

홍수기 낙동강 하천플룸의 3차원 거동해석

이종섭* · 윤은찬 · 백승우 · 이재철¹
부경대학교 건설공학부, ¹부경대학교 해양학과

Three-Dimensional Behavior of Nakdong River Plume during the Flood Period in Summer

Jong Sup LEE*, Eun Chan YOON, Seung Woo BAEK and Jae Chul LEE¹
Department of Civil Engineering, Pukyong National University, Pusan 608-739, Korea
¹Department of Oceanography, Pukyong National University, Pusan 608-737, Korea

Behavior of the Nakdong River plume was studied by the analysis of the observed CTD data and numerical simulations using three-dimensional Princeton Ocean model (POM) in which the river discharge, tides and winds were considered. During the flood season of summer the 30 psu isohaline expands northward to Daebyeon and southwestward to Samcheonpo. The model results show that the isohalines are approximately parallel to the bottom slope, which suggests the possibility of upwelling induced by the topographic effects. Northwesterly wind expands the river plume to the offshore direction so that the inflow of fresh plume water into Jinhae Bay through the Gaduk Channel is constrained, then the coastal upwelling seems to be caused by the wind-driven current at the southern edge of Gaduk Island. Southwesterly wind expands the river plume toward Daebyeon, and the inflow of fresh water into Jinhae Bay is also constrained.

Key words: Nakdong River plume, POM, Wind-driven current, Coastal upwelling

서 론

남해동부해역에서 연안수의 거동에 미치는 낙동강 유출수의 영향은 매우 중요하다. 그러나 홍수시 낙동강 유출수의 거동과 관련한 현지해양조사는 거의 없었으며 또한 3차원적인 하천플룸의 거동해석에 대한 연구도 거의 이루어지지 않았다. 따라서 홍수시 낙동강 유출수가 어떤 경로로 어디까지 확산되는지 아직 명확하게 밝혀지지 않고 있는 실정이다. 하천플룸은 하천유출수와 해수와의 밀도차에 의한 부력효과가 탁월한 흐름으로서 표층밀도류의 거동특성을 나타낸다. 이때 밀도차는 담·염수의 염분에 의한 밀도차와 해수와 하천수와의 수온차에 의한 밀도차에 의하여 형성된다. 낙동강 하구역과 진해만 일대에서 해수유동, 하천수의 거동과 관련된 기존의 연구결과를 요약하면 Yoo et al. (1994)은 낙동강 하구역에서 plume의 횡방향 퍼짐과 부유퇴적물의 전송에 대하여 수치실험과 현장조사자료를 비교하였다. 그리고 Kim et al. (1996)은 CTD관측자료를 이용하여 낙동강수의 유출특성에 관하여 조사하였고, Jung (1996)은 진해·마산만의 조류에 관하여 3차원 시뮬레이션을 수행하였으며 Kang (1999)은 낙동강 하구역과 진해만을 포함하는 해역에서 POM (Princeton Ocean Model)을 이용하여 해수유동특성과 취송순환을 재현하였지만 하천수와 연안수와의 밀도차를 고려하지 않았다. Jang (2000)은 낙동강 하구에 있어서 하구둑 건설전·후의 해양환경변화에 대하여 강수의 유출거동과 혼합양상을 기존자료의 분석과 POM을 이용한 수치해석을 통해서 행하였지만 하구사

주 주변의 좁은 지역에 한정되어 있었다. Joo (2002)는 낙동강 하구-가덕수로-진해만에 이르는 해역의 장기관측자료를 이용하여 낙동강 하구역유출수의 3차원적인 거동특성을 밝히고 POM을 이용하여 조석과 하천유량에 대한 수치시뮬레이션을 수행하였지만 조석과 하천유량을 동시에 고려하지는 못하였다. 한편, Lee and Yoon (2003)은 본 연구에 선행하여 현지관측자료와 POM을 이용한 수치시뮬레이션을 통하여 평수기 낙동강 플룸의 3차원거동특성을 해석하였다.

본 연구에서는 홍수기 낙동강 플룸의 확산범위를 예측하기 위하여 수치모델의 계산영역을 광역의 남해동부해역을 대상으로 하였으며, 수치모델의 검증은 국립해양조사원의 조석조화상수와 낙동포-가덕수로-진해만 입구에 이르는 해역에서 관측된 1998년 8월의 CTD관측자료를 이용하였다.

자료 및 방법

수온·염분의 현지조사자료

본 연구에서는 낙동강 하구역 및 가덕수로와 진해만 입구에 이르는 지역에서 Fig. 1과 같은 총 41개의 정점에서 홍수기인 1998년 8월 22일에 CTD (Sea Bird 19)를 이용하여 관측된 수온, 염분의 수평 및 연직자료 (부경대학교 해양과학공동연구소, 1999)를 분석하여 홍수기의 낙동강 하천유출수의 영향범위를 해석하고 하구전선 구조에 대해서 알아본다.

Fig. 2는 낙동강 하구둑의 1998년 일별 유량자료를 나타내며 8월은 최대일유량이 11414.0 m³/s로서 홍수기의 유출조건이 된다. 관측일인 1998년 8월 22일은 월령 0일이고 국립해양

*Corresponding author: jslee@pknu.ac.kr

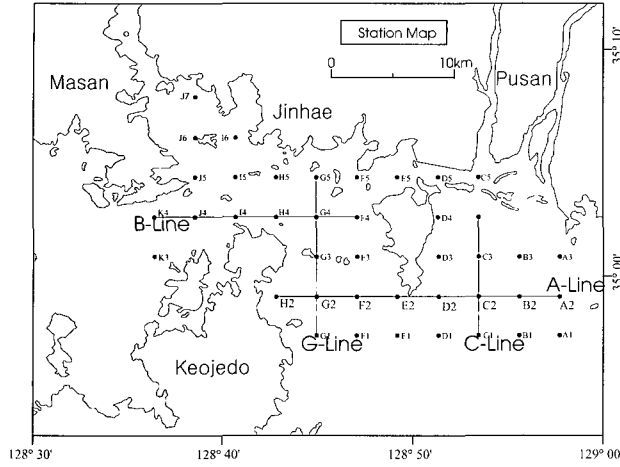


Fig. 1. Observation stations of CTD.

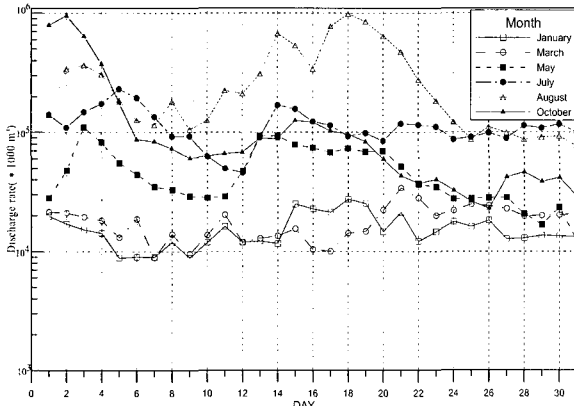


Fig. 2. Discharge of Nakdong River (1998).

조사원의 조석표에 의하면 가덕수로의 조류는 11시 38분에 최강낙조류가 0.77 m/s로 흐르며 15시 02분에 전류되는 것으로 예보되었다. 관측시간은 10시 00분부터 14시 48분까지로 낙조류시에 관측되었다.

수치모델

수치모델의 개요

본 연구에 사용된 3차원 경압수치모형인 POM (Blumberg and Mellor, 1987)은 국내외의 많은 연구자들에 의하여 열·염에 의한 밀도차를 고려한 해양순환모델링에 이용되어져 왔으며, 모델의 검증과 현지적용을 통하여 약간씩 수정되어져 왔다.

Plume과 관련된 연구에 POM을 이용한 국내외의 연구결과들을 살펴보면, Kourafalou et al. (1996)은 POM을 South Atlantic Bight에 적용하여 밀도류에 영향을 미치는 여러 가지 파라미터에 대한 민감도해석을 하였다. Oey (1996)는 멕시코만류의 흐름해석시 플룸의 확산은 수평확산계수의 선택에 아주 민감하게 반응하는 것을 확인하였고 Ezer and Mellor (2000)는 North Atlantic sea에서 POM을 이용하여 수평격자의 크기,

개계조건 그리고 난류 Prandtl number에 따른 하천 플룸의 확산범위를 모의하였다. Pullen and Allen (2000)은 캘리포니아 북부연안의 Eel river의 주요 홍수시 연안의 응답특성을 현지 조사자료 및 인공위성자료를 POM 모델의 결과와 비교하여 해석하였다. 국내의 경우 Bang and Lie (1999)는 POM을 이용하여 황해로 유입되는 양자강 하천수 플룸의 확산거동을 지형과 바람조건에 대하여 수치모의하였으며 Shin et al. (2002)은 POM의 변형모델인 ECOM-si를 이용하여 조석과 편향력의 유무에 따른 금강 plume의 구조와 분포를 수치모의하였다.

수치계산의 개요

Fig. 3은 수치계산의 대상영역과 격자망을 나타내며 낙동강 하구역 일대와 거제도 등을 포함하며 외해방향으로 대한해협과 대마도를 포함하는 광역에서 구성되었고 격자간격은 수평면상에서 x, y방향에서 모두 1 km이고, 160×170개의 격자로 이루어져 있으며, 연직방향으로는 등 σ 간격 ($\Delta\sigma=0.167$)의 6개의 층으로 나뉘어졌다. 외부모드의 time step은 2초, 내부모드의 time step은 20초를 사용하였으며 이 값들은 CFL 안정조건을 만족한다. 초기수평확산계수는 Kantha (1995)의 연구에 기초하여 격자크기를 고려하여 $10 \text{ m}^2/\text{s}$ 로 산정하였다. 해수의 밀도는 $1,025 \text{ kg/m}^3$ 이고 초기염분과 수온은 국립해양조사원의 한국해양환경도 (1998)의 표층수온 및 염분분포로부터 모든 수평 및 연직격자상에서 각각 32 psu과 $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 로 일정하게 주어졌다. 본 연구에서는 담수혼합과 확산에 의한 밀도차만 고려하고 대기·해양간의 열수지에 의한 열의 확산은 고려하지 않았다. 이는 염분은 보존성물질로서 하구에서 밀도차를 일으키는 주요인인 반면에 수온은 비보존성 물질로서 해수와 하천수와의 수온차에 의한 밀도차는 매우 작을 것으로 판단되어 본 연구에서는 열확산은 고려하지 않았다.

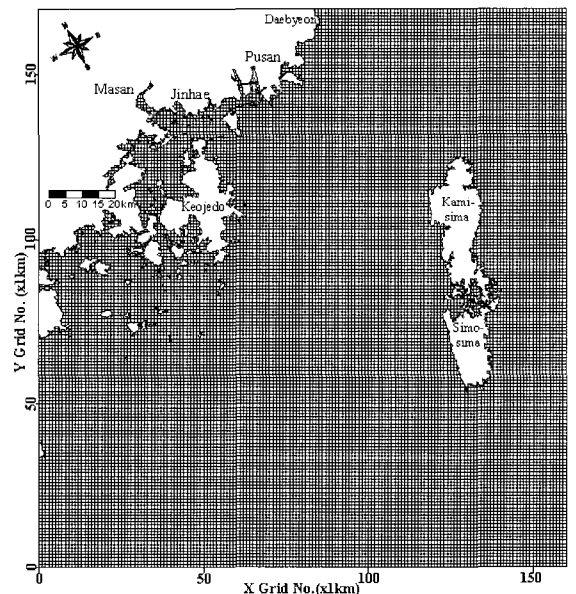


Fig. 3. Computational Grid system.

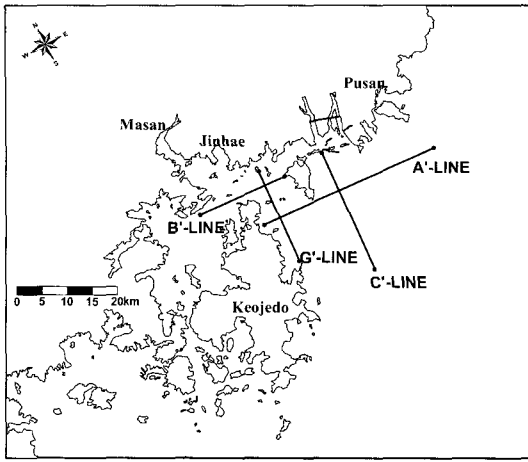


Fig. 4. Cross section in the model same as observed line.

수치계산은 크게 두 가지 경우로 나뉘어 수행되었다. 첫 번째의 경우 조석과 하천유량만을 고려한 경우에 홍수기 전·후의 수평염분분포 및 유속분포를 비교하고, 현지관측일인 8월 22일의 창·낙조류 최강류시의 표층수평염분분포 및 Fig. 4의 4개 정선에서 조석위상에 연직염분분포의 변화를 고찰한다. 두 번째는 첫 번째의 조건에서 각각 북서풍과 남남서풍을 고려한 경우에 8월 22일의 표층수평염분분포 및 연직염분분포를 출력하여 그 결과를 첫 번째와 비교하여 플룸확산에 미치는 바람의 영향을 검토한다.

경계조건

개방경계에서의 조위는 Table 1의 조석조화상수를 이용하여 선형보간하여 개경계에서 강제조위를 주었다.

Table 1. Tidal harmonic constants at the open boundary

Location	M ₂		S ₂		K ₁		O ₁	
	H (m)	G (°)	H (m)	G (°)	H (m)	G (°)	H (m)	G (°)
Daeyeon	0.29	225	0.14	257	0.03	86	0.02	359
Upper right	0.24	263	0.11	278	0.02	178	0.01	160
Lower right	0.65	263	0.29	278	0.15	178	0.12	160
Lower left	0.91	261	0.43	282	0.17	175	0.12	159
Samcheonpo	0.94	250	0.42	273	0.17	169	0.12	153

낙동강하구둑에서의 유량은 Fig. 2의 1998년 8월의 유량자료중에서 1998년 8월 7일부터 8월 22일까지 총 16일간의 유량을 고려하였으며, 낙동강하구둑에서 유출수의 염분은 0 psu, 밀도는 1,000 kg/m³으로 주었다. 그리고 수온에 의한 밀도차는 고려하지 않았다.

바람조건

홍수기의 낙동강 하천플룸의 확산에 미치는 바람의 영향을 조사하기 위하여 조석과 홍수시의 하천유량이 동일하게 주어진 경우에 대상해역에서 여름철의 평균풍속 및 대표풍향 조건에서 수치시뮬레이션을 수행하였다. 풍속의 크기는 부산지방 기상청의 30년 자료로부터 하계의 평균풍속인 4.2 m/s를 동일

하게 주었다. 이러한 바람은 육상의 기상대에서 관측된 결과이므로 해상풍으로의 변환이 요구되며 본 연구에서는 다음과 같이 Hsu (1984)에 의해 제안된 해상풍산정식을 사용하였다.

$$U_s = 3.93 U_L^{1/2} \quad U_L < 10 \text{ m/s일 경우}$$

$$U_s = 1.24 U_L \quad U_L \geq 10 \text{ m/s일 경우} \quad (1)$$

여기에서, U_s 는 해상풍이며, U_L 은 육상풍을 나타낸다. 바람응력은 다음과 같이 나타내어진다.

$$(\tau_{ox}, \tau_{oy}) = \rho_a C_D \sqrt{W_U^2 + W_V^2} (W_U, W_V) \quad (2)$$

여기에서, W_U 와 W_V 는 U, V방향의 풍속이고, ρ_a 는 공기의 밀도로서 1.2 kg/m³이고, C_D 는 풍속의 함수로서 결정되는 수면항력계수이다. 이 항력계수의 값은 일반적으로 몇몇 경험적인 관계식을 사용하고 있고 본 연구에서는 다음과 같은 Geernaert et al. (1986)의 식을 사용하였다.

$$C_D = 10^{-3} (0.43 + 0.097 U_W) \quad (3)$$

여기에서 U_W 는 풍속을 나타낸다.

풍향은 대상해역의 과거 기상자료와 낙동강 유출수의 확산에 대한 영향을 고려하여 북서풍과 남남서풍으로 주었다. 수치계산시 전해역에서 일정하게 풍향풍속을 고려하였으며, 조

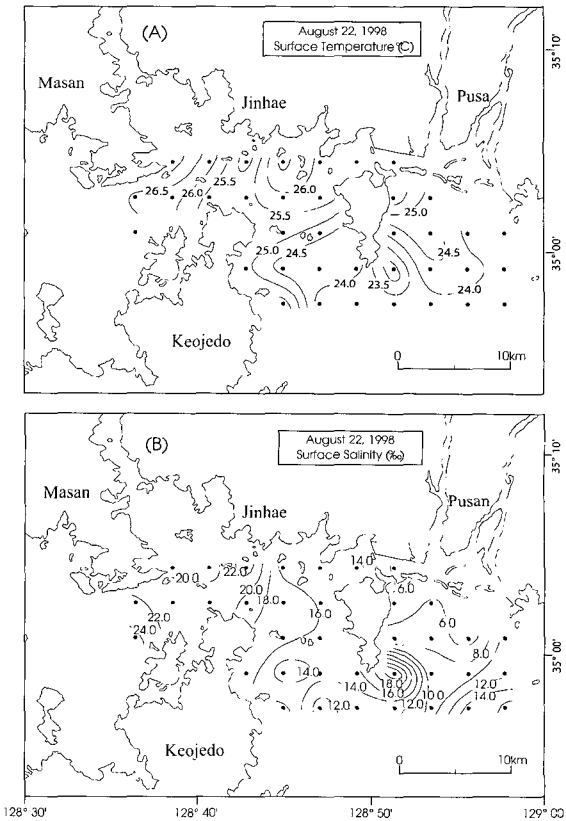


Fig. 5. Horizontal distribution of surface temperature (A) and surface salinity (B) on August 22, 1998.

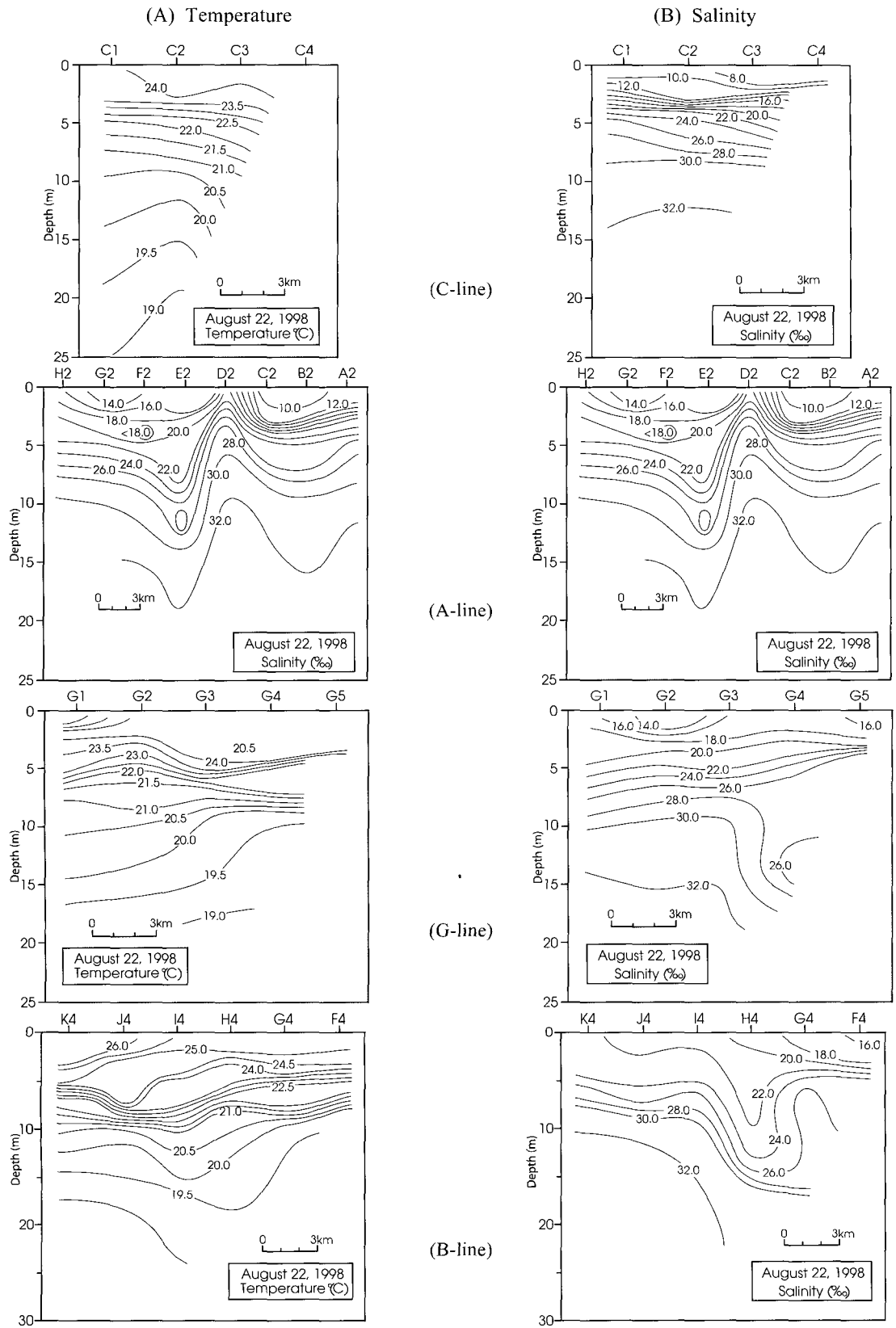


Fig. 6. Vertical distribution of temperature (A) and salinity (B) at the section C, A, G and B on August 22, 1998.

석과 하천유량만을 고려한 계산결과와 비교하기 위해서 마지막 3일간 바람운력을 고려하여 염분의 수평 및 연직분포를 비교·분석한다.

결과 및 고찰

현지조사결과 및 고찰

수온·염분의 수평분포

Fig. 5는 표층수온과 염분의 수평분포로서 (A)의 표층수온 분포는 가덕도 남쪽외해역에서는 24.0℃ 이하이고 낙동강하구의 수온은 25.0℃ 이상이고 가덕수로에서 24.0-26.0℃의 범위로 가덕수로의 북쪽으로 갈수록 수온이 상승하고 있고 진해만 입구에서는 26.0℃ 이상의 고온수가 존재한다. 그리고 가덕도 남단에서 23.5℃ 이하의 해수가 유입되고 있다. (B)의 표층염분분포는 가덕도 동쪽의 낙동강 하구역에서는 10.0 psu 이하의 저염수가 남서방향으로 확장되고 있으며 가덕도 남단의 동쪽에서 18.0 psu의 고염수가 존재한다. 가덕수로 남단에서 가덕수로를 따라 진해만 안쪽까지 염분은 14.0-24.0 psu의 범위로 감소하는 형태를 보이고 있다.

대상해역은 대규모 하천유출의 영향을 받아서 전 조사영역이 낙동강 유출수의 영향을 받고 있고 낙동강 유출수가 가덕도 남단을 돌아 가덕수로를 통과하여 진해만내로 유입되는 유출기구를 명확하게 보여주고 있다.

수온·염분의 연직분포

Fig. 6은 Fig. 1의 C, A, G, B-line에서 수온·염분의 연직분포이다. 낙동강 유출수의 유출을 따르는 C-line의 경우 수온은 19.0-24.0℃의 범위에서 연직성층을 이루고 있고 염분은 8.0-32.0 psu의 범위에서 연직성층을 이루고 있고 수심 3-5 m 부근에서 염분약층 (halocline)이 존재한다. 가덕도 남단을 동서방향으로 가로지르는 A-line의 경우 수온과 염분은 가덕도 남단의 정점 D2에서 저온·고염수가 용승하는 특징을 보이고 수온은 D2를 기준으로 서쪽에서는 19.0-24.5℃의 범위에서 성층을 이루고 있고 동쪽에서는 19.0-22.5℃의 범위에서 성층을 이루고 있다. 염분은 정점 D2의 왼쪽에서는 14.0-32.0 psu의 범위에서 성층을 이루고 있으며 수심 3-5 m 범위에서 염분약층이 존재함을 확인할 수 있다. 가덕수로 서쪽에서 남북방향인 G-line의 경우 수심 3 m 부근까지는 24.0℃ 이상의 고온수가 존재하고 3 m 아래에서부터 저면까지 수온은 19.0-24.0℃의 범위에서 성층을 이루고 있으며 수심 5 m 부근에서 수온약층이 존재한다. 염분은 18.0-32.0 psu의 범위에서 성층을 이루고 있고 정점 G2의 수면부근에서 14.0 psu의 저염수가 존재한다. 가덕수로 북단에서 진해만 입구까지의 B-line에서는 수온은 수면아래 수심 5 m까지 24.0℃ 이상의 고온수가 발달해 있고 수심 5.0-10.0 m의 범위에서 수온약층 (thermo-cline)이 존재하고 그 아래에는 19.0-21.0℃의 범위에서 성층을 이루고 있다. 염분은 가덕수로 북단의 정점 F4에서 H4까지는 수면하 수심 5 m 부근까지 20.0 psu의 저염수가 존재하고 거제도북단의 정점 H4에서는 수심 10 m 부근까지 20 psu의 저염수가 침강하

는 것을 볼 수 있다. 그리고 진해만쪽의 정점 I4-K4에서 수심 10 m 이내에서 22.0-30.0 psu의 범위에서 연직성층을 이루며 저염수가 존재한다. 홍수기의 수온·염분의 연직분포는 대규모 하천유출수의 영향으로 인하여 모든 정선에서 연직성층화를 이루고 있고 C-line와 A-line에서 수면하 수심 3.0-5.0 m에서 염분약층이 존재한다.

수치모델링결과 및 고찰

홍수유출 전·후의 확산범위비교결과

조석과 하천유량을 고려한 경우 홍수기 전·후의 낙동강 하천플룸의 확산형태를 파악하기 위해서 하천유량이 1223.9 m³/s인 8월 9일과 하천유량이 11,414 m³/s로 가장 많았던 8월 18일의 창조류 최강류시의 표층염분분포를 비교하였다. Fig. 7과 Fig. 8은 8월 9일과 8월 18일의 창조류최강류시의 표층유속 및 염분분포이다. 본 모델에 의한 해수유동의 수평 및 연직 분포계산결과는 Lee and Yoon (2003)에 의하여 평수기 유출시에 측정된 측류자료와 비교·검증을 하였다. 따라서 본 논문에서는 해수유동에 대하여는 표층유속벡터도만 제시한다.

8월 9일의 경우 표층염분은 30 psu의 등염분선이 서쪽으로 가덕도 남단을 돌아 거제도 북단까지 진출하고 동쪽으로는 영도까지 확장된다.

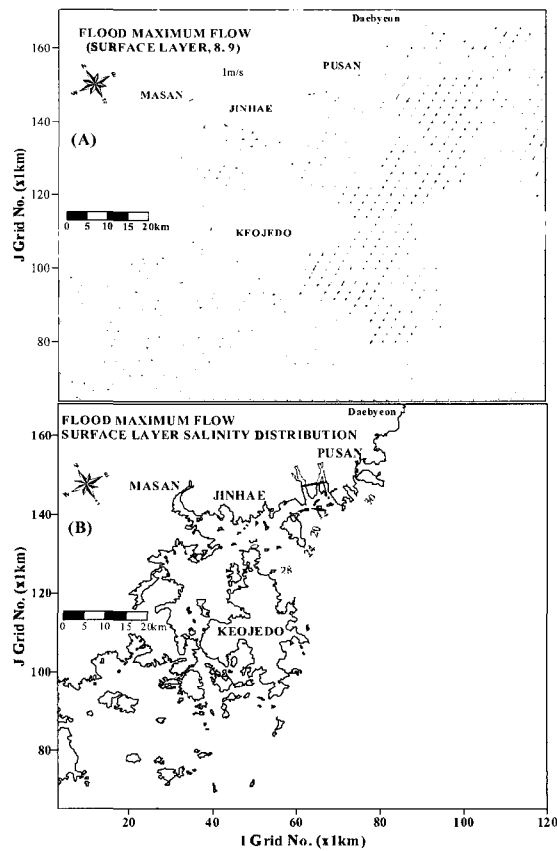


Fig. 7. Surface layer flood maximum flow (A) and salinity (B) distribution on August 9, 1998.

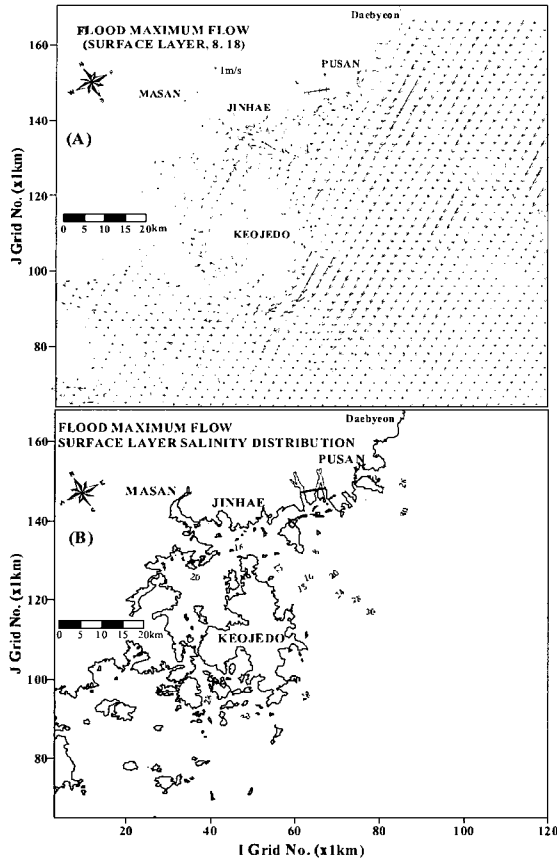


Fig. 8. Surface layer flood maximum flow (A) and salinity (B) distribution on August 18, 1998.

대규모 하천유량이 연속하여 유입된 8월 18일에는 30 psu의 등염분선이 남쪽으로는 거제도 남단을 돌아 통영해안까지 진출하고 가덕도 남단에서 분기하여 가덕수로내로 유입된 성분은 거제도 북단을 돌아 진해만내로 깊이 유입되는 것을 볼 수 있다. 한편 동쪽으로는 개경계인 대변부근까지 좁은 띠를 이루며 확장되어 있는 것을 볼 수 있다. 이로부터 홍수시의 낙동강하천유출수는 대상해역의 연안을 따라 폭넓게 영향을 미침을 알 수 있다.

현지관측결과와의 비교고찰

현지관측결과와의 비교고찰을 위해서 관측일인 8월 22일의 창·낙조류 최강류시의 표층염분분포와 Fig. 4의 4개 정선에서 출력된 고조-낙조류 최강류-저조-창조류 최강류시의 연직 염분분포를 이용하였다. Fig. 9-10은 홍수기의 실제유량과 조석을 고려한 경우에 계산된 창조류 최강류시의 낙조류 최강류시의 표층흐름, 해수면 분포, 표층염분분포를 나타낸다.

Fig. 9의 창조류 최강류시에 표층염분의 수평분포를 보면 낙동강 유출수의 연속적인 대규모 유출에 의하여 30 psu 등염분선이 북쪽경계인 대변연안과 남쪽경계인 삼천포까지 확장된다. 서쪽으로 16 psu 등염분선이 진해만내로 유입되고 남쪽

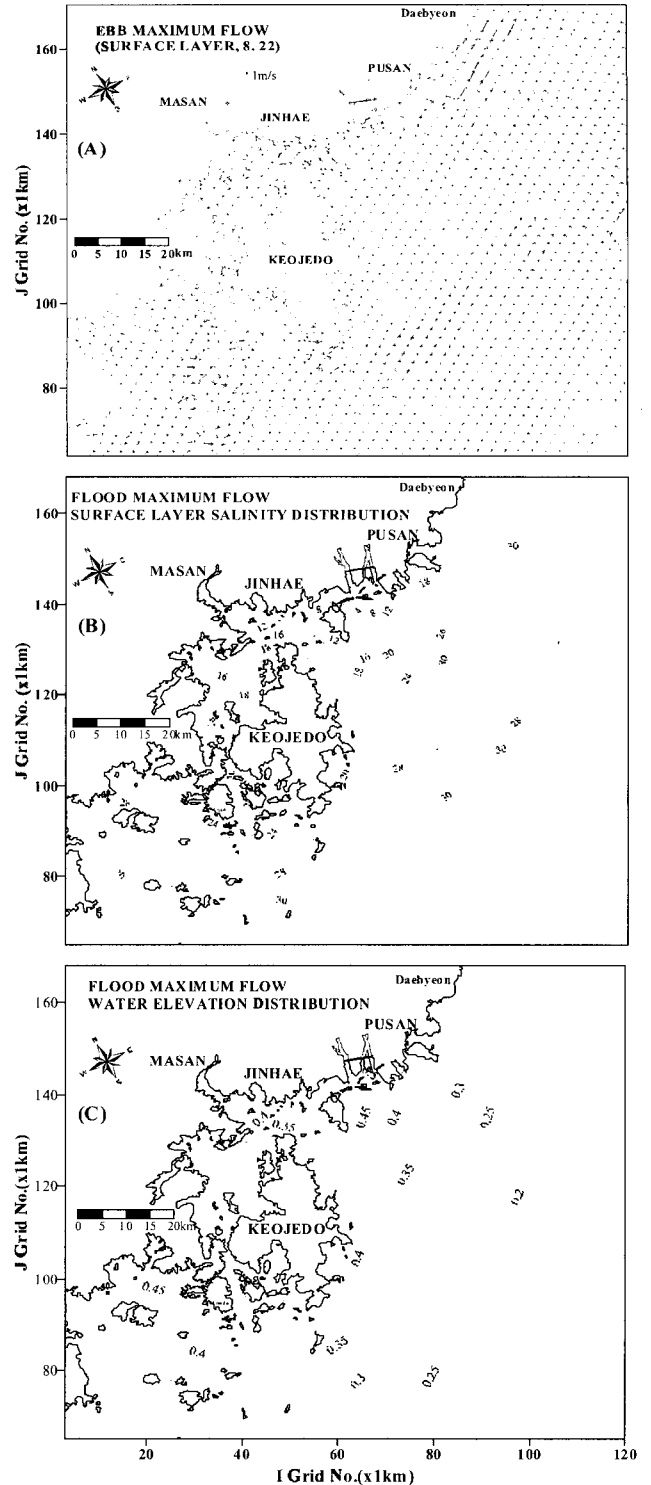


Fig. 9. Surface layer flood maximum flow (A), water elevation (B) and salinity(C) distribution on August 22, 1998.

으로 가덕도 남단에서 분기한 흐름에 따라 16 psu 등염분선이 거제도 동쪽해안을 따라서 서이말까지 확장된다. 그리고 부산 연안을 따라서 16 psu 등염분선이 영도의 남단까지 분포하는

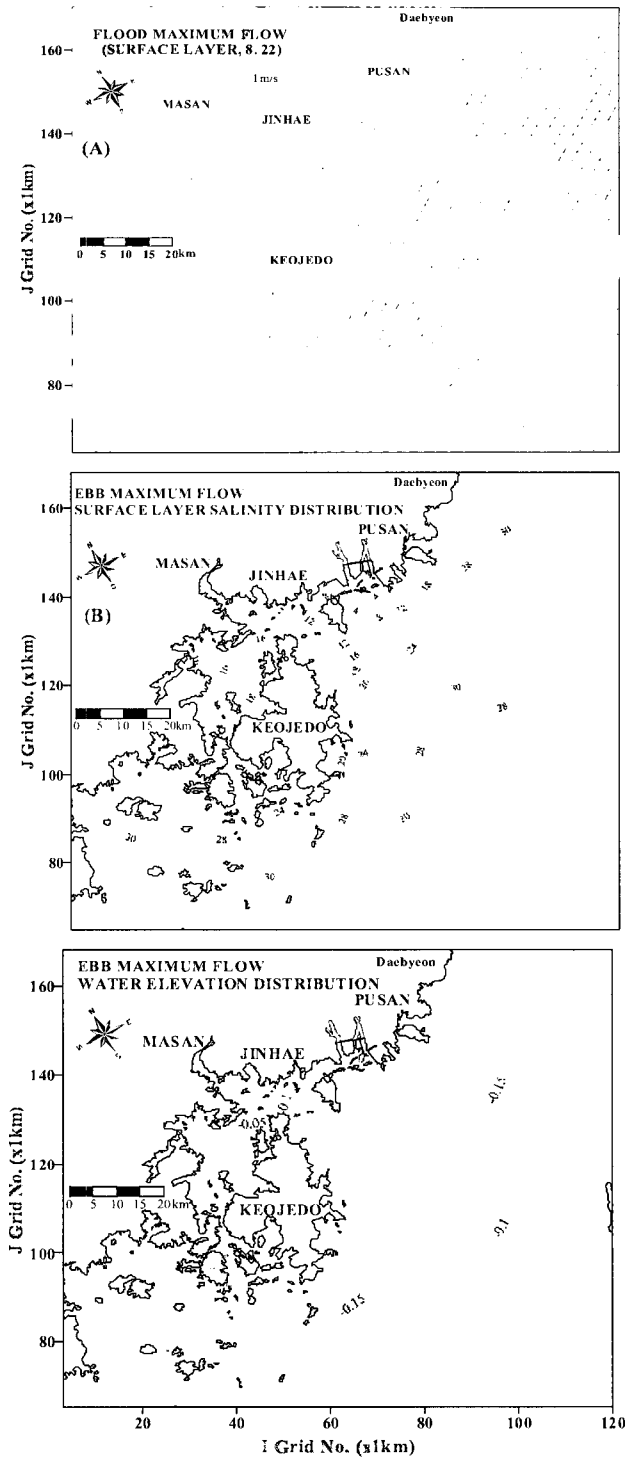


Fig. 10. Surface layer ebb maximum flow (A), water elevation (B) and salinity (C) distribution on August 22, 1998.

형태를 보인다.

Fig. 10의 낙조류 최강류시에는 진해만에서 가덕수로 방향으로의 낙조류시의 흐름에 의하여 진해만과 가덕수로에서 등염분선이 후퇴하는 양상을 보인다. 한편 거제도 동쪽해안에

서는 등염분선이 창조시보다 외해방향으로 더욱 확장되는 형태를 띤다. 낙조시의 계산결과를 현지조사결과인 Fig. 6(B)와 비교해보면 염분의 절대치는 약간 차이를 보이고 있지만 수치계산결과 등염분선의 분포를 보면 낙동강으로부터 유출된 플룸이 가덕도남단을 돌아 가덕수로를 거쳐 진해만과 마산만으로 유입되는 양상을 잘 나타내고 있다.

Fig. 11은 계산된 8월 22일의 조석위상에 따른 고조-낙조류 최강류-저조-창조류최강류시의 연직염분분포이다. Fig. 11(A)는 낙동강 하구에서 외해방향으로의 C'-line의 연직염분분포로서 낙조시 낙동포 일대에서는 Fig. 6의 현지조사 결과와 유사하게 수심 10 m 부근까지 담수층이 성층을 이루며 외해방향으로는 수심 15 m 부근까지 성층을 이룬다. 창조시 담수층의 두께가 증대되는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 11(B)는 가덕도 남단을 동서방향으로 가로지르는 A'-line의 연직염분분포이다. 고·저조시에는 수심 10 m 부근까지 연직성층을 이루며 창·낙조류 최강류시에는 가덕도 남단의 동쪽 (I=62, J=132)에서 고염수가 상승한다.

Fig. 11(C)는 가덕수로 남북방향의 G'-line의 연직염분분포를 나타낸다. 정선의 북쪽 (I=52, J=132)에서 지형적인 영향으로 사료되는 고염수의 상승이 일어나고 지형의 변화가 급격한 부분 (J=132-136)에서 저층까지 30 psu 등염분선이 존재하는데, 이러한 결과는 염분의 크기에는 차이가 있지만 Fig. 4의 현지조사결과와 유사한 형태를 띤다.

Fig. 11(D)는 거제도 북단을 동서방향으로 가로지르는 B'-line의 연직염분분포를 나타낸다. 창·낙조시 30 psu 이하의 저염수가 저층까지 존재하는 것을 볼 수 있고 거제도 북단의 동쪽 (I=50, J=133)에서 고염수가 상승하는 것을 볼 수 있다.

현지관측결과와 염분 연직분포 Fig. 6(B)와 계산결과인 Fig. 11과 비교해보면 수평 scale이 다르고 현지조사자료가 동일한 시간에 이루어진 것이 아니기 때문에 직접적으로 비교하기는 곤란하지만 염분약층의 깊이와 등염분선의 분포는 대체로 유사한 경향을 나타낸다. 그리고 각 정선에서의 연직염분분포는 해저지형의 영향을 받아 해저 단면형태와 유사한 형태를 나타낸다.

북서풍(NW)에 의한 유출수의 거동변화

Fig. 12-13은 동일한 유량조건에서 수치계산의 마지막 3일간 북서방향으로 8.05 m/s의 풍속을 가지는 바람을 전 영역에 일정하게 고려한 후 출력된 8월 22일의 창·낙조류 최강류시의 표층수평유속 및 염분분포이다.

Fig. 12의 창조류 최강류시에 표층염분분포는 16 psu의 등염분선이 가덕수로내에 위치하고 있어서 북서풍의 영향으로 인해 하천유출수의 가덕수로내로의 유입이 크게 제한을 받을 수 있고 거제도 동쪽해안을 따른 16 psu 등염분선의 확장도 감소함을 볼 수 있다. 그리고 바람이 없는 Fig. 9와 비교하여 거제도 동쪽해안을 따라 유입된 하천유출수가 거제도 남단을 돌아 삼천포 방향으로 유입하는 것이 제한을 받을 수 있다. 하지만전체적으로 외해로 등염분선의 확장은

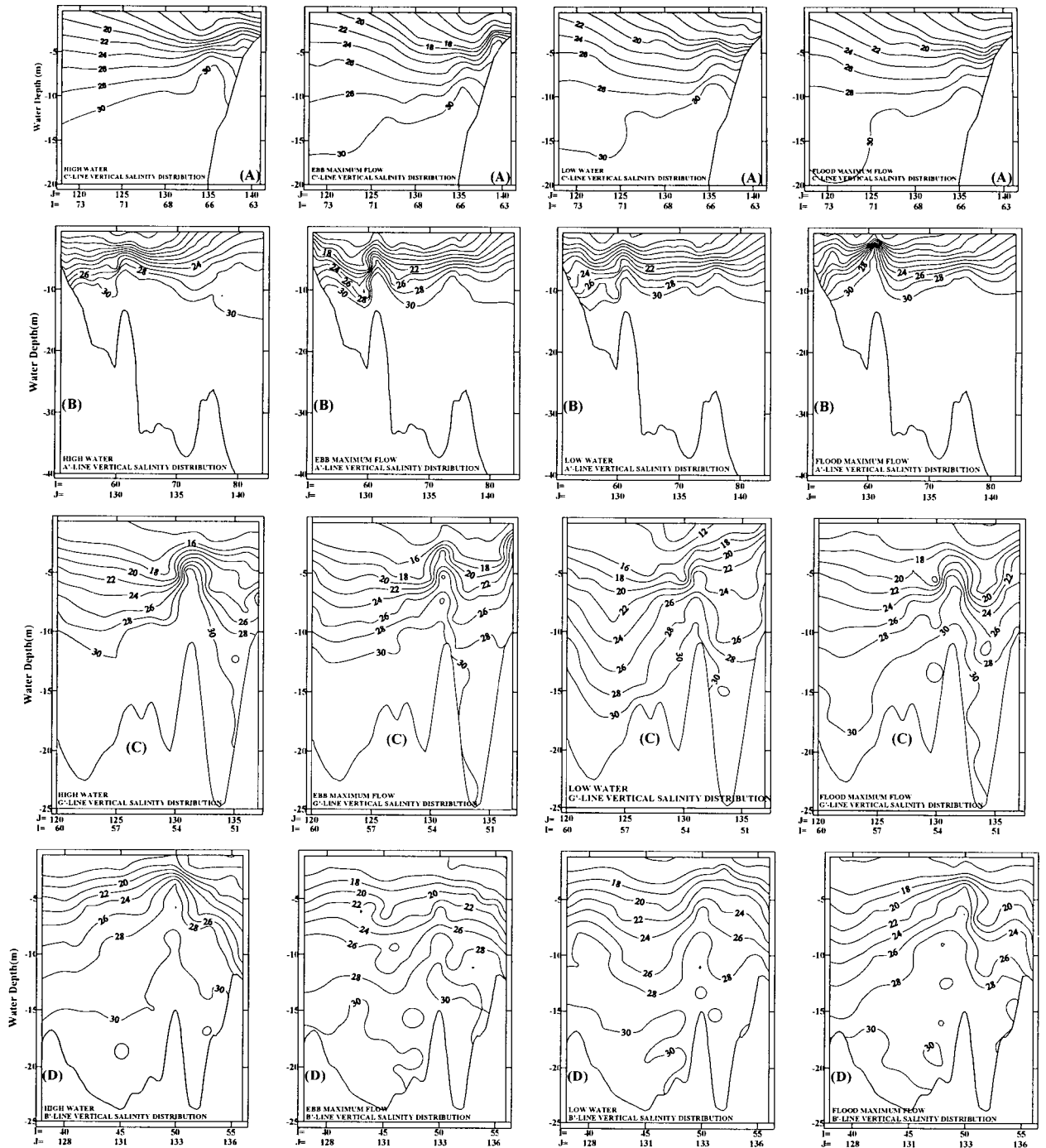


Fig. 11 Vertical salinity distribution with tidal phase on C' (A), A' (B), G' (C) and B' line (D) on August 22, 1998.

크게 증대된다.

Fig. 13의 낙조류 최강류시에 표층염분분포는 16 psu 등염분선은 가덕도 남단까지 후퇴하고 바람이 없는 Fig. 10과 비교하여 부산연안을 따른 하천유출수의 확장이 더욱 증대됨을 알 수 있다. 그리고 외해방향으로의 등염분선의 확장은 더욱 증대되고 가덕도 남동해역에서 주위수보다 비교적 높은 고염수가 존재한다. 이는 바람에 의한 취송효과로 인해 저층으로부터

터 고염수가 용승한 결과로 사료된다.

Fig. 14는 C', A', G', B'-line에서 조석위상에 따른 염분의 연직분포이다. Fig. 14(A)는 낙동강하구에서 외해방향인 C'-line의 연직염분분포이다. 바람장을 고려하지 않은 Fig. 11(A)와 비교하여 외해쪽에서 담수층의 두께는 감소하고 전체적으로 성층이 잘 발달한다.

Fig. 14(B)는 가덕도 남단을 동서방향으로 가로지르는 A'-

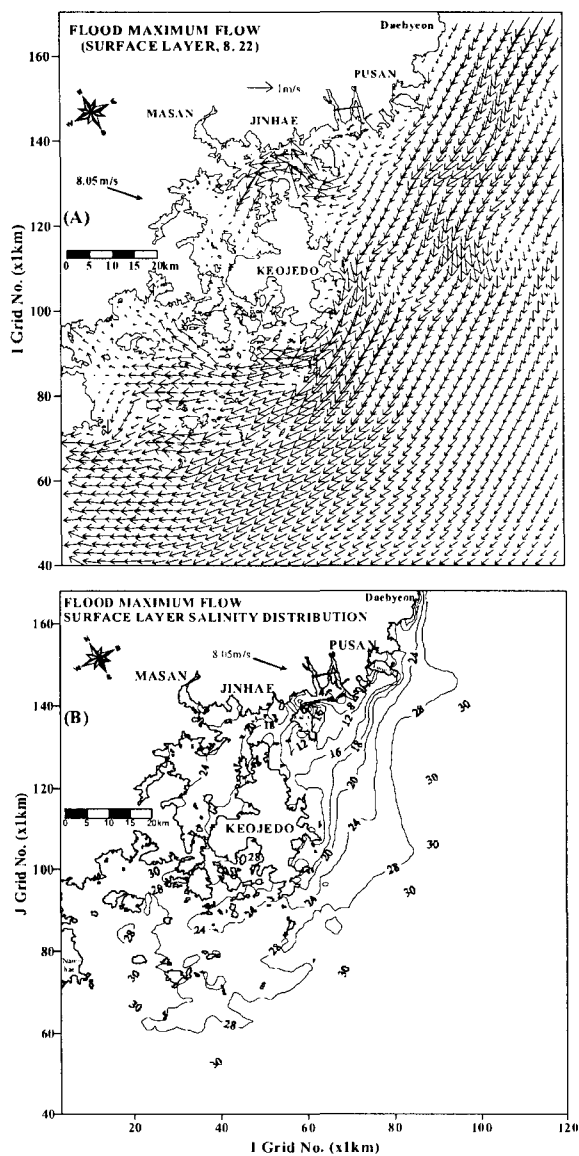


Fig. 12 Surface layer flood maximum flow (A) and salinity (B) distribution on August 22, 1998 for the north-westerly wind.

line의 연직염분분포를 나타낸다. 여기서, 가덕도 남단의 동쪽 (I=62, J=132)에서 등염분선의 상승이 바람장을 고려하지 않았을 경우보다 증가하는 특징을 보인다.

Fig. 14(C)는 가덕수로 남북방향의 G'-line의 연직염분분포이다. 30 psu 이하의 담수층의 두께는 전체적으로 바람장을 고려하지 않은 경우보다 감소하는 것을 확인할 수 있고 정선의 북쪽 (I=52, J=132)에서 저층고염수의 상승은 바람을 고려하지 않은 경우보다 증가하여 낙조시 20 psu 등염분선이 수면 부근까지 존재한다.

Fig. 14(D)는 거제도 북단을 동서방향으로 가로지르는 B'-line의 연직염분분포이다. 담수층의 두께는 바람장을 고려하지 않은 경우보다 감소하는 것을 볼 수 있다.

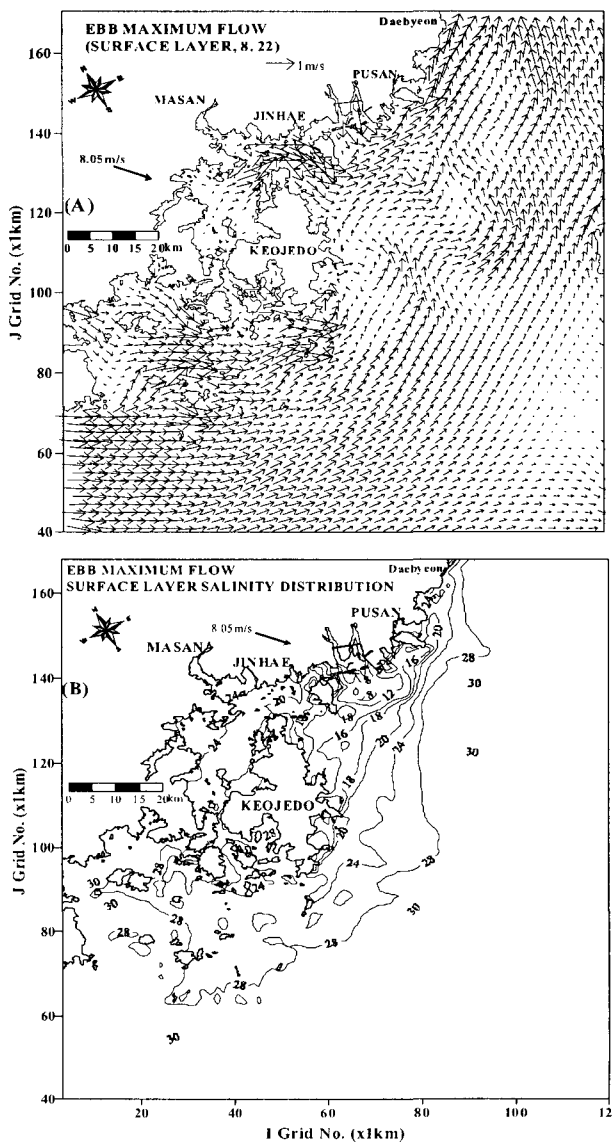


Fig. 13 Surface layer ebb maximum flow (A) and salinity (B) distribution on August 22, 1998 for the north-westerly wind.

복서풍을 고려한 경우 각 단면에서 등염분선의 연직분포는 전체적으로 바람을 고려하지 않은 경우와 크게 차이는 없었다.

남남서풍(SSW)에 의한 유출수의 거동변화

Fig. 15-16은 복서풍을 고려한 경우와 동일한 방법으로 3일간 8.05 m/s의 남남서풍을 전 영역에 일정하게 고려한 후 동일한 시간에 출력된 표층의 수평 유속 및 염분분포이다.

Fig. 15의 창조류 최강류시에는 바람장을 고려하지 않은 Fig. 9와 비교하여 거제도 남단을 돌아 통영해안으로 유입되는 성분과 가덕수로를 통과하여 진해만내로 유입되는 성분이 제한되어 16 psu의 등염분선이 진해만입구까지 진출해 있는 것을 볼 수 있고 가덕도 남단에서 분기하여 거제도 동쪽해안

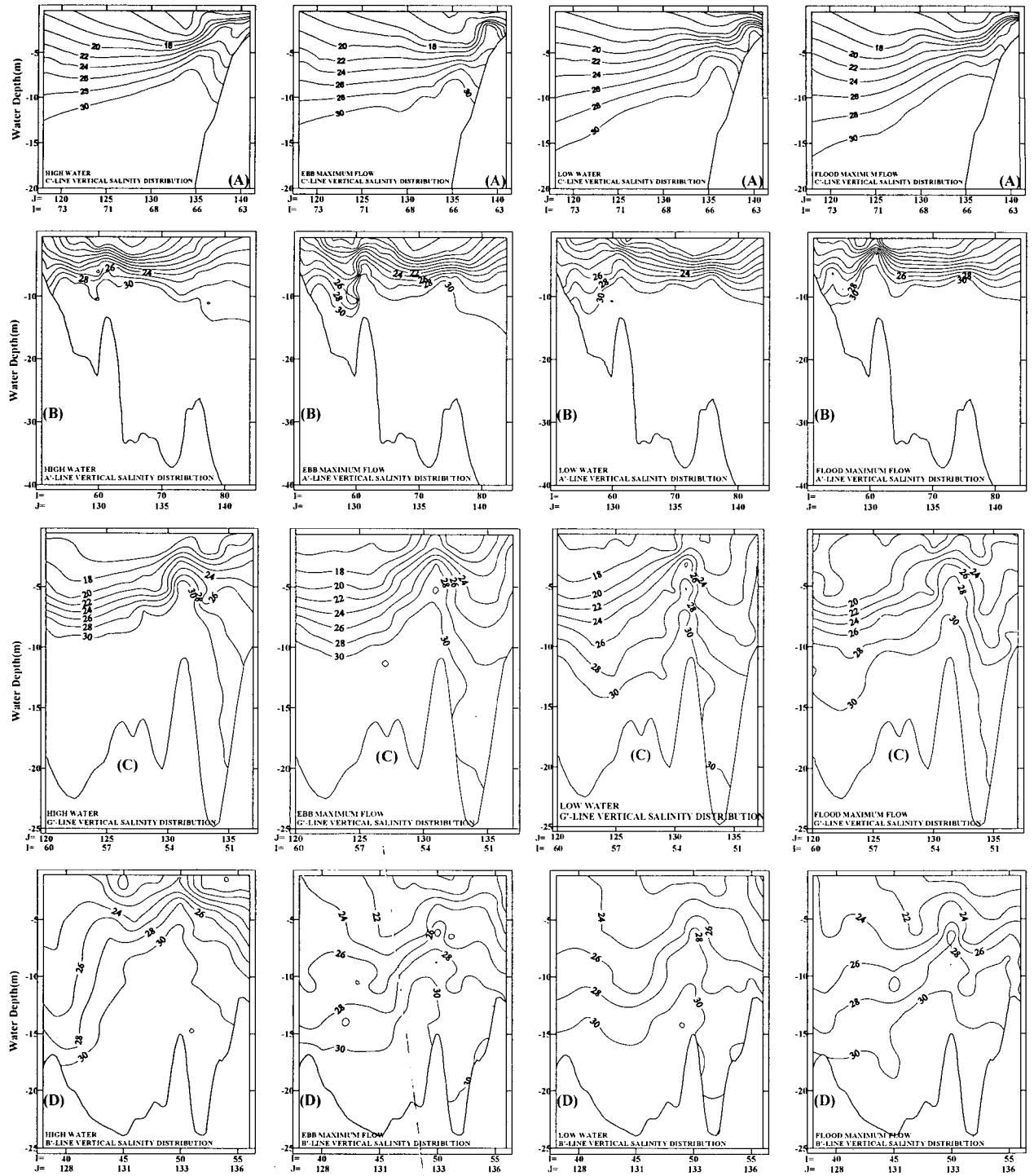


Fig. 14 Same as Fig. 11, but for the north-westerly wind.

을 따라 확장되는 성분도 크게 제한을 받고 있는 것을 볼 수 있다. 반면에 서쪽으로는 바람장을 고려하지 않았을 경우 부산연안을 따라 대변연안으로 좁은 띠를 이루며 확장되던 성분은 크게 연안을 따라 외해방향으로 폭넓게 증대되어 나타나는 특징을 보인다.

Fig. 16의 낙조류 최강류시 표층염분 분포는 가덕수로를 따라 유입된 흐름과 거제도 동쪽해안을 따라 유입된 흐름이 합류하여 부산연안쪽으로 진행되는 낙조류시의 유동패턴에 따라 부산연안을 따라 외해방향으로의 등염분선의 확장이 더욱 증대되는 것을 볼 수 있다.

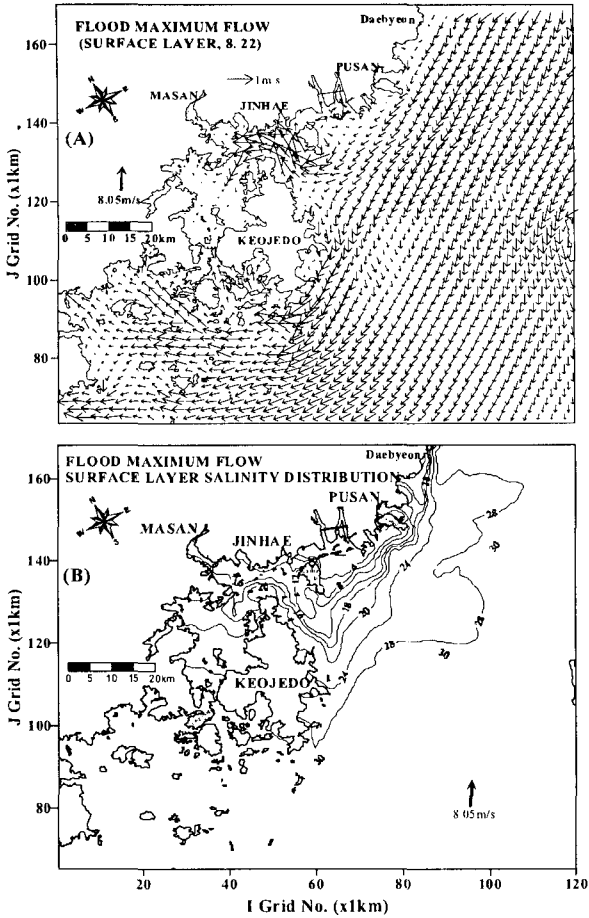


Fig. 15 Surface layer flood maximum flow (A) and salinity (B) distribution on August 22, 1998 for the south-south-westerly wind.

Fig. 17은 C', A', G', B'-line에서 계산된 8월 22일의 조석위상에 따른 염분의 연직분포이다.

Fig. 17(A)는 낙동강하구에서 외해방향인 C'-line의 연직염분 분포이다. 바람장을 고려하지 않은 Fig. 11(A)와 비교하여 낙동강하구 전면에서는 전체 조석위상에서 30 psu 이하의 담수층의 두께가 증대되는 특징을 보이고 반면에 정선의 남단에서는 창조류시 담수층의 두께가 감소하는 특징을 보인다. 이러한 형태는 Fig. 15-16의 표층수평분포에서 나타난 바와 같이 남남서풍에 의해서 낙동강하천플룸의 외해방향으로의 확장이 제한된 결과로서 사료되어진다.

Fig. 17(B)는 가덕도 남단을 동서방향으로 가로지르는 A'-line의 연직 염분분포를 나타내며, 바람장을 고려하지 않은 Fig. 11(B)와 비교하여 담수층의 두께는 큰 차이를 보이지 않지만 상대적으로 고염수가 존재하는 것을 볼 수 있다.

가덕수로 남북방향의 G'-line과 거제도 북단을 동서방향으로 가로지르는 B'-line의 연직염분분포는 Fig. 17(C) 및 Fig. 17(D)와 같고 바람장을 고려하지 않은 경우와 비교하여 저층의 염분분포는 큰 변화가 나타나지 않지만 가덕수로와 진해만

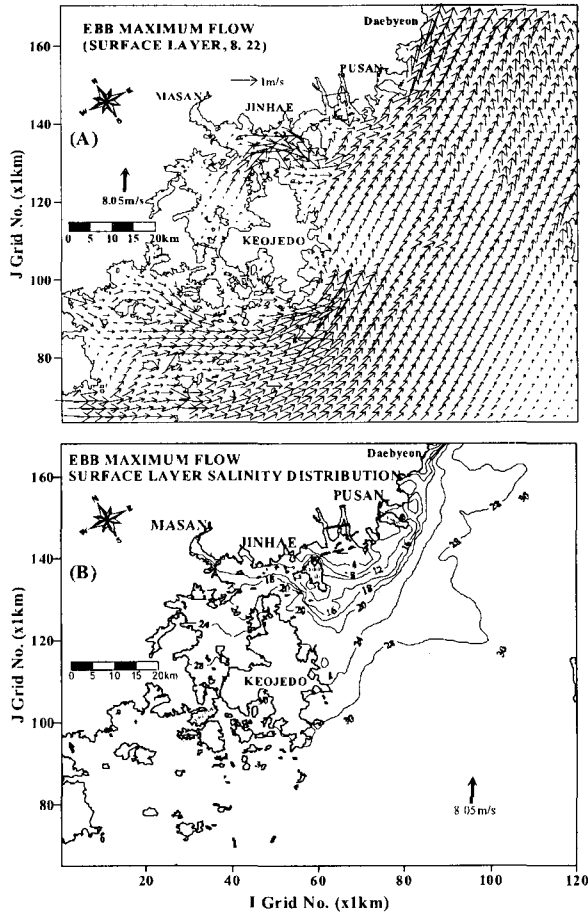


Fig. 16 Surface layer ebb maximum flow (A) and salinity (B) distribution on August 22, 1998 for the south-south-westerly wind.

내로 저염수의 유입이 감소하여 표층에서 바람장을 고려하지 않은 경우보다 상대적으로 고염수가 존재하는 특징을 보인다. 이와 같이 남남서풍은 바람을 고려하지 않은 경우와 비교하여 낙동강 하천플룸의 부산연안을 따른 외해로의 확장을 증대시키고 가덕수로와 거제도 해안을 따른 낙동강 하천플룸의 확산을 제한하는 역할을 한다.

참고 문헌

Bang, I.W. and H.J. Lie. 1999. A numerical experiment on the dispersion of the Changjiang River. *J. Oceanogr. Soc. Kor.*, 34, 185-199.

Blumberg, A.F. and G.L. Mellor. 1987. A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model: Three-Dimensional Coastal Ocean Model, Heaps, N.S. ed., Vol. 4, American Geophysical Union, Washington, D.C., pp. 1-16.

Ezer, T. and G.L. Mellor. 2000. Sensitivity studies with the North Atlantic sigma coordinate Princeton Ocean

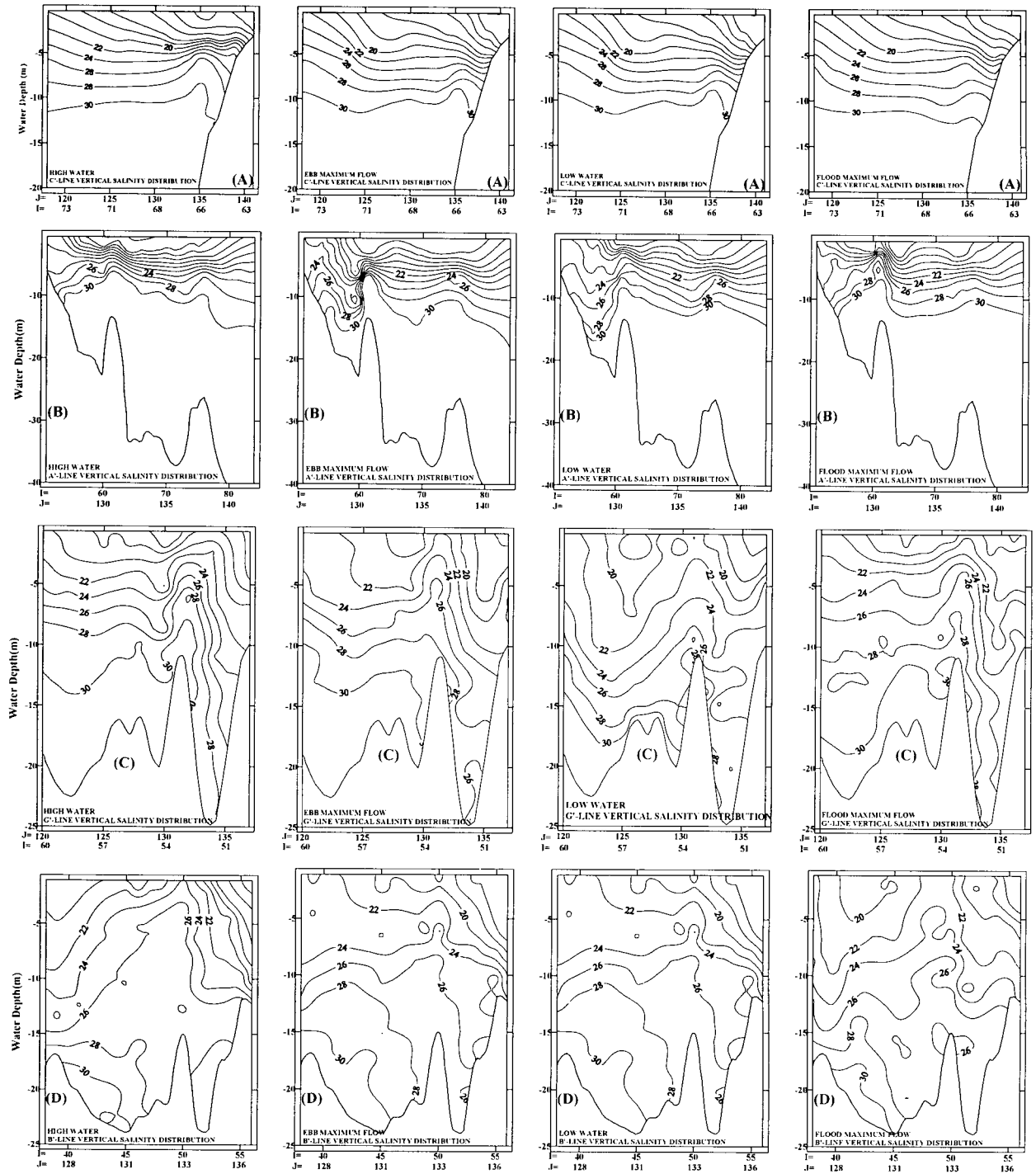


Fig. 17 Same as Fig. 11, but for the south-westerly wind.

Model. Dynamics Atmos. Oceans, 32, 185-208.
 Geernaert, G.L., K.B. Katsaros and K. Richter. 1986. Variation of the drag coefficient and its dependence on sea state. J. Geophys. Res., 91, 7667-7679.
 Hsu, S.A. 1984. Improved formulas for estimating offshore winds. Proc. 19th Coastal Eng. Conf., 2220-2229.

Jang, S.T. 2000. A Study on the Oceanographic Environment in the Nakdong Estuary. Ph.D. Thesis, Donga Univ., Busan, pp. 27-127.
 Joo, G. H. 2002. Three-Dimensional Analysis of the River Discharged Plumes in Nakdong Estuary. Ph.D. Thesis, Pukyong Nat'l Univ. Busan, pp. 6-116.

- Jung, T. S. 1996. Three-dimensional numerical modeling of tidal currents in Masan-Jinhae Bay. *KSCE*, 16 (II-1), 63-72.
- Kang T. S. 1999. A Study on the Circulation Characteristics of South-Eastern Sea in Korea using the Three Dimensional Ocean Circulation Model. MS Thesis, Pukyong Nat'l Univ. Busan, pp. 33-109.
- Kantha, L. H. 1995. Barotropic tides in the global ocean from a nonlinear tidal model assimilating altimetric tides. *J. Geophys. Res.*, 100(C12), 25283-25308.
- Kim, G.C, J.J. Kim, Y.U. Kim, G.M. Han, G.G. Choi and S.T. Jang. 1996. Outflow characteristics of Nakdong River plume. *J. Kor. Soc. Coast. Ocean Eng.*, 8(4), 305-313.
- Kourafalou, V.H., L.Y. Oey, D.W. John, and N.L. Thomas. 1996. The fate of river discharge on the continental shelf, 1, Modeling the river plume and inner shelf coastal current. *J. Geophys. Res.*, 101(C2), 3415-3434.
- Kourafalou, V.H., L.Y. Oey, D.W. John and N.L. Thomas. 1996. The fate of river discharge on the continental shelf, 2, Transport of coastal low-salinity water under realistic wind and tidal forcing. *J. Geophys. Res.*, 101(C2), 3435-3455.
- KWRC (Korea Water Resources Corporation). 1998. Annual Report of Hydrologic Data. pp. 510-521.
- Lee, J.S and E.C. Yoon. 2003. A study on the 3-dimensional mixing behaviours of Nakdong River plume. *KSCE*, 23(4B), 347-358.
- NORI (National Oceanographic Research Institute). 1998. Marine Environm. Atlas of Korean Waters, pp. 2-13.
- Oey, L.Y. 1996. Simulation of mesoscale variability in the Gulf of Mexico: Sensitivity studies. *J. Geophys. Res.*, 101(C7), 16,667-16,682.
- Pullen, J.D., and J.S. Allen. 2000. Modelling studies of the coastal circulation off Northern California: Shelf response to a major Eel river flood event. *J. Cont. Shelf Res.*, 20, 2213-2238.
- Shin, H.J., S.H. Lee and H.Y. Choi. 2002. Numerical model study for structure and distribution of the Keum River plume. *J. Kor. Soc. Oceanogr.*, 7(3), 157-170.
- Yu, H.S, J. Lee, S.Y. Kang, G.S. Choi and J.S. Kim. 1993. Lateral spreading of a river plume and transport of suspended sediments in the Nakdong Estuary. *J. Kor. Soc. Coast. Ocean Eng.*, 5(4), 296-301.

2003년 4월 28일 접수
2003년 10월 24일 수리