

한국 남서해역에서 조석전선의 변동과 저수온역 확장기작

정희동* · 권철휘** · 김상우*** · 조규대****

*, *** 국립수산과학원 동해수산연구소, ** (주)국토해양환경기술단, **** 부경대학교

Fluctuation of Tidal Front and Expansion of Cold Water Region in the Southwestern Sea of Korea

Hee-Dong Jeong* · Chul-Hui Kwoun** · Sang-Woo Kim*** · Kyu-Dae Cho****

*, *** East Sea Fisheries Research Institute, National Fisheries Research & Development Institute, Gangneung, Gangwon-Do, 210-861, Korea

** Land Ocean Environment Co., LTD, Digital-Empire 1 D-dong 1301 ho, 980-3, Youngtong-Gu, Suwon, Gyeonggi-Do, 443-813, Korea

**** Pukyong National University, Busan 608-737, Korea

요약 : 본 연구는 장기 해양관측(1966-1995)자료, 위성관측자료 및 수치모델기법을 이용하여 한국 남서해역에서 하계에 형성되는 조석전선과 저수온역의 시공간적 변화를 파악하였다. 한국 남서 연안해역에서는 6월과 8월에 대흑산도~진도간 해역의 표면에서 주변 해역보다 2~3°C 낮은 저수온역이 분포하면서 조석전선역이 형성됨을 확인할 수 있었다. 수온수평경도가 0.3°C/km 이상인 조석전선은 성층계수 2.0~2.5 범위이며, 0.03°C/km 이상인 저수온역은 성층계수 2.5~3.0의 범위와 일치하였다. 소조시에서 대조시까지 조석주기가 변하는 동안 조석전선의 위치변동은 전선은 25~75km, 저수온역의 범위는 60~90km로 조류의 세기에 정비례하여 이동 범위가 커지는 것으로 나타났다. 또한, 남서쪽 외해역으로 저수온역이 확장되는 원인은 진도 남서쪽으로 향하는 10cm/s 이상의 강한 조석잔차류에 의한 것으로 판단된다.

핵심용어 : 조석전선, 저수온역, 위성 표면수온, 수치모델, 조석잔차류

Abstract : The appearance and variation of cold water area and its expansion mechanism of tidal front in the south western coast of Korea in summer were studied on the basis of oceanographic data(1966-1995), satellite images from NOAA and SeaWiFs and numerical model. Cold water appearance in southwestern field of Jindo was due to the vertical mixing by strong tidal current. Tidal front where horizontal gradient of water temperature was more than 0.3°C/km parallels to contours of H/U^3 parameter 2.0~2.5 and the outer boundary of cold water region corresponds with contours of the parameter 2.5~3.0 in the southwestern sea of Korea during the period between neap and spring tides. The position replacement of tidal front formed in the study area varies in a range of 25~75km and cold water region extends about 90km. These suggest that the magnitude of variation of frontal position and cold water area was proportionate to the tidal current during lunar tidal cycle. Moreover, it was estimated that the southwestward expansion of cold water region was derived from the southwestward tide-induced residual currents with speed more than 10cm/s.

Key Words : Tidal front, Cold water region, NOAA SST, Numerical model, Tide-induced residual current.

1. 서론

조석전선(tidal front)은 연직적으로 수괴가 잘 혼합된 연안 수괴와 성층이 형성되어 안정된 외양 수괴 사이의 경계면에 형성되며, 해양생물의 분포에 큰 영향을 미친다(Bowman and Esaias, 1977). 이러한 조석전선이 해양생물학적으로 중요한 곳임을 인식한 것은 Uda(1938)가 전선해역이 부유물질

의 집적과 해양생물들의 분포 경계면이라고 거론하면서 시작되었다. Pingree and Griffiths(1978)은 조석전선이 해양의 1차 생산자인 식물플랑크톤의 분포와 성장에 큰 영향을 준다고 하였다. 최(1991)는 경기만 외해역에 형성된 조석전선이 식물플랑크톤의 분포와 일차생산력과 관계한다고 하였다. 황해 동부해역의 조석전선은 하계에 조류에 의한 해저난류 때문에 발생하며, 동계에는 서해 전역이 저층의 난류 혼합과 표면의 대류작용으로 인하여 전선이 명확하게 형성되지 않는다(조 등, 1983; 추와 조, 1984). Choi(1980)는 황해 및 동지나 해에서 성층·혼합모델을 수행하여 한국 서해안의 조석에너

* 대표저자 : 정희동, hdjeong@nfrdi.go.kr, 033-660-8530
** 공동저자 : 정희원, kwounch@hanmail.net, 010-7707-9704
*** 공동저자 : 종신회원, swkim@nfrdi.go.kr, 033-660-8535

지 손실률이 크다고 지적하였고, 이로 인한 조석전선의 존재 가능성을 제시하였다. Lie(1989)는 CTD 자료와 위성관측 표면수온 자료를 분석하여 한국 남서해역 조석전선의 위치와 구조를 설명하였으며, 정과 이(1990)는 위성 자료를 분석하여 황해 남동해역의 전선대(frontal zone)의 수평 수온구배가 0.05~0.1°C/km라고 보고하였다. Fedorov(1983)의 경우 전선대는 수평구배가 0.03°C/km, 전선(front)은 0.3°C/km로 정의하였다.

조석전선의 형성기작은 에너지 보존법칙으로 설명되며, 해저면과의 마찰에 의해 소멸되는 조류의 운동에너지가 난류 에너지로 바뀌고 이것이 해수의 수직혼합을 일으켜 위치에너지로 변환된다. 따라서 조류의 운동에너지 소모율은 해수의 성층 정도와 밀접한 관계가 있다. 이러한 관계에 대하여 Simpson and Hunter(1974)는 $S = \log(H/U^3) / (\log H/U^3)$ (H:수심, U:유속)를 성층계수로 제시하였으며, 해류관측 자료를 이용하여 조석전선의 위치가 성층계수 1.0~1.4와 일치한다고 하였다. Fearhead(1975)는 영국 주변해와 펀디만의 조석전선 출현 지역의 성층계수가 1.5~2.0인 지역과 일치한다고 하였다. Yanagi and Tamaru(1990)는 일본은 Bungo Channel에서 조석전선의 위치가 성층계수 2.5인 등심선과 일치한다고 하였다. 또한, Osaka Bay의 동계는 성층계수가 3.0~3.5, 하계는 2.5~3.0의 범위에서 조석전선이 발견된다고 하였다 (Yanagi et al, 1995).

한편 조 등(1995)은 직접 관측된 조석전선의 위치가 성층계수($\log H/U^3$) 1.5~2.0의 값으로 추정되는 조석전선의 위치보다 대·중·소조시 모두 서해 쪽으로 10~30km 외해쪽에 위치한다고 하였다. 그러나 한국 남서해역에서 성층계수를 이용한 기존의 연구결과들(정 등, 1990; 조 등, 1995)은 계산격자의 간격이 20km와 1.25km 등으로 연안경계와 해저수심에 많은 영향을 받는 연안해역의 특성을 반영하기에는 부족하였다. 또한 수치실험 결과와 표층수온의 변화만으로 조석전선을 구분하였으며, 조석 혼합역으로 추정이 가능한 탁도에 의한 분석을 제외한 표층 수온만으로는 조석혼합에 의한 조석전선을 추정하기에는 어려움이 있었다.

따라서, 본 연구에서는 장기 해양관측(1966~1995) 및 위성관측 자료와 수치모델을 이용하여 한국 남서해역에서 형성되는 조석전선의 조시에 따른 변동과 저수온역의 확장 원인을 구명하고자 하였다.

2. 자료 및 방법

본 연구해역의 범위는 한국 남서부 해역인 33~36°N, 124~128°E 이며, 이 해역은 진도, 흑산도를 비롯한 많은 도서로 이루어진 다도해로서 그 수심이 50m 내외로 얇은 천해역

을 이루고 있다(Fig. 1). 수심 분포는 20m, 50m, 100m의 등수심선들이 연안선을 따라 평행하게 분포하고 있다.

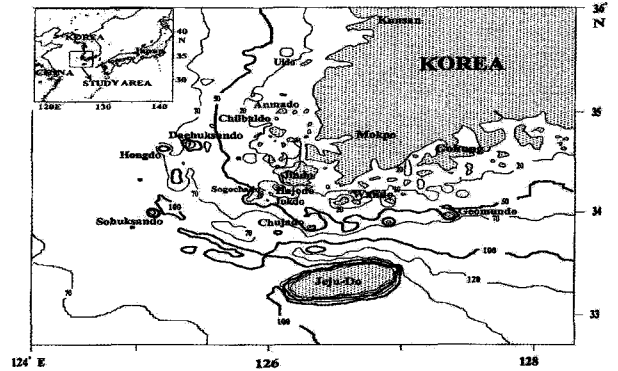


Fig. 1. Location(upper left) and bathymetry(in meter) of the southwestern area of Korea.

2.1 자료

2.1.1 수온 및 위성관측자료

우리나라 남서연안에서 조석전선의 출현 증거를 평균적인 해황에서 찾아보기 위하여 국립수산진흥원에서 발간한 30개년(1966~1995)의 해양조사연보를 이용하였다. 수온의 수평분포도는 정선 203~205, 309~314선의 표면과 50m층을 설정하여 격월(2, 4, 6, 8, 10월)별로 조사하였다(Fig. 2).

표면수온의 시계열적 특성과 조석전선의 출현 시기를 파악하기 위하여 국립수산과학원에서 수신한 1990년의 소조기인 7월 17일, 중조기인 8월 2일과 3일, 대조기인 8월 7일의 NOAA AVHRR(Advanced Very High Resolution Radiometer) 영상자료(공간분해능 1.1km)를 이용하였다. NOAA 위성영상의 보정은 Park(1999)에 의한 방법으로 기하학적 지형보정, 구름보정을 하였다. 또한 표면수온 외에 연직혼합에 의한 조석전선의 가시적인 증거를 제시하기 위하여 해색(ocean color) 위성인 SeaWiFs(공간분해능 1.1km)에서 관측한 부유물질(suspended sediments) 탐지밴드인 555nm 영상(1999년 8월 31일)을 이용하였다.

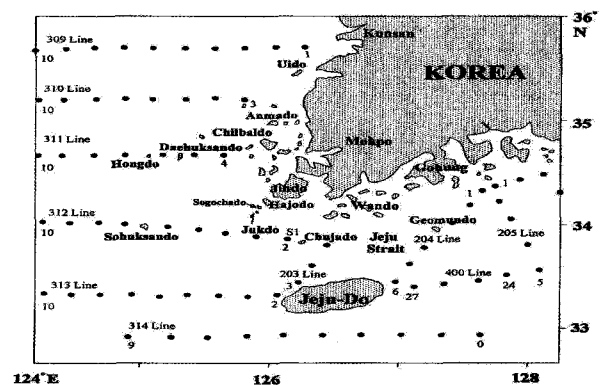


Fig. 2. Location of the oceanographic lines and stations(NFRDI) used for this study.

2.1.2 모델입력자료

해수유동모델 입력 자료는 한반도 주변 조석조화상수 자료집(해양연구소, 1996)에 수록된 연구해역 8개 지점의 진폭과 위상 자료를 이용하였다. 조류모델 결과는 대한민국 수로국에서 진도 주변 2개 정점(A6, M1)에서 연속 관측한 조류 관측자료(해양연구소, 1986)를 이용하여 검증하였다. 연구해역의 조석 및 조류관측 지점, A6과 M1 지점에서의 조류관측 기간과 수심을 Fig. 3과 Table 1에 각각 나타내었다.

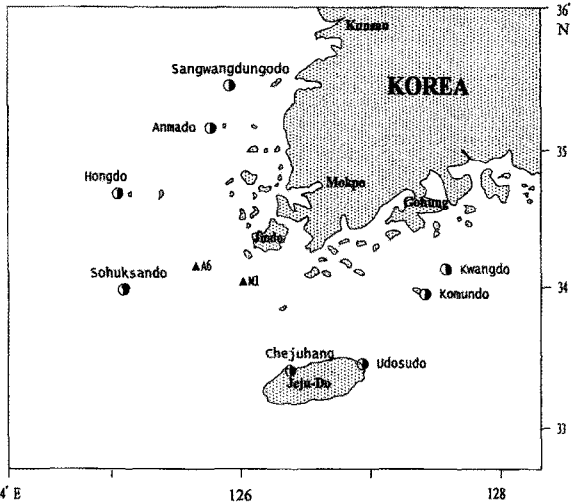


Fig. 3. Tidal level observation stations(●) by National Oceanographic Research Institute and current observation stations(▲) by Korea Ocean Research and Development Institute in the southwestern coast of Korea in June 1985.

Table. 1 Information of current meter mooring in 1985

Station	Water depth	Mooring depth	Duration	Location	
				Lon.	Lat.
A6	67m	20m	17 June 1:30 - 22 June 15:00	125 35.8E	34 11.1N
M1	68m	20m	22 June 17:00 - 23 June 06:30	125 55'E	34 06'N

2.2 연구방법

2.2.1 성층계수의 산정

관측된 표면수온과 탁도를 이용한 조석전선의 위치 파악과 조류모델 결과에 의한 성층계수의 분포를 비교·검토하여 조석전선의 위치를 수치실험으로 재현하였다. 또한, 조류의 유속을 이용한 성층계수(S)는 Simpson and Hunter(1974)가 제시한 식(1)로 구하였다.

$$S = \log(H/U^3) \tag{1}$$

U : 수심적분된 조류의 유속(m/s)

H : 수심(m)

본 연구에서는 한국의 남서해역(Fig. 1)에서 조석전선대와 조석전선의 정의를 Fedorov(1983)의 기준에 따라 표면수온의 수평구배가 0.3°C/km 이상인 전선대 해역과 0.03°C/km 이상인 전선 해역으로 정의하였다.

2.2.2 조류모델의 개요

연구해역에서 해수유동을 재현하기 위하여 지형의 효과를 고려한 수치모델인 Heaps모델을 사용하였으며, 이를 유한차분법(finite difference method)으로 재현하였다. 계산의 편리를 위하여 유체는 점성이고 비압축성이며, 압력은 정수압분포를 하는 것으로 가정하였다. 연직방향의 흐름은 시간적 변화량을 무시하였다. 이상과 같은 가정 하에서 수심적분된 연직 2차원 조류모델의 운동방정식과 연속방정식은 다음과 같다(Flather & Heaps, 1975).

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - fv = -g \frac{\partial \eta}{\partial x} + A_h \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + \frac{\tau_x}{h + \eta} \tag{2}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + fu = -g \frac{\partial \eta}{\partial y} + A_h \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + \frac{\tau_y}{h + \eta} \tag{3}$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = 0 \tag{4}$$

여기서 x, y는 2차원 직교좌표(x: 동쪽, y: 북쪽), u, v는 x, y방향의 수심평균된 유속(m/sec), η는 평균해면으로부터의 해면값(m), h는 평균해면하의 수심(m), f는 Coriolis parameter(2Ωsinθ, Ω:각속도, θ:위도), A_h는 수평확산계수(1x10⁷cm²/sec), g는 중력가속도(9.8m/sec²)를 나타낸다.

또한, 식(2), (3)의 τ_x와 τ_y는 해저마찰을 나타내며, 식(5), (6)과 같이 계산하였다.

$$\tau_x = -\gamma_b^2 (u^2 + v^2)^{1/2} u \tag{5}$$

$$\tau_y = -\gamma_b^2 ((u^2 + v^2)^{1/2} v) \tag{6}$$

여기서 γ_b²는 해저마찰계수이다. (2),(3),(4)식을 차별화하여

계산하였으며, 차분방법은 Dufort-Frankel법을 이용한 leap-frog scheme를 사용하였다. 연안선에서 유속은 $u = v = 0$ (non-slip condition)을 주었다. 개방경계조건은 식(7)과 같이 조석변위에 의한 해면승강을 반영하였다.

$$\eta = \eta_0 \sin\left(\frac{2\pi}{T_M} t - P\right) \quad (7)$$

여기서, η_0 , P 는 open boundary의 진폭과 위상이고, T_M 은 M_2 의 조석주기, t 는 시간이다.

계산영역은 균일 격자로 나누고 CFL(Courant Friedrichs Lewy) 조건을 만족하게 time step을 결정하였다(식 8).

$$\Delta t \leq \frac{\Delta s}{\sqrt{2gHmax}} \quad (8)$$

여기서 $Hmax$ 는 연구해역의 최대수심(140m)이며, ΔS 는 격자의 크기로서 위도 1분에 해당하는 거리(m)이다. 모델영역은 외해경계를 고힌반도 남동쪽 외나로도에서 제주 해협 동·서해역을 포함하고 서쪽으로는 소흑산도 부근해역, 북쪽으로는 변산반도 근해역까지 설정하고, 각 격자의 크기는 위도 1분, 경도 1분의 격자로 이루어진 21,708개(162×134)의 격자망으로 구성하였다. 외부경계조건은 Choi(1980)의 M_2 , S_2 분조에 대한 Tidal chart를 참조하고 한반도 주변 조석조화상 수 자료집(해양연구소, 1996)에 수록된 연구해역 내의 8개 조석관측 지점의 진폭과 위상자료(Table 2)로 linear interpolation한 값을 경계치로 적용하였다.

2.2.3 저수온역의 정의

저수온역은 성층해역의 상층수온보다는 낮고 저층수온보다는 높은 연직혼합수온역으로 본 연구해역에서 조석전선 형성과 관련되어 나타나는 수온전선과 저수온역은 Fedorov(1983)의 기준에 따라서 수온수평경도가 각각 0.3°C/km, 0.03°C/km 이상인 해역으로 적용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 정선관측자료를 이용한 연평균 수온분포

조석전선의 출현 시기 및 범위를 파악하기 위하여 한국 남서연안해역에서 30년간 장기 해양관측 자료를 이용하여 격월별 평년수온 분포를 Fig. 4에 나타내었다. 2월부터 10월까지 표면 및 50m층의 수평수온분포를 보면, 2월의 경우 표면수온의 범위는 약 5~15°C로서 군산 연안에서 가장 낮고 남쪽으로 갈수록 높아져 제주도 동남방 해역에서 가장 높게 나타났다.

Table 2. Harmonic constants(Harmonic constants of tide around the Korea Peninsula, KORDI, 1996)

Station	Latitude	Longitude	Constitutions		
				M_2	S_2
Kwangdo	34° 15' 36"	127° 31' 35"	Amp.	89.1	42.3
			Phase	267.7	296.5
Udosudo	33° 30'	126° 54'	Amp.	66.0	31.0
			Phase	274.0	296.0
Chejuhang	33° 30' 52"	126° 31' 51"	Amp.	69.7	29.5
			Phase	303.5	324.1
Komundo	34° 03' 23"	127° 18' 38"	Amp.	83.7	40.0
			Phase	276.3	309.6
Sohuksando	34° 05' 03"	125° 07' 02"	Amp.	73.0	20.3
			Phase	3.8	32.5
Hongdo	34° 40' 47"	125° 11' 42"	Amp.	94.5	35.6
			Phase	24.0	55.1
Anmado	35° 20' 30"	126° 01'	Amp.	172.2	62.2
			Phase	55.5	98.2
Sangwang-dungodo	35° 29' 33"	126° 06' 48"	Amp.	180.0	65.7
			Phase	76.2	134.6

제주해협에서는 11°C를 중심으로 수평경사 약 0.08°C/km의 수온전선이 남해안의 연안선과 거의 나란하게 동서방향으로 분포하였다. 50m층은 6~15°C의 수온 범위로 표층과 거의 동일하여 표·저층간의 수직혼합이 활발한 동계의 특성을 잘 나타내고 있다. 4월에는 2월의 수온과 비교하였을 때 약 1~2°C 정도 높은 분포였으며, 등온선의 형태는 유사하게 나타났다. 6월의 표면수온은 16~20°C의 범위로 4월보다 크게 상승하였다. 특히, 대흑산도 주변의 표면에서는 주변해역보다 수온이 약 2°C 정도 낮은 저수온역이 형성되었음을 볼 수 있었다. 50m층은 7~16°C의 범위로 4월보다 약 1°C 상승한 경향으로 전남 서북쪽 외해역에는 8°C이하의 저수온역, 제주도 동쪽해역에는 16°C이상의 고수온역이 분포하였다. 8월의 표면수온은 23~27°C의 범위로 6월에 비해 7°C나 상승하였으나 6월부터 나타나기 시작한 대흑산도 주변의 저수온역은 그 중앙부가 약 23°C 이하로 주변수온보다 약 3°C 정도 낮았다. 50m층의 수온분포를 보면 전남 북서쪽 외해역이 11°C 이하였고 연안으로 갈수록 수온이 높아져 대흑산도 인근 해역에는 16°C 내외의 고수온이 분포하면서 남북방향으로 전형적인 조석전선이 형성되었다. 10월의 표면수온은 19~24°C의 범위로 대흑산도 주변해역에는 20°C 이하의 저수온역이 약하게 잔존하고 제주도 동쪽해역은 22°C이상의 분포였다. 50m층은 서쪽 외해역에 12°C이하, 연안역은 15°C이상으로 남북방향의 조석전선이 지속하고 있음을 알 수 있다.

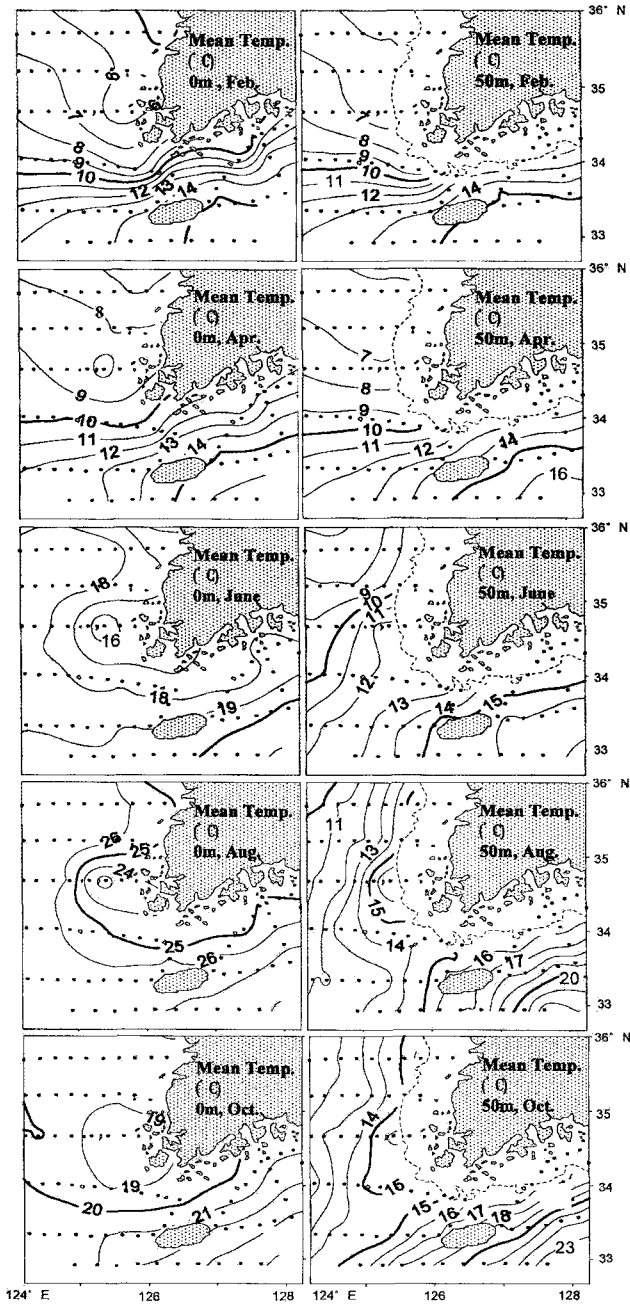


Fig. 4. Bi-monthly mean(1966-1995) temperature at sea surface and 50m layer in the study area.

3.2 위성자료 분석에 의한 조석전선의 시·공간적인 변동

한국남서해역에서 하계에 출현하는 조석전선의 조시별 변동을 파악하기 위하여 비교적 맑은 날이 이어져 표면수온 자료의 비교가 용이한 1990년 하계를 택하여 조사하였다. 소조에서 대조사이(소조 7월17일, 중조 8월 3일, 대조 8월 7일)의 창조시에 관측된 표면수온을 이용하여 Fedorov(1983)의 기준을 적용한 조시별 조석전선의 위치와 저수온역 분포를 Fig. 5에 나타내었다. 조석전선의 위치는 소조시에는 진도 남서쪽의 일부 해역을 제외하고는 뚜렷한 전선이 형성되지 않았다. 중조시에는 진도 서북서쪽 우이도에서 진도 남서쪽 약 45km해역을 거쳐서 고흥반도 남쪽의 손죽열도에 이르는

해역에 전선이 분포하였다. 대조시에는 중조시에 진도 서쪽 약 25km에 위치하던 전선이 서쪽으로 약 75km 정도 이동하여 홍도 부근해역까지 확장하였다. 남쪽으로는 중조시 보길도 연안에 있던 전선이 추자도 부근까지 약 25km, 남서 외해 쪽으로는 약 40km 이동하여 분포하였다. 저수온역은 소조시 전남 서쪽의 임자도~대흑산도~소흑산도~추자도~보길도를 잇는 해역에서 형성되었다. 중조시에는 소조시와 큰 차이를 보이지 않으나 동쪽으로는 다소 확장되어 고흥반도 남단까지 분포하였다. 그러나 대조시에는 진도 남쪽과 서쪽은 분포역이 비슷한 반면 북쪽으로는 군산 인근해역까지 분포하며 동쪽으로는 여수 돌산도 부근 해역까지 확장하고 있으며, 또 남서쪽으로는 소흑산도 남남서쪽 약 60km 까지 혀모양으로 분포하는 것으로 나타났다(Fig. 5).

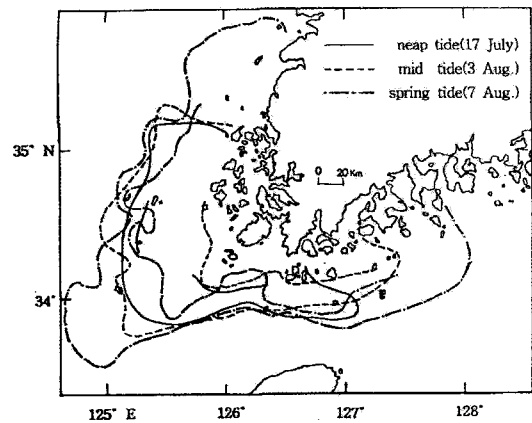


Fig. 5. Distribution of tidal front and cold water region by the criteria of Fedorov(1983) on 17 July, 3, 7 August 1990.

같은 조석시간대의 창조와 낙조간 변화를 파악하기 위하여 중조기(8월 2, 3일)의 창조와 낙조시의 전선의 위치를 Fig. 6에 나타내었다. 전선의 위치는 창조시에 진도 서쪽 25km에 위치하던 전선이 낙조시에는 보다 서쪽으로 이동하여 진도 서쪽 50km 부근에 위치하고 있으나 진도 북서쪽 비금도 연안에서 진도 남서쪽 연안을 돌아 보길도, 고흥반도 남쪽의 손죽열도에 걸쳐 분포하는 전선의 형태는 창·낙조시 모두 유사하게 나타났다. 저수온역의 분포는 북쪽으로는 전남 영광 인근해역에서부터 대흑산도와 소흑산도를 거쳐 추자도와 고흥반도 부근해역을 잇는 형태로 전선과 같이 창·낙조시가 비슷한 분포를 보인다. 진도를 중심으로 살펴보면 서쪽으로는 약 120km, 남쪽으로는 약 60km 부근해역에 걸쳐 분포하는 것으로 나타났다(Fig. 6). 이러한 결과는 조 등(1995)이 제시한 전선 이동거리 20~60km와 크게 다르지 않다. 한편 저수온역의 경우 진도를 중심으로 남쪽과 서쪽은 조시별 위치가 거의 비슷한 반면 북쪽과 동쪽으로 약 90km, 남서 외해 쪽으로 약 60km에 이르는 변동이 각각 나타난 것은 연안역에서는 대조로 갈수록 강해지는 조류에 의하여 저수온역이 확장되는 것으로 해석되며, 남서 외해역으로는 또 다른 확장 기작이 있음을 시사한다.

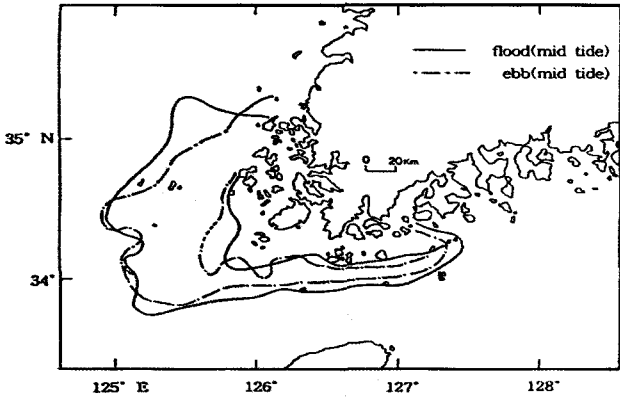


Fig. 6. Distribution of tidal front and cold water region by the criteria of Fedorov(1983) on 2(flood) and 3(ebb) August 1990.

진도 서부해역 전선대 부근에서 혼합수역은 해수의 탁도가 높고 성층역은 낮은 탁도로 그 경계가 육안으로도 명확히 구별되므로(해양연구소, 1986) SeaWiFS위성의 555nm 밴드의 부유물질 감지 영상을 이용하여 한국남서해역의 해수 탁도를 조사하였다. 1999년 8월 31일에 SeaWiFS 위성에서 관측된 해수 탁도의 영상(Fig. 7)을 보면 한국 남서 연안해역에 조석 전선이 형성된 해역의 범위(Fig. 5)와 해수의 탁도가 높게 나타나는 해역의 범위가 진도 서측 해역에서 대부분 일치하는 것으로 나타났다. 그러나, 북위 35° 이북의 안마군도 부근에서는 조석전선의 혼합역으로 추정되는 탁도가 높게 나타났지만, 표면 수온자료에서는 뚜렷한 조석전선이 나타나지 않았다. 이와 같이 안마군도 주변해역에서 조석전선이 잘 발달하지 않는 원인은 50m이상의 수심 분포를 보이는 진도 주변해역과는 달리 안마군도 부근의 해역은 수심이 평균 20m내외의 얕은 해역이기 때문에 수심 20m이심에 존재하는 황해의 저층냉수가 표층으로 공급될 수 있는 조건을 만족하지 못하기 때문인 것으로 판단된다.

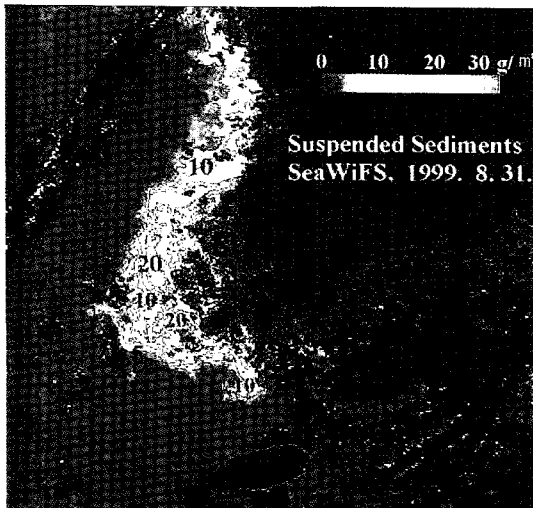


Fig. 7. Apparent sea surface suspended sediment estimated from ocean color image of SeaWiFS satellite on 31 August, 1999.

3.3 해수유동모델의 검증 및 결과

연안에서 조석전선이 출현하는 기작들 중에서 조류에 의한 해저마찰로 인하여 생기는 수온전선의 형성과정을 파악하기 위하여 2차원 조류 수치실험을 수행하였다. 조류모델 결과의 검증을 위해서 정점 A6과 M1(Fig. 3)에서 1985년 연속 관측된 자료(해양연구소, 1986)를 이용하였다. 1985년 관측한 자료와 조류 수치실험 결과를 Fig. 8에 나타내었다. Fig. 8에서 점들은 관측 값들이고, 실선의 타원형은 계산결과 얻어진 조류타원도이다. 모델계산 결과치와 관측치가 비교적 유사하게 재현된 것으로 판단되며 모델계산 결과를 이용하여 구한 성층계수로 조석전선을 파악하는 데 무리가 없을 것으로 사료된다.

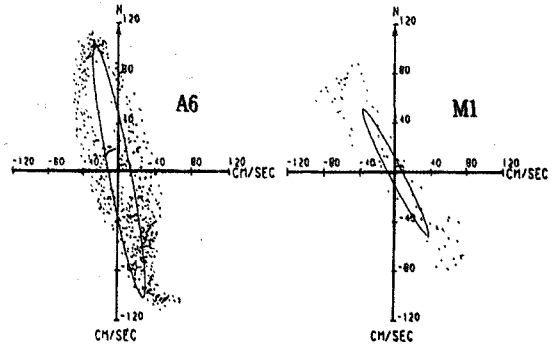


Fig. 8. Comparison of observed current data with computed tidal ellipses at st. A6 and st. M1.

조류모델 수행결과 나타난 연구해역의 대조시 창조와 낙조류의 조류벡터를 Fig. 9에 나타내었다. 창조시의 해수 유동은 동쪽에서 제주해협으로 유입한 조류가 제주도 서쪽해역에서 북서쪽으로 흘러드는 조류와 합류하여 진도 남서쪽의 맹골수도 부근에서 북서류하면서 최강류를 나타내었다. 진도 서부에서 대흑산도간 해역에서는 주로 북류하다가 북부에서는 다시 북동류로 바뀐다. 약 140cm/s 이상의 강류대는 추자도와 보길도간 해역에서 맹골수도 그리고 진도 서쪽 연안을 거쳐 안마도 주변해역에 걸쳐 형성되었다. 낙조시의 해수유동은 창조시의 유속은 거의 비슷하며 방향은 반대로 나타났다.

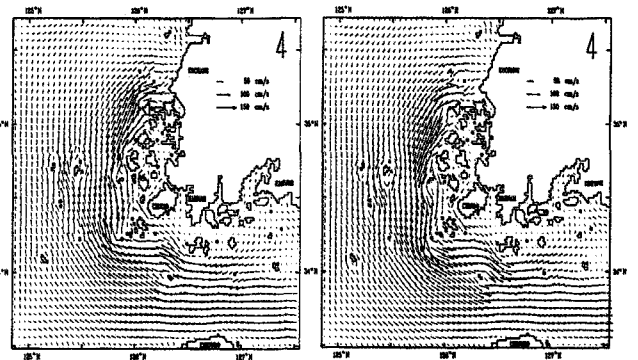


Fig. 9. Distribution of tidal currents on maximum flood(Left) and maximum ebb(Right) in the spring tide.

연구해역에서 장기적으로 물질순환 및 해수특성의 변동에 크게 영향을 미칠 수 있는 대조시 조석 잔차류의 분포를 살펴해보았다(Fig. 10). 안마군도 서쪽 해역에서 진도 남서쪽 맹골군도 부근해역까지 약 7~10cm/sec의 남향류가 나타났다. 한편, 진도 남쪽 독거군도에서 맹골군도간 인접해역에서는 반시계방향의 환류가 형성되면서 서쪽으로 향하는 7~10cm/sec의 흐름이 나타났다. 이 두 흐름은 저수온 중심해역인 진도 남서 약 15마일 해역에서 서로 만나며 남서 외해쪽으로 10cm/sec 이상의 강한 흐름을 볼 수 있다. 이 흐름은 연구해역에서 남서쪽 방향으로 저수온역의 분포를 확장시키는 기작으로 판단된다. 이러한 판단의 근거는 조시별 전선역 분포(Fig. 5, 6)에서 나타나는 남서 외해쪽 혀모양의 분포 방향이 조석잔차류의 진행방향과 일치하기 때문이다. 따라서 한국 남서연안에서의 저수온역의 형성에 따른 조석전선의 변동 기작은 강한 조류에 의한 표·저층간의 혼합뿐만 아니라 강한 조석잔차류에 의한 이류효과에 의한 결과라고 사료된다. 향후 조류 및 조석잔차류에 영향을 미치는 연안경계와 해저수심이 해수의 유동에 어떤 영향을 미치는 지에 관한 연구가 필요하며, 이를 위하여는 3차원 조류모델의 적용이 필요하다.

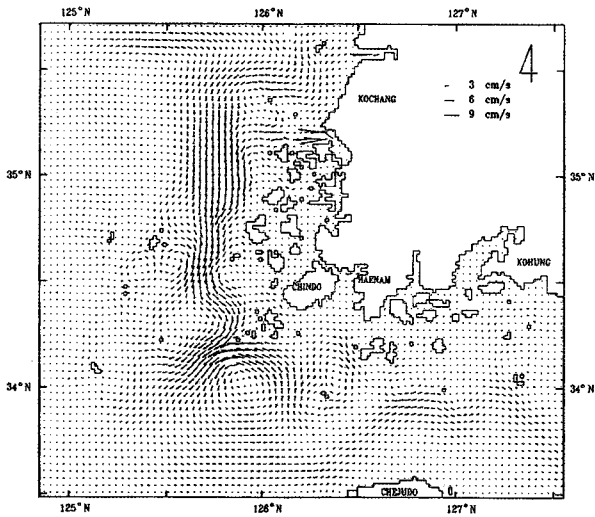


Fig. 10. Tide-induced residual currents in the spring tide.

3.4 성층계수를 이용한 조석전선의 시·공간적인 변동

조류모델의 결과를 이용하여 성층계수를 산정한 후, 그 값을 이용하여 조석전선의 위치를 파악하고, 대조시 표면수온으로부터 파악한 전선의 위치(Fig. 5)와 비교하였다. 창·낙조류로 계산된 성층계수의 분포(Fig. 11)는 창조시 성층계수 2.5의 등치선과 표면수온의 조석전선 위치가 유사하게 나타났다. 특히, 진도 남서쪽 약 70km해역의 북쪽 대부분의 해역은 조석전선의 위치가 거의 일치하였다. 반면 진도 남서쪽 약 70km해역에서 제주도 북쪽해역까지는 성층계수 2.0~3.0의 위치와 조석전선의 위치가 유사하게 나타났다. 낙조류시 성층계수의 분포는 창조류시와 거의 동일한 분포양상을 보였

다(Fig. 11). 중조시 창·낙조류시에는 성층계수 2.0~2.5의 범위가 조석전선의 위치와 유사하게 나타났다. 대조시와 유사하게 진도 남서쪽 약 45km해역의 북쪽 해역에서 조석전선의 위치가 일치하였으나, 진도 남서쪽 약 45km해역부터 동측의 남해 연안에서는 성층계수 2.0~3.0의 범위로 나타났다. 표면수온에 의한 소조시 조석전선의 위치는 중조시의 위치와 유사하지만 진도 남서쪽의 일부 해역에 국한되어 나타났으며(Fig. 5), 소조시 성층계수 2.0~3.0의 범위로서 조석전선의 위치를 파악하기에는 부적절하였다.

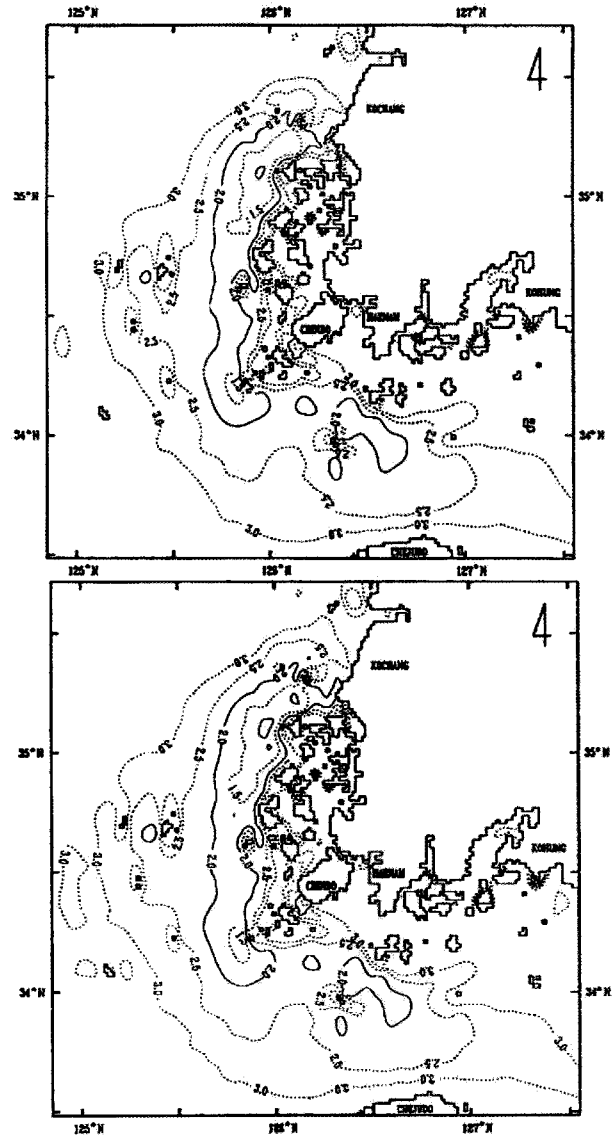


Fig. 11. Contours of $\log(H/U^3)$ on maximum flood(upper) and maximum ebb(lower) in the spring tide.

이러한 결과는 Yanagi and Tamaru(1990)가 제시한 일본의 봉고해협 성층계수 범위(2.5~2.9)와 거의 일치한다. 그러나 Lie(1989)가 제시한 1.0~1.4와 영국 주변해와 펀디만의 1.5~2.0(Fearnhead, 1975; Shmpson et al., 1978)에 비하여 다소 높은 것은 전선이 형성되는 지형적·해양학적 특성과 전선의

위치를 결정하는데 사용된 자료의 시·공간적 분해능의 차이에 기인하는 것으로 판단된다.

4. 결론

한국 남서 연안해역에서 조석전선과 저수온역의 시·공간 변동을 파악하기 위하여 장기 해양관측자료를 분석하고 인공 위성으로 관측된 표면수온 및 탁도 분포의 특성을 조사하였으며, 조류모델의 결과와 성층계수의 분포를 관측 자료와 비교하였다. 조석전선역은 6월과 8월에 대흑산도~진도간 해역의 표면에서 주변 해역보다 2~3°C 낮은 저수온역이 분포하면서 조석전선역이 형성됨을 확인할 수 있었다. 수온수평경도가 0.3°C/km 이상인 조석전선은 성층계수 2.0~2.5 범위와 일치하며, 0.03°C/km 이상인 조석혼합에 의한 저수온 분포역은 성층계수 2.5~3.0의 범위와 일치하였다. 소조시에서 대조시까지 조석주기가 변하는 동안 조석전선의 위치변동은 전선은 25~75km, 저수온역의 범위는 60~90km로 조류의 세기에 정비례하여 이동 및 분포 범위가 커지는 것으로 나타났다. 특히, 남서쪽 외해역으로 조석혼합에 의한 저수온 분포역이 확장되는 기작은 진도 남서쪽으로 향하는 10cm/s 이상의 강한 조석 잔차류에 기인하는 것으로 판단된다.

사 사

이 연구는 국립수산과학원(동해 해양환경연구, RP-2009-ME-064)과 한국항공우주연구원의 “유류오염해역의 해양환경 모니터링” 사업의 지원에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

[1] 조규대, 홍성윤, 김희준, 양용립(1983), 황해 동부의 대륙붕전선의 구조와 부유물질의 분포, 한국수산학회지, 제16권 제4호, pp. 316-329.

[2] 조양기, 최병호, 정황화(1995), 한국 남서해역 조석전선의 변화, 한국해양·해양공학회지, 제7권 제2호, pp. 170-175.

[3] 정종률, 이태신(1990), NOAA 자료를 이용한 여름철 한국 서안의 조석 전선 연구, 한국지구과학회지, 제11권, 제3호, pp. 276-282.

[4] 최중기(1991), 황해 중·동부 연안수역의 조석전선이 식물플랑크톤 생산력과 분포에 미치는 영향, 한국해양학회지, 제26권, 제3호, pp. 223-241.

[5] 추효상, 조규대(1984), 1982년 하계 서해안 조석전선의 구조, 한국수산학회지, 제17권, 제2호, pp. 83-91.

[6] 해양연구소(1986), 한국 남서해역에서 조석전선, KORDI Rep. BSPE00058-93-1, p. 106.

[7] 해양연구소(1996), 한반도 주변 조석조화 상수 자료집,

p. 282.

[8] Bowman, M. J. and W. E. Esaias(1997), Oceanic fronts in coastal process, Springer-Verlag, p. 114.

[9] Choi, B. H.(1980), A tidal model of the Yellow sea and Eastern China sea, Report 80-02, Korea Ocean Research and Development Institute.

[10] Fedorov, K. N.(1983), Lecture note on coastal and estuary studies (the physical nature and structure of oceanic form), spring-verlag, pp.21-22.

[11] Fearhead, P. G.(1975), On the formation of fronts by tidal mixing around the British Isles, Deep-Sea Research, Vol. 22, pp. 311-321.

[12] Flather, R. A. and N. S. Heaps(1975), Tidal computations for Morecambe Bay, Geophys. J. Royal Astronom. Soc., Vol. 42, pp. 489-517.

[13] Lie, H. J.(1989), Tidal fronts in the southeastern Hwanghae(Yellow sea), Continental Shelf Res., Vol. 9, pp. 527-546.

[14] Park, S. J.(1999), Variations of SST around Korea inferred NOAA remote sensing data, M. S. Thesis, Pukyong National Univ., p. 61.

[15] Pingree, R. D. and D. K. Griffiths(1978), Tidal fronts on the shelf seas around the British Isles, Journal of Geophys. Res., Vol. 83(C9), pp. 4615-4622.

[16] Simpson, J. H. and J. R. Hunter(1974), Fronts in the Irish Sea, Nature, Vol. 250, pp. 404-406.

[17] Simpson, J. H., C. M. Allen and N. C. G. Moris(1978), Fronts on the Continental Shelf, Journal of Geophys. Res., Vol. 83(C9), pp. 4607-4614.

[18] Uda, M.(1938), Researches on "Siome" or Current rip the seas and Oceans, Geophys. Mag., Vol. 11, pp.307-372.

[19] Yanagi, T. and H. Tamaru(1990), Temporal and spatial variations in a tidal front, Continental Shelf Res., Vol. 10, No. 7, pp. 615-627.

[20] Yanagi, T., S. Igawa and O. Matsuda(1995), Tidal front at Osaka Bay, Japan, in winter, Continental Shelf Res., Vol. 15, No. 14, pp. 1723-1735.

원고접수일 : 2009년 09월 02일

원고수정일 : 2009년 10월 08일 (1차)

: 2009년 11월 23일 (2차)

게재확정일 : 2009년 12월 24일