Article

가덕수도 근해에서 물리적 현상과 해류의 계절 변동

장성태^{1*} · 전동철² · 신창웅¹¹한국해양연구원 해양환경연구본부²한국해양연구원 해양자원연구본부

(425-600) 경기도 안산시 안산우체국 사서함 29

Seasonal Variations of Physical Conditions and Currents in the Sea Near Gadeok-Sudo

Sung-Tae Jang^{1*}, Dongchull Jeon², and Chang-Woong Shin¹¹Marine Environment Research Department, KORDI²Marine Resources Research Department, KORDI

Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea

Abstract : In order to investigate seasonal variations of the physical environments in the region of Jinhae Bay-Nakdongpo, we carried out hydrographic surveys from November 2000 to November 2001. Horizontal and vertical distribution of salinity and temperature shows large seasonal variations. Water column is well mixed in winter and stratified in summer. Low-salinity water is distributed in the form of patches because of the drainage control at the Nakdong River. Seasonal variations in the sea near Gadeok-Sudo are affected by topography, river discharge and tidal current. Currents have been measured using a bottom mounted ADCP and DCM12 between November 2000 and August 2001 in the Gadeok-Sudo. The current in the Gadeok-Sudo shows a distinct two-layer structure with reversed current. Low-pass filtered time series of wind, sea elevation and current are coherent for the period of 1-2 days and are attributed to Ekman-like dynamics. Spatial and temporal circulation pattern shows a slight different. The subtidal current in Jinhae Bay goes northward, however is reversed in the Gadeok-Sudo mouth.

Key words : Jinhae Bay, Nakdongpo, Gadeok-Sudo, Nakdong River, river discharge, subtidal current

1. 서 론

한반도 남해안 동부 해역에 위치한 가덕수도는 거제도 를 중심으로 가덕도에서 진해만에 이르는 수로를 말하며, 내만 형태의 독특한 지형적인 특징을 보이는 지역이다 (Fig. 1). 주된 흐름은 지형적인 특성상 수로를 따르는 왕 복성 조류이며, 수로 방향과 일치하는 흐름을 보인다. 외 적인 요소로 작용하는 진해만 내에서의 담수 유입, 낙동강 하천수의 유입과 외해수의 유입 등으로 계절별로 상이한

양상을 보이고 있는 지역이다. 특히 진해만은 폐쇄성이 강 한 내만으로 지형이 대단히 복잡하며, 대규모의 적조 발생 이 빈번한 지역으로 가덕수도와 견내량수도를 통해 해수 교환이 이루어진다. 가덕수도는 폭이 넓고 최고수심이 약 45 m이고, 견내량수도는 폭이 매우 좁고 최고수심이 약 8 m이다(장 등 1993). 장 등(1993)과 김 등(1994)의 현장 관측을 바탕으로 실시한 수리, 수치 실험에 의하면 가덕수 도를 통해 유입된 해수는 진해만의 북부해역과 진해만의 서부해역으로 분기된다고 하였다. 또한 창조류에 유입된 대부분의 해수가 가덕수도에서 합해져 외해로 유출된다고 하였다.

*Corresponding author. E-mail : stjang@kordi.re.kr

가덕수도에서의 조류는 창조류에 가덕수도 남동 방향에서 유입하여 북서쪽을 통해 진해항, 마산항으로 흐르고 일부는 수심이 얕은 가덕도 북측으로 흐르고, 낙조류는 창조류의 반대 방향으로 흐른다(국립해양조사원 1999). 가덕수도의 조류 형태는 만일 주조의 왕복성 조류로 월 중 일 조부등은 달의 적위가 최대인 날에 가장 크게 나타나고, 연중 최대 대조는 하·동절의 삭·망에, 소조는 춘·추절의 양현에 나타난다. 진해만에서 표, 중, 저층을 연속 관측한 이 등(1974)에 의하면, 진해만의 해수 유동은 만일 주조가 강한 왕복성 조류로 표, 중, 저층 공히 유사한 분포를 나타내고, 낙조류의 영향이 창조류에 비해 강하다고 하였다. 가덕도 서편은 창조시 북향하고 낙조시 남하하는 흐름을 보이나, 가덕도 북쪽 해역은 지형적인 특성상 창조시 북동 내지 동향으로, 낙조시 남서류의 형태를 보이고 진해만과는 달리 창조류가 우세한 양상을 보인다고 하였다.

이러한 가덕수도의 해황은 조류에 의한 영향이 지배적이나 내만의 형태를 띤 지형적인 특성과 외적 요소로 작용하는 낙동강 하천수의 영향을 무시할 수 없다. 윤(1988)에 의하면, 낙동강 하구둑 건설로 인하여 낙동강 하류의 수로 변경과 이로 인한 해저 지형의 변동이 생겨 해수 유동 특성이 달라졌다고 하였다. 낙동강 하구둑 하류에 관해 연구한 장과 김(2006)에 의하면 낙동강 하류부에서는 하구둑 수문의 개폐에 의해 저염의 강물 플룸(river plume)이 형태를 유지한 채 내려오고, 저염의 하천수는 완전히 혼합되지 못하여 패치(patch) 형태를 띄며 조류에 의해 가덕도 방향과 다대동 방향으로 편향한다고 하였다. 또한 방류되는 하천수의 방류량에 따라 혼합 양상이 달라짐을 보고하였다. 한국 남해의 수온과 염분의 13년 월평균 변화량을 조사한 김(1982)의 연구 결과에 의하면, 부산 앞바다

표층 염분의 변화 폭이 가장 클 때는 8월로 7, 8월에 집중적으로 내리는 장마에 의한 낙동강 유출수의 영향이 가덕수도에도 영향을 끼침을 시사한다. 한 등(1993)은 명지, 녹산 지구의 매립은 가덕도 북단에서 가덕수도로 유입되는 유출·입량의 변화를 가져왔다고 하였고, 현재 진행되고 있는 신행만의 건설은 지형적인 변화를 가중시키고 있다고 하였다.

이러한 지형적인 영향과 외적 요소에 의해 변화가 심한 가덕수도 근해에서의 계절적 변동성과 외적 요소로 인한 역학적인 특성을 고찰하기 위해 계절별로 조사하여 분석하였다. 조사는 진해항 남단에서 거제도과 가덕도를 지나 외해역까지 2000년 가을부터 2001년 가을까지 계절별로 CTD(Conductivity Temperature Depth)와 ADCP(Acoustic Doppler Current Profiler) 및 DCM 12(Doppler Current Meter Model 12)를 이용하여 진해만에서 낙동포 외해에 이르는 해역에서의 물리적 해황과 가덕수도 내에서 해류의 특성을 파악하였다.

2. 자료 및 분석 방법

가덕수도 근해에서 물리 해황의 계절 변화를 관찰하기 위해 2001년 3월, 5월, 8월과 11월에 각각 Fig. 1a에 나타난 정점에서 Seabird사의 SBE 911을 이용하여 CTD 관측을 실시하였다. 정점은 진해 내만에서 가덕수도를 따라 남단까지와 거제도에서 부산 앞바다까지로 선정하여 관찰하였다. 수도내의 세밀한 기작을 살펴보기 위해 동서방향으로 가덕수도의 입구인 거제도 북동편에서 가덕도 남단을 지나는 F1에서 F5를 잇는 선과 외적 요소로 작용하는 낙동강 하류부 지역인 H1에서 H4에 이르는 선을 연결하여

Fig. 1. Study area and station maps of hydrographic measurements in the eastern South Sea in 2001. (a) Each solid line denotes the line of the vertical section, (b) Each area denotes Jinhae Bay, Gadeok-Sudo, Nakdong River and Open sea area.

수직 분포를 관찰하였고(Line 1), 남북방향으로 진해만 내에서 가덕수도 외해역에 이르는 가덕수도 전역에 걸친 선을 연결하여 수직 분포를 관찰하였다(Line 2).

또한, 계절별 영역별 분포를 관찰하기 위해 연구지역을 만 내의 거동을 위한 진해만 영역, 가덕수도 영역 및 외적 요소로 작용하는 낙동강 유역과 외해역의 4개 영역(Fig. 1b)으로 구분하여 수괴(water mass)의 분포를 살펴보았다.

계절별 수괴 변화

모든 관측자료에 대한 계절별 수온·염분 곡선(T-S Diagram)을 Fig. 2에 나타내었고, 이를 바탕으로 수괴 특성을 살펴보았다. 수괴 분석을 통하여 동계의 혼합이 하계로 감에 따라 성층화되는 계절 변동을 관찰할 수 있다. 동계는 수직적으로 혼합이 잘 이루어져 수심에 따른 밀도변

화가 없는 중립안정도를 나타내고, 춘계에는 동계의 중립 안정이 서서히 깨어지는 특징이 나타난다. 하계의 표층은 태양 복사열과 담수의 유입으로 밀도가 낮아져 뚜렷한 성층이 형성되고 전 계절을 통틀어 가장 고온과 저염이 나타났고, 이후 추계로 가면서 다시 혼합이 이루어진다. 수온과 염분의 분포는 동계에 최저 수온인 8°C와 최고 염분 34.5가 나타났고, 하계에 최고 수온인 27.8°C와 최저 염분 28.1이 각각 나타났다. 동계에서 하계로 갈수록 수괴는 성층 현상으로 안정되어 나타나고, 하계에서 추계로 감에 따라 혼합되어 동계의 중립안정으로 되풀이되는 계절별 수괴 특성이 나타난다.

이러한 계절별 변동을 4개의 세부 영역으로 나누어 Fig. 3에 나타내었다. 전반적으로 Fig. 2의 분포를 따르지만 지역적인 편차가 나타났다. 4개의 영역 중 진해만 영역

Fig. 2. Seasonal variations of Temperature-Salinity Diagrams.

Fig. 3. Seasonal and spatial variations of T-S Diagrams (.: Winter, *: Spring, o : Summer, x : Autumn).

이 계절별 수온과 염분의 편차가 가장 적게 나타나 가덕 수도를 통해 유출·입되는 해수가 수심이 얕고 좁은 내만 형태의 지형적인 특성으로 쉽게 혼합됨을 시사한다. 낙동강과 가덕수도 영역은 하계에 집중적인 장마비와 낙동강 하천수에 의한 담수의 영향으로 그 변동 폭이 가장 크게 나타났다. 상대적으로 외적 요소에 의한 영향을 적게 받는 외해역에서 동계에 가장 고온고염이 나타나 이는 수온 10°C 이상, 염분 34.2 이상인 대마난류수로 여겨지고, 하계와 추계에는 나타나지 않았다. 하계의 전 해역에서 낙동강 하천수에 의한 고온저염의 혼합수가 나타났고, 이를 통해 낙동강 하천수가 가덕수도 해황에 미치는 중요한 외적 영향 중 하나임을 알 수 있다.

전 해역에서 최저수온은 동계에 진해만 영역에서 나타났고, 최고수온은 하계에 낙동강지역에서 나타나 비열이 작은 육지의 영향이 그대로 나타났다. 해양개발연구소

(1980)에 의하면 수온은 외해로부터 내만으로 가면서 증가한다고 하였는데, 동계에만 달리 나타났다. 최저염분은 낙동강 하구지역이 아닌 가덕수도에서 하계에 나타났고, 최고염분은 외해역에서 동계에 나타났다.

수평 분포 특성

계절별 표층 염분의 수평 분포를 Fig. 4에 나타내었다. 동계는 하천수의 영향이 일부 나타나는 낙동강 하류부를 제외하고는 균질한 분포를 나타내고, 춘계는 낙동강 하구 지역과 거제도 북동편에 일부 담수의 영향이 보인다. 두 계절 모두 등수심선을 따르는 분포를 보여주고 있다. 하계는 장과 김(2006)이 언급한 것처럼 낙동강 하천수의 영향이 가덕도 남단까지 패치형태로 존재하고, 이는 낙동강 하구둑 수문의 인위적인 개폐로 완전히 혼합되지 않은 혼합수가 조류에 의해 가덕수도쪽으로 편향되어 나타난 결

Fig. 4. Horizontal distributions of salinity observed at the surface layer.

과로 판단된다. 아울러 장마비에 의한 강수량의 증가는 관측 해역에서 저염수의 양을 늘려 전 계절을 통틀어 저염의 분포가 가장 넓게 나타났다. 그림으로 나타내지 않았지만, 지역적으로 수심이 얇은 진해만의 전 층에서 저염이 존재하였다. 추계는 하계의 성층이 다시 혼합되는 시기로 염분 분포가 등수심선을 따르고 있다.

표층 수온의 수평 분포는 Fig. 5에 나타내었다. 동계에는 비열이 큰 해수의 영향으로 내만의 수온에 비해 외해수의 수온이 높게 나타났고, 춘계에는 태양열에 의해 오히려 내만의 수온이 높게 나타났다. 하계는 염분의 분포와 유사하였고, 이는 위에서 언급한대로 낙동강 하천수의 영향으로 사료된다. 전 계절 중에서 하계에 온도 편차가 가장 크게 나타났다. 추계는 혼합이 시작되는 시점으로 내만의 수온이 외해에 비해 저온을 나타내었다.

염분의 수평 분포에서 뚜렷한 계절 변동을 보이고, 이는 낙동강 하천수의 유입이 외적 요소로 작용함을 암시하

고 있다. 혼합이 활발하였던 동계와 춘계의 등염분선이 등수심선과 유사하게 분포하고 있었다. 수온의 경우도 낙동강 하천수의 영향이 뚜렷이 나타나 계절별 변동에 가장 큰 영향을 끼침을 보여주고 있다.

수직 단면 구조

동서 방향인 거제도 북동단에서 가덕도 남단을 거쳐 대동해에 이르는 정점 F1에서 H4를 잇는 선 1(Line 1)에서 계절별 염분의 수직 분포를 Fig. 6에 나타내었다. 동서 단면을 가덕수도 영역(F1~F5)과 낙동강 영역(H1~H4)으로 나누어 보면, 가덕수도의 동계는 표층과 저층간 염분 변화가 거의 없어 낙동강 하구지역에 비해 혼합이 활발하였음을 알 수 있다. 춘계로 접어들면서 낙동강 영역에서부터 성층이 시작되고 바닥은 동계에 비해 저염이다. 이후 하계에는 뚜렷한 성층을 나타내고 추계에 다시 혼합이 활발해져 동계의 완전 혼합으로 되풀이 된다. 낙동강 영역에서는

Fig. 5. Horizontal distributions of temperature observed at the surface layer.

Fig. 6. Vertical distributions of salinity observed at the Line 1 in Fig. 1(a).

Fig. 7. Vertical distributions of temperature observed at the Line 1 in Fig. 1(a).

Fig. 8. Vertical distributions of salinity observed at the Line 2 in Fig. 1(a).

계절에 관계없이 하천수의 유입이 많으면 언제든지 저염의 혼합수가 나타나고, 이러한 혼합수는 패치 형태로 존재함을 알 수 있다.

수온의 수직단면 분포는 Fig. 7에 나타내었고, 하계를 제외한 계절의 수온 분포가 1~2°C 정도 차이를 보인 반

면, 하계에는 10°C 이상의 온도 차를 보이고 있다. 하계는 수온약층이 강하게 형성되어 표·저층간 수직 혼합이 잘 이루어지지 않았다. 염분과 수온의 수직 단면 구조에서도 가장 큰 계절 변동요인은 유입된 하천수에 의한 영향이라는 사실을 재확인할 수 있다.

Fig. 9. Vertical distributions of temperature observed at the Line 2 in Fig. 1(a).

남북 방향인 진해항에서 외해역까지인 가덕수도 전역에 걸친 염분의 수직 단면을 Fig. 8에 나타내었다. 모든 계절에서 만내의 염분이 외해역에 비해 적게 나타났고, 이는 진해만 내에서 유입되는 담수의 영향으로 남고북저의 분포를 보인다. 지형적으로 좁은 만내에서 넓은 외해로 연결되어 있어 염분은 담수의 유입이 있는 만내에서 외해쪽으로 증가하고 있다. 주목할 정점은 거제도 북단과 연도 사이에 있는 정점 D2(▼ in Fig. 8, 9)로 진해만의 길목에 위치해 있고 수심도 주위보다 깊어 조류에 의한 해수의 교환이 이루어지는 지점이다. F3(▽ in Fig. 6~9) 지점은 외해 유입수가 직접 가덕수도로 들어오는 입구이며, 낙동강 하류부 혼합수도 직접 들어와 상대적으로 그 변화 폭이 크다. 외해역인 K2~L3 정점은 하계를 제외하고 변화 폭이 가장 작게 나타났다. 남북 방향의 수온 단면은 Fig. 9에 나타내었고, 동계에 외해역의 수온이 높은 남고북저의 분포가 나타났다.

남북 방향 수온과 염분의 수직단면에서 동계와 춘계는 전 층에서 혼합이 활발하고 하계에 접어들어 성층이 이루어지는 분포 특성이 잘 나타났다. 특히, 동계에는 내만으로 이루어진 육지의 영향으로 수온과 염분 모두 남고북저의 분포를 보여주고 있다. 해양개발연구소(1980)는 진해만 일대의 수온 및 염분의 분포는 표층이 기온의 영향을 받고 있음에 비하여 저층은 조류에 의하여 외해의 영향을 받는다고 하였고, 관측에서도 표·저층 수온과 염분 분포의 차이를 확인할 수 있었다.

가덕수도에서의 해류

가덕수도에서 해수 유동의 특성을 파악하기 위해 TRBM(Trawl-Resistant Bottom Mount) ADCP를 이용하여 가덕수도 내의 2개 정점에서 2000년 11월 2일부터 동년 12월 2일까지와 2001년 3월 9일부터 3월 27일까지 각각 계류하여 관측하였고, 2001년 3월, 5월과 8월에도 Fig. 10에 나타난 정점에서 보름 전후의 기간 동안 DCM12를 이용하여 관측하였다. 관측 장비와 관측 위치 및 기간을 Table 1에 나타내었다.

Fig. 10. Locations of ADCP and DCM12 deployments.

Table 1. Locations, depths and periods of current measurements between November 2000 and August 2001 in the Gadeok-Sudo

Instrument	Station	Period	Latitude	Longitude	Depth
ADCP	A1	Nov. 2~Dec. 2, 2000	34° 58.595'	128° 47.120'	21 m
	A2	Mar. 9~Mar. 27, 2001	35° 0.775'	128° 47.210'	32 m
DCM	D1	Mar. 7~Mar. 25, 2001	34° 4.500'	128° 40.400'	18 m
		May 20~Jun. 13, 2001	35° 4.328'	128° 40.549'	20 m
	D2	Mar. 12~Mar. 25, 2001	35° 1.662'	128° 47.201'	18 m
		May 19~Jun. 2, 2001	35° 1.362'	128° 47.393'	18 m
	D3	Mar. 12~Mar. 25, 2001	34° 58.529'	128° 48.511'	32 m
	D4	Aug. 19~Aug. 30, 2001	34° 59.332'	128° 49.709'	36 m

Fig. 11. Progressive Vector Diagrams at the station A1 and A2.

Fig. 12. Tidal curves and stick vector plots of low-passed velocity with depth.

먼저, ADCP를 이용하여 관측한 A1과 A2 정점의 표, 중, 저층간 유속변화를 파악하기 위한 PVD(Progressive Vector Diagram)에서 두 정점의 위치와 관측 시기는 다르지만 표층과 저층의 상반된 흐름을 관찰할 수 있고(Fig. 11), 이는 조류성분을 제거하기 위해 저주파통과 필터

(low-pass filter)를 사용하여 구한 수심별 유속 분포(Fig. 12)에서도 잘 나타나 외해역으로 빠져나가는 표층류와 내만 쪽으로 파고드는 저층류의 이중구조를 관찰할 수 있다. A1의 표, 중, 저층의 평균유속은 4.95, 0.5, 3.84 cm/s 이고, A2는 3.25, 3.1, 3.79 cm/s로 나타나 저층의 유속은

비슷하였고, A1과 A2 정점의 유향차이는 지형적인 영향으로 보인다. 실제 A2 정점의 수심은 깊고 골짜기형태로 이루어져있다. A1 정점의 표층유속이 A2에 비해 강하게

Fig. 13. Time series stick vector plot of low-passed wind at Geoje and N (northerly) and E (easterly) component wind.

나타났고, 이러한 영향이 바람에 의해 좌우되리라 판단되어 표층유속과 바람의 상관관계를 분석해보았다. 사용된 바람자료는 거제 기상관측소에서 1시간 간격으로 관측한 자료이고, 저주파통과 필터를 이용한 후 Fig. 13에 나타내었다. 계절의 특성상 북서풍이 강하게 불어 남북성분과 동서성분 사이에 깊은 상관성을 보인다. 관측기간에서 11월 16일 반나절을 제외하고는 북풍이 강하게 불면 반드시 서풍이 강해졌다. 바람의 영향을 고찰하기 위해 밀접한 관련을 보였던 동서와 남북성분의 바람과 필터링을 거친 조위의 일치 스펙트럼(coherence spectrum)을 Fig. 14a에 나타내었다. 바람과 해수면의 상관성은 비교적 낮지만, 동서성분에서 1일 이상 2일 이하 주기에서 동풍이 불면 위상은 150° 이상으로 해수면이 상승하는 것을 유추할 수 있다. 수로방향이 남북으로 되어있는 가덕수도에서 동서방향의 바람에 의한 에크만 수송(Ekman transport)에 따라 해수면이 변화하는 것은 역학적으로 일치한다. 조류와 상관관계를 보였던 동서성분의 바람과 동서와 남북성분의 유속자료와 비교하였을 시는(Fig. 14b) 동서성분의 바람과 동서성분의 유속이 모든 주파수에서 상관성이 높게 나타나고

Fig. 14. Coherence analysis of the wind, tidal elevation and surface current.

위상도 일치하였다. 이 말은 결국 서풍이 불면 흐름도 서쪽으로 향한다는 말인데, 조위와 연관시켜 보면 결국 서풍

이 불면 해수면은 하강하고 하강한 해수면을 채우기 위한 서쪽으로 향하는 흐름이 존재하게 되는 것이다.

Fig. 15. PVD (left side) and stick vector plots (right side) of low-passed velocity with tidal curves in March 2001.

관측 기간 내 조류를 제거한 평균 유속은 표층에서 남서 방향으로 4.9 cm/s, 저층에서 북동 방향으로 3.8 cm/s

로 나타나 강하구의 흐름형태(estuarine fluxes)를 이루었으며, 그 경계인 중층에서는 유속이 상쇄되어 작게 나타났

(a) Station D1

(b) Station D2

(c) Station D4

Fig. 16. PVD (left side) and stick vector plots (right side) of low-passed velocity with tidal curves in May and August 2001.

다. 조류를 제거한 최강 유속은 표층의 10.3 cm/s보다 저층에서 14.5 cm/s로 더 크게 나타났다. 이것은 저층을 통한 내만으로의 유입수가 상층을 통해 가덕수도 밖으로 유출되는 흐름보다 경우에 따라 더 강함을 말해준다. 또한, ADCP 관측 결과 수도방향과 거의 일치하는 반일주조 우세형으로 조류의 장축은 가덕수도 방향과 일치하는 북서-남동 방향의 흐름이었고, 이 등(1974)이 말한 표, 중, 저층이 공히 유사한 진해만 내의 유동과는 달리 표, 저층간 흐름 차를 보이는 특징이 있다.

계절별 지역별 해류의 특징

가을과 초봄에 관측하였던 ADCP의 관측 결과 외해역에서 저층을 통해 고염수가 가덕수도를 따라 북상하였고, 표층에서는 내만으로부터 저염수가 외해쪽으로 유출되는 흐름 양상이 나타났다. 다만, 관측 위치와 계절에 따른 영향으로 사료되는 편차는 보인다. 이러한 변동 양상을 파악하기 위해 관측 시기와 위치를 달리해서 Fig. 15와 16에 나타내었다. 위치별로는 진해만 영역, 가덕수도 내 정점과 가덕수도 입구 정점으로 나누었고, 시기별로는 3월, 5월과 8월로 달리 관측하였다. 3월에 관측하였던 D1, D2와 D3 정점에서는 위치에 따른 흐름 차이를 뚜렷이 보여주고 있다. 진해만 영역에서는 표층에서 저층까지 내만으로 향하는 흐름을 보여주고 있는 반면 가덕수도 초입에서는 공히 남하하는 흐름을 보여주고 있다. 가덕수도 내의 정점인 D2의 저층은 내만으로 북상하는 흐름을 보이지만, 표층은 가덕도 방향으로 향하였다. 이는 건내량수도를 통해 유입되는 해수가 진해만과 가덕수도 방향으로 분기되면서 나타난 영향으로 사료된다. D1, D2와 D3 정점 저층의 평균 유속은 각각 6.1, 2.7, 12.6 cm/s로 나타나 가덕수도 입구에서 남하하는 흐름이 가덕수도 내 북상하는 흐름에 비해 2배 이상 크게 나타났고, D2 정점은 골 형태의 지형적인 영향을 받고 있다. 5월과 8월에 관측한 자료에서는(Fig. 16) 진해만 영역인 D1에서 5월 25일까지 북상하던 흐름이 이후 남하하는 흐름으로 바뀌었고, D2에서는 3월과 유사한 흐름을 보이지만 방향의 편차는 보였다. 8월에 가덕수도 끝자락에서 관측한 D4에서도 D3와 마찬가지로 남하하는 특징을 보여주고 있다. 각 정점의 저층 평균유속은 2.0, 3.3, 17.0 cm/s로 나타나 지형적인 영향을 받는 D2 정점은 3월과 유사한 흐름분포를 보이지만, D1은 흐름의 세기가 1/3 줄었고 방향도 반대로 나타나 계절별 변동성이 크게 나타났다.

특이한 점은 3월의 D1, D3 정점과 5월과 8월의 D1, D4 정점의 경우, 저주파 필터를 사용했음에도 불구하고 조석 곡선과 유속 크기의 변화가 유사하게 나타났다. D1 정점은 병목현상에 의해 물의 흐름이 빠르기로 유명한 건

내량수도가 조류에 의한 영향을 많이 받는 관계로 해류성분에 남아있고, 가덕수도 끝자락에 위치한 D3과 D4 정점도 조류에 의한 영향이 일부 나타난 결과이다.

3. 결 론

지형적인 영향과 외적 요소에 의해 변화가 심한 가덕수도 내의 계절적 변동성과 외적 요소에 의한 영향을 살펴 보았다. 가덕수도 근해의 계절별 해황은 동계에 수직적으로 완전 혼합된 상태에서 춘계에 복사열에 의한 수온약층을 형성하고, 하계에는 담수의 유입에 의한 성층화가 추계까지 지속되다 동계에 다시 완전 혼합되는 양상을 반복하였다. 수괴 분석을 통해서도 동계의 혼합이 하계로 감에 따라 성층화되는 계절 변동성이 잘 나타났다. 지역적으로는 진해만 영역이 계절별 수온과 염분의 편차가 가장 크게 나타났고, 낙동강 하구 지역이 하계의 집중적인 장마비에 의한 담수의 영향으로 그 변동 폭이 가장 크게 나타났다. 계절별 수평 분포에서도 하계에 낙동강 하천수의 유입이 가덕도 남단까지 영향을 미치고 있음을 확인하였고, 낙동강이 외적 요소로 작용함을 알 수 있었다. 수직 단면 구조에서 낙동강 영역에서는 계절에 관계없이 하천수의 유입이 많으면 언제든지 저염의 혼합수가 나타나고 이러한 혼합수는 패치 형태로 떠 다닌다는 사실을 알 수 있고, 이는 낙동강 하구둑 수문의 개폐에 의한 영향이 있음도 확인할 수 있었다. 염분과 수온의 수직 단면 구조에서도 가장 큰 계절 변동은 하계의 집중 호우에 의한 영향이라는 사실을 재확인하였다.

가덕수도 내 해류의 특성은 지형적인 특징상 수로를 따르는 왕복성 조류가 탁월하고 표, 중, 저층이 공히 유동하는 진해만의 유동과는 달리 표·저층간 흐름 차가 나타났다. 저층에서는 고염수가 외해역에서 가덕수도를 따라 북상하고, 표층에서는 내만으로부터 저염수가 외해쪽으로 유출되는 이중구조를 나타내었고 그 흐름은 가덕수도 방향과 일치하는 북서-남동 방향이었다. ADCP로 관측한 표층 유동과 바람과의 상관관계를 분석한 결과 동서방향의 바람에 의한 에크만 수송에 따라 해수면이 변화하는 것을 관찰하였다.

위치별 관측에서 진해만 영역의 정점은 표, 저층 공히 내만으로 북상하는 흐름을 나타낸 반면 가덕수도 입구 정점에서는 남하하는 특징을 보여 위치에 따라 대비되는 양상을 나타내었고, 이는 건내량수도를 통해 유입되는 해수가 진해만과 가덕수도 방향으로 분기되면서 나타난 영향으로 여겨진다. 3월과 5월에 진해만에서 관측한 자료에서 3월에 비해 흐름의 세기가 약화되고 방향도 반대로 나타나는 계절별 변동성을 확인하였다.

사 사

본 논문의 심사를 맡아주셔서 세세한 부분까지 조언해주신 심사위원님들과 담당 편집위원이신 강석구 박사님께 감사드립니다.

참고문헌

- 국립해양조사원. 1999. 가덕수도의 조류도. 18 p.
- 김복기. 1982. 한국 남해의 수온과 염분의 변동계수. *한국해양학회지*, 17(2), 74-82.
- 김차겸, 장선덕, 이종섭. 1994. 진해만 조류의 2차원 수리 및 수치 모델링. *한국해양학회지*, 29(2), 83-94.
- 윤갑동. 1988. 낙동강 하구의 물리적 해황에 관한 연구. *한국어업기술학회지*, 24(2-3), 65-70.
- 이종화, 봉종훈, 한상준. 1974. 진해만의 해수유동에 관하여. *한국해양학회지*, 9(1-2), 19-30.
- 장선덕, 김차겸, 이종섭. 1993. 진해만 조류의 현장관측 및 수리모형실험. *한국수산학회지*, 26(4), 346-352.
- 장성태, 김기철. 2006. 낙동강 하구에서의 해양 환경 변화. *한국해양학회지 「바다」*, 11(1), 11-20.
- 한건모, 김기철, 김재중. 1993. 명지녹산 해역 매립 후의 해수 유동에 관한 연구. *한국해양공학회지*, 7(1), 441-454.
- 해양개발연구소. 1980. 진해만의 적조 및 오염모니터링 시스템 개발을 위한 기초연구. 해양개발연구소, BSPE 00022-43-7. 459 p.

Received Sep. 4, 2007

Accepted Feb. 5, 2008