950 | 7.67 | 2.815 | 0.840 |
| | St. 4 | U_s | -32.14 | 456.53 | 14260 | 3.20 | 10.039 | 0.363 |
| | | U_b | 12.91 | | | | | |
| | St. 6 | U_s | -27.95 | 456.53 | 13780 | 3.31 | 8.437 | 0.398 |
| 7/ 28 | St.2 | U_s | -9.39 | 127.66 | 5950 | 2.14 | 4.380 | 0.235 |
| | | U_m | 2.67 | | | | | |
| | St. 6 | U_s | -20.25 | 127.66 | 13780 | 0.89 | 21.861 | 0.040 |
| | | U_b | 2.77 | | | | | |
| 7/ 29 | St. 4 | U_s | -22.68 | 127.66 | 14260 | 0.92 | 25.333 | 0.147 |
| | | U_m | 2.87 | | | | | |

형을 파악하기 위해서는 조석주기 평균된 물리량을 이용하여야 한다. 관측된 염분의 수직구조 및 조류와 담수방류량을 이용하여 조석주기 평균된 성층계수와 순환계수를 계산하고 Hansen and Rattray(1966)의 염하구 분류방식에 따라 금강하구의 특성을 구분해 보았다(Table 3). 성층계수는 $\Delta S/S_0$ 로 표현되며 표층과 저층의 염분차(ΔS)와 단면적내 평균염분(S_0)의 비로 정의되는데 (Hansen and Rattray, 1966) 본 연구에서는 각 정점의 수직 염분구조가 단면을 대표한다고 가정하였으며 이를 조석주기동안 평균하였다. 순환계수는 U_s/U_r 로 표현되며 조석주기에 걸쳐 평균된 표층유속(U_s)과 단면을 통과하는 유체속도의 조석주기 평균치(U_r)의 비로 정의된다. 여기서 U_r 는 담수의 유출량이 하구의 단면적을 통과하는 평균속도의 조석평균치로 대치될 수 있다. 본 연구에서는 해면하 1 m 혹은 2 m의 관측조류를 평균하여 U_s 로 사용하였다. 매 관측시에 조류가 측정된 수층이 많지 않아 관측된 조류에서 U_r 를 산출하기 어려웠으며 담수유출량과 각 정점위치의 하구 단면적을 이용하였다. 즉, 낙조시 일시적으로 유출된 담수량에서 하구단면을 통과하는 평균유속을 산출하여 이를 다시 조석주기 평균하였다. 하지만 갈수기인 1997년 10월과 풍수기인 1998년 7월에는 관측당일에 방류가 없었기에 관측일 이전의 방류량을 이용하였다(Table 2).

계산된 성층계수와 순환계수 값을 이용하여 작성한 성층-순환 관계도는 Fig. 8과 같다. 담수방류가 많았던 1997년 7월에는 정점 2에서 성층계수가 상대적으로 큰 완전혼합형(Type Ib, ●) 하구이고 정점 4에서 부분혼합형(Type IIb, ●)을 보인다. 정점 4에서 네 조석주기에 걸쳐 조사된 자료를 한 조석주기씩 나누어 계산하였을 때 담수방류시기에 따라 성층계수가 다소 변화였다. 담수방류가 거의 없었던 1997년 10월의 갈수기에는 정점 2와 7에서 성층계수가 상대적으로 작은 부분혼합형(Type IIa, ◇) 하구로 분류되었다. 담수방류가 중간정도였던 1998년 5월에는 주로 성층계수가 큰 부분혼합형(Type IIb, ★)으로 분류되었다. 관측당일 담수방류가 없었으나 풍수기인 1998년 7월에는 하구상류의 정점 2와 4에서 갈수기의 경우와 달리 성층계수가 상대적으로 큰 부분혼합형(Type IIb, ○)으로 분류되었다. 이러한 금강하구의 유형 분류를 종합하면 하구인 완공이후 금강 하구역은 부분혼합형의 하구로 분류할 수 있다.

성층계수는 부분혼합형의 범위 내에서 주로 풍수기와 갈수기에 따라 변하는 특징을 보이며 풍수기에도 담수방류 여부와 조석의 월령에 따라 성층계수 및 순환계수는 차이를 보인다. 1998년 5월과 7월은 관측시기가 모두 중조기로서(Table 2) 1997년 관측시기의 대조기 조류보다 유속이 작았다. 담수방류가 크지 않

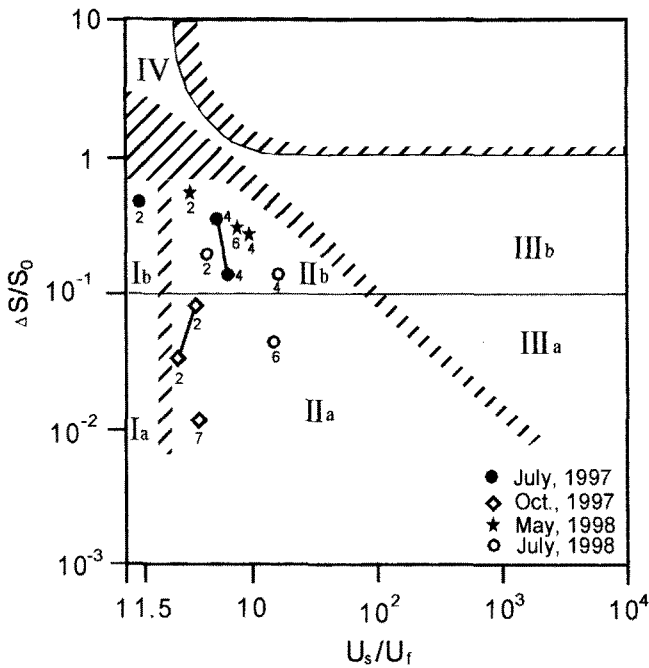


Fig. 8. Stratification-circulation diagram for the Keum River estuary using the parameters in Table 3. See the text and Table 3 for stratification parameter $\Delta S/S_0$ and circulation parameter U_s/U_r . The bold roman numbers denote the estuary types, and arabian numbers and symbols indicate the observed stations and months.

있던 5월에 관측 분석된 하구유형에서 상층계수가 상대적으로 큰 결과는 하구 내에서 조류에 의한 수직 혼합과정이 상대적으로 활발하지 않았음을 반영하는 것으로 해석될 수 있다. 한편, 각 관측시기마다 순환계수는 정점 2에서 가장 작았고 정점 4에서 가장 큰 값을 보였다. 정점 2와 정점 4는 모두 해안선이 굽을 이루고 정점부근의 하구단면에서 수심이 가장 깊은 곳이다. 두 정점에서의 순환계수 차이는 두 가지 원인을 가질 수 있다. 유출된 담수흐름이 주로 정점 4를 통과한 반면에 정점 2는 담수흐름의 중심부가 아니었을 가능성과 해안선의 형태로 인하여 만들어질 수 있는 조류 잔차류의 기여 가능성이 있다. 본 연구에서 두 가능성에 대한 검증은 못하였으며, 앞으로 연구할 대상이다. 순환계수가 가장 큰 시기는 1998년 7월인데 이는 관측 2일전에 소량으로 방류된 담수량을 순환계수의 U_r 산출에 사용하였기 때문으로 해석된다.

토 의

Fig. 2와 3에서 보여진 두 정점에서의 조류와 균산내향 조석은 위상관계에서 정상파의 성격이 비교적 우세하나 조류의 전류시기가 1~2시간 정도의 차이를 보였다. 이러한 차이는 담수방류가 없을 때에도 나타났으며 금강 하구역 조석이 완전한 정상파는 아니고 부분적으로 진행파의 성격을 띄고 있음을 의미한다. 조석파의 진행속도는 수심에 의해 지배된다. 수심이 얇은 하구역에서는 고조시 수심이 깊어지고 저조시 얇아져 파의 마루와 골의 진행속도가 달라지므로 조위곡선은 비대칭이 될 수 있다(Dyer, 1977). 균산 내향조석의 조위곡선이 짧은 창조와 긴 낙조를 보이는 특

성은 이러한 하구역 조석전파의 특성으로 해석된다.

금강하구에서 관측된 풍수기와 갈수기의 계절적인 물성변화에서 하구연의 담수방류에 따라 변화되는 염분범위는 다음과 같이 정리된다. 하구 상류인 정점 2(소치곶)에서 최저염분이 관측시기에 따라 0.2~21.2‰ 범위에서 변화되며 담수방류시 10‰ 미만의 담수희석수가 나타나 담수의 직접적 영향을 확인할 수 있었다. 최고염분은 풍수기와 홍수기에 20‰ 정도이고 갈수기는 26‰ 정도이다. 하구하류 쪽에서는 최저염분이 풍수기 담수방류시 해수표층에서 12‰ 정도이며 갈수기에는 30‰로 다소 높아졌고, 최고염분은 풍수기에 30‰ 미만이고, 갈수기에는 31‰ 정도이다. 이러한 하구역의 염분변화 범위는 하구연을 완공하기 이전에 정 등(1983), Oh *et al.*(1995), 최 등(1995)이 관측한 결과와 비교했을 때 담수방류의 직접적 영향으로 담수희석수가 나타나는 것 이외에는 염분변화 범위가 유사하다.

금강하구는 하구연 수문을 열었을 때 하구의 특성을 갖으나 수문을 닫으면 만의 특성을 갖는 독특한 환경이다. 이런 환경에서 하구유형 구분요소인 조석주기 평균 순환계수를 구하기 위해서 담수가 유출되는 시기를 포함하여 관측된 조류를 평균하였다. 관측기간동안 농어촌진흥공사에서 제공한 자료에는 담수방류량이 없는 날도 있으나 하구연에는 수문외에 어류의 통행을 위한 어도가 있어 소량이지만 담수가 항상 공급되고 있다. 관측기간에 하구연 수문을 열지 않은 경우에는 U_r 가 정의되지 않는데, 이 경우 어도를 통해 방류된 담수 유출량을 사용했을 때는 작은 U_r 값으로 인해 순환계수가 너무 큰 값이 되었다. 본 연구에서는 비현실적인 순환계수를 대신하기 위하여 관측기간 이전에 방류된 담수량을 이용하여 U_r 를 구하였다. 한편, 관측시간이 25시간 미만 이어서 평균유속 U_s 와 U_r 는 자유도(degree of freedom)가 1~2 정도 이므로 개개 평균유속은 임의성이 클수 있다. 하지만 동일 정점에서 다른 시기에 2회이상 관측된 평균유속 U_s , U_m , U_b 는 크기와 방향에서 담수유출과 상관된 유의성을 보인다(Table 3). 따라서 본연구에서 사용된 순환계수는 정점별로 보았을 때 통계적 신뢰도가 높다고 판단된다.

부분혼합형 하구의 일반적 특징은 염분이 2층 구조를 이루고 상층에서 저염수가 바다쪽으로 하층에서 고염수가 육지쪽으로 흐르는 평균적 순환특징을 갖는다(Dyer, 1977). 본 연구에서 관측된 염분구조는 조석위상에 따라 상층과 하층의 염분차이가 변하지만 조석주기 평균으로 보았을 때 2층 구조가 우세하다(Figs. 3과 4참조). 관측된 조류의 조석주기 평균된 흐름을 보면(Table 3), 모든 정점에서 상층(U_s , 해면하 1~2 m)은 하구입구인 서쪽으로 향하여 음의 부호이고 하층(U_b , 해면하 9 m)에서는 하구상류인 동쪽으로 향하여 양의 부호이다. 중층(U_m , 해면하 5 m)에서도 1997년 7월의 정점 4를 제외하고는 평균적 흐름이 동쪽을 향한다. 이러한 조석 평균된 흐름은 금강하구가 부분혼합형의 특징적 순환계를 유지한다는 것을 의미한다. 권과 이(1998)는 균산내향과 외향의 조위자료를 분석하여 하구연 수문작동 시작과 동시에 비조석 해수면이 내향에서 급격히 하강하였으며, 하구 상류 쪽으로의 평균해수면 구배가 감소하였음을 보여주었다. 부분혼합형 하구역의 순환은 마찰력과 압력경도력의 평형으로 유지되는데, 여기서 압력경도력은 상류쪽으로 증가하는 평균해수면에 의한 순압적 압력구배와 하류쪽으로 증가하는 밀도분포에 의한 경

압적 압력구배의 증첩에 의해 결정된다(Dyer, 1977; Knauss, 1997). 하구순환의 역학적 평형에서 평균해수면 구배의 변동으로 하구상류를 향하는 순압적 압력경도력이 감소하면 하구역의 하층에서는 경압적 압력경도력이 우세해지고, 이로 인하여 상류쪽으로 향하는 하층의 평균적 흐름이 발생하거나 증가할 수 있다.

하구역에서 하층의 평균적 흐름이 육지쪽으로 향하는 현상은 하구내 물질의 대사와 순환에 중요한 의미를 지닌다. 2층 구조의 부분혼합형 하구에서는 하구내로 유입, 유출되는 용적수송량이 담수유입량보다 증가하게 되나(Knauss, 1997), 용적수송량에 의한 체류시간은 담수체류시간과 같게된다. 또한 염분순환은 하층을 통하여 염분이 상류쪽으로 이루어지며 강한 조류에 의한 수직혼합으로 상층으로 확산된다(Dyer, 1977). 본 연구와 동시에 관측된 영양염 및 부유물질 자료를 분석한 양 등(1998)에 의하면 금강하구역의 담수체류시간은 갈수기에 약 21일, 풍수기에는 약 3.3일 정도이다. 이러한 체류시간 동안에 하구언으로부터 공급된 육상기원 부유물질은 저층으로 침강되고, 저층에서 재부유된 부유사에 의해(Figs. 3과 4) 하층에서 부유물질의 농도는 증가된다. 따라서 하구내의 부유물질은 하층의 평균흐름에 의하여 육지쪽으로 이송될 가능성이 높고, 하구외측의 부유물질도 하구내로 이루어져 상류쪽에서 퇴적될 수 있음을 의미한다. 본 연구에서 밝혀진 하구유형과 순환체계로 미루어보면 장기적으로 금강하구는 퇴적환경이 될 가능성이 높다.

정 등(1983, Fig. 3)은 하구언 완공이전 6월에 조사된 자료에서 금강하구 남쪽수로의 군산 외항부근에서는 대조기에 염분의 수직적 차이가 감소하고 소조기에 현저히 증가하는 현상을 보고하였고, 현재의 하구언보다 상류인 정점에서는 염분의 수직적 차이가 대조기와 소조기 모두 매우 작아 수직 혼합된 구조를 보여 주었다. 이러한 기존의 관측결과로부터 하구언 건설이전에는 본 연구의 정점 2와 4 부근에서 수직 혼합정도가 변화되는 점이역이었던 것으로 추측할 수 있다. 본 연구에서 관측된 상기 정점은 담수방류의 직접 영향으로 염분이 크게 변하고 수층내 성층도 매우 크게 변화되는 지역임을 제시한다. 군산내항과 하구언 사이의 하구 상류에서는 하구언 완공 전과 후에 물성구조의 변화와 하구유형이 크게 변화되었을 가능성이 있으나 기존 연구에서 하구유형이 체계적으로 구분되어 있지 않아 직접 비교는 어렵다.

최 등(1995)은 1994년 8월과 9월에 걸쳐 하구언 완공 전과 후의 수직적 염분차이를 조사하였으며, 하구언 수문작동 후에 군산외항 부근에서는 대조기와 소조기 모두 부분혼합형 하구유형을 보이나 군산내항 부근에서는 대조기에 부분혼합형, 소조기에는 부분혼합형 혹은 염쇄기형까지 될 것으로 판단하였다. 본 연구에서 관측된 결과는 대량의 담수방류가 있을 때에 정점 2와 4 부근에서 상하층의 염분차이가 증가하여 성층계수가 1에 가깝게 되는 경우도 있었다(Table 3). 염쇄기형 하구(Fig. 7, Type IV)는 성층계수가 1 이상이어야 하는데, 금강하구와 같은 조차가 큰 해역에서는 기대하기 어려운 것으로 판단되나 수층간의 혼합작용이 적은 소조기에 대량으로 담수가 방류될 때는 하구상류역이 염쇄기형에 가까운 하구로 변이 될 가능성도 배제할 수 없다. 한편, Oh et al.(1995)은 금강 하구언의 수문을 닫기 이전의 관측 자료를 분석하여 금강하구 유형이 Fjord 유형(Type III)의 하구

로 보고한 바 있다. 이는 순환계수를 산출하는 과정에서 U_s 를 조석주기에 걸쳐 백터평균하지 않고 유속평균(speed mean)으로 계산하여 나온 결과로 보인다. 본 연구에서 관측된 조류크기는 성분별로 평균된 표층유속 U_s 의 10배정도 되는 점으로 미루어보면 하구유형 구분에 사용되는 변수를 다르게 정의할 때 Oh et al.(1995)과 유사한 착오를 겪었을 것이다.

결론

본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다. 1) 금강하구에서 조류와 조석의 위상관계가 정상과 관계에서 다소 벗어나 있다. 2) 하구언에 가까운 하구상류에서는 담수방류의 직접적 영향으로 담수방류와 조석위상에 따른 염분구조의 변화가 매우 크다. 하구상류인 정점 2에서 최소염분이 0.2~21.2‰ 범위에서 관측시기에 따라 변화되며 담수방류시 10% 미만의 저염수가 나타나 담수의 직접적 영향을 받는다. 최대염분은 풍수기와 홍수기에 20% 정도이고 갈수기는 26% 정도이다. 하구입구에서는 최소염분이 풍수기 담수방류시 21.3%이며, 갈수기에는 30.4% 정도이고, 최대염분은 풍수기에 30.0% 미만이며 갈수기에는 31.0% 정도이다. 3) 염분변화와 조석위상과의 관계는 하구상류에서 정상과 형에서 벗어나 하구언 건설이전의 하구유형과는 달라졌으나 하류역에서는 담수유출에 관계없이 정상과 하구유형을 유지하고 있다. 4) 조류에 따라 저염수가 이동하는 거리는 약 8~12 km 정도이고, 담수방류가 중단된 이후에 한 조석주기 동안에는 저염수가 하구를 벗어나지 못하며, 하구상류에서 조류에 따라 왕복이동하며 점차 외해로 유출된다. 5) 성층-순환 관계도에 의해 분류된 하구유형은 풍수기와 갈수기의 담수유출량에 따라 성층계수가 달라지나 주로 부분혼합형 하구가 된다. 6) 하구내에서 조석평균된 흐름은 저층에서 육지쪽으로, 상층에서 바다쪽으로 향하며 이는 부분혼합형 하구의 순환체계에서 나타나는 현상이고, 이로 인하여 금강하구는 장기적으로 퇴적환경이 될 것으로 예측된다.

사사

이 논문은 1996년도 한국학술진흥재단의 대학부설연구소 연구비 지원에 의하여 연구되었고, 과학기술부·한국과학재단 지정 군산대학교 새만금환경연구센터의 일부지원에 의한 것입니다. 현장관측에서 동시성 있는 자료를 획득할 수 있도록 해류계와 CTD를 제공해주신 서울대학교 정종률 교수님과 오임상 교수님, 군산대학교 홍성근 교수님께 감사드리며, 금강하구언 담수방류자료를 제공해주신 농어촌진흥공사 금강사업단에 감사한다. 현장관측과 자료정리에 많은 시간과 노력을 아끼지 않은 신은주, 이현정양과 김창희, 손영태군 그리고 군산대 해양학과 학부생들에게 감사한다.

참고문헌

- 국립해양조사원, 1996, 1997. 조석표(한국연안). 250 pp.
 권효근, 이상호, 1999. 하구언 수문작동으로 인한 금강하구의 물리적 환경변화 I. 평균 해수면과 조석. 한국해양학회지. 바다, 4: 93-100.

- 금강홍수통제소, 1996. 금강홍수예정보. 건설교통부, 426 pp.
- 양재삼, 정주영, 황은숙, 허진영, 1998. 금강하구의 물질대사 2. 부유현탁물질과 영양염의 Flux. 학술진흥재단 중점연구소과제 보고서. 군산대학교, 46 pp. (unpublished)
- 정종률, 이재학, 안희수, 1983. 금강하구의 해수순환역학. I. 염분 경계층의 변화성. 한국해양학회지, **18**: 142-148.
- 최병호, 안원식, 1985. 금강 감조구간의 조석전과. 한국수문학회지, **18**: 67-73.
- 최진용, 최현용, 서만석, 1995. 하구언 갑문폐쇄 후 금강하구의 물리, 퇴적학적 특성변화. 한국해양학회지, **30**: 262-270.
- Dyer, K.R. 1977. Estuaries: A physical introduction. John Wiley & Sons, London. 140 pp.
- Hansen, D.V. and M. Rattray, 1966. New dimensions in estuary classification, *Limnol. and Oceanogr.*, **11**: 319-326.
- Knauss, John A., 1997. Introduction to Physical Oceanography 2/e. Prentice-Hall, Inc., New Jersey, pp. 96-104.
- Oh, I.S., T.K. Na and H.B. Lee, 1995. Tidal Current and Suspended Sediment Transport in The Keum Estuary, West Coast of Korea. *J. Oceanol. Soc. Korea*, **30**: 147-162.
- 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: Proceeding of Korea-U.S. Seminar and Workshop on Marine Geology and Physical Processes of the Yellow Sea, edited by Park, Y.A., O.H. Pilkey and S.W. Kim, pp. 286-308.
- Yih, W.H., J.S. Yang, H.J. Jeong and J.H. Shim, 1997. Recent red tide in Kunsan Inner Harbor-'The Kunsan type red tide'. North Pacific marine science organization (PICES). Sixth annual meeting abstracts, p 84.

1999년 1월 11일 원고 접수

1999년 9월 20일 수정본 채택