

ADCP bottom tracking에 의한 금오열도 주변의 해수유동

추효상*†

* 전남대학교 해양기술학부

Acoustic Doppler Current Profiler Bottom Tracking Survey of Flow Structures around Geumo Archipelago in the Southern Waters of Korea

Hyo-Sang Choo*†

* Faculty of Marine Technology, Chonnam National University, Dundok-dong Yeosu-si, Jeollanam-do, 59626, Korea

요 약 : 한국 남해안 금오열도 주변 다도해역의 조류특성과 해수순환 구조를 파악하기 위해 대조와 소조시 ADCP bottom tracking을 이용한 25시간 선박 항주관측을 실시하였다. 대조시 낙조와 창조 방향은 남동-북서이며, 최강유속은 표층 약 40 cm/s이다. 개도주변은 지형적 특성으로 주변해역의 탁월유향과 다르고, 유향·유속의 분산이 크다. 전 구간 표~저층 흐름에 두드러진 경압모드 성분은 없었다. 이는 좁은 수로와 얇은 수심, 빠른 유속으로 지형성와류나 eddy로 인한 연직혼합이 활발했음을 나타낸다. 소조시 조류는 남남동-북북서, 평균유속은 대조의 85%이다. 탁월유향은 대조보다 우세하지 못하고 지속시간도 짧다. 흐름은 연직방향 유속시어, 수평와류, 비대칭 조류혼합으로 물질의 수평·연직이동이 왕성할 것으로 추정된다. 일평균조류는 개도 서~북서 수로해역이 북서~북동, 금오도 서쪽은 서남서~남남서 방향 최대 21 cm/s의 흐름이 존재한다. 소리도 서쪽에는 좌선환류나 와류가 형성되었다.

핵심용어 : 다도해, 금오열도, 조류, ADCP bottom tracking 관측, 일평균조류, 지형성와류

Abstract : In order to investigate the flow structures around Geumo archipelago on Southern Waters of Korea, water movements were measured for 25 hours during spring tide in May and neap tide in September 2002 using ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) attached to a running boat. Dominant directions of ebb and flood current at spring tide are SE-NW, representing the average flow rate of approximately 40cm/s in the surface layer. However because of the topographical reason, the direction and speed of the flow in the narrow waterway sea area around the northwest of Gae Island were different. There was no notable baroclinic component of tidal flow at spring tide. This indicates that the sea area has been actively engaged in vertical mixing due to island wake or eddy due to narrow waterways, shallow water depth and rapid flow rate around archipelago. At neap tide, dominant directions of tidal flows are SSE-NNW and the average flow rate in the surface layer is about 85 percent of the spring tide. The duration and intensity of the flow direction are shorter and less dominant than the spring tide. It is expected that asymmetrical tidal mixing will occur due to vertical velocity shear and horizontal eddies. From daily mean tidal flows obtained from the ADCP observation, it was found that the northwest of Gae Island have flows in NW-NE, the west of Geumo Island have the average currents of up to 21 cm/s WSW-SSW and counterclockwise circulation or eddy currents are formed in the west of Sori Island.

Key Words : Archipelago, Geumo Islands, Tidal currents, ADCP Survey, Daily mean tidal flow, Island Wake

1. 서 론

한국의 남해 연안은 조차 및 조간대 발달 정도가 커 수심이 얇고 해저 지형이 복잡한 리아스식 해안과 다도해로 이루어져 있다. 남해연안 중 전남해안은 전국에서 가장 많은 섬(1,965개, 전국 도서의 약 60%)과 긴 해안선(6,419 km, 전국

해안선의 약 50%)을 가진다. 남해의 가막만과 여수반도, 그리고 이들 주변에 금오열도라 불리는 여러 섬들(백야도, 상하도, 하화도, 조발도, 둔병도, 낭도, 제도, 개도, 자봉도, 월호도, 화태도, 두라도, 금오도, 안도, 연도(소리도))은 전남해안에 위치하며 남해연안 중 비교적 중앙부에 위치한다. 이러한 금오열도 주변은 크고 작은 여러 섬들이 산재함에 따라 급격한 수심변동과 다양한 육안지형이 출현하고, 해역을

† choo@jnu.ac.kr, 061-659-7144

주기적으로 통과하는 강한 조류로 인해 해수유동이 매우 복잡하다(Fig. 1).

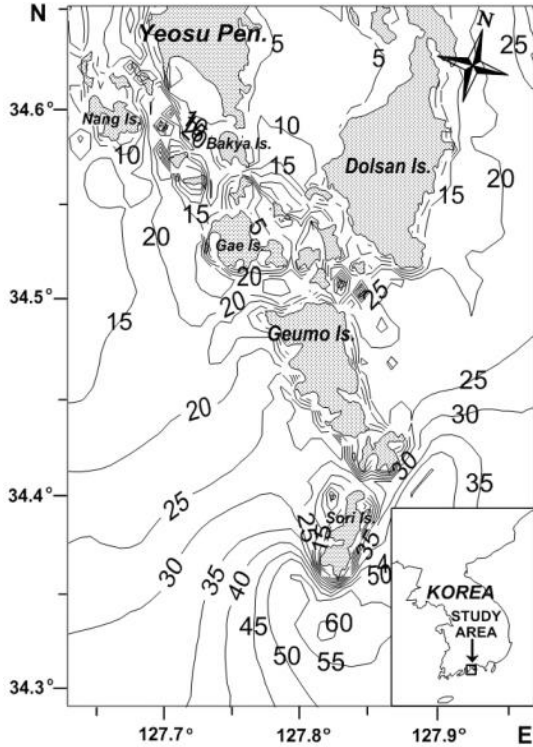


Fig. 1. Bottom topography around Geumo archipelago on Southern Waters of Korea. Contour numbers show depth (m).

금오열도 주변 다도해역은 육지연안과 인근 여러 섬들로부터 유입되는 많은 유기물과 섬 주변 빠른 조류나 지형성 와류에 의한 저층 영양염류의 표층공급이 활발하다. 따라서 기초 생산력이 크고 해양생물의 먹이가 풍부해, 예로부터 갈치, 고등어, 전갱이, 오징어, 삼치와 같은 유용 수산생물을 대상으로 한 정치망어업이 성행한 해역으로도 잘 알려져 있다(MOF, 2003). 한편, 이러한 다도해역의 개발은 인공과 산업집중을 야기해, 천해역과 하천수역 주변에 다량의 유기물과 영양염 유입을 일으키고 조류 정체해역에 부영양화를 진행시킨다. 금오열도~나로도 해역은 1995년 이후 유해성 와편모조류인 *Cochlodinium polykrikoides* 적조가 연중 최초로 발생해 해조류를 타고 인근 남동해역과 동해연안까지 급속히 확산되어 막대한 수산피해를 일으키는 해역이다(Kim et al., 1999). *C. polykrikoides* 적조는 부영양화와 관련된 일반 내만형 적조와 달리 해수유동과 같은 물리적 해양구조와 해양수온 같은 환경특성에 의해 종 공급과 증식·자극, 성장·촉진되어 발생하는 연안성 적조(Geesey and Tester, 1993; Imada and Honjo, 2001)로, 이 종이 이들 해역의 어떤 해양환경에 의해

자극되어 발생하는지는 아직 명확하게 규명되어 있지 않다.

한국 남해 중앙부인 금오열도~나로도 주변은 연중 수괴특성이 다른 해수가 계절적 변동을 나타내며 존재한다. 이들 해역에 존재하는 수괴로는 쿠로시오에서 분리되어 제주도 동쪽으로 유입되는 대마난류수(Lie and Cho, 1997), 제주도 남쪽 대마난류에서 분리되어 제주도 서쪽을 통해 제주해역으로 유입되는 제주난류수(Park, 1986; Chang et al., 1995), 겨울철 남해연안에서 형성되어 여름의 계절수온약층 아래에 분포하는 남해연안수, 황해에서 발생되어 남해에 영향을 미치는 서해연안수(Cho and Kim, 1995), 양자강 하구수와의 혼합으로 형성되어 여름철 남해안에 영향을 주는 양자강희석수(Kim et al., 1991) 등이 있다. 이러한 수괴들은 계절에 따른 세력의 강약으로 연안과 외양사이에 열염전선이 형성(Lee, 1983)되나, 추·동계의 해면냉각과 연안 해역에 지배적인 강한 조류로 인해 수직혼합이 발생하기도 한다(Lie, 1989). 질소, 인과 같은 영양염류나 생물 종간의 경쟁보다 동 해역의 이러한 다양한 해황과 유동구조, 물리적 환경이 이 해역에 빈번히 출현하는 *C. polykrikoides* 적조발생에 더 큰 요인으로 작용할 것이라는 연구(Yoon, 2001)도 있다.

남해 다도해 연안해역의 해수유동 연구는 지금까지 주로 특정해역을 중심으로 1~2개 mooring 지점의 조석, 조류조사를 전 해역에 대해 순차적으로 실시한 후, 복잡한 다도해 주변의 유동상황을 유추하는 정도에 지나지 않았다(KHOA, 1968; 1977; 1978; NIFS, 1978). 이는 우리나라 남해 연안역이 가지는 특수성, 즉, 강한 조류와 얇은 수심 그리고 잦은 연안어선 유출입 등으로 안전한 장기 계류관측과 여러 지점에서 동시 유속측정이 어렵기 때문이다. 금오열도 주변 해수유동에 관한 연구는 대체로 연중 탁월한 조류에 관한 조사, 연구가 많다. Choo and Kim(2013)은 돌산도~금오도~개도 주변 다도해역에 대한 해수유동 수치실험에서 섬 사이 수로(다도해역)의 조류유속이 타 해역에 비해 크고, 그 크기는 18.7~20.4 cm/s(평균), 73.2 cm/s(최대), 창, 낙조시 유향은 대체로 반대이며, 다도해역은 해수수렴으로 조석진폭이 커져, 조석에너지 분산이 협수로 바깥 개방해역이나 지형이 완만한 해역보다 커진다고 보고하였다. 또 Choo(2013)는 금오도 서쪽과 돌산도 동쪽 연안에서의 조류 장기관측과 나로도~남해도 다도해역에 대한 조류수치실험으로 금오열도를 중심으로 한 조류의 시간변동과 조석간차류 분포를 제시하였다.

다도해역 가운데 금오열도 주변 해수유동은 조류에 의한 영향이 크며, 반일주조가 우세하다. 또 계절에 따라서 외해로부터 외양수 유입이 있는 것으로 알려져 있다(Choi, 2001). 따라서 이들 해역은 강한 조류와 조석 간차류, 계절적 수평·연직 밀도분포로 발생하는 밀도류, 계절풍에 의한 취송류 등, 다양한 역학구조가 이 해역의 해수유동에 영향을 줄 것

이다. 이러한 해역의 유동구조를 명확히 하기 위해서는 넓은 해역에서 ADCP를 사용한 동시 다층적 3차원적 해수유동 조사가 이루어져야 한다(Hwang et al., 2006). 본 연구는 남해 다도해 금오열도 주변 해역(Fig. 1)의 공간적 조류 분포와 그 변동을 조사하고, 조석 평균류 계산에 의한 지형성 와류 등의 해수 유동구조를 파악하기 위해 금오열도 주변 다도해역의 25시간 ADCP bottom tracking 관측을 대조기와 소조기에 실시하였다.

2. 자료 및 방법

금오열도 서쪽과 남쪽 해역에 조사 정선을 설정하여 전남대학교 실습선 청경호(총톤수 115톤, 최대속력 13 노트)를 사용하여 ADCP(Acoustic Doppler Current Profiler) bottom tracking 관측을 실시하였다. 관측에 사용된 ADCP는 RD Instruments사의 주파수 300 Hz 음향펄스(Ping)를 사용하는 선저부착(Bottom Track Mode)용 장비(WorkHorse Mariner)이다. 관측에 사용된 ADCP의 주요 입력변수들을 Table 1에 나타낸다.

Table 1. Parameter values of ADCP bottom tracking survey

Parameter	Value
Transducer depth	2.0 m (Blank distance 1.0 m)
Bin size	100 cm
Number of depth cells	50 (1~128)
Ensemble time (Ping interval)	2.0 sec
Ensemble averaging interval	Short term: 20 sec, Long term: 60 sec
Ship position source	NAV. displayed as Lat/Lon position
Velocity reference	Delta position from the external NMEA GGA data

조사는 주야 25시간 동안 이루어져야하므로 항주선박의 야간항해가 용이하고, 수심이 깊으며 어장시설물이 설치되어 있지 않는 해역을 선정하였다(Fig. 2). 대상해역의 유동은 조류가 탁월하다. 조류는 계절에 따른 변동은 크지 않으나, 대조나 소조와 같은 조시에 따른 유속과 유향의 변동이 크다. 따라서 조사는 Fig. 3에서와 같이 대조(2002년 5월 27일 09:43 ~ 5월 28일 10:33)와 소조(2002년 9월 12일 09:26 ~ 9월 13일 10:43) 2차례에 걸쳐 전체 정선구간을 A-F의 5개 세부구간(A, B, C, D, E, F leg, (Fig. 2))으로 구분한 다음, 정선을 따라 약 3시간 6분에 걸쳐 A→F leg로 선박을 항주시켜 조사하

고, 이어서 정선의 반대방향인 F→A leg를 따라 3시간 6분 동안 선저에 부착된 ADCP로 전 수층의 유향, 유속을 측정하였다(1 왕복 소요 시간 약 6시간 12분).

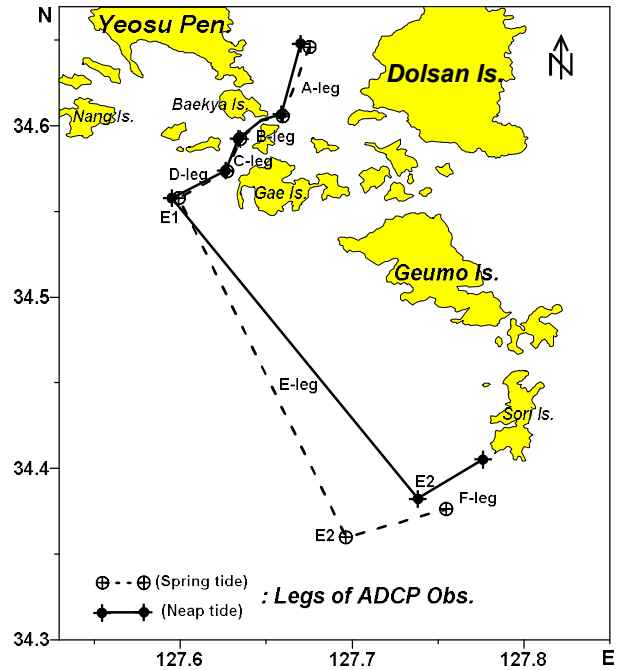


Fig. 2. Observational locations of ADCP bottom tracking around Geumo archipelago at spring and neap tide.

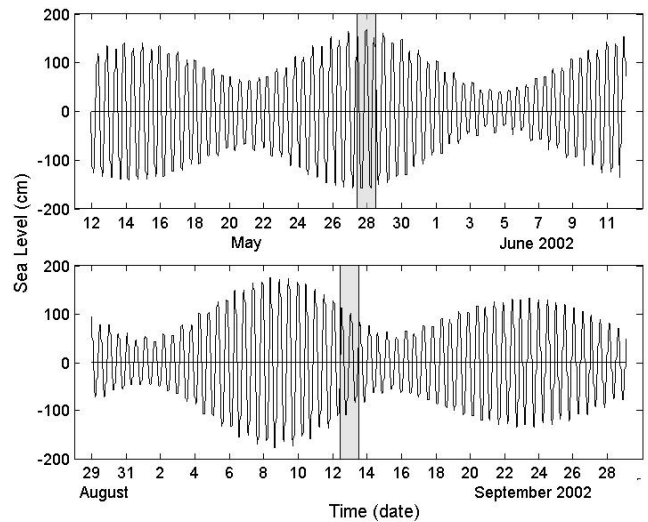


Fig. 3. Tidal elevations of observational periods at Yeosu in May~June (upper) and in August~September (lower), 2002. The shading areas in figures show the observational periods at spring (upper) and neap tide (lower).

각 세부구간(A-F leg)을 선박이 항주하는데 소요된 시간 (running time)은 A leg 16분, B leg 11분, C leg 14분, D leg 14분, E leg 89분, F leg 26분이다. 한 개 leg 항주가 끝난 후 다음 leg 항로로 변경(turning)하는 데 필요한 시간은 약 3분가량을 할애하여, A-F leg 1 항주 침로변경에 소요되는 시간은 총 16분이 되도록 하였다. 동일한 방법으로 전체 정선을 4왕복(24시간 50분) 항주하면 탁월 반 일주조류(12시간 25분)가 포함된 대상해역의 조류 유동상황이 전체적으로 파악되어진다. 항주관측이 이루어진 대, 소조시의 조위변화와 정선구간을 따라 3시간 6분 간격으로 8회 조사가 각각 시행된 상황을 Fig. 3과 Fig. 4에 나타낸다.

관측시 선박 항주속도는 7 노트로 거의 일정하게 유지시켰으나, 항주 도중 전방에 갑작스러운 장애물이 출현하거나 타 선박이 구간 항로상을 항행할 경우를 대비해 각 leg 구간의 시작 시각과 끝나는 시각을 항주 전 미리 결정한 후, 선박이 leg 구간 도중 불의의 정선이탈에 대비하였다. 관측조사에서 소조시(9월 12~13일) 조사항로는 대조시 실시한 항주 항로 주변에 예기치 못한 어장시설물의 출현으로 항로를 부득이 조정하였다(Fig. 2).

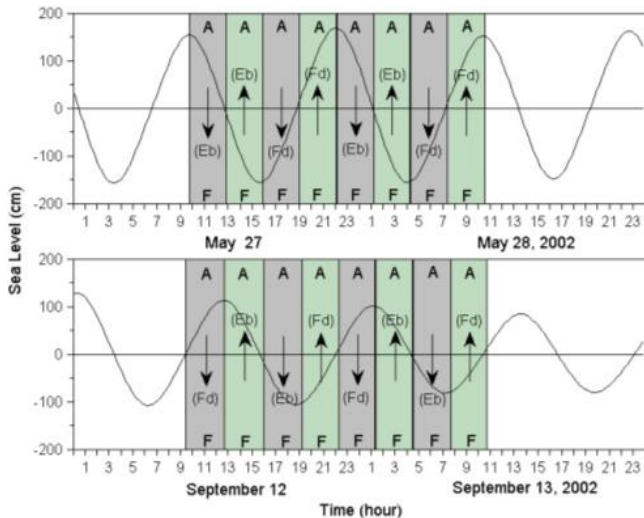


Fig. 4. Tidal elevations at Yeosu in May 27~28 (upper) at spring tide and September 12~13 (lower) at neap tide. In figures, A(F)→F(A) means the vessel runs along the course from A(F) leg to F(A) leg within the specified time range. Eb and Fd mean periods of Ebb and Flood currents.

관측시 선박 항주속도는 7 노트로 거의 일정하게 유지시켰으나, 항주 도중 전방에 갑작스러운 장애물이 출현하거나 타 선박이 구간 항로상을 항행할 경우를 대비해 각 leg 구간의 시작 시각과 끝나는 시각을 항주 전 미리 결정한 후, 선

박이 leg 구간 도중 불의의 정선이탈에 대비하였다. 관측조사에서 소조시(9월 12~13일) 조사항로는 대조시 실시한 항주 항로 주변에 예기치 못한 어장시설물의 출현으로 항로를 부득이 조정하였다(Fig. 2).

ADCP 조사는 항주선박의 흘수(Transducer depth 2.0 m)와 선박항주로 인한 물거품의 영향이 대체로 배제(Blank distance 1.0 m)될 수 있는 약 3 m 수심부터 1 m 수심 간격으로 실시하였다. 본 연구에 사용된 ADCP는 최대 약 128 m 수심까지 관측가능하다. 그러나 해당영역은 이 측정 최대수심보다 얕아 (Fig. 1), A-F leg 정선을 따라 해저와 가까운 수심(최대 50 m)까지 측정하였다. 2초 빈도로 측정된 유향·유속은 연속하여 25시간 동안 컴퓨터 저장장치에 기록한 후, 20초와 1분 평균치로 변환하여 사용하였다(Table 1).

수심 1 m 간격으로 표층 3m-해저 부근(수심 50 m 미만) 약 50개 수층에서 조사된 자료에 대해, 선박 항주 중 표층 부유물과 기포 영향에 의한 오차가 가장 적을 것으로 판단되는 5 m 수심을 표층으로 선정하고, 중층은 수심 10 m 그리고 저층은 관측해역 주변수심이 20 m 이하가 많아 15 m 수심을 선정하였다. 이들 수심에서 2초 간격의 위·경도, 시각, 유향·유속 자료를 단주기 성분이 제거된 20초, 1분 간격으로 평균한 다음, A-F leg 까지 3시간 6분에 걸쳐 8회 항주(4회 왕복)한 1분 간격의 유속 벡터를 대조와 소조, 표, 중, 저층에 대해 그 분포를 제시하였다.

반일 주기 조석에서 고조~고조+3시간, 고조+3시간~저조, 저조~저조+3시간, 저조+3시간~고조 등, 3시간 간격 조시에 따른 조류 분포로부터 해당 leg 구간 및 전 leg 구간 평균류, 최강류의 유향·유속을 계산 하였다. 또한 해당지점에서 24시간 50분, 8회 연속 측정된 자료를 평균한 일평균조류(조석 간차류)도 계산 하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 대조시의 해수유동

대조시 조류는 해면 하 약 3m부터 해저(최대 약 45 m)까지 1 m 간격으로 조사하였으나, 3~4 m 수심의 유향·유속은 안정적이지 못해 5 m 수심부터 대상으로 하였다. 해역 북서쪽 개도 주변은 수심이 얕아 15 m 수심에서는 데이터를 얻을 수 없었다. 수심 5, 10, 15 m 층의 낙조류와 창조류에 대한 유속벡터를 Fig. 5에 나타낸다. ADCP 관측시 선박위치는 실시간 연동되어지므로 유속벡터가 표기된 지점의 좌표는 이들 위, 경도 자료를 바탕으로 하였다. 관측이 이루어진 시기의 여수지점 조위기록 곡선은 그림 아래 좌측에 나타냈다.

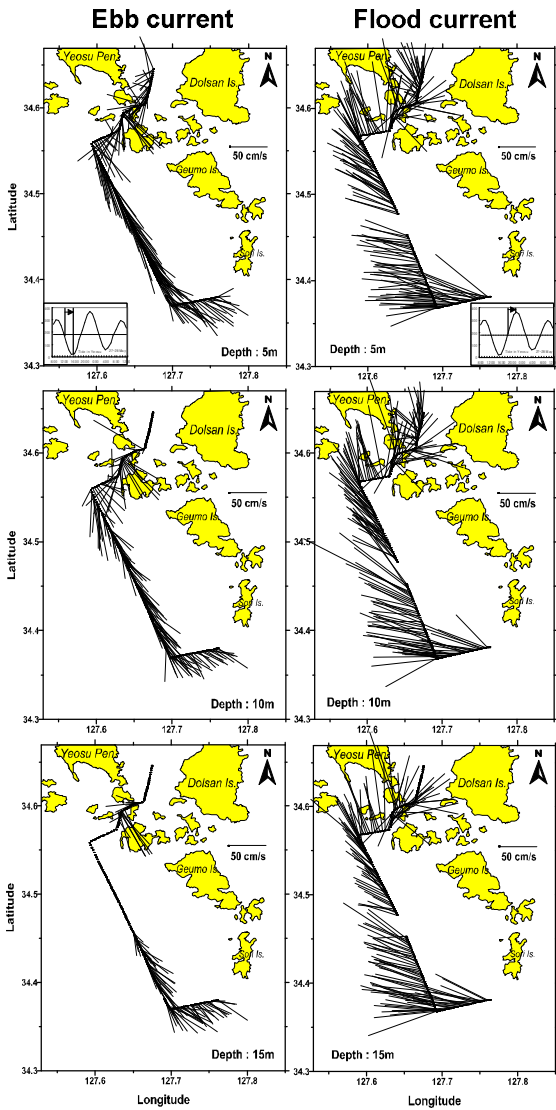


Fig. 5. Tidal flow vectors on ebb current (left column) and flood current (right column) of spring tide at 5 m (top panel), 10 m (middle panel) and 15 m depth (lower panel) 27 May, 2002.

대조시 ADCP 조사는 Fig. 4와 같이 A에서 F leg 구간을 정확히 3시간 6분 간격으로 8회 조사하였다. 그러나 8회의 A~F leg 구간 항주 동안, 조류는 유속크기에 다소의 차이가 있을 뿐 매 회의 유동형태는 대체로 동~남동~남남동방향 낙조류와 서~북서~북북서방향의 창조류 패턴을 반복적으로 나타냈다. 즉, Fig. 4에 나타낸 낙조(Eb)시 4회, 창조(Fd)시 4회의 관측결과가 대체로 유사한 유동형태를 보였다. 해당해역 인근 여자만의 해수유동은 낙조류가 여수항 고조 후 0.4~1.0시, 창조류는 저조 전 0.4~1.0시에 전류하고, 최강낙조

류는 고조 후 2.6~4.1시, 최강창조류는 저조 후 3.1~5.2시에 나타난다. 그러나 개도나 금오도 주변은 낙조류가 여수항 고조 후 0.5~0.8시, 창조류는 저조 전 0.2~0.5시에 전류하여, 다른 해역보다 여수항 조석에 따른 전류시각의 지연이 작으며, 최강 창·낙조류가 출현하는 시각도 저조와 고조 후 약 3.5시로 매우 일정하다(NIFS, 1978). 대조시 ADCP에 의한 개도와 금오열도 주변 유동관측에서 나타난 조류는 고조→저조 사이 낙조류, 저조→고조 사이 창조류가 교대로 규칙적으로 출현하는 유동패턴이 확인되었다.

Fig. 5에 제시한 유속벡터는 8회 조사된 A~F leg 구간 3시간 6분의 항주관측 중, 대표적인 낙조류와 창조류의 분포 패턴을 나타낸 것이다. 그림 중 항주 구간에 유속벡터가 빠져 있는 부분은 낙조시 조위변화로 해당지점의 수심이 알아졌거나, 일시적 기기 트러블로 자료가 얻어지지 않은 것이다. 대조시 낙조류의 탁월유향은 남동방향, 창조류는 북서방향으로 나타난다. 그러나 개도 주변 좁은 수로 상에 위치하는 A~C leg 일부 구간의 조류는 해저지형과 해안선 형태에 따라 주방향이 정해져, D~F leg 구간에서의 탁월유향과 반대로 흐르기도 한다. 표층 최강유속은 전 leg 구간 평균 약 40 cm/s이다. 대조시 D~E leg 구간의 조류분산은 그리 크지 않다.

금오도 서쪽해역의 조류변화를 시계열로 보기위해, ADCP 측정결과 중 항주구간이 가장 긴 E leg에서 24시간 50분 동안의 표층(5m) 유속분포를 Fig. 6에 나타낸다. 그림에서 E1 지점은 개도 서쪽해역, E2지점은 소리도 서남서 해역부근이다. 조류벡터는 창·낙조류의 주방향을 보기 쉽도록 원점에서 반시계방향으로 약 50도 회전하였다. 그림은 선박이 A→F leg 구간을 항주하는 09:43~12:48 (1차)에 E1→E2 지점(E leg)의 유향·유속을 측정후, 이어서 F→A leg 구간을 따라 반대로 항주하는 12:49~15:54 (2차)에 E2→E1 지점을 통과하는 시기의 유속결과이다. 따라서 각 유속분포를 연결하면 E leg 구간의 1~8차 항주까지의 조류벡터가 연속 표시되게 된다. 한편, 8차에 걸친 항주시기 동안 E1~E2 구간 내 각 지점의 조류는 각 항차별 동일지점의 유향·유속과 각각 3시간 6분의 시간차이가 나게 된다. Fig. 6의 1~2, 5~6차는 낙조류, 3~4, 7~8차는 창조류의 유속분포를 나타낸다. 낙조시 표층에서의 유향은 동남동~남남동, 유속은 24~54 cm/s, 창조시는 서북서~북북서, 11~61 cm/s의 분포이다. 최대유속은 60.7 cm/s로 창조시 출현한다. 한편, D~F leg 구간평균의 표층 낙조류 최대 유속은 32.7 cm/s, 창조류 최대는 59.8 cm/s, 평균유속은 낙조류 26.9 cm/s, 창조류 33.5 cm/s이다. 전체 leg 구간의 표층평균은 낙조류 최대 36.2 cm/s, 평균 27.8 cm/s, 창조류 최대 43.1 cm/s, 평균 25.5 cm/s이다

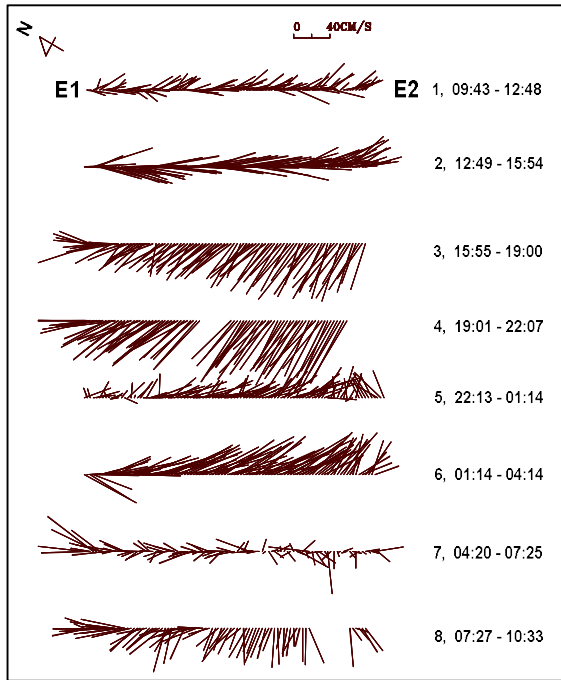


Fig. 6. Tidal flow vectors at surface layer (5 m) along E leg section every 3 hours on 27~28 May (spring tide), 2002.

대조시 A-F leg 구간에서 표, 중, 저층의 창조와 낙조시 평균조류 분포를 Fig. 7에 나타낸다. 그림은 각 구간(A-F leg)에서 수층별로 낙조(그림 위, Ebb)와 창조(그림 아래, Flood) 각 4회에 걸쳐 측정된 평균 유속벡터를 나타낸 것이다. 각 구간은 항주길이가 달라 항주시간(11~89분)에 차이가 있고, 따라서 각 구간에서 선박이 관측한 유속 측정횟수(long term 평균 횟수 11~89회)가 다르므로 구간에 따른 평균유속의 차이를 서로 비교하기에는 무리가 있다. 그러나 E leg 구간을 제외한 나머지 구간은 측정횟수(11~26회)의 차이가 그리 크지 않으며, 특히 A~D leg의 4개 구간은 항주길이(항주소요 시간; 11~16분)가 비슷하고 서로 인접해 측정시기도 큰 차이가 나지 않는다. 그림에서 한 구간 내 부분적으로 유속벡터가 없는 것은 4회 관측기간 중, 조시에 따른 수심변화로 층별 관측이 이루어지지 못했거나 ADCP 측정시 오차가 두드러진 경우로, 자료에서 제외하였다. 수심이 전체 항주구간 중 가장 얇은 A leg 구간 중층(10m)과 저층(15m)에서 자료의 결손이 많았다.

Fig. 7의 A-C leg 구간은 가막만 입구, 백야도~제도, 하화도~개도의 비교적 폭이 좁은 수로로, 남서쪽 외해와 접한 D-F leg 구간보다 조시별, 수심별 흐름변동이 크다. 낙조시 조류는 A-B leg 구간은 북~북동방향이나, C-F leg 구간은 남~남동방향을 나타내어 조류가 하화도~백야도 주변에서

서로 나누어진다. 창조시 B-C leg 구간의 조류는 D-F leg 구간의 서북서~북쪽 흐름에 비해, 남서~북동으로 흘러 하화도~개도 주변에서 조류가 둘로 분지되는 양상을 보인다. 이와 같이 해역 폭이 좁은 섬과 섬 사이에 위치하는 A-C leg 구간은 지형적 특성으로 인해 외해 구간의 탁월 조류방향과 달리 수로방향의 흐름과 조시별 유향·유속 변동이 크게 나타난다.

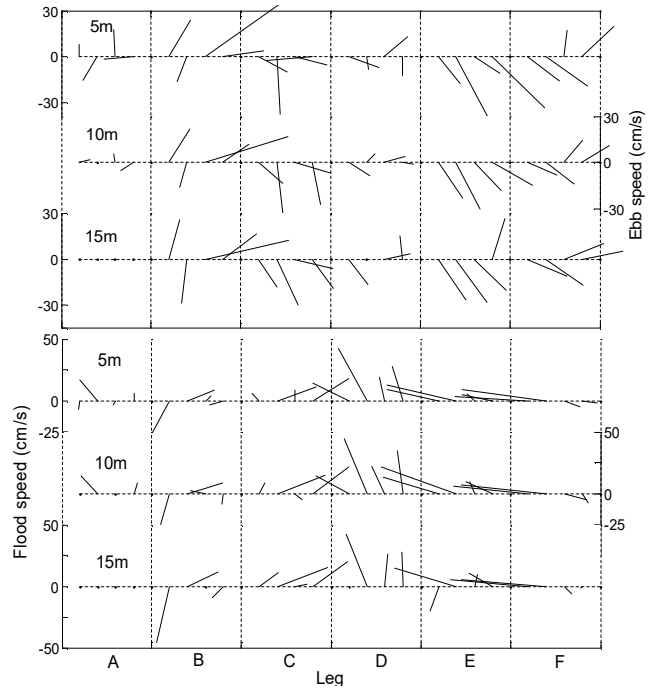


Fig. 7. Mean tidal flow vectors along each A~F leg section with depth of 5 m, 10 m and 15 m at ebb (upper) and flood current (lower) observed in 27~28 May (spring tide), 2002.

수층 간 조류분포는 해역에 따라 표층에서 저층으로 갈수록 유속이 약해지고 유향이 달리 나타나는 경압모드 성분이 순압성분에 포함되어 나타나는 경향이 있으나, 대조시 동해역은 A-F leg 전 항주구간의 표~저층 유향·유속에 두드러진 경압모드 성분은 찾아볼 수 없었다. 이는 이들 해역이 금오열도 주변다도해의 좁은 수로와 얇은 수심, 빠른 유속 등으로 수평방향 난류와 해저마찰응력이 비선형효과를 유발하고(Ippen and Harleman, 1966; Friedrichs and Aubrey, 1988), 섬 주변에서 발생하는 island wake(후류와)(Barton, 2001; Caldeira et al., 2002; Chavanne et al., 2002)로 인한 eddy 발생(shedding)이 연직혼합을 활발히 일으켰음을 알 수 있다. Raapoto et al.(2018)는 eddy kinetic energy 추적연구를 통해 다도해 섬 주

변에서 생성되는 이러한 eddy는 순압과 경압에너지 변환 등의 복합작용에 의해 발생하고, 이로 인해 표층의 생물생산이 촉진(Hasegawa et al., 2009)되어 짐을 주장하였다. 금오열도 주변의 이러한 유동특성은 이 해역의 기초생산력, 용존산소, 해조류 및 어류자원 밀도를 높이는 주된 역할을 하고 있다(MOF, 2003).

3.2 소조시의 해수유동

조류세기가 약해지는 소조시(9월 12~13일), 대상 영역 A~F leg(Fig. 2 참조)에서 대조시 조사와 동일하게 표층~해저까지 1m 간격으로 ADCP에 의한 유향·유속이 측정되었다. 대조시와 마찬가지로 수심 5m, 10m, 15m의 3개 층에 대해 A~F leg 혹은 F~A leg까지 항주하는데 소요된 약 3시간 동안의 유속 관측 결과를 Fig. 8에 나타낸다.

소조시는 대조시와 달리 25시간 8회 항주하는 동안 조류는 낙조류, 창조류, 낙조~창조류, 창조~낙조류의 유동 패턴을 나타낸다. 1 항주 기간에 낙조~창조류, 창조~낙조류의 전류 패턴이 출현한 때는 항주 도중 해당 구간의 조류가 바뀌는(전류) 시기로 해역에 따라 유향·유속이 불규칙하다. Fig. 8은 전류시를 제외한 낙조류와 창조류시의 유동패턴이다. Fig. 5에 제시한 대조시 유동에 비해 소조시 조류는 유향의 분산이 크고, 유속은 대조시에 비해 작다. 낙조류는 조류가 강한 대조시(남동)보다 남남동, 창조류(대조시 북서)는 북북서~북으로 편향되고, 대조시 유속의 5/6 정도 크기이다. 또 유속이 강할 때, 협수로역 A~C leg의 조류흐름에 나타나는 D~F leg의 탁월유향과 반대거나 크게 다른 방향의 흐름이 출현하는 경향은 대조시보다 적었다.

소조시 E leg 구간(E1~E2)에서 약 3시간 간격으로 24시간 50분 동안 조사된 표층(5m) 유속 분포를 Fig. 9에 나타낸다. E1과 E2지점은 개도 서쪽, 소리도 서남서 부근해역이다. 조류벡터는 대조시와 같이 원점에서 반시계방향으로 약 50도 회전하였다. 낙조류는 동남동~서남서 21~46 cm/s 분포로 대체로 남남동류이고, 창조류는 서북서~동북동 4~32 cm/s의 분포로 북북서 방향으로 흐른다. 유속크기는 대조시보다 작고 유향변화가 크다. 조시에 따른 조류변화는 대조시 창, 낙조류의 탁월유향(북서-남동)보다 유향의 지속시간이 짧고, 분산이 크다. Fig. 9의 1차(09:26~12:46, 저조+3시~고조)시기 조류는 창조류(북서류)이나, 2차(고조~고조+3시)시기는 창조→낙조의 전류에 해당한다.

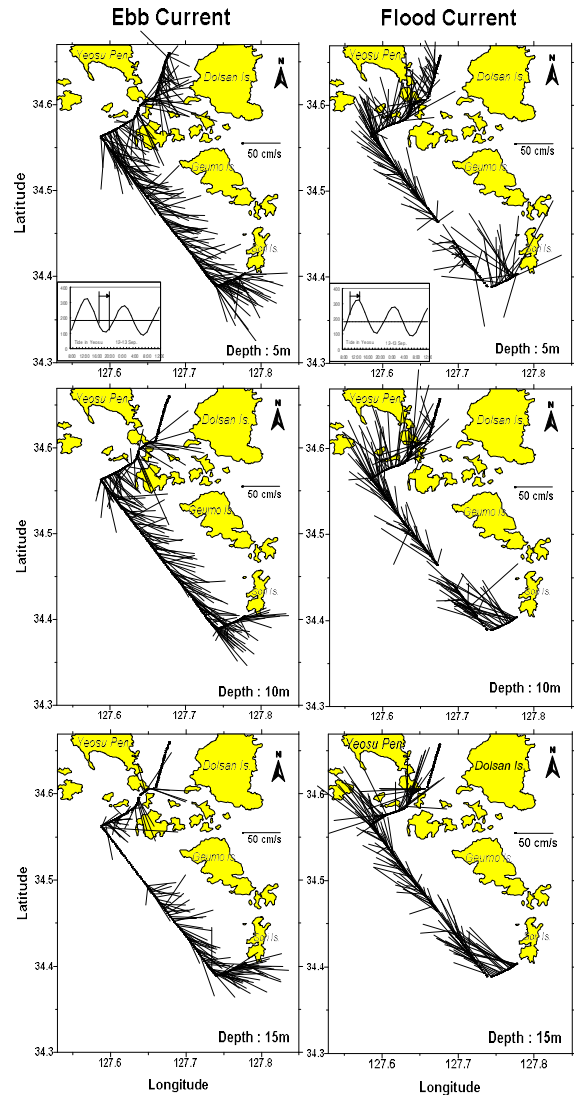


Fig. 8. Tidal flow vectors on ebb current (left column) and flood current (right column) of neap tide at 5 m (top panel), 10 m (middle panel) and 15 m depth (lower panel) 12 September, 2002.

3차(고조+3시→저조+0.5시)는 낙조류, 4차(저조+0.5시~저조+3.5시)와 5차(저조+3.5시~고조+0.5시)는 전류, 6~8차는 1시간 30분의 관측기간 동안 낙조류나 창조류가 그 세력을 유지하지 못하고 분산이 큰 흐름을 나타낸다. 따라서 1차와 3차시기를 제외하면 소조시는 창, 낙조의 탁월유향이 우세하지 못하고 지속시간도 대조시보다 짧다. 최대유속은 46.2 cm/s로 낙조시 출현한다. D~F leg 구간평균 표층 낙조류 최대유속은 38.6 cm/s, 창조류 최대유속 34.8 cm/s이며, 평균유속은 낙조류 21.3 cm/s, 창조류 15.7 cm/s이다. 전체 leg 구간의 표층평균은 낙조류 최대 38.6 cm/s, 평균 23.3 cm/s(대조시의 84%), 창조류 최대 29.4 cm/s, 평균 13.7 cm/s(대조시의 87%)이다.

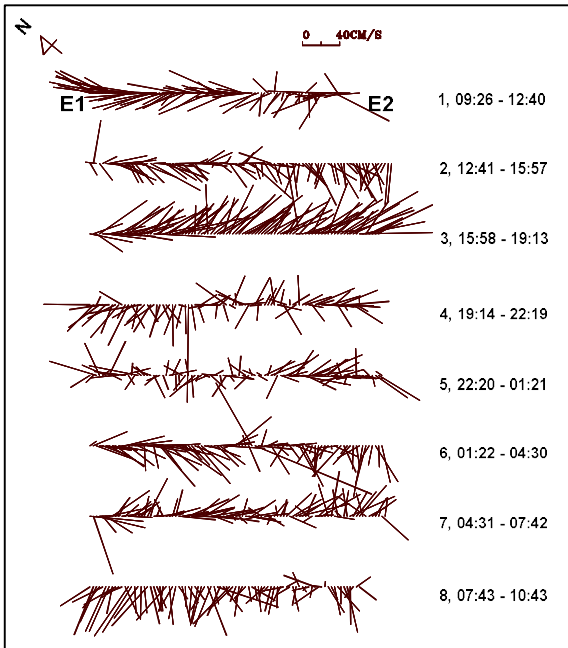


Fig. 9. Tidal flow vectors at surface layer (5 m) along E leg section every 3 hours on 12~13 September (neap tide), 2002.

소조시 A-F leg 구간 표(5 m), 중(10 m), 저층(15 m)의 창조와 낙조시 평균조류 분포를 Fig. 10에 나타낸다. A~C leg 구간 평균조류는 대조시와 같이 타 leg 구간보다 조시와 수심에 따른 흐름변동이 크다. 특히 A, B leg 구간은 수심에 따라 유향이 서로 반대방향이거나 층간 유속차이가 커, 소조시 가막만 입구, 백야도~제도의 흐름은 와류 형태를 보인다. 낙조시 D leg의 저층유속은 표층에 비해 매우 미약하나 창조시는 표층유속이 중, 저층과 동일하거나 약간 작은 유속분포를 보인다. F leg 구간은 창, 낙조류 모두 조시에 따른 유향, 유속의 변동이 매우 크게 나타나, 소리도(연도) 주변의 조류 분포는 섬 주변에 형성되는 와류의 영향을 받고 있음을 알 수 있다. 소조시 A-F leg 구간 표~저층의 평균조류 분포는 대조시에 비해 수층별, 조시별 유향과 유속의 분산이 커, 연직방향의 유속시어(shear)와 수평와류로 인한 공간적 혼합(Strang and Fernando, 2001)과 지형효과로 인한 비대칭 조류혼합(asymmetric tidal mixing, ATM)(Cheng et al., 2013)이 발생해, 섬 주변 해수의 수평, 연직 물질이동이 왕성해질 것으로 추정된다. 이는 대조시 난류와 해저마찰로 대상해역 주변에 조류로 인한 island wake나 eddy가 해수 혼합작용을 일으키는 것과 함께, 이들 해역 주변(붓돌바다) 해저 표층퇴적물에 분포하는 와편모조류 시스템(cyst)(Shin et al., 2011)의 부유나 저층 영양염류의 용승(John et al., 1992)으로 춘·하계 적조현상과 식물플랑크톤의 대발생(blooming)을 야기하는 중요한 물리 역학적 기능을 할 것으로 예상된다.

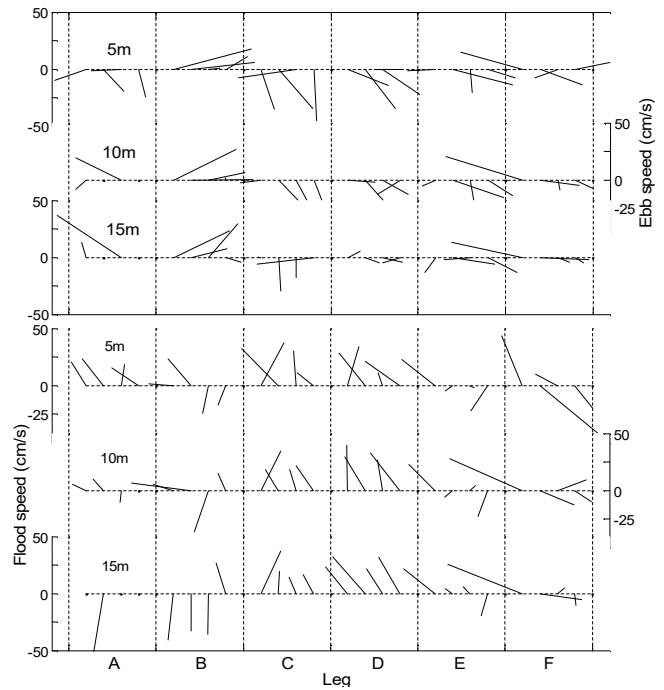


Fig. 10. Mean tidal flow vectors along each A-F leg section with depth of 5 m, 10 m and 15 m at ebb (upper) and flood current (lower) observed in 12~13 September (neap tide), 2002.

Fig. 11은 1998년 9월 15일 12시 55분 한반도 연근해를 관측한 SeaWiFS 위성자료에 의한 클로로필 a 농도분포와 9월 15일 발생한 인근해역 적조예찰반 현장조사 결과(Suh, 2001)를 나타낸다. 그림에서 전남 고흥반도나 경남 남해도 주변 연안의 클로로필 a 농도는 1.0 mg/m^3 정도의 분포를 나타내나 금오열도~나로열도 사이(붓돌바다)해역은 $3.0\text{--}9.2 \text{ mg/m}^3$ 로 클로로필 a 농도가 높고, 이로 인해 적조발생 농도도 높아 이 해역에 적조경보가 발령되었다. 한편, 2002년 유해성적조인 *C.polykrikoides*는 8월 2일 붓돌바다 상부~돌산도 동쪽해안에 최초 발생하여 57일간 지속되었고, 이들 적조는 내만 쪽이 아니라 소리도 인근 외측(양)수역에서 유입되었다는 기록이 있다(NIFS, 2004). 그리고 *C.polykrikoides* 적조의 최초 발생해역은 2000년을 제외하고 1995~2001년까지 전남 고흥 나로도 붓돌바다 연안부근으로 발생시기도 7~8월로 일정하며(NIFS, 2000; 2002; Jeong, 2005), 이 해역의 적조는 외양성기원의 물리화학적 특성이 그 발생을 자극하고(Yang et al., 2000), 강한 조류로 인한 인근 해역의 성층붕괴가 영향을 준다는 연구(Suh et al., 2003) 결과 등을 종합하면 금오열도~개도 주변에 형성되는 지형성 와류 등의 해수유동 구조가 적조발생에 직·간접적 영향을 주고 있음이 분명한 것으로 판단된다.

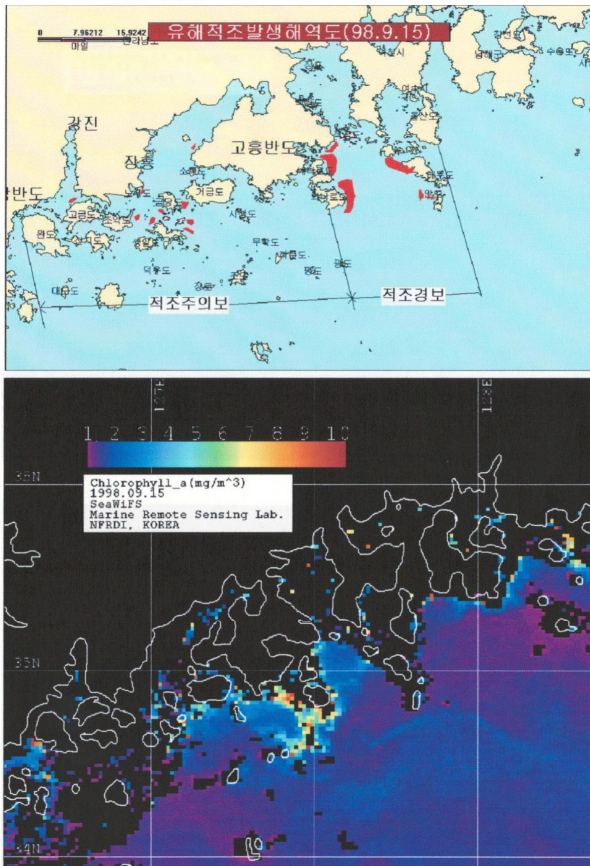


Fig. 11. Distributions of the observed red tide (upper) and chlorophyll_a derived from SeaWiFS satellite (lower) around Geumo archipelago on Southern Waters of Korea on september 15, 1998. Areas marked in red in the upper map indicate red tide zone (Suh, 2001).

3.3 일 평균조류

ADCP bottom tracking 관측을 대조와 소조시 대상해역 A~F leg구간에 대해 약 24시간 50분에 걸쳐 8회 실시하였다. 따라서 각 leg 구간 내 동일지점의 조류는 약 3시간 6분 간격으로 24시간 50분 동안 8회 측정되어진다. 만약 해당지점에 조류이외의 다른 흐름이 존재하지 않는다면 이 8회 측정된 유동을 평균하면 흐름은 이론상 '0'이 되어야 한다. 그러나 전술한 바와 같이 해당해역은 많은 섬과 협수로, 복잡한 수심 그리고 이들 해역을 빠른 속도로 통과하는 조류가 탁월한 다도해역이다. 따라서 난류 eddy나 해저마찰에 의한 지형성 와류(wake), 비선형효과로 인한 비대칭 조류성분 등이 출현해 조석 평균된 흐름은 일반적으로 '0'이 되지 않는다. 대조와 소조시 ADCP 항주 구역 각 지점에서 8회 측정된 해수유동 관측결과를 평균(일평균조류)한 다음, 그 결과를 Fig. 12에 나타낸다.

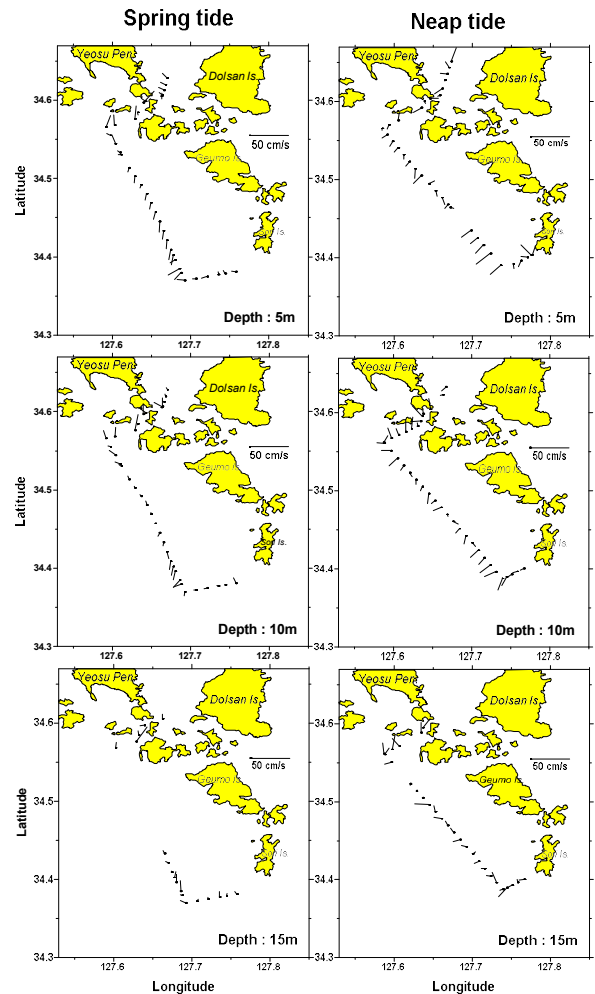


Fig. 12. Daily mean tidal flow vectors at 5m, 10m and 15m depth calculated from eight ADCP tidal current observations that pass through sections A leg through F leg on 27~28 May (spring tide, left column) and 12~13 September (neap tide, right column), 2002.

대조시 일평균조류는 금오도 북서쪽 개도 주변 A~D leg 구간에서 북서~북동, 13~21 cm/s이고, E leg 구간은 저층(15m)을 제외하면 대체로 남남서 5~12 cm/s 이다. F leg 구간은 북북서~서쪽 방향 1~8 cm/s의 분포이다. E와 F leg 구간의 표, 중층 평균류로 볼 때, 금오도~소리도 남서쪽 해역은 반시계 방향 와류나 환류의 존재가 예측된다. 또한 소리도 남서쪽 저층(15m)의 흐름이 표, 중층과 달리 나타나는 것으로부터, 인근 소리도 섬의 존재로 불안정해진 조류(unsteady tidal flow)로 인한 island wake 또는 eddy가 이 해역 주변에 형성되어 있음을 알 수 있다(Branson et al., 2018). 개도 주변 북서~북동 흐름은 협수로 해역과 수심변화 등으로 인한 조류의 수렴·발산에 따른 결과로 판단된다.

소조시 일평균조류도 대조시와 같이 A~D leg 구간은 대체로 북서~북동으로 북향류가 우세하다. 유속은 3~18 cm/s로, 저층으로 갈수록 작아진다. E leg 구간은 남서방향 1~18 cm/s로 대조시보다 평균 유속이 다소 크다. 소리도 남서쪽 F leg 구간 평균류는 북서~남서방향 3~10 cm/s로, 인근 E leg 구간의 평균류 방향과 연관시켜 볼 때 소리도 인근 해역은 대조시보다 더 뚜렷한 반시계방향 와류 또는 환류가 형성되어져 있음을 알 수 있다. F leg 구간 표, 중, 저층의 평균류 방향도 북서에서 서, 남서방향으로 변동한다.

Fig. 12의 대, 소조시 일평균조류 분포로부터 개도 서~북쪽 다도해역은 서~북서~북동방향, 금오도 서쪽 해역은 서남서~남남서방향의 평균류가 최대 약 21 cm/s의 세기로 존재하고, 소리도 서쪽은 좌선환류나 와류(최대 유속 약 10cm/s)가 존재하고 있음이 ADCP bottom tracking을 통해 파악되었다.

4. 요약 및 결론

한국 남해안 금호열도 주변 다도해역의 조류특성과 해수순환 구조를 파악하기 위해 대조와 소조시 ADCP를 이용한 25시간 bottom tracking을 실시하였다. 개도와 금오도 주변의 조류는 낙조류는 여수항 고조 후 0.5~0.8시, 창조류는 저조 전 0.2~0.5시에 전류하여, 다른 해역보다 여수항 조석에 따른 전류시각의 지연이 작다. 대조시 최강 창·낙조류가 출현하는 시각은 저조와 고조 후 약 3.5시로 대체로 일정하며 고조→저조 사이 낙조류, 저조→고조 사이 창조류가 규칙적으로 출현하는 유동패턴이 확인되었다. 대조시 개도 주변 A~C leg 일부 구간을 제외하면 낙조류와 창조류의 탁월유향은 남동-북서방향이며, 최강류 시 표층 평균 약 40 cm/s의 유속분포를 나타낸다. A~C leg 구간은 지형적 특성으로 D~F leg 구간의 탁월 조류방향과 달리, 수로방향 흐름과 조시별 유향·유속의 변동이 크다. 대조시 전 항주구간의 표~저층 흐름에 두드러진 경압모드 성분은 없었다. 이는 이들 해역이 다도해의 좁은 수로와 얇은 수심, 빠른 유속 등으로 island wake나 eddy로 인한 연직혼합이 활발했음을 말해주며, 이는 이 해역의 기초생산력을 높이는 주된 역할을 한다.

소조시 조류의 탁월유향은 낙조시 남남동, 창조시 북북서로, 표층 평균유속은 대조시의 약 85%이다. A~C leg의 탁월유향이 D~F leg의 유향과 반대인 경향은 대조시보다 적다. 소조시는 창, 낙조의 탁월유향이 우세하지 못하고 지속시간도 대조시보다 짧아 조류의 분산이 크다. 가막만 입구와 백야도~제도 사이 A~B leg 구간은 수심에 따라 유향이 반대이고 층간 유속차이가 크다. 또 F leg 구간은 조시에 따른 조류변동이 매우 크다. 따라서 연직방향 유속시어와 수평와류, 지형효과로 인한 비대칭 조류혼합이 발생해 물질의 수평·연

직이동이 왕성해 질 것으로 예상된다.

일평균조류 분포에서 개도 서~북서 해역 수로역은 조류의 수렴·발산에 따른 북서~북동 흐름, 금오도 서쪽은 서남서~남남서 최대 약 21 cm/s의 평균류가 존재하고, 소리도 서쪽에 좌선환류나 와류가 형성되어 있음이 파악되었다. 금오열도 주변 다도해역의 이러한 유동특성은 이들 해역의 저층 영양염 용승, 식물플랑크톤 blooming, 시스트(적조생물) 부유와 같은 생물·화학적 과정을 일으키는 주요 물리·역학적 역할을 할 것이다.

References

- [1] Barton, E. D.(2001), Island wakes, Nature, pp. 1-8.
- [2] Branson, P. M., M. Ghisalberti and G. N. Ivey(2018), Shallow Water Island Wakes in Unsteady Tidal Flows, 21st Australasian Fluid Mechanics Conference, Adelaide, Australia.
- [3] Caldeira, R. M. A., S. Groom, P. Miller, D. Pilgrim and N. P. Nezlin(2002), Sea-surface signatures of the island mass effect phenomena around Madeira Island, Northeast Atlantic, Remote Sens. Environ., 80(2), pp. 336-360.
- [4] Chang, K. I., K. Kim, S. W. Lee and T. B. Shim(1995), Hydrography and sub-tidal current in the Cheju Strait in Spring, J. Oceanol. Soc. Korea, 30, pp. 203-215.
- [5] Chavanne, C., P. Flament, R. Lumpkin, B. Dousset and A. Bentamy(2002), Scatterometer observations of wind variations induced by oceanic islands: implications for wind-driven ocean circulation., Can. J. Remote Sens., 28(3), pp. 466-474.
- [6] Cheng, P., H. E. Swart and A. V. Levinson(2013), Role of asymmetric tidal mixing in the subtidal dynamics of narrow estuaries, Journal of Geophysical Research: Oceans, 118, pp. 2623-2639.
- [7] Cho, Y. K. and K. Kim(1995), Characteristics and origin of the cold water in the cold water in the South Sea of Korea in summer, J. Oceanol. Soc. Korea, 19, pp. 414-421.
- [8] Choi, H. Y.(2001), Oceanographic Condition of the Coastal Area between Narodo Is. and Solido Is. in the Southern Sea of Korea and Its Relation to the Disappearance of Red-Tide Observed in Summer 1998, The Sea, Journal of the Korean Society of Oceanography, 6(2), pp. 49-62.
- [9] Choo, H. S.(2013), Numerical simulation of tidal currents and anchor-induced suspended solids dispersion around Dolsan Island, Korean Journal of Hydrography, 2(2), pp. 27-38.
- [10] Choo, H. S. and D. S. Kim(2013), Tide and tidal currents around the archipelago on the Southwestern Waters of the

- South Sea, Korea, J. Korean Soc. Marine Environment & Safety, 19(6), pp. 582-596.
- [11] Friedrichs, C. T. and D. G. Aubrey(1988), Nonlinear tidal distortion in shallow well mixed estuaries: A synthesis, Estuarine, Coastal Shelf Science, Elsevier, 26(5), pp. 521-545.
- [12] Geesey, M. E. and P. A. Tester(1993), *Gymnodinium breve* ubiquitous in Gulf of Mexico waters. In: Smayda, T. J. and Shimazu, Y. (eds), Toxic phytoplankton blooms in the Sea, Elsevier, Amsterdam, pp. 251-255.
- [13] Hasegawa, D., M. R. Lewis and A. Gangopadhyay(2009), How islands cause phytoplankton to bloom in their wakes, Geophys. Res. Lett., 36(20), pp. 1-4.
- [14] Hwang, S. B., H. S. Choo, D. H. Kim and D. S. Kim(2006), Distribution of current structures between Sori Island and Yokji Island in the South Sea of Korea, Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety, 12(4), pp. 285-291.
- [15] Imada, N. and T. Honjo(2001), Origin of seed population on coastal red tide, Bull. Plankton Soc. Japan, 48, pp. 121-124 (in Japanese).
- [16] Ippen, A. T. and D. R. F. Harleman(1966), Tidal Dynamics in Estuaries, Estuary and Coastline Hydrodynamics, Edited by Ippen, A. T., McGraw-Hill, New York, pp. 493-545.
- [17] Jeong, J. C.(2005), The temporal and spatial distribution analysis of red tide using GIS, The Journal of GIS Association of Korea, 13(3), pp. 253-260.
- [18] John, M. A. St., P. J. Harrison and T. R. Parsons(1992), Tidal wake-mixing: localized effects on primary production and zooplankton distributions in the Strait of Georgia, British Columbia, Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 164(2), pp. 261-274.
- [19] KHOA(1968), Tidal current in vicinity of Yosung Hang, Korea Hydrographic and Oceanographic Administration, Annual Report, pp. 157-180.
- [20] KHOA(1977), The result of tidal current observation in the Yeosu Hang Approches, Korea Hydrographic and Oceanographic Administration, Annual Report, pp. 91-123.
- [21] KHOA(1978). The result of tidal current observation in the Narodo Approches, Korea Hydrographic and Oceanographic Administration, Annual Report, pp. 151-184.
- [22] Kim, H. G., W. J. Choi, Y. G. Jung, J. S. Park, K. H. An and C. I. Baek(1999), Initiation of *Cochlodinium polykrikoides* blooms and its environmental characteristics around the Narodo Island in the western part of south sea of Korea, Bull. Natl. Fish. Res. Dev. Inst. Korea, 57, pp. 119-129.
- [23] Kim, K., H. K. Rho and S. H. Lee(1991), Water masses and circulation around Cheju-Do in summer, J. Oceanol. Soc. Korea, 26, pp. 262-277.
- [24] Lee, J. C.(1983), Characteristic of front near the Cheju Strait in early winter, Bull. Korea Fish. Soc., 16(2), pp. 33-47.
- [25] Lie, H. J.(1989), Tidal fronts in the southeastern Hwanghae (Yellow Sea), Continental Shelf Research, 9(6), pp. 154-168.
- [26] Lie, H. J. and C. H. Cho(1997), Surface current fields in the Eastern East China Sea, J. Oceanol. Soc. Korea, 32, pp. 1-7.
- [27] MOF(2003), Study on the foundation-laying of Jeonnam archipelago marine ranching program in Korea, Ministry of Oceans and Fisheries, BSPM 176-00-1531-3, pp. 353-359.
- [28] NIFS(1978), Tidal current around Yeosu Peninsula, National Institute of Fisheries Science, Annual Report, No. 41, pp. 89-106.
- [29] NIFS(2000), Harmful algal blooms in Korean coastal waters in 1999, National Institute of Fisheries Science, NIFS Report 2, pp. 1-206.
- [30] NIFS(2002), Harmful algal blooms in Korean coastal waters from 2000 to 2001, National Institute of Fisheries Science, NIFS Report, p. 158.
- [31] NIFS(2004), Harmful algal blooms in Korean coastal waters from 2003 to 2002, National Institute of Fisheries Science, ISSN 1229-6104, pp. 1-143.
- [32] Park, Y. H.(1986), Water characteristics and movement of the Yellow Sea Warm Current in summer, Progress in Oceanography, 17, pp. 243-254.
- [33] Raapoto, H., E. Martinez, A. Petrenko, A. M. Doglioli and C. MaesModeling(2018), The wake of the Marquesas archipelago, Journal of Geophysical Research: Oceans, 123(2), pp. 1213-1228.
- [34] Shin, H. H., Y. H. Yoon, Y. O. Kim and K. Matsuoka(2011), Dinoflagellate cysts in surface sediments from Southern Coast of Korea, Estuaries and Coast, 34, pp. 712-725.
- [35] Strang, E. J. and H. J. S. Fernando(2001), Vertical Mixing and Transports through a Stratified Shear Layer, Journal of Physical Oceanography, 31, pp. 2026-2048.
- [36] Suh, Y. S.(2001), Oceanographic features around the Korean Peninsula inferred from satellite remote sensing, Pukyong Nat. Univ., Doctorial dissertation, pp. 98-104.
- [37] Suh, Y. S., I. H. Jang and H. G. Kim(2003), Relationships between Spatio-temporal Distribution of *Cochlodinium polykrikoides* Red Tide and Meso-scale Variation of

Oceanographic Environment around the Korean Waters, The Journal of GIS Association of Korea, 6(3), pp. 139-150.

- [38] Yang, J. S., H. Y. Choi, H. J. Jeong, J. Y. Jeong and J. K. Park(2000), The outbreak of red tides in the coastal waters off Kohung, Chonnam, Korea: 1. Physical and chemical characteristics in 1997, The Sea, Journal of the Korean Society of Oceanography, 5(1), pp. 16-26.
- [39] Yoon, Y. H.(2001), A summary on the red tide mechanisms of the harmful dinoflagellate, *Cochlodinium polykrikoides* in Korean coastal waters, Bull. Plankton Soc. Japan, 48, pp. 113-120 (in Japanese).

Received : 2019. 07. 31.

Revised : 2019. 08. 21.

Accepted : 2019. 08. 28.