

## 금강 풀룸의 구조와 분포에 대한 수치모델 연구

신은주 · 이상호\* · 최현용  
군산대학교 새만금환경연구센터, 해양정보과학과

## Numerical Model Study for Structure and Distribution of the Keum River Plume

EUN JU SHIN, SANG-HO LEE\* AND HYUN YONG CHOI  
*Department of Ocean Information Science, Saemangeum Environmental Research Center,  
Kunsan National University, Kunsan 573-701, Korea*

연속적으로 방출되는 금강 담수에 의해 형성되는 풀룸(plume)의 구조와 분포를 시험하기 위해 전향력과 조석의 유무에 따른 3차원 수치모델 실험을 하였다. 조석없이 전향력이 포함된 경우 모델풀룸은 빌달단계에서 남수로 북쪽에 시계방향 순환을 형성한다. 풀룸 확장이 진행되면 순환증심이 남서쪽으로 이동하며 남수로 입구에서부터 남서쪽으로 저염수의 유출 축 방향이 편향된다. 이러한 결과는 외해의 강한 염분전선 때문에 하구입구 전방에서 누적되는 저염수에 의해 유지되는 해면경사에 의한 순압적 지형류 균형으로 설명된다.  $M_2$  분조를 포함하는 경우에는 모델풀룸이 북서쪽으로 멀리 확장하여 큰 혁모양의 염분분포를 이룬다. 외해역 풀룸의 조석주기 평균된 표층흐름은 주로 지형류 균형을 이룬다. 이러한 풀룸분포의 변화는 하구입구 외측에서 저염수를 북쪽으로 공급하는 조류이동에 의한 저염수 이류와 풀룸을 따라 평균해면을 높이고 북쪽 천해연안역 표층염분을 증가시키는 활발한 조류혼합에 의한 것으로 설명된다. 관측된 금강 풀룸의 주된 형태(Lee et al., 1999; 최 등, 1999)는 하구 입구역에서부터 풀룸 축이 북서쪽으로 편향되고 북쪽으로 풀룸 두께가 깊어지는데 이러한 특징은 조석이 포함된 모델에서 잘 재현되었다.

To examine the structure and distribution of the Keum River plume produced by continuous river discharge we carried out three-dimensional numerical model experiments with or without Coriolis force and tide. When Coriolis force is included but tide is not the model plume forms the clockwise circulation north of southern channel in the developing stage. As the plume expansion progresses the center of circulation moves to the southwest, with turning the discharging axis of low-salinity water to the southwest from the mouth of southern channel. These results are explained mainly in terms of barotropic geostrophy by surface slope maintained with accumulated low-salinity(buoyant) water in front of the estuary mouth due to offshore strong salinity front. When the  $M_2$  tide is included the model plume extends farther to the northwest, forming large tongue-like salinity distribution. The tidally averaged surface flows of the offshore plume are mainly in geostrophic balance. These changes in plume distribution are explained in terms of low-salinity water advection by tidal excursion and active tidal mixing; the former supplies low salinity water to the north off the estuary mouth and the later increases mean sea level along the plume and surface salinity in northern shallow coastal area. The main features of observed Keum River plume(Lee et al., 1999; Choi et al., 1999), which showed the northwestward deflection of the plume axis and northward deepening of the plume thickness from the estuary mouth region, are well reproduced by the model in which tide is included.

**Key words:** Keum River plume, Numerical model, Barotropic geostrophy, Tidal advection, Tidal mixing

### 서 론

한반도 남서연안에 있는 금강하구 인근해역(Fig. 1)은 평균수심이 20 m 미만이고 대조차 지역이다(정 등, 1983). 금강하구는 간사지가 넓게 발달하였으며 해저지형이 서쪽으로 완만하게 깊어지

고, 남수로(주 수로)와 북수로(개야수로)로 나누어진다. 하구에서 조석에 의한 해수교환은 70% 이상이 남수로를 통하여 일어난다(군산항 건설사무소, 1993). 조류는 외해에서 주로 북동-남서방향으로 흐르고(수로국, 1989) 섬 주변과 연안 내만에서는 지형의 영향으로 조류방향이 바뀐다. 이 지역에는 1994년 8월말에 완공된 금강하구언이 있으며, 하구연 축조전 금강하구로부터 유출되는 담수는 년간 약 50~60억 ton정도였고(Schubel et al., 1984) 7월부터 9

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

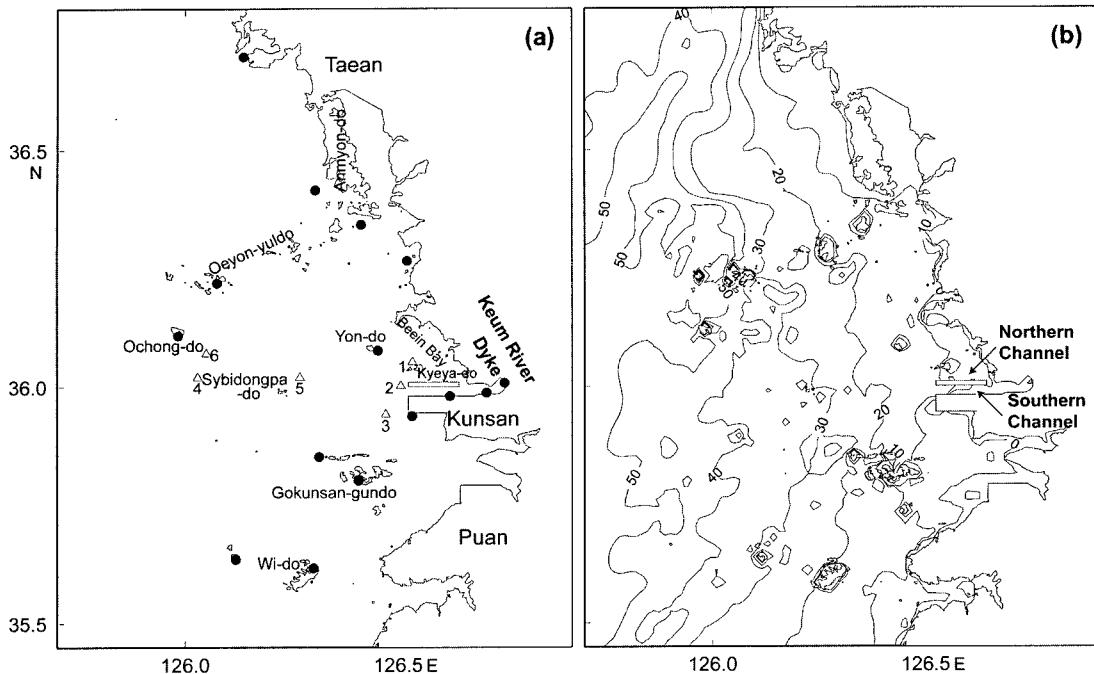


Fig. 1. Study area (a) with locations of tide (closed circle) and tidal current observations (open triangle) and (b) topographic contours in meters.

월사이에 년간 총량의 58%가 유출된다(나, 1993; 김과 기, 1987).

금강하구언으로부터 방류된 담수, 특히 하계 집중호우시 대량 담수 방출에 의해 형성된 금강 풀룸(담수유출에 의한 저염수 혹은 저염수 축)에 관한 기존연구들은 대부분 관측된 자료의 분석에 바탕을 두고 있다. 이 등(1999)과 이 등(2001)은 금강하구의 염분구조와 하구유형 및 저염수의 조석동조를 관측하여 분석하였다. 이 등(1995)은 하구언 축조전 저염수가 삽이동파도 근처에서 북쪽으로 편향되어 황해중부해역으로까지 확장될 가능성을 제시하였으며, 최 등(1999)은 홍수로 인한 대량 담수방류시 금강기원 저염수가 태안반도 주변 조석전선역까지 확장되는 흔적을 관측한바 있다. 최근 Lee et al.(1999)은 다량의 담수가 방출되었을 경우 남수로 입구 북쪽에 저염수의 제트류가 형성되고 외해쪽에서는 저염수 축이 북서쪽으로 편향되어 외연도 주변까지 확장된 저염수의 혁모 양분포를 관측하였다. 그밖에 이 등(1990), Seung et al.(1990), 최와 이(1991)는 금강담수 기원 저염수에 대해 연구한 바 있다.

대부분 여름철에 조사된 위의 연구결과들은 다음과 같은 금강 풀룸의 특징들을 보고하였다. 첫째로, 저염수가 삽이동파도 근처에서 북서쪽으로 편향되어 외연열도 쪽으로 축을 이루며 확장한다. 둘째, 남수로 입구보다 저염인 표층수가 비인만 지역에서 뚜렷한 핵구조를 보이고, 하구입구부근의 남북 방향 단면에서 등염 분선이 북쪽 저층으로 기울어진다(이 등, 1995; Lee et al., 1999). 이러한 조사결과들은 금강 풀룸이 이 지역에서 물성분포 등을 변화시키며 황해중부 연안역에서의 물질순환에도 영향을 미칠 수 있음을 제시한다. 그러나 관측에서 밝혀진 현상들의 발생원인과 물리적 과정은 명확하게 논의되지 않았다. 탁월한 순환계가 없고 조차가 큰 황해 중부역에서 금강담수의 확장기작을 규명하는 일은 연안역 순환계 및 물질교환 연구에 중요하다.

일반적으로 하구로부터 유출된 저염수는 주변수와 만나면서 두 수괴를 분리하는 강한 염분전선을 형성하며(Alexander et al., 1997), 하구로부터 10일~20일 이상 담수의 지속적인 공급을 받게 되면 표층 풀룸은 더 이상 급격한 변화를 보이지 않는 충분히 성장한 풀룸이 된다(Chao and Boicourt, 1986). 풀룸의 저염수 축 형성과 발달과정은 담수량과 전향력 뿐만 아니라 주위의 물리적 환경요소인 해저지형, 조석, 바람, 그리고 연안류 등에 의해 영향을 받게 된다. Garvine(1987)는 풀룸에 의한 지형적 연안류가 형성되는 과정을 지구회전과 강한 비선형의 풀룸 동역학에 중점을 두어 설명하였다. O'Donnell(1990)은 유출된 풀룸이 전향력에 의해 하구 입구근처에서 시계방향순환을 형성하며 주변수의 흐름의 세기에 따라 풀룸전선역의 두께나 분포형태가 달라질 수 있음을 3차원 모델을 이용하여 보여주었다. McCreary et al.(1997)은 하천수 유입에 따른 해양의 반응을 1/2층 수치모델을 이용하여 살펴보았는데, 담수 방출량의 차이에 따라 외해에 형성된 풀룸의 순환형태나 확장형태가 달라질 수 있음을 보여주었다. 한편, Garvine(1987), O'Donnell(1990)등도 저염수 분포와 구조가 주변수의 이동(조류 혹은 연안류)에 의해 영향을 받고 있음을 모델을 통해 보여주었다. Kourafalou et al.(1996)은 3차원 수치모델을 사용하여 풀룸 확장이 수평, 수직 확산계수와 방출량 그리고 해저지형 등에 의해 영향을 받을 수 있음을 보여주었다. 이처럼 저염수의 거동이나 구조 등은 연구대상지역의 물리적 환경요소들에 의해 결정되므로 이를 연구하기 위해서는 우선적으로 그 지역의 주된 환경요소에 의한 풀룸의 변화와 역학적 과정을 점검해야 할 필요성이 있다. 특히, 담수 풀룸에 대한 수치모델 연구의 대부분은 연구해역에서 배경유동으로 작용하는 조석을 포함하지 않았으며, 배경유동효과를 강제적인 혼합의 증가로 처리하고 있다.

본 연구에서는 관측에서 밝혀진 금강답수기원 저염수의 구조 및 화장 특성들의 원인과 풀룸발달의 물리적 과정을 수치모델 실험을 통하여 알아보자 한다. 연구대상 해역의 해저지형을 입력하고 실험조건에서 일정한 금강답수 유출량을 주었을 때 전향력, 조류 혹은 확산/혼합정도 등을 저염수의 거동에 영향을 미치는 주요 요인으로 선택하여 모델환경의 변화조건으로 하였다. 실험환경에 따라 재현된 각 모델결과와 관측된 금강답수 풀룸의 특성들을 비교하여 연구해역의 풀룸특성을 지배하는 요인을 도출하였으며 전향력과 조류포함 효과에 의한 모델풀룸의 형성과정 분석에 중점을 두었다.

## 수치모델

사용된 모델은 ECOM-si(Blumberg and Mellor, 1987)이며 Boussinesq 근사와 정수압근사를 사용하는 비선형 연안해양순환 모델이고, 운동방정식과 연속방정식은 수직방향에서 사용된  $\sigma$ -좌표계에서(Blumberg, 1992) 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{dUD}{dt} - fVD + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} + P_x + F_{xz} + F_x = 0 \quad (1a)$$

$$\frac{dVD}{dt} + fUD + gD \frac{\partial \eta}{\partial y} + P_y + F_{yz} + F_y = 0 \quad (1b)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial UD}{\partial x} + \frac{\partial VD}{\partial y} + \frac{\partial \omega}{\partial \sigma} = 0 \quad (1c)$$

(1a)에서  $\frac{dUD}{dt} = \frac{\partial UD}{\partial t} + \frac{\partial U^2 D}{\partial x} + \frac{\partial U V D}{\partial y} + \frac{\partial U \omega}{\partial \sigma}$ 은 관성력항,  $fVD$ 와  $gD \frac{\partial \eta}{\partial x}$ 은 전향력과 순압경도력항,  $P_x = \frac{gD^2}{\rho_0} \frac{\partial}{\partial x} \int_{\sigma} \rho d\sigma - \frac{gD}{\rho_0} \frac{\partial}{\partial x} \int_{\sigma} \sigma \frac{\partial \rho}{\partial \sigma} d\sigma$

은 경압경도력항이고,  $F_x = -\frac{\partial}{\partial x} \left( 2DA_M \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left[ DA_M \left( \frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) \right]$ ,  $F_{xz} = -\frac{\partial}{\partial \sigma} \left( \frac{K_M \partial U}{D \partial \sigma} \right)$ 은 수평과 수직 난류점성력항이다. (1b)에서도 각 항은 이와 유사한 형태로 표현된다. 주요변수들은 전통적으로 사용되어온 기호로 표현되었으며,  $D=H+\eta$ 는 총수심,  $\omega$ 는  $\sigma$ -평면에 수직인 속도성분이다. 수평난류점성계수  $A_M$ 은 Smagorinsky(1963)의 방법으로 계산하거나 혹은 상수로 주었다(Table 1). 수직난류점성계수  $K_M$ 을 결정하기 위해 난류운동에너지와 난류혼합거리 방정식을 포함하며 Mellor and Yamada(1982)의 “level 2.5 turbulent closure” 모델을 수정한 Galperin *et al.*(1988)의 방법을 사용하되 수직배경혼합(background mixing)을 포함시켜 혼합강도를 조절하였다(Blumberg, 1992). 밀도는 열과 염수송 방정식

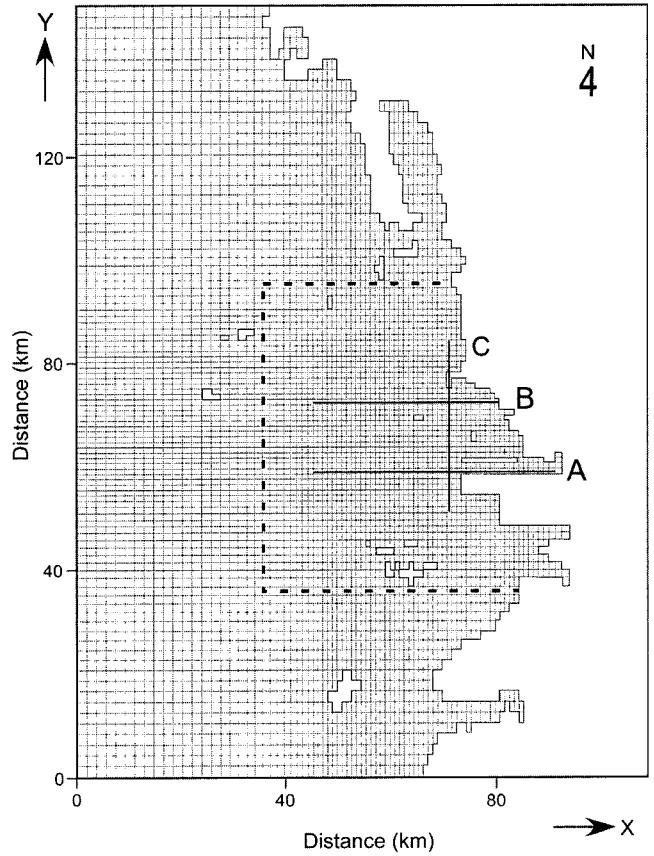


Fig. 2. Model grids constructed with 90×100 cells and three sections A, B and C for the analysis of vertical model-plume structure. Dashed line denotes area where horizontal and vertical eddy viscosity are averaged after 40 lunar days run.

을 끝 후 계산된다.

모델영역의 수평격자는 가변격자를 사용하였고( $\Delta x = 906 \sim 2174$  m,  $\Delta y = 1040 \sim 2080$  m) 총 90×100개로 이루어져 있다(Fig. 2). 북수로를 포함하기 위하여 1 km 구간을 연결수로로 설정하였고 남수로의 도류제와 주변의 넓은 간사지는 1 km 폭의 육지로 처리하였다. 수직방향으로는 등 간격의 16개 격자( $\Delta \sigma = 0.0625$ )로 구성하였다. 모델에서 사용된 수심은 Fig. 1b와 같다. 모델영역의 간사지에서  $M_2$ 분조의 진폭(2.3 m)보다 수심이 얕은 지역은 모두 육지로 처리하였으며 최저수심은 2.5 m로 설정하였다. 모델에서 해저면 마찰상수는  $C_d = \max[k^2/\ln(z_d/z_0)^2, 0.0025]$ ( $k$ : Von Karman 상수,  $z_d = H\Delta\sigma/2$ : 해저에 접하는 격자두께의 ½,  $z_0$ : 조도높이)로 계산되는데 본 연구에서는  $z_0 = 0.0012$  m로 사용하였다. 육지경계에서는 no-normal flow 조건을 가정하였고, 해수표면을 통한 열과 염의 유출입은 없는 것으로 설정하였다. 개방경계에서 온도 및 염분은 no-gradient 조건을 사용하였으며 해면은 “partially clamping” 기법(Blumberg and Kantha, 1985)을 사용하여 내부영역에서와 경계면에서 차이 값을 방사시켰다. 조석을 포함하는 모델은  $M_2$ 분조를 입력하였는데, 개방경계에서의 진폭과 위상은 한반도 주변 조석 조화상수 자료집(한국해양연구소, 1996)을 사용하여 구하였다. 시간적분간격은 모델의 안정화를 위해서 CFL조건을 만족시키는

Table 1. Summary of the numerical model conditions for constant discharge of 240 m<sup>3</sup>/s in the Keum River dyke. SM indicates Smagorinsky method used in horizontal eddy viscosity  $A_M$  calculation and GM denotes Galperin method with background mixing used in vertical eddy viscosity  $K_M$  calculation.

Exp.	Coriolis force	$M_2$ tide	$A_M$ (m <sup>2</sup> /s)	$K_M$ (m <sup>2</sup> /s)
Case 1	x	x	SM	GM with $10^{-5}$
Case 2	o	x	SM	GM with $10^{-5}$
Case 3	o	o	SM	GM with $10^{-5}$
Case 4	o	x	27.1	GM with $10^{-4}$

37.26초를 적용하였다.

모델 초기조건은 정지상태의 주변수이고 온도와 염분은  $17^{\circ}\text{C}$ , 33‰로 설정하였다. 담수유출량은 일정하게 하여 금강하구언의 연평균 담수방출량  $240 \text{ m}^3/\text{s}$ (농어촌진흥공사, 1996, 1997, 1998)을 주었다. 담수의 온도 및 염분은 밀도에의 영향인자를 단순화하고 모델결과 분석을 용이하게 하기 위해  $17^{\circ}\text{C}$ , 0‰로 설정하였다. 실험초기의 갑작스런 담수유출과 조석진폭 입력에 따른 충격을 최소화하기 위해 1 조석주기동안 유출량과 진폭을 “ramping” 시켰다. 담수방류가 유발하는 밀도차이 외에 저염수 거동에 미치는 주요 요인별 실험조건은 Table 1과 같다. 모델결과 분석에서 초기해수 염분보다 1‰ 낮은 32‰의 등염분선을 저염수 풀롬경계로 설정하였다.

## 모델결과

### 전향력 효과

연구해역에서 전향력 유무에 따른 저염수의 확장과 변화를 보기 위하여 수치모델 실험 Case 1과 Case 2를 수행하였다. 모델수행 10 태음일 후 표층의 염분과 속도분포 및 해면분포는 Fig. 3과 같다. 전향력이 없을 때, 저염수는 남수로 입구에서 외해로 넓게 확장되며, 표층속도는 해면경사를 따라 사방으로 퍼진다. 그러나 전향력을 고려했을 경우, 저염수 풀롬의 범위가 연안역에 국한되

고 30‰ 미만의 저염수는 남수로 입구에서 북쪽(오른쪽)으로 휘어지는 축을 형성하며 북쪽 연안을 따라 이동한다. 해면분포는 염분분포와 유사하며, 특히 저염수 축을 따라 해면이 1 cm 이상 높아져 있고, 해면경사가 급한 곳을 따라 강한 흐름이 형성되어 시계방향 순환을 구성한다.

40 태음일까지 수행된 Case 2 실험에서는 표층 저염수의 범위가 넓어지고 북쪽연안을 따라 연안류가 발달한다(Fig. 4a). 남수로 입구부터 저염수에 의해서 형성된 전선역(30~31‰)을 따라 빠른 시계방향 순환이 형성되었다. 시계방향 순환은 해면경사가 큰 지역에서 등고선과 평행한 흐름으로 이루어지고 순환의 중심에서 해면이 가장 높다. 10 태음일 후(Fig. 3b)와 비교하면 29‰ 이하의 저염수 유출방향이 남서쪽으로 바뀌었고, 시계방향 순환의 중심이 남서쪽으로 이동하였다. 해면아래 7 m 깊이에서(Fig. 4b) 남수로 외측에 표층 풀롬과 유사하게 시계방향 순환이 형성되었다. 32‰ 미만의 저염수는 북쪽 연안을 따라 확장하지만 북쪽의 연안류는 뚜렷하지 않다.

조석이 포함되지 않은 Case 1과 2의 수치모델 결과는 북서쪽 외연도 해역으로 저염수 축이 확장하는 관측된 금강 풀롬의 수평적 분포특성을 재현하지 못하였다. 하지만 전향력이 없으면 표층 저염수는 남수로 입구에서부터 방사형태로 퍼지는데 비해 전향력이 포함되면 하구입구로부터 저염수의 축은 발달하고 저염수에 의한 순환계가 만들어졌다. 이러한 실험결과의 차이는 전향력에 의

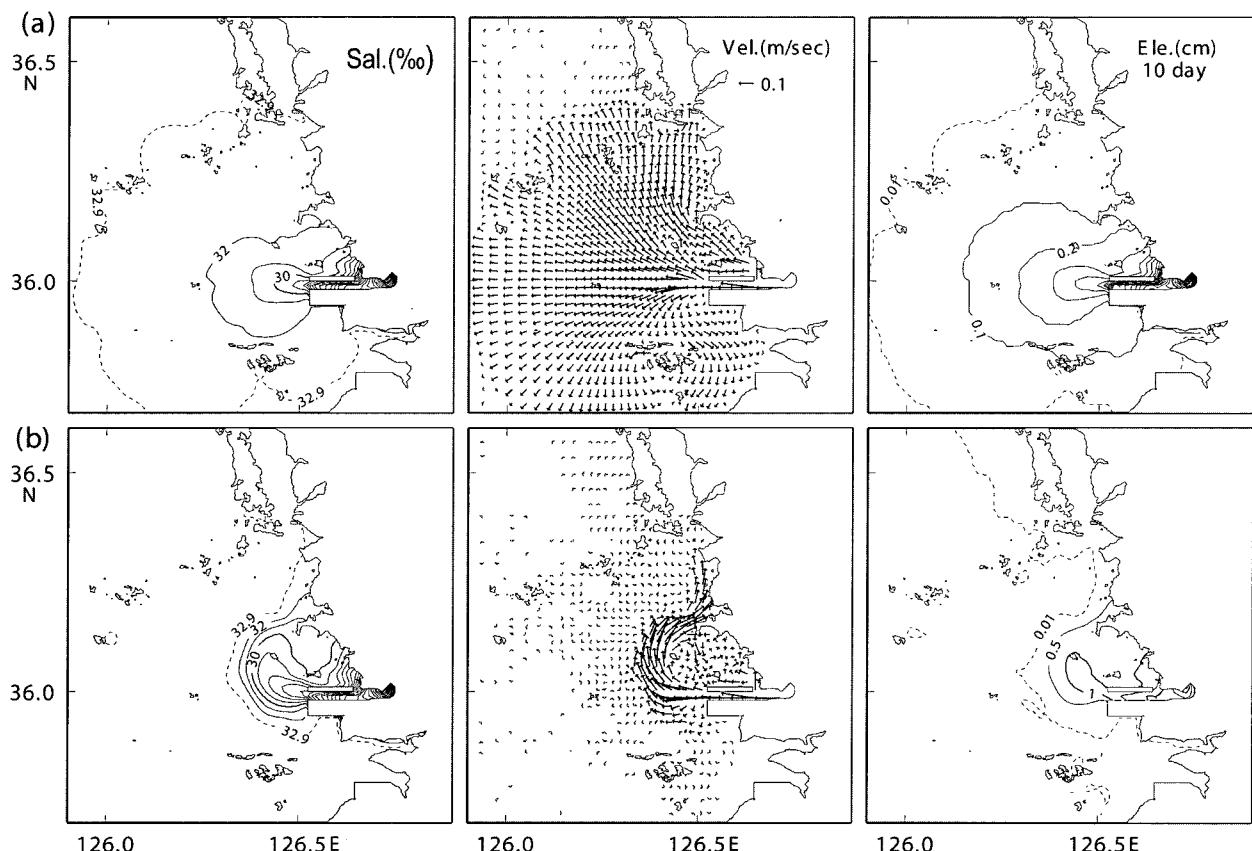


Fig. 3. Distributions of salinity and velocity at surface level and sea level height after 10 lunar days run in experiment (a) Case 1 and (b) Case 2. Velocities are plotted at every other grid point. See Table 1 for model conditions of Case 1 and 2.

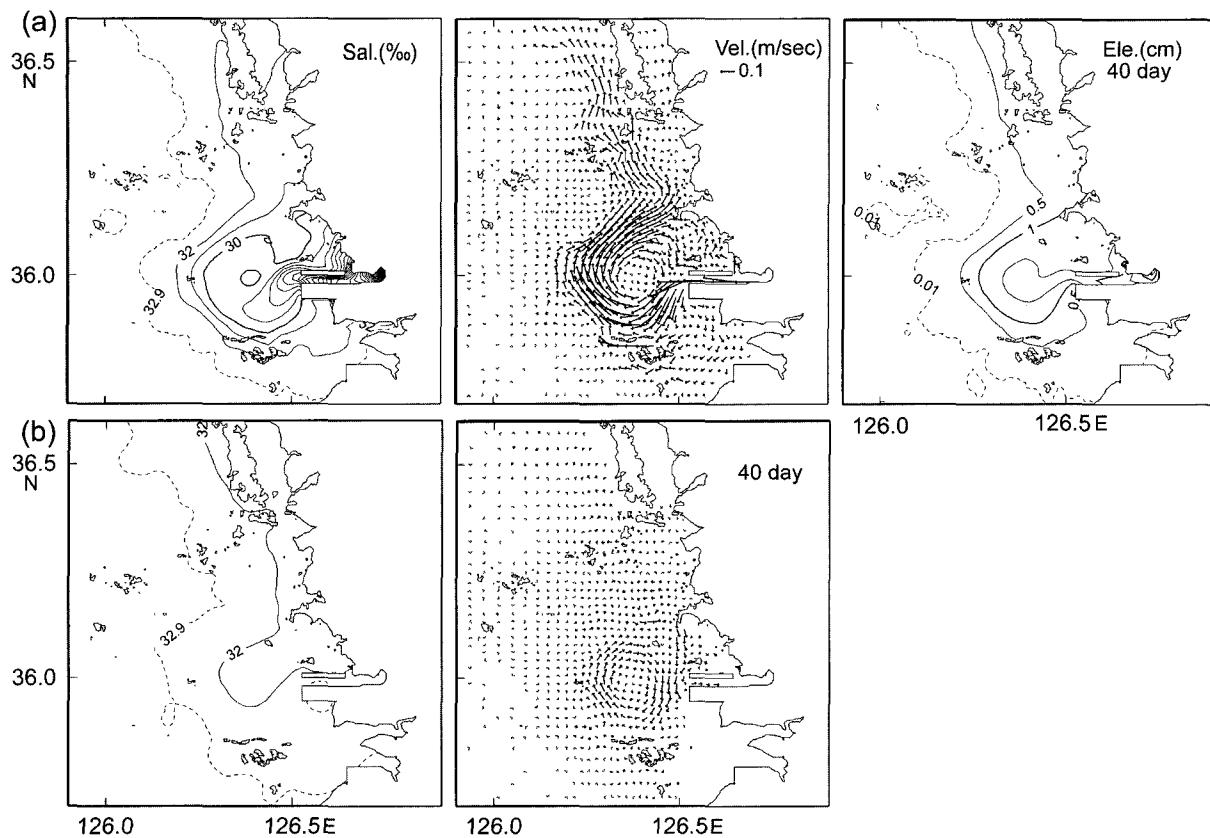


Fig. 4. Distributions of (a) salinity and velocity at surface level and sea level height and (b) salinity and velocity at 7 m depth after 40 lunar days run in experiment Case 2. Velocities are plotted at every other grid point.

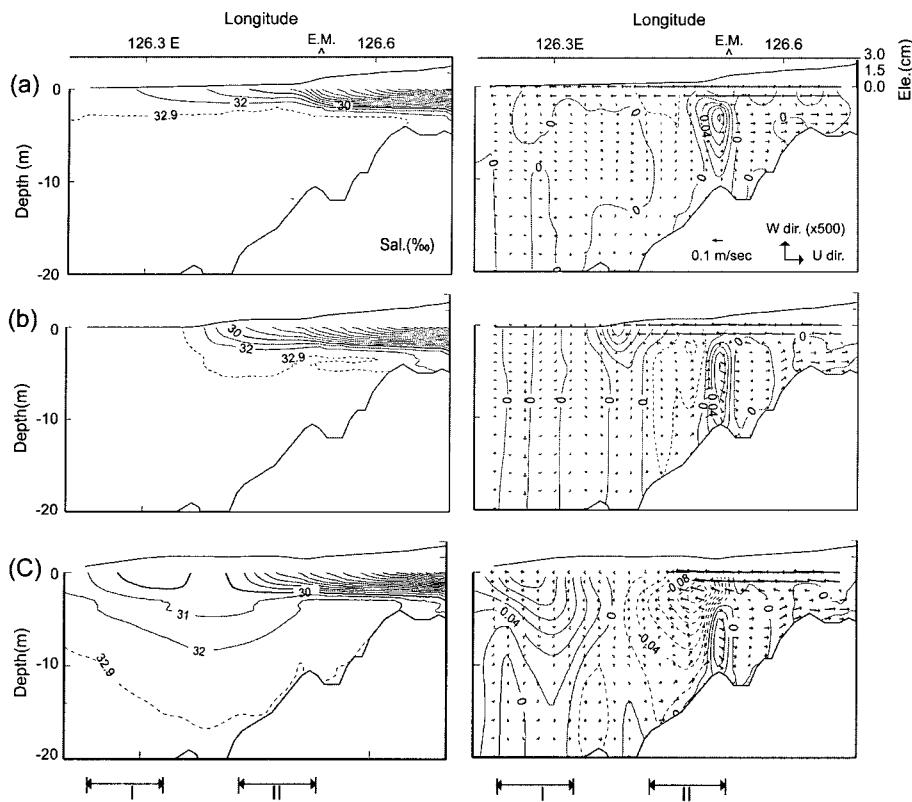
한 모델순환계의 형성과 변화과정에 대한 설명을 필요로 하여 모델결과를 분석해 보았으며, 분석결과가 기존의 모델풀룸 형성과정에 대한 설명(McCreary *et al.*, 1997)과 다른 부분에 대해서는 토의에서 논의하였다.

Case 1과 2에서 저염수가 유출되는 구조는 남수로를 따라 설정한 단면 A(Fig. 5)에서 볼 수 있다. 전향력을 무시했을 때 10 태음일 후 이층구조를 이루는 32‰ 이하의 저염수 두께가 하구입구 (Fig. 5a, E.M. 표시)에서부터 외해쪽으로 감소하고 저염수 유출속도는 표층에만 발달하였다. 하구안쪽(육지쪽)으로 향하는 저층 흐름은 밀도차에 의한 경압경도력이 해면경사에 의한 순압경도력보다 우세하기 때문이다(Dyer, 1973). 전향력이 포함되면, 10 태음일 후(Fig. 5b) 하구 내에서 저염수의 수직 두께와 순환형태는 전향력을 무시했을 경우와 유사하지만 하구외측 “I”과 “II” 지역사이 염분전선구조가 발달한 곳에서 해면경사가 증가하며 서향성분 유속이 뚜렷이 감소하고 북향성분의 유속이 강하게 발달하였다. 40 태음일 후는(Fig. 5c) 남수로 바깥쪽에서 32‰ 미만인 저염수의 두께가 8 m까지 증가하여 저염수의 누적현상을 보인다. 이곳을 중심으로 외해(“I” 지역)와 하구입구 쪽(“II” 지역)에서 반대방향인 남북방향 속도성분은 전향력에 의해 형성된 순환계 속도구조를 보여준다.

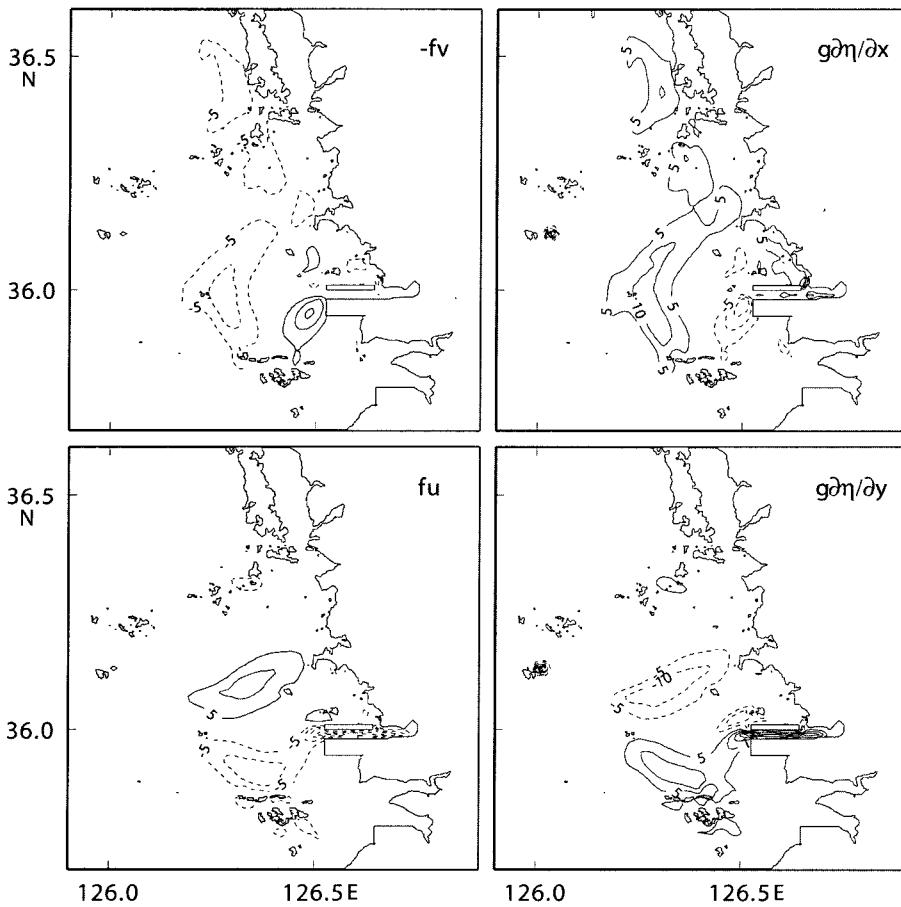
Case 2 실험에서 표층속도와 해면등고선이 평행한 경향과 단면 A에서 표층속도와 해면경사의 관계로부터 하구외측의 표층 풀룸

에서는 순압적 지형류 균형이 가장 뚜렷한 힘의 평형임을 짐작할 수 있다. 이를 확인하기 위해 40 태음일 후 표층에서 해면경사에 의한 순압경도력과 전향력의 성분크기를 도시하면 Fig. 6과 같다. 각 성분들이 염분전선을 따라 큰 값으로 나타나며 분포형태가 일치하여 표층에서 풀룸의 순환체계는 순압적 지형류 균형을 유지하고 있음을 볼 수 있다. 남수로 입구에서 저염수 풀룸이 남서쪽으로 편향되어 유출되는 현상도 주로 순압적 지형류 균형을 이루고 있어 저염수는 이 지형류에 의해 이동되며 축이 형성됨을 알 수 있다. 북쪽 연안을 따라서는 주로 동서방향의 지형류균형이 나타나지만 하구외측에 비해 성분크기가 작다.

이러한 분석을 바탕으로 조석을 포함하지 않았을 때 전향력에 의한 풀룸 발달과정은 다음과 같이 정리할 수 있다. 금강하구 남수로에서 유출되는 저염수는 일차적으로 유출관성과 전향력에 의해 남수로 입구에서 오른쪽(북쪽)으로 편향되며 빨달단계의 풀룸을 만들어 주변수와 강한 염분전선이 형성되고 염분전선을 따라 시계방향순환이 구성된다(Fig. 3b). 담수 유출이 지속되면 염분 전선역의 지형류는 증가하지만 시계방향의 순환을 이루므로 남수로에서 공급되는 저염수가 충분히 빠르게 주변해역으로 확장하지(해소되지) 못하기 때문에 염분전선은 남수로 외측에 저염수를 누적시키는 역할을하게 된다. 이 저염수의 누적으로 연속방정식 (1c)에 의해 남수로 입구외측의 해면은 계속 높아진다(Fig. 4a, Fig. 5b와 5c). 하구에서 유출되는 저염수는 남쪽의 해면경사가 크기 때



**Fig. 5.** Vertical sections of salinity and velocity components along A in experiment (a) Case 1 and (b) Case 2 after 10 lunar days run, and (c) Case 2 after 40 lunar days run. Sea level height is plotted above sections and E.M. denotes the location of southern channel mouth. Contours in velocity sections signify northward component (dashed lines: negative values). Roman numbers in bottom of (c) denote subregions for easy explanation.



**Fig. 6.** Distributions of Coriolis (left) and barotropic pressure gradient (right) acceleration (unit:  $10^{-6} \text{ m/sec}^2$ ) at surface level after 40 lunar days run in experiment Case 2.

문에(Fig. 6) 우세한 지형류 균형의 지배를 받아 축이 남서쪽(유출 방향의 왼쪽)으로 향하게 된다. 이 결과로 시계방향 순환의 중심이 점점 남서쪽으로 이동하게 된다. 한편, Fig. 4에서 북쪽연안을 따라 나타난 표층 모델연안류가 해면아래 7 m 깊이에서 뚜렷하지 않은 현상은 이 깊이에서 순압경도력이 경압경도력과 비슷한 크기로 되었기 때문인 것으로 해석된다.

### 조류 효과

조석이 포함되지 않은 Case 1과 2의 실험조건은 풀룸 속도만에 의한 수평, 수직난류점성력과 약한 수직배경흔합이 적용되었기 때문에 연구해역에서 배경유동의 우세한 요소인 조류에 의한 이류(advection)와 혼합/학산효과가 풀룸발달에 충분히 반영되지 않았다. Case 3 실험은 연구해역의 조류에 의한 배경유동효과를 반영하기 위하여 모델 외력으로 조석을 포함시킨 경우이다.

담수풀룸의 분포와 구조에 미치는 조류의 영향을 알아보기 위해서 먼저 모델조석을 검정하였다. 담수 방류가 없을 때 모델에서 재현된  $M_2$  모델조류 타원도(Fig. 7)는 금강하구 인근해역에서 북동-남서방향의 장축을 보이며 이 지역에서 관측된 조류도(수로국, 1989)의 장축방향과 잘 일치한다. 조류는 천수만과 만경강, 동진강 그리고 금강하구 수로에서 크다.  $M_2$ 분조의 조위 및 조류에 대해 진폭과 위상을 기준관측(Fig. 1a, 관측위치 참조) 값들과 비교하면 다음과 같다. 조위진폭과 위상에 대한 관측치와 모델값 차이의 평균은  $-2.28 \text{ cm}$ ,  $0.08^\circ$ 이고, 조류의 U 성분에서 차이 평균은  $-1 \text{ cm/s}$ ,  $15.8^\circ$ 이며 V 성분에서는  $-10.9 \text{ cm/s}$ ,  $-23.5^\circ$ 이다. 조위진폭과 위상에 대한 관측치와 모델값 차이의 표준편차는  $6.75 \text{ cm}$ ,  $4.54^\circ$ 이고 U와 V에 대해서는 각각  $10.4 \text{ cm/s}$ ,  $18^\circ$ 와  $9.23 \text{ cm/s}$ ,  $18.8^\circ$ 이다.

조석을 포함하여 수행한 Case 3 실험에서 40태음일 후 조석주기 평균된 표층 염분분포는 조석이 포함되지 않는 Case 2와 확연히 다른 분포를 보인다(Fig. 8a). 북서쪽 외연열도까지 길게 편향된 혁모양분포를 이루는 저염수의 축이 남수로 입구로 연결되지 않고 비인만의 저염수 덩어리(28% 이하)로 이어진다. Case 2(Fig. 5a)에서 나타났던 남수로 입구에서 남서쪽으로 저염수 유출은 없어지고 북쪽연안을 따라 길게 연결되었던 32%의 등염선은 범위가 확연히 축소되었다. 저염수 축 주변의 염분전선을 따라 넓은 범위의 제트류가 형성되어 시계방향 순환계를 이루며, 평균해면의 등고선을 따른 흐름이 우세하다. 이 순환계는 개야도 북쪽에 중심을 둔 소규모 순환계와는 나뉘어져 있다. 안면도 동쪽 천수만 입구와 외연열도 및 고군산군도 주변에서 나타나는 유속은 조석잔차류에 의한 것이다. 평균해면이 1 cm 이상인 구역이 Case 2에 비해 크게 넓어졌고, 비인만 외측에서 염분과 유사한 해면높이분포를 보인다. 해면아래 7 m 깊이에서(Fig. 8b) 32%의 등염분선이 북서쪽으로 확장된 혁모양분포로 나타나 표층과 유사한 풀룸 형태를 이루고 비인만 전체가 저염화되어 Case 2의 결과와는 차이를 보인다. 외해에는 북서향류가 나타나고 비인만 쪽에는 남향류가 형성되었다.

Case 3의 결과에서 나타난 표층저염수가 북서쪽 외연열도로 혁모양분포를 이루며 확장하는 형태는 하계 금강담수에 의한 저염수 분포조사(Lee et al., 1999, Fig. 6b; 최 등, 1999)에서 밝혀진 바와 매우 유사하다. 또한 저염수 덩어리가 비인만 입구에 나타나

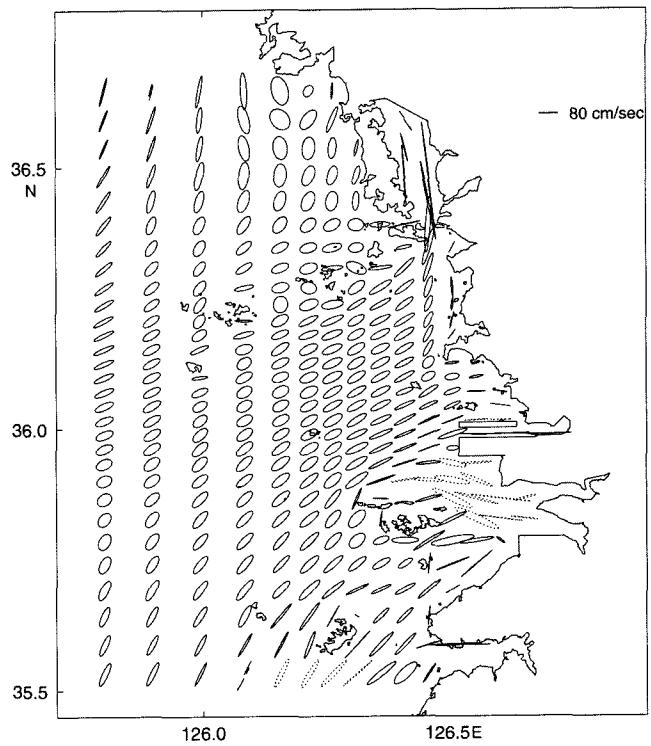


Fig. 7. Distribution of  $M_2$  tidal current ellipses at surface level obtained from the model without river discharge. Solid (dashed) circles denote cyclonic (anticyclonic) rotation.

는 현상도 관측결과에서 밝혀진 금강담수 풀룸의 핵구조 위치와 정성적인 일치를 보인다. 따라서 Case 1과 2와는 다르게 Case 3 실험에서 모델풀룸이 보이는 관측된 풀룸특성의 재현성은 연구해역에서 조류가 풀룸분포와 구조를 결정하는 주요요소임을 의미한다. Case 3 실험에서 포함된 조석은 조류에 의한 저염수 이류와 혼합효과를 가지므로 이러한 작용을 중심으로 Fig. 8의 모델풀룸 형태가 형성되는 기작을 분석하였다.

배경유동인 조류가 풀룸발달에 미치는 영향에서 먼저 조류에 의한 저염수의 이류효과를 파악하기 위해 모델수행 40태음일 후 조류위상에 따른 표층 염분분포의 변화를 분석하였다(Fig. 9). 하구입구역 저염수의 이류과정을 모델조류(Fig. 7)를 참조하여 살펴보면, 남수로내의 서쪽방향 낙조류에 의해 저조에는 27% 미만의 저염수가 남수로 입구를 통해 서쪽 외해로 유출되었고, 이 저염수는 창조동안에 하구밖의 북동방향 조류에 의해 북쪽에 있는 개야도 동편으로 이동하여 남수로 내의 저염수로부터 단절되어 분리된다. 고조에는 이 저염수가 개야도 북쪽 비인만 내로 이동하여 덩어리(patch)로 나타나며 낙조에도 개야도 북쪽에 28%의 저염수가 덩어리로 유지된다. 저염수가 조류에 의해 조석주기 평균으로 보았을 때 남수로에서 유출된 저염수를 북쪽으로 공급하므로 외해 풀룸이 북서쪽으로 발달하는데 중요한 역할을 한다. 특히, 29% 등염분선 범위는 낙조때에 연안쪽으로 축소되고 창조때에는 가장 멀어져 창조류에 의한 저염수 이류공급이 외해로 풀룸이 발달하는 원천임을 알 수 있다. 외해쪽에서는 조류의 왕복운동(Fig. 7)에 의해 풀

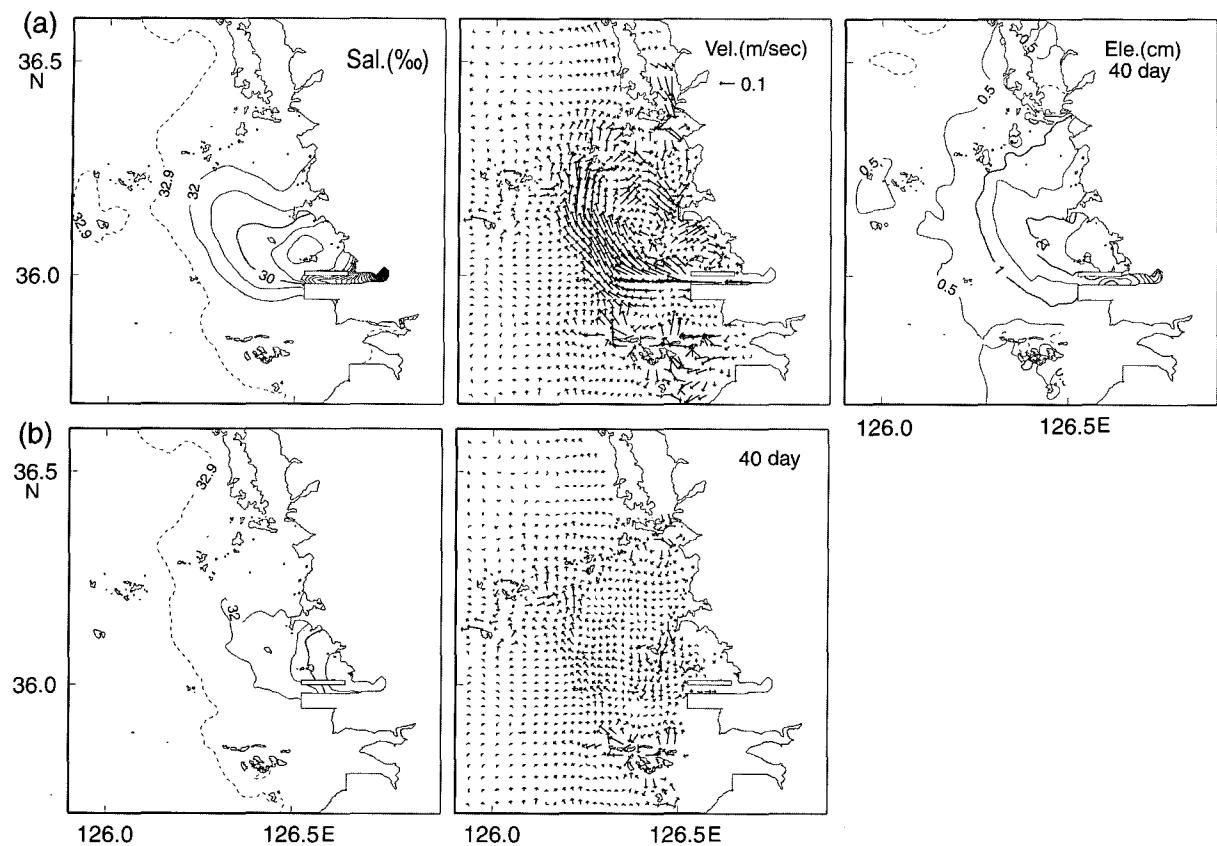


Fig. 8. Same as in Fig. 4 except for using tidally-averaged values in experiment Case 3.

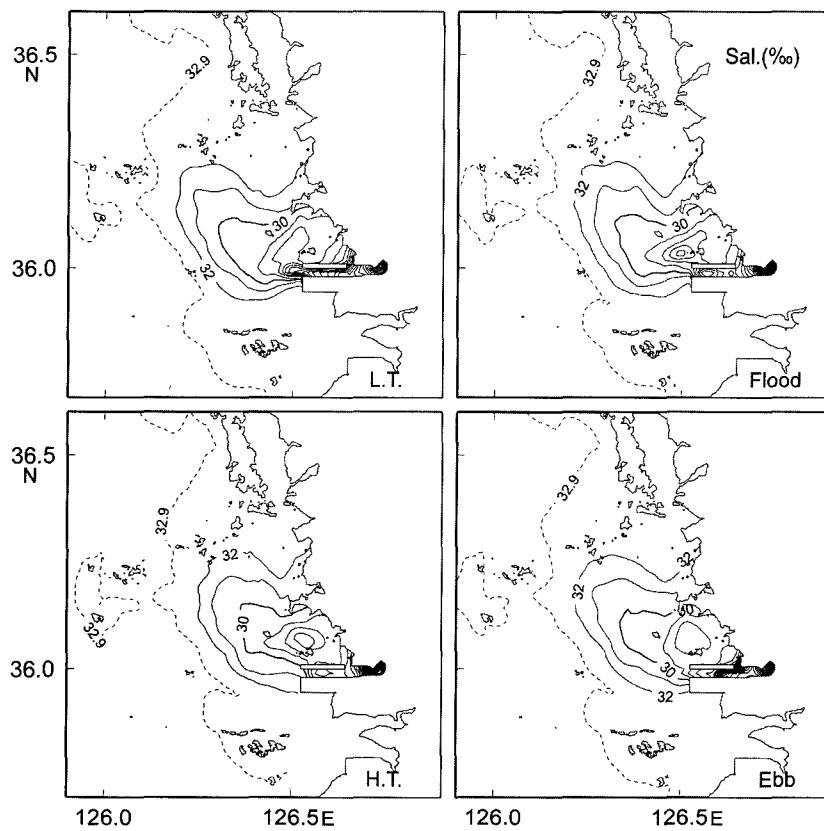
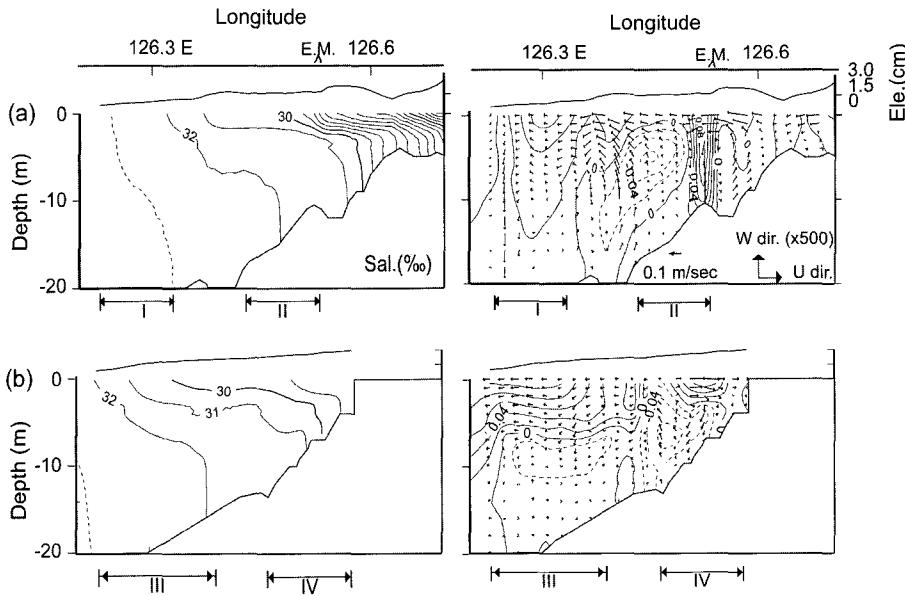


Fig. 9. Sequence of surface salinity distributions in four tide phases after 40 lunar days run in experiment Case 3.



**Fig. 10.** Vertical sections of tidally-averaged salinity and velocity components along (a) A and (b) B in experiment Case 3 after 40 lunar days run. Mean sea level height is plotted above sections and E.M. denotes the location of southern channel mouth. Contours in velocity sections signify northward component (dashed lines: negative values). Roman numbers in bottom of sections denote subregions for easy explanation.

룸의 혁도양분포(31~32‰ 등염선)가 북동-남서방향으로 이동하며, 이동거리는 약 8 km 정도이다.

한편, Fig. 9에서 저조이후 비인만에 분리된 저염수 덩어리의 염분은 변화를 보인다. 즉, 창조에 26‰ 미만이고 고조에는 27‰이며 낙조에는 28‰ 미만으로 계속 증가한다. 이 저염수 덩어리의 염분증가는 조류에 의한 희석/혼합과정이 조석주기동안에 활발히 진행됨을 의미한다. Case 3에서 포함된 조류의 혼합효과를 간접적으로 알아보기 위해 40 태음일 후 저염수 분포구역(Fig. 2 접선구역) 내에서 Case 2와 3 실험의 난류점성계수를 비교해 보았다. 조석이 포함되지 않은 Case 2에서는  $A_M$ 과  $K_M$ 의 공간적 평균이  $4.7 \text{ m}^2/\text{s}$  와  $1.8 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ 이고 조석이 포함된 Case 3에서 공간과 조석주기 평균된  $A_M$ 과  $K_M$  값이 각각  $27.1 \text{ m}^2/\text{s}$  와  $5.5 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ 이다. 이러한 난류점성계수의 차이는 연구해역에서 조류에 의한 수평 및 수직 혼합효과를 대변해 준다.

조류의 혼합효과는 단면 A와 B의 조석주기 평균된 풀룸의 수직구조에서도 나타난다(Fig. 10). 32‰ 이하의 저염수는 연안쪽으로 갈수록 두께가 증가하며 모든 등염분선이 해저바닥에 닿아 있고 저층에서는 염분이 균일한 층이 발달하였다. 단면 A의 풀룸구조는 Case 2(Fig. 5c)에 비해 염분성층이 약해졌으며 연구해역의 수층내 특히 저층에 수직혼합이 활발함을 제시한다. 염분단면에서 수직조류혼합에 의해 저층까지 염분이 낮아지므로 Case 3 실험에서 금강기원 담수가 수층내에 포함되는 효과는 Case 2의 저염수 누적현상에 비해 적지않다. 단면 A와 B에서 남수로 입구와 비인만 연안쪽으로 갈수록 높아지는 평균해면은 수층내에 담수가 효과적으로 혼합된 염분구조에 의한 것으로 해석된다. 한편, 단면 A의 속도구조는 Case 2(Fig. 5c)와 유사하지만 표층에 서향성분 유속이 증가되었다. 단면 B의 속도구조에서 의해("III" 지역) 염분전선역 표층에 북향류가 넓게 발달하였고, 연안쪽("IV" 지역) 표층에 발달한 흐름은 개야도 북쪽에 중심을 둔 작은 순환계의 일면이다(Fig. 8a참조).

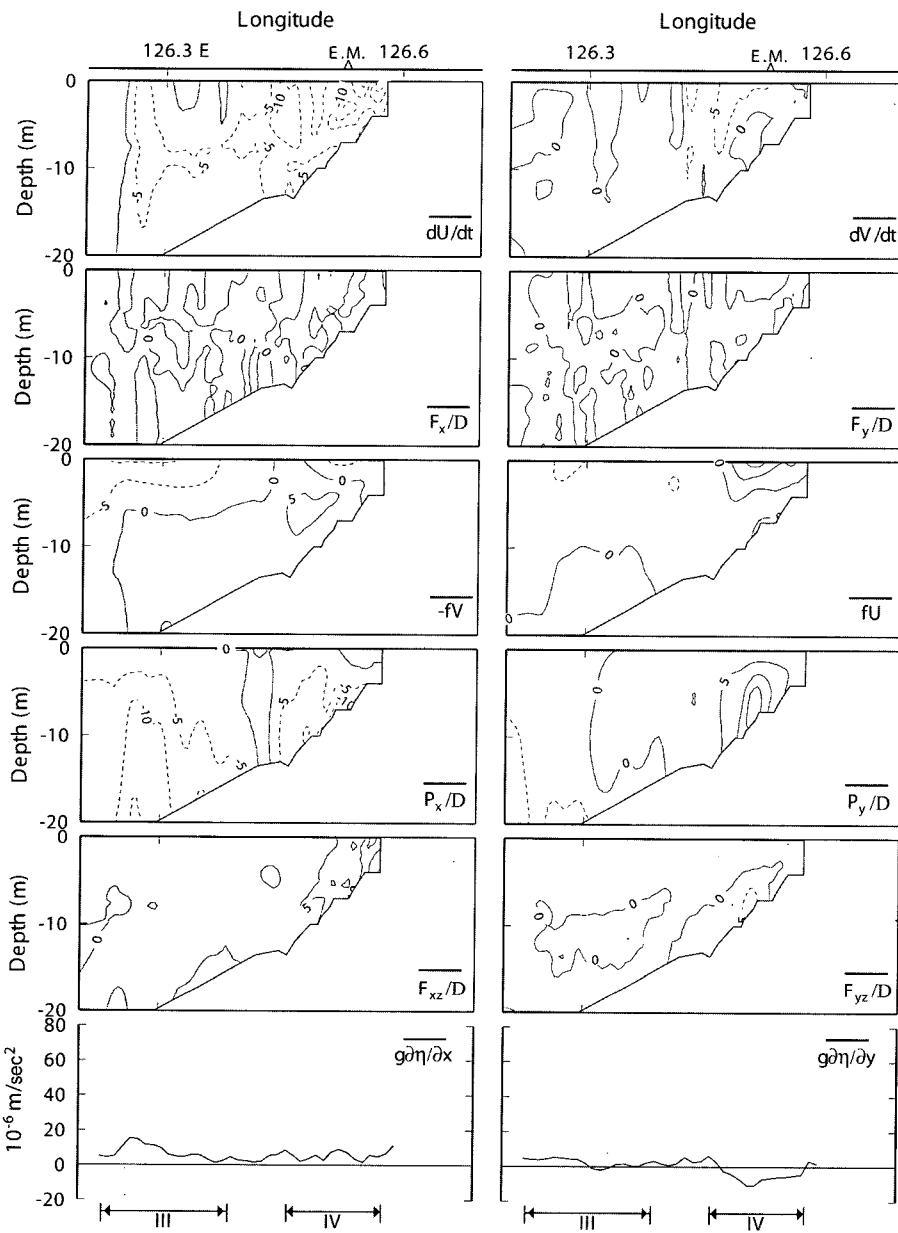
풀룸의 평균속도구조와 조류에 의한 혼합과정이 형성되는 역학

적 배경을 알아보기 위해 운동방정식 (1a)와 (1b)에서 각항을 수심  $D$ 로 나누어 가속도 항의 조석주기 평균크기를 계산하였다. 단면 B는 북서쪽으로 확장하는 풀룸과 시계방향 순환계의 중앙부를 가로지르므로 단면 B의 가속도 수직분포를 살펴 보았다(Fig. 11, 왼쪽; 동향성분, 오른쪽; 북향성분). 외해쪽인 "III" 지역의 동향 가속도 항들에서 관성력과 표층에 발달한 북향류에 의한 전향력 그리고 순압 및 경압경도력이 상대적으로 크다. 북향 가속도 항들의 크기는 작지만 지형류 균형이 우세하다. 따라서 외해 풀룸에서의 주된 힘의 균형은 (2)과 같이 구성되며(각 항은 조석주기 평균치임), 표층에서는 전향력과 순압경도력이 주된 균형을 이루고 있다.

$$\frac{d\bar{U}}{dt} - \bar{fV} + g\frac{\partial\bar{\eta}}{\partial x} + \frac{\bar{P}_x}{D} = 0 \quad (2a)$$

$$\bar{fU} + g\frac{\partial\bar{\eta}}{\partial y} + \frac{\bar{P}_y}{D} = 0 \quad (2b)$$

연안역인 "IV" 지역에서는 (2)의 항들에 수직난류점성력( $\bar{F}_{xz}/D$  와  $\bar{F}_{yz}/D$ )이 추가되며, 북향가속도에서 관성력( $dV/dt$ )이 추가된다. 이 지역에서 강조되어야 할 힘은 수직난류점성력인데, 조류에 의한 마찰력으로서 수직조류혼합 효과를 유발한다. 조류혼합 효과는 수심이 얕은 연안쪽에서 크게 증가하므로 연안 저층수의 저염화와 표층수의 고염화가 촉진되며 하구에서 공급된 저염수가 효과적으로 주변수에 수직적으로 퍼지게 한다(Fig. 8b, Fig. 10참조). 이와 더불어 수평난류점성력은 조류속도의 공간적 차이에 의해 변화를 유발할 수 있는데 Fig. 11에서  $\bar{F}_{xz}/D$ 와  $\bar{F}_{yz}/D$ 의 크기는 뚜렷하지 않지만 수직구조는 많은 변화를 보인다. 이러한 난류점성 항들은 염분의 수직적 구조를 변화시키고 이로 인해 내부 밀도차에 의한 경압경도력이 공간적으로 변화될 수 있다. 한편, 관성력은 굴곡이 많은 해안선과 해저지형에 의한 왕복성 조류의 공간적 변화 혹은 성층유체에서의 조석잔차류 발생 등에 의한 것으로 추정할 수 있지만 본 연구에서 이를 분석하기에는 너무 복잡하다.



**Fig. 11.** Vertical distributions of accelerations (top to bottom; inertia, horizontal eddy friction, Coriolis, baroclinic pressure gradient, vertical eddy friction) and variation of barotropic pressure gradient acceleration (unit:  $10^{-6} \text{ m/sec}^2$ ) in eastward (left) and northward (right) direction, averaged over a tidal period along section B after 40 lunar days run in experiment Case 3. E.M. denotes longitude of the southern channel mouth. Roman numbers in bottom plot denote the same subregions as in Fig. 10b.

이상의 모델결과 분석으로부터 조류가 저염수 분포에 영향을 미치는 역학적 과정들은 다음과 같이 설명할 수 있다. 먼저 표층 저염수가 남수로 입구로부터 분리되어 덩어리 형태로 비인만에 나타나는(Fig. 8a, Fig. 9) 원인은 남북 수로입구와 비인만 해역에서는 조류가 동서방향이고 외해쪽 조류의 주방향이 북동-남서방향이기 때문이다(Fig. 7). 즉, 남수로 내 저염수는 낙조류에 의해 저조까지 서쪽으로 유출되고 저조이후 조류가 전류되면 하구 밖에서는 창조류가 이 저염수를 북쪽으로 이동시킨다. 창조동안의 저염수 이동은 최 등(1999, Fig. 8)이 관측한 하구입구외측의 조류이동과 부합된다. 모델결과에서 창조동안 남수로 내 저염수는 하구밖으로 유출되지 않는데(Fig. 9), 이는 이 등(1999)과 이 등(2001)의 관측 결과와 부합된다. 이러한 조석주기동안의 조류에 의한 저염수 이동 과정은 남수로 입구에서 북쪽(오른쪽)연안으로 저염수를 공급한다

. 한편, 조류혼합작용은 풀룸 발달과정에서 평균해면 높이와 표층 저염수분포를 결정하는 중요한 역할을 한다. 남수로에서 북쪽으로 공급되는 저염수는 조류혼합효과에 의해 수층내에 회석되어(Fig. 9, Fig. 11) 평균해면이 높아지게 한다. 평균해면의 경사진 지역(염분 전선)에서 발달하는 표층지형류(식 (2) 참조)는 조류이동에 의해 남수로에서 공급된 저염수를 북서쪽 외해로 재공급하여 저염수 축을 발달시킨다. 저염수 축의 북측 연안쪽에서는 표층지형류가 남동쪽으로 향하여(Fig. 8a) 풀룸이 북쪽연안을 따라 발달하는 것을 억제 한다. 이와 더불어 하구북쪽 연안을 따라서는 조류에 의한 활발한 수직혼합작용이 표층염분을 증가시키는 역할을 한다. 이러한 조류에 의한 저염수 이류공급과 혼합작용 그리고 평균해면경사에 의한 표층지형류는 풀룸이 북서쪽 외해로 확장하는 염분의 혁모양분포를 이루게 되는데 기여한다.

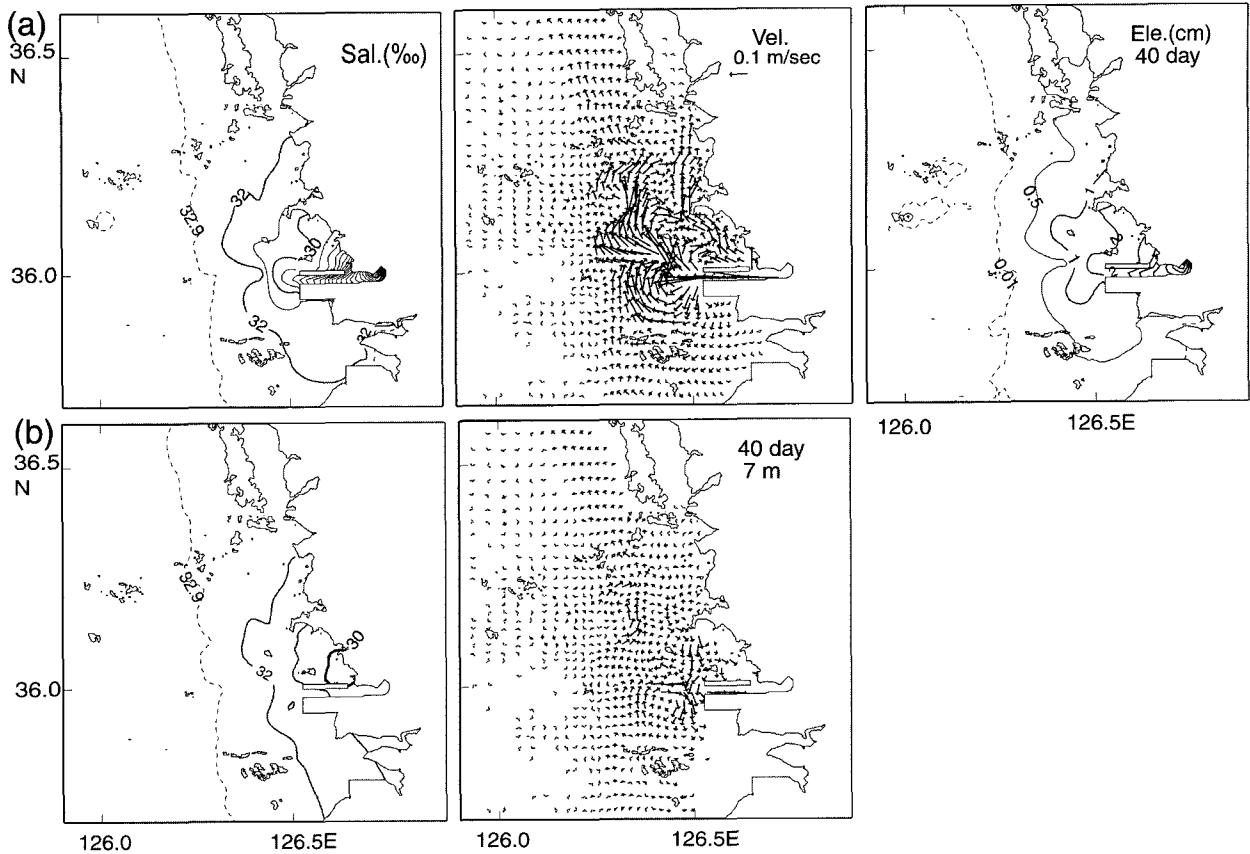


Fig. 12. Same as in Fig. 4 except for in experiment Case 4.

### 강제혼합 효과

Case 3 실험은 조류에 의한 저염수 이류와 혼합작용으로 풀룸의 수평적 분포형태가 Case 2의 경우와는 확연히 달라진 결과를 보여주었다. 조류에 의한 두 가지 과정의 상대적 중요성을 보기 위해서는 두 작용을 별도로 구분하여 실험해야 하지만 Case 3 실험에서는 조류에 의한 배경혼합 효과와 이류과정을 분리하여 입력할 수 없었다. Case 4는 연구해역에서 조류에 의한 이류과정없이 배경혼합이 풀룸발달에 미치는 영향만을 보기 위해 Kourafalou *et al.*(1996)의 경우와 유사하게 인위적으로 혼합효과를 증가시킨 실험이다. Case 4의 실험조건은 조석이 포함되지 않은 경우를 설정하고 Case 3의 혼합효과에 의한 수직염분구조가 적절히 나타나게 하기위해 수행한 여러실험 중에서  $A_M$ 을 Case 3 실험에서 구해진  $27.1 \text{ m}^2/\text{s}$ 로 일정하게 하고  $K_M$ 은 Galperin *et al.*(1998)의 방법을 사용하여 수직배경혼합을  $10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ 로 증가시킨 경우이다(Table 1).

Case 4 실험에서 남수로 입구로부터 외해로 향하는 표층 저염수 축이 나타나지만 북서쪽으로 확장하는 범위가 Case 3에 비해 매우 축소되었다(Fig. 12). 남수로를 통한 표층 저염수 유출흐름은 해면경사가 급한 곳을 따라 남쪽과 북쪽으로 나누어지며 남쪽에서는 시계방향 순환을 만들고 북쪽에서는 염분전선을 따라 강한 북향류가 형성된다. 비인만에서는 연안쪽의 흐름이 북서쪽으로 향하여 외해쪽 흐름과 분리되어 있다. 이로 인해 표층흐름은 한 방향의 순환계를 형성하지 못한다. 해면 아래 7 m 깊이에서 외해쪽은 표층과 유사한 흐름이 형성되었지만 비인만 입구에서는 남향

류가 발달하였다. 단면 A와 B(Fig. 13)에서 동염분선이 연안쪽 저층으로 깊어져 Case 2에 비해 증가된 수직혼합의 효과를 보인다. 단면 A의 염분구조는 Case 3에 비해서 저층 혼합층의 발달이 미약하지만 수직성층이 유사한 구조이고 단면 B의 염분구조는 혼합효과가 다소 크게 나타났다. 단면 A에서는 남수로 내에 Case 3의 경우보다 증가된 순환구조가 나타났고 단면 B에서는 “III” 지역의 북향성분 유속이 증가하였다.

Case 4 실험의 염분과 속도분포 및 구조에서 Case 2와 3 결과의 일부 특성들이 나타나는 것처럼 보이지만, Case 2에서 보이던 저염수 축의 남쪽 편향(Fig. 4a참조)이 나타나지 않았고 남수로 외측의 저염수 누적으로 인한 시계방향 표층순환이 충분히 발달하지 못하다. 또한, Case 3에서 보이던 북서쪽으로의 저염수 확장축의 발달이 확연히 축소되었고 비인만 입구에 저염수 덩어리도 나타나지 않았으며, 관측된 금강풀룸의 특성을 재현하지 못하였다. 따라서 수평난류점성계수와 수직배경혼합을 강제적으로 증가시키면 Case 2에서 나타난 저염수 누적현상은 약해지고 북쪽 연안을 따른 표층 저염수의 확장범위도 축소되지만 Case 3에서 나타난 하구 북쪽으로의 저염수 이류공급 효과는 구현되지 않으며 이로 인해 북서쪽 외해으로의 풀룸 축 발달이 잘 재현되지 않을 수 있다.

한편, 본 논문에서는 보여주지 않았지만 여러경우의 수평, 수직난류점성계수를 사용하여 풀룸분포를 실험하였을 때 풀룸의 발달은  $A_M$  값보다는  $K_M$  값 혹은 수직배경혼합에 민감한 반응을 보였

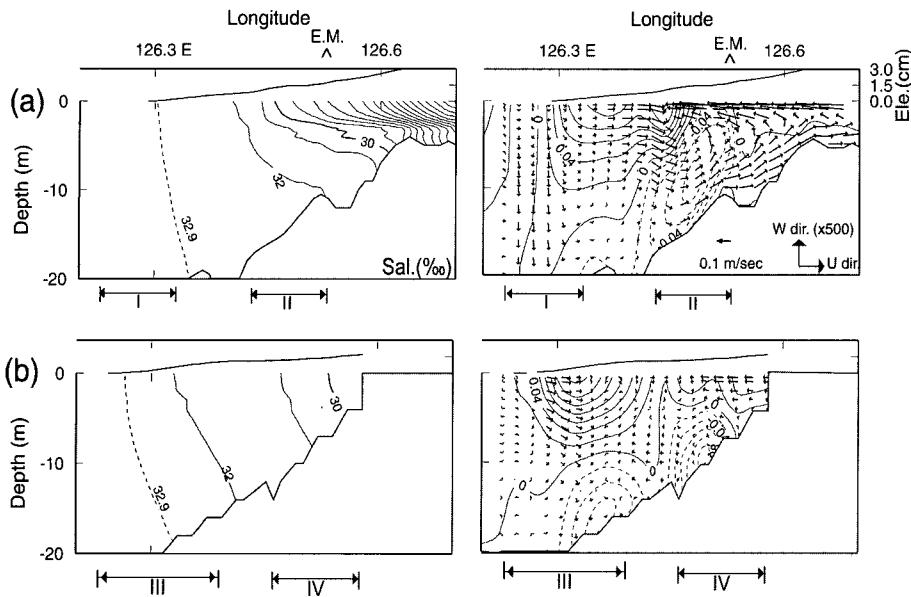


Fig. 13. Same as in Fig. 10 except for instant values in experiment Case 4.

으며, 이중 Case 4 실험의 염분수직구조가 비교적 Case 3과 유사하였다.  $A_M$ 을 Case 4와 같은  $27.1 \text{ m}^2/\text{s}$ 로 주었지만  $K_M$ 은 Gaperin *et al.*(1988)의 방법을 적용하지 않고 일정한  $7 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ (Case 3의 평균치와 유사함)로 주었을 경우에는 수직적으로 염분이 완전히 혼합되고 저염수가 하구주변 연안역에 좁게 국한되어 풀름이 발달하지 않았다. Kourafalou *et al.*(1996)은 5 km 격자 모델결과로부터 수심과 해안선 변화가 없는 조건에서의 담수유출량에 의한 관성력 효과와 하구 밖에서의 혼합효과의 비율에 따라 모델풀름 형태를 분류한 바 있다. 조석이 포함되지 않은 조건에서 혼합효과를 변화시키기 위해 수평, 수직난류점성/학산계수를 조절하였는데 수직혼합효과가 큰 경우의 풀름분포는 저염수 축이 발달하지 않은 형태로 오른쪽으로 확장되었다(Kourafalou *et al.*, 1996, test 3.2, 2.3). 본 연구의 Case 4가 Kourafalou *et al.*(1996)의 결과와는 다른 풀름 형태를 보이는 것은 수직배경혼합의 차이뿐만 아니라 격자크기의 차이, 수심과 지형변화 등에 의한 것으로 보인다.

## 토의 및 요약

조류이동과 혼합을 충분히 고려하지 않았을 때(Case 2) 모델풀름은 관측된 금강 풀름 분포특성과는 다른 결과를 보였지만 풀름 형성기작에 대한 설명은 토의되어야 한다. 담수 풀름이 만드는 시계방향 순환은 O'Donnell(1990)의 모델결과들에서도 보여졌으나 담수공급이 지속되면 저염수 유출방향이 변화되는 현상과 그에 따른 순환중심 이동은 논의되지 않았다. McCreary *et al.*(1997)과 Bang and Lie(2000)는 40일 이상 담수가 유출되었을 때 본 연구의 Case 2와 유사하게 하구입구의 왼쪽(남쪽)으로 저염수의 축이 휘어지는 결과를 보여주었다. 이러한 저염수 축의 편향에 대해 McCreary *et al.*(1997)는 외해쪽에 형성된 염분전선을 따라 발생하는 오른쪽방향 흐름에 대한 보류로 설명하였고, Bang and Lie(2000)도 양자강 풀름 수치모델에서 나타나는 북쪽으로의 저염수 유출에 대해 보류개념의 설명이 더 타당한 것으로 보인다고 하였

다. 하지만 이러한 연구들은 저염수 확장의 역학적 기작에 중요한 부분을 차지하는 해면경사 효과를 고려하지 않거나 분석해보지 않은 상태에서 설명하였으므로 하구입구에서 왼쪽으로의 저염수 유출을 보류로 설명하는 것은 적절하지 않다고 판단된다. 따라서 조석없이 전향력이 포함된 경우 하구입구에서 유출되는 흐름이 남쪽으로 편향되는 과정과 그에 따른 순환중심의 이동은 본 연구의 Case 2 실험에서 분석된 바와 같이 의해 염분전선에 의한 저염수의 누적으로 해면이 높아지고 이로 인해 하구입구부근에서 발달되는 순압적 지형류에 의한 것으로 해석되어야 한다. Case 2 실험에서 나타난 개야도와 연도 사이의 표층에 나타나는 유속이 작은 남향류(Fig. 4a)도 보류라기보다 저염수 누적으로 발생되는 시계방향 순환의 일부로 해석되어야 할 것이다. 또한 남수로 외측 중층(Fig. 4b, Fig. 5c)의 남향류는 시계방향 순환의 일부로서 저염수 누적에 효과에 의해 형성된 압력경도력이 중층에서도 우세하여 발생하는 것으로 판단된다.

조석이 포함된 수치모델 실험 Case 3에서 저염수의 축이 비인만 입구로부터 북서쪽으로 길게 편향되며 저염수 축의 폭이 확대되는 결과를 보였고 북쪽 연안을 따라 확장되는 것도 억제되었다. 이 결과는 관측된 금강 풀름의 수평적 분포특성을 유사하게 재현하고 있다. Case 2와 다른 이러한 모델결과는 조류이동에 의한 남수로 입구로부터 북쪽으로의 저염수 이류공급과 조류혼합에 의해 조절되는 내부밀도구조 및 해면분포로 인하여 풀름의 분포와 구조가 조류가 없는 경우들과는 다르게 결정되기 때문으로 분석되었다. 모델풀름에서 전향력의 효과는 조석주기 평균유속이 염분전선을 따라 우세한 해면경사에 의한 지형류 균형으로 나타났다. 비인만을 인위적으로 육지로 만든 경우에도(본 연구에서는 보여주지 않았음) 남수로에서 유출된 저염수가 조석위상에 따라 수로입구에서 덩어리 형태로 분리되지는 않았지만 위와 같은 저염수 확장과정은 유지되었는데, 이는 비인만 지형이 금강풀름의 형성에 미치는 영향은 미약함을 의미한다. Garvine(1974, 1975, 1977)는 Connecticut River 풀름이 낙조때는 동쪽으로, 창조때는 서쪽으로

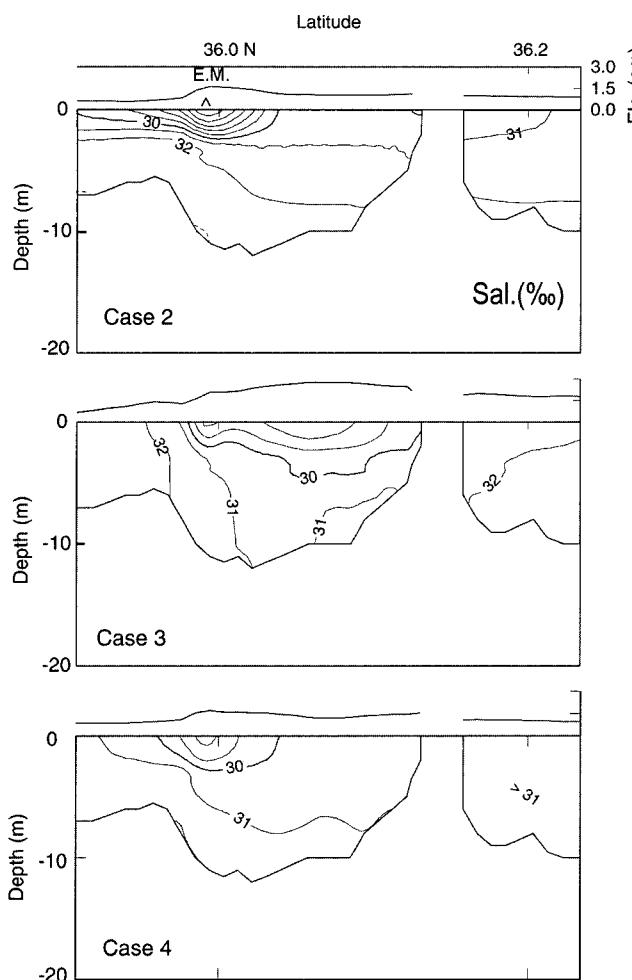


Fig. 14. Vertical sections of salinity along C in experiments Case 2, 3 and 4 after 40 lunar days run. Tidally-averaged salinity is used in Case 3 and sea level height is plotted above sections.

편향되는 것을 관측하였는데 이러한 풀룸거동은 해안선과 평행한 조류타원의 주방향에 의한 것으로서 본 연구해역과 다른 조류에 의한 이류효과가 나타나는 경우이다.

한편, 관측에서 밝혀진 하구입구부근 남북단면에서 보이는 비인만쪽 저염수 핵구조와 등염분선이 북쪽 저층으로 기울어지는 현상(이 등, 1995; Lee et al., 1999, Fig. 8)을 모델결과에서 검토해 보기 위하여 단면 C의 염분분포를 비교해 보았다. 전향력을 포함하지 않은 경우에 저염수는 하구입구를 중심으로 대칭적 구조를 보인데 비하여(Case 1, 본 연구에서는 제시하지 않음) 전향력이 포함된 Fig. 14의 단면구조들은 남수로 입구 북쪽의 수층내 염분이 많이 낮아져 저염수가 하구 북쪽으로 더 많이 확산되었음을 알 수 있다. 저염수의 표층 핵구조는 조석운동이 포함되지 않았을 때 (Case 2와 4) 남수로 입구에만 형성되지만, 조석운동을 포함하였을 때(Case 3)는 북쪽 비인만 쪽에서 핵구조가 넓게 잘 발달하여 관측된 금강 풀룸 특징이 적절히 재현되고 있음을 보여준다. 따라서 조석이 포함되지 않은 모델실험에서는 관측된 현상과 다른 풀룸 분포와 구조가 만들어지므로 금강 담수 풀룸의 기본적 특성을

잘 재현하기 위해서는 조석운동을 모델에 포함하여야 한다. 특히, 연구해역에 대한 네가지 실험조건에 따른 모델결과에서 Case 3 실험의 풀룸이 오른쪽으로 편향된 저염수 축을 가지며 잘 발달된 혁모양분포로 나타났으며 이는 주변수의 배경유동인 조류가 포함되어 저염수의 조류이동과 혼합효과가 동시에 포함되었을 때 가능하였다. 이러한 모델풀룸 실험결과의 차이는 연구해역의 경우 조류에 의한 저염수의 이류공급과정이 풀룸발달에 매우 중요하며 전향력 (Case 2)과 의도적인 난류점성/확산계수의 조절(Case 4)에 의해서 관측된 풀룸과 유사한 특성을 갖는 풀룸이 구현될 수 없음을 의미한다.

Case 3 모델에서 재현된 금강담수 풀룸의 확장방향, 거리 및 구조에 대한 결과들은 연평균 방류량과  $M_2$  분조만을 고려한 것으로 극단적인 여러 상황을 대변하지는 못한다. 금강 하구언으로부터 담수 방류량은 양자강(연평균 방류량은  $28,400 \text{ m}^3/\text{s}$ , Shen et al., 1998) 등의 대규모의 담수 방출에 비하면 매우 작지만 여름철 집중호우시  $4,000 \text{ m}^3/\text{s}$ (농어촌진흥공사, 1998; 8월)에 달한다. 또한 하구언 수문조절에 의해 낙조시에만 간헐적으로 담수방류가 이루어진다. 금강담수 방출량이 여름철 집중호우에 의한 홍수시 담수 방출이 급격히 증가되거나, 계절적 타월풍 혹은 태풍통과 등의 극단적 기상조건이 가해지면 담수 풀룸의 확장범위와 구조가 달라질 수 있다. 수치모델에서 밝혀진 금강 풀룸의 평균적 구조와 확장범위는 태안반도 주변의 조석전선역을 포함한 황해중부 연안역의 물질순환이나 해류, 물성분포에 큰 영향을 미칠 수 있음을 시사하므로 차후 대규모 방류 등 방류량과 방류주기 및 바람변화에 따른 풀룸 변동에 대한 연구가 필요하다.

본 연구결과를 요약하면, 조석이 포함하지 않은 모델의 경우 금강하구에서 장기간에 걸쳐 유출된 저염수는 염분전선에 의해 하구입구 외측에 누적되고 표층에서 순암자형류 균형으로 저염수 축이 남수로 입구에서 남쪽으로 편향된다. 조석이 포함되면 전향력 효과와 조류에 의한 저염수 이류공급 및 혼합효과로 저염수 축은 북서쪽으로 편향되며 길게 확장되어 나타난다. 인위적인 난류점성 계수의 증가에 의해서는 조석을 포함했을 때의 저염수 축 발달이 재현되지 않았다. 관측된 금강담수 풀룸의 분포형태 및 범위와 비인만 입구에 나타난 저염수 핵구조는 조석이 포함된 모델결과에서 유사하게 재현되었다. 따라서 관측된 금강 풀룸의 특성들은 조류에 의한 저염수 이류공급과 혼합작용 그리고 전향력에 의해 지배되고 있음을 알 수 있다.

## 사 사

본 연구는 과학기술부와 한국과학재단이 지역협력센터로 지정한 군산대학교 새만금환경연구센터(SERC)의 지원과 해양수산부 KSGP(2000)의 일부지원에 의해 수행되었다. 논문의 그림들을 정리하고 개선해준 권효근군에게 감사하며, 논문의 체계화와 결과해석이 보다 선명해 질 수 있게 의견을 주신 전남대학교 조양기 교수와 한국해양연구원 이종찬박사에게 감사한다.

## 참고문헌

- 군산항 건설사무소, 1993. 금강 하구 수리현상 조사 보고서.  
김경렬, 기준학, 1987. 금강하구에서의 화학적 생물학적 제과정에

- 관한 연구, 1. 질소계 화합물의 순환: 전반적인 고찰. *한국해양학회지*, **22**: 191–206.
- 나태경, 1993. 금강 및 금강 하구에서 부유퇴적물 이동과 미량 금속 원소들의 변화성. 서울대 석사학위논문, 89p.
- 농어촌 전홍공사, 1996, 1997, 1998. 일일 수문일지.
- 수로국, 1989. 조류도(군산항 부근). 서지 제 1432호.
- 신은주, 2001. 금강답수 풀룸의 거동 및 구조. 석사학위논문집. pp. 53.
- 이상호, 최현용, 오임상, 1995. 하계 금강 풀룸의 구조와 변동. *한국해양학회지*, **30**: 125–137.
- 이상호, 권효근, 최현용, 양재삼, 최진용, 1999. 하구언 수문작동으로 인한 금강 하구역의 물리적 환경변화 II. 염분구조와 하구 유형. *한국해양학회지-바다*, **4**(4): 255–265.
- 이상호, 최현용, 권효근, 2001. 하구언 수문작동으로 인한 금강 하구역의 물리적 환경변화 III. 저염수의 조석동조. *한국해양학회지-바다*, **6**(3): 115–225.
- 이원호, 이상호, 장진호, 1990. 고군산군도 주변해역의 해양학적 기초 연구, 1. 해수특성, 표층 퇴적물 및 식물플랑크톤 군집. 군산대학교 해양개발연구, **2**: 61–81.
- 정종률, 이재학, 안희수, 1983. 금강하구의 해수 순환 역학. *한국해양학회지*, **18**: 142–148.
- 최진용, 이상호, 1991. 한반도 서해해역에서의 동계와 하계의 부유 퇴적물 분포와 변화. *군산대학교 해양개발연구*, **3**: 135–150.
- 최현용, 이상호, 유광우, 1999. 금강하구언 대량방류시 황해 중동부 해역의 염분분포. *한국해양학회지-바다*, **4**: 1–9.
- 한국해양연구소, 1996. 한반도 주변 조화상수 자료집.
- Alexander E.Y. and D.C. Chapman, 1997. A Simple theory for the fate of buoyant coastal discharge. *J. Phys. Oceanogr.*, **27**: 1386–1401.
- Bang, I.W. and H.J. Lie, 2000. A Numerical Experiment on the Dispersion of the Changjiang River Plume. *J. Oceanogr. Soc. Korea*, **34**: 185–199.
- Blumberg, A.F. and G.L. Mellor, 1987. A description of a three dimensional Coastal Ocean Model. Ed. by N. S. Heaps, *Coast. Est. Sci.*, **4**: 1–16.
- Blumberg, A.F. and L.H. Kantha, 1985. Open boundary condition for circulation models. *Journal of Hydrological Engineer., ASCE*, **111**(2): 237–225.
- Blumberg, A.F., 1992. A primer for ECOM-si technical report. Hydruodal, Inc., Mahwah, N. J., p. 64.
- Chao, S.-Y. and W.C. Boicourt, 1986. Onset of estuarine plumes. *J. Phys. Oceanogr.*, **16**: 2137–2149.
- Dyer, K.R., 1973. *Estuaries a Physical Introduction. A summary of the descriptive and dynamic oceanography of estuaries*. Wiley, p. 140.
- Galperin, B., L.H. Kantha, S. Hassid, and A. Rosati, 1988. A quasi-equilibrium turbulent energy model for geophysical flows. *J. Atmos. Sci.*, **45**: 55–62.
- 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**: 1766–1183.
- Garvine, R.W., 1977. Observations of the motion field of the Connecticut River estuary. *J. Geophys. Res.*, **82**: 441–454.
- Garvine, R.W., 1987. Estuary plumes and fronts in shelf waters: A layer model. *J. Phys. Oceanogr.*, **17**: 1877–1896.
- Kourafalou, V.H., T.N. Lee, L.-Y. Oey, and T.D. Wang, 1996. The fate of river discharge on the continental shelf, 2. Transport of coastal low salinity waters under realistic wind and tidal forcings. *J. Geophys. Res.*, **101**(C2): 3435–3455.
- Lee, S.H., Choi, H.Y. Kwon, H.K. and E.J. Shin, 1999. Estuary Type and Plume Structure of the Keum River Estuary. In: *Progress in Coastal Engineering and Oceanography*, Vol. 1 coastal oceanography of asian seas, edited by B.H. Choi. Korean Soc. Coastal and Ocean Eng, Seoul, pp. 143–155.
- McCreary, J.P. Jr., S. Zhang, and S.R. Shetye, 1997. Coastal circulation driven by river outflow in a variable-density 1-layer model. *J. Geophys. Res.*, **102**: 15535–15554.
- Mellor, G.L. and T. Yamada, 1982. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problem, *Rev. Geophys.*, **20**: 851–875.
- O'Donnell J., 1990. The formation and fate of a river plume: A numerical model. *J. Phys. Oceanogr.*, **20**: 551–569.
- Schubel, 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*, proceeding of Korea-U. S. Seminar and Workshop, ed. Chough. S. K., pp. 286–308.
- 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.
- Shen, H., C. Zhang, C Xial and J. Zhu, 1998. Change of the discharge and sediment flux to estuary in Changjiang River. In: *health of the Yellow Sea*, edited by G. H. Hong, J. Zhang and B.K. Park, The Earth Love Pub. Ass., Seoul, pp. 129–148.
- Smagorinsky, T., 1963. General circulation experiments with the primitive equations, I. The basic experiments. *Mon. Weather Rev.*, **91**: 99–164.
- 
- 2002년 6월 18일 원고접수
- 2002년 8월 12일 수정본 채택
- 담당편집위원: 이재학