

2006년 봄철 광양만 해류의 구조와 변동

이재철* · 김정창

부경대학교 해양과학공동연구소

Current Structure and Variability in Gwangyang Bay in Spring 2006

JAE CHUL LEE* AND JEONG-CHANG KIM

Korea Inter-university Institute of Ocean Science, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea

광양만의 순환을 이해하기 위하여 2006년 봄철에 수심이 가장 깊은 두 지점을 선정하여 ADCP가 장착된 모니터링 부표 2대를 이용하여 유속관측을 하였다. 두 지점에서 공통적으로 북향류가 지배적인데, 이는 서쪽의 남향류를 동반하는 반시계 방향의 순환이 있음을 뒷받침 하고 있다. 남쪽에서는 14 m 수심에서 유향이 반전되는 2층 구조가 뚜렷하며 저층의 북향류는 바닥에 가까운 36 m 수심까지 증가한다. 북쪽 지점에서는 북향류가 더욱 강해져서 북쪽의 단면적 감소에 따른 해류의 가속 효과가 있으며 상층부에서도 북향류가 우세하다. EOF 분석을 통한 연직구조에 있어서 첫 번째 모드는 북쪽 부표에서 전체 분산의 74%인데 비하여 남쪽 부표에서는 67%로 감소하고 상대적으로 2층 구조의 비중이 크다. 반시계 방향의 순환과 관련된 북향류의 전형적인 유속은 약 10 cm/s이다. 여기에 중첩되는 변동성으로서 국지적인 바람의 영향은 거의 받지 않는 반면에 동서 방향의 바람에 의한 외해의 에크만 수송과 관련된 비국지적 영향은 주로 풍속이 강할 경우에 나타난다.

Two monitoring buoys equipped with ADCP were deployed at the deepest positions along the trough of the central Gwangyang Bay in spring 2006 in order to study the circulation in the bay. Northward velocity is commonly dominant at both stations located in the eastern part of the channel, which supports the cyclonic circulation accompanied by the southward flow in the western part. The southern station has a distinct two-layer structure with current reversal at 14 m depth and increasing northward velocity in the lower layer to 36 m depth close to the bottom. At the northern station the northward flow becomes accelerated due to the decrease in the cross-sectional area and this northward current is dominant even in the upper layer. In the modal structure from the EOF analysis, the first mode has 74% of total variance at the northern station whereas it is 67% but the baroclinic portion increases at the southern station. The typical northward velocity is about 10 cm/s which is associated with the cyclonic circulation. Subtidal variability due to the local wind effect is negligible, but the non-local response associated with offshore Ekman flux by the zonal wind is found during strong wind events.

Keywords: Gwangyang Bay, Current, Modal Structure, Circulation, Wind

서론

광양만은 여수반도와 남해도에 의해 둘러싸여 있으며 남해를 향해 열려있는 여수해만에서 북쪽으로 가면서 좁아지다가 광양제철(POSCO)을 중심으로 묘도가 있는 서부 지역과 남해도 쪽의 동부 지역으로 분리된다(Fig. 1). 여수해만에서 남해도의 서해안에 근접하여 형성된 수심 20 m 이상의 골은 만의 상류로 가면서 광양제철을 사이에 두고 'Y' 자 형태로 분리되며 그 중앙부는 30 m 이상으로 깊다.

광양만의 해수 순환에 관한 연구는 극히 적은 편인데, 이 등(2006)은 광양만 북동부 해역 상층부의 유속관측을 통한 연구에서 밀도분포에 기인하는 반시계 방향의 순환이 있고 계절변화를 하

며 또한 노랑수도를 통해서 9 cm/s의 평균속도로 동쪽의 진주만으로 유출되는 흐름이 있다고 하였다. 그러나 광양만의 북동부에서만 관측이 이루어졌기 때문에 다른 지역에서도 유속관측을 함으로써 보다 광범위한 지역의 연구가 필요하다. 본 연구는 광양만의 해류를 더 이해하기 위한 노력의 일환으로 광양만의 중심부에서 수심이 가장 깊은 두 지점을 선정하여 ADCP가 설치된 모니터링 부표를 이용하여 2006년 3-4월에 약 1개월간 관측을 실시하였으며 이를 통하여 해류의 연직구조와 변동성을 파악하였다.

해양관측 및 자료분석 방법

광양만에서 수심이 30 m 이상인 가장 깊은 두 지점을 선정하고 2006년 3월 21일에 모니터링 부표 두 대를 설치하여 10분 간격으로 ADCP를 이용한 유속관측을 하였다(Fig. 1에 N과 S로 표시됨).

*Corresponding author:

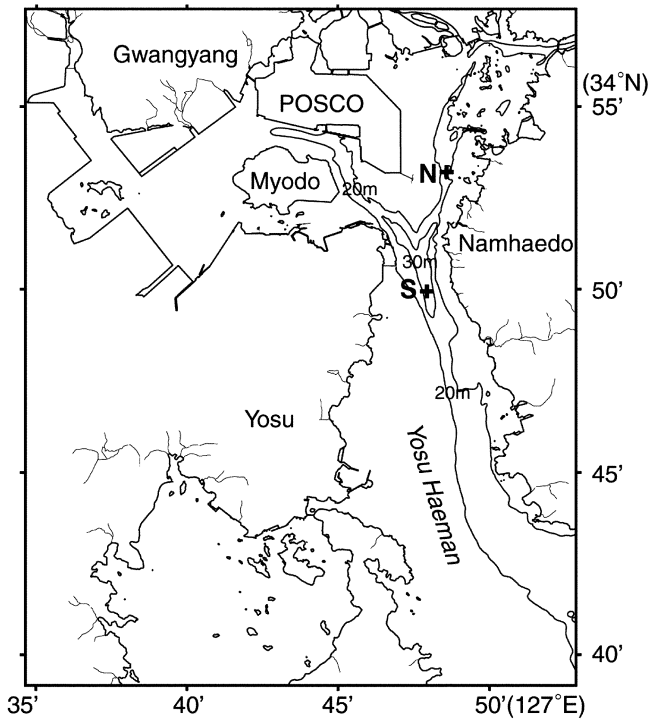


Fig. 1. Map of Gwangyang Bay showing current meter stations (+) and isobaths of 20 and 30 m.

유속측정의 수심간격은 4 m였다. 남쪽 부표(S)에서는 기상관측도 병행되어 해수면상 2 m 높이에서 관측한 풍속자료도 획득하였다.

북쪽 부표(N)가 설치된 지점에는 국지적으로 40 m 이상의 깊은 골이 형성되어 있다. 남쪽 부표는 4월 20일에, 북쪽 부표는 4월 27일에 각각 회수되었다. 두 지점 사이의 거리는 약 6.3 km이다.

각 수심의 유속관측 자료는 우선 조류분석을 통해 조류성분을 계산하였다. 원 자료에서 조류성분을 빼주어서 구한 비조류 성분 에 Butterworth filter를 적용하여 40시간 이하의 단주기 성분을 제거하는 low-pass filtering을 하였다. 본 연구에서는 이 등(2006)의 연구에서와 마찬가지로 filtering을 하여 조류와 단주기 성분이 제거된 나머지 유속성분을 간단히 해류라고 부르기로 한다. 조류와 해류에 대한 주축성분분석(principal component analysis)의 결과를 이용하여 유속벡터의 분포를 평균유속과 표준편차 타원으로 표현하였다. 해류의 경우에 모든 자료의 평균 동방분속과 북방분속 으로부터 평균유속의 방향을 구하여 국지적인 좌표계의 y-축으로 하였고 이 방향의 유속성분인 주축성분을 가지고 해류의 연직구조와 상관성에 관한 분석을 하였다.

결과 및 고찰

해류 성분의 연직구조와 변화

관측자료로부터 분리된 해류 성분의 층별 구조와 시간적 변화를 파악하기 위해서 Fig. 2에 벡터 시계열로 나타내었다. 남쪽 부표에서는 기상관측도 병행되었으므로 해면상 2 m 높이의 풍속벡터도 유속 벡터의 위에 함께 도시하였다. 바람은 3월 28-31일과 관측의 끝 부분인 4월 19-20일에 강한 북서풍이 기록되었다. 해류에 있어서는 두 지점 공히 16 m 수심까지의 상층부 유속은 상대

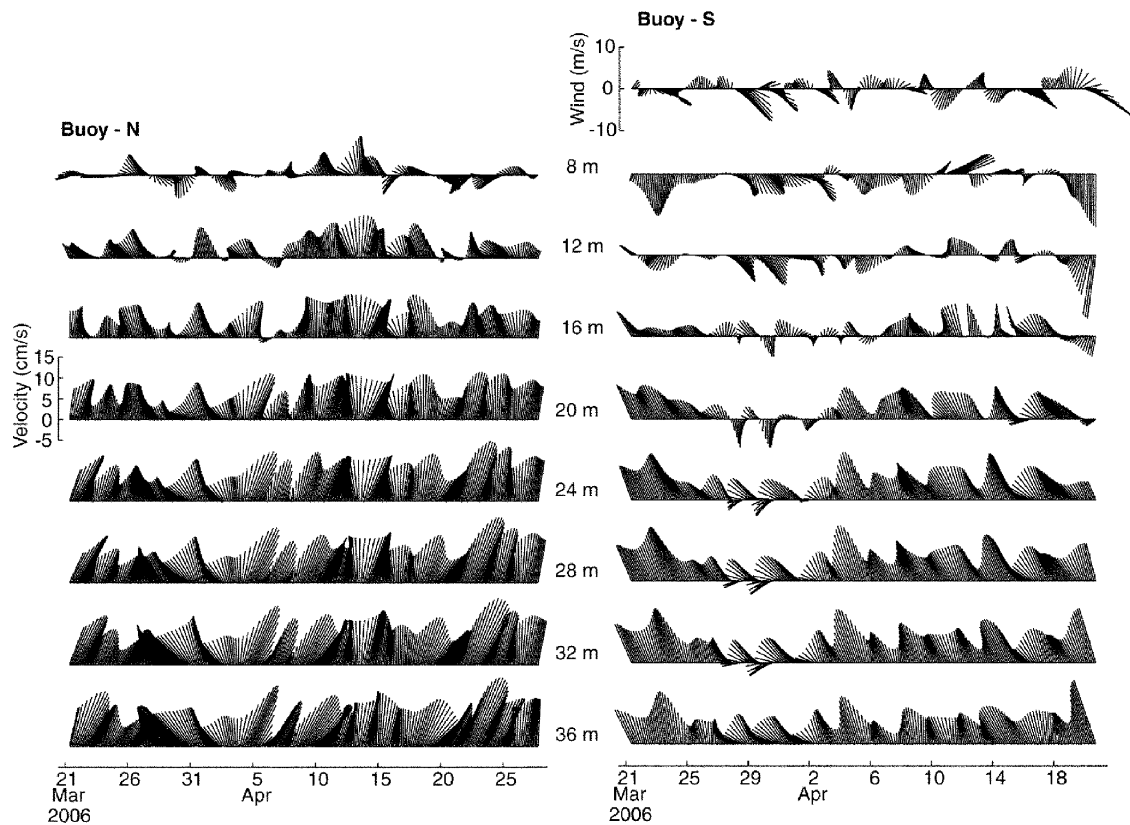


Fig. 2. Stick vector plots of low-passed current and wind velocity.

적으로 약하며 방향도 변화가 심하고 남향류도 자주 나타난다. 특히 남쪽 부표에서는 8-12 m의 상층부에서 북향류 보다 남향류가 오히려 더 크고 3월 27-31일에는 32 m 수심까지 관측되었는데, 이는 강한 북서풍의 시기와 거의 일치한다. 수심 20 m 아래에서는 북향류가 지배적인데 수심이 깊어질수록 유속이 오히려 증가하는 경향을 보인다.

이와 같이 두 지점의 유속이 북향류가 우세한 것은 관측 위치가 비교적 동쪽에 치우쳐 있는 데다가 이 등(2006)이 제시한 반시계방향의 순환으로 인해서 동쪽에는 북향류가, 서쪽에는 남향류가 편중되어 있기 때문으로 보이며 추후에 서쪽 지역에서 유속관측을 통하여 남향류의 존재를 확인할 필요가 있다. 북쪽 부표에서 북향류는 8 m 수심을 제외한 모든 수심에서 지배적이고 남쪽 부표 보다 훨씬 큰 특징을 가지는데, 이는 여수해만에서 북쪽으로 가면서 단면적이 좁아짐에 따라 흐름이 가속되는 효과와 전향력에 의해서 동쪽으로 치우치는 효과가 중첩되기 때문일 것이다. 최대유속은 북쪽 부표에서 4월 22일 12시 경에 34 m 수심에서 18.1 cm/s가, 남쪽부표에서는 4월 20일 19시에 36 m 수심에서 15.2 cm/s가 기록되었다.

조류와 해류의 주축성분 분석

조류와 해류에 대해서 주축성분분석을 한 결과가 Fig. 3에 각 수심의 평균유속과 표준편차타원으로 나타나 있다. 조류에 비해서 해류는 크기가 매우 작아 알아보기 쉽도록 확대하였으므로 크기는 아래에 표시된 각각의 기준과 비교하면 된다. 타원은 장축과

단축 방향의 표준편차이므로 크기를 1.96배를 한 타원의 내부에 모든 유속벡터의 95%가 분포하게 된다.

조류에 있어서 장축 방향의 성분은 전체 분산의 97% 이상을 포함하므로 단축 성분을 무시하여도 조류의 유속을 대표하기에 충분하다. 해류의 경우, 장축 성분이 차지하는 분산의 비율은 남쪽 8 m 수심의 69.5%에서 16 m 수심의 82.0%의 범위, 그리고 북쪽 36 m 수심의 72.7%에서 20 m 수심의 91.8%의 범위로서 조류에 비해 작고 장축의 길이 또한 5.5~7.8 cm/s로 조류의 47.9~66.5 cm/s에 비하면 매우 작은 편이다. 해류의 평균유속을 보면 북쪽의 8 m에서는 서북서 방향에 1.6 cm/s이고 수심이 깊어지면서 유속은 증가하고 방향은 시계방향으로 약간씩 바뀌며 36 m에서는 12.5 cm/s에 이른다. 남쪽에서는 8 m에서 남동향 2.6 cm/s, 32 m에서 북서향 6.9 cm/s의 범위를 가지고 14 m 수심을 중심으로 한 2층 구조가 보다 뚜렷하여 부분혼합형 하구만의 특징을 보여준다.

관측지역의 지형적인 영향으로 인해서 특정 방향의 흐름이 지배적이므로 주축방향을 국지적 좌표계의 기준으로 삼으면 주축 성분의 유속만 분석하면 간편하다. 왕복성인 조류는 장기간의 평균 유속이 0이기 때문에 표준편차타원의 장축 방향을 주축으로 간주하면 된다. 그러나 해류의 경우에는 평균유속 벡터가 중요한 반면에 표준편차타원의 크기도 작고 방향의 변화가 심하므로 타원의 장축을 기준으로 하는 것은 적당하지 않다. 그 대신에 모든 유속 자료를 사용하여 평균유향을 결정하는 것이 더욱 타당하다. 이렇게 계산된 모든 수심에 대한 평균유향은 북쪽 부표에서는 정복을

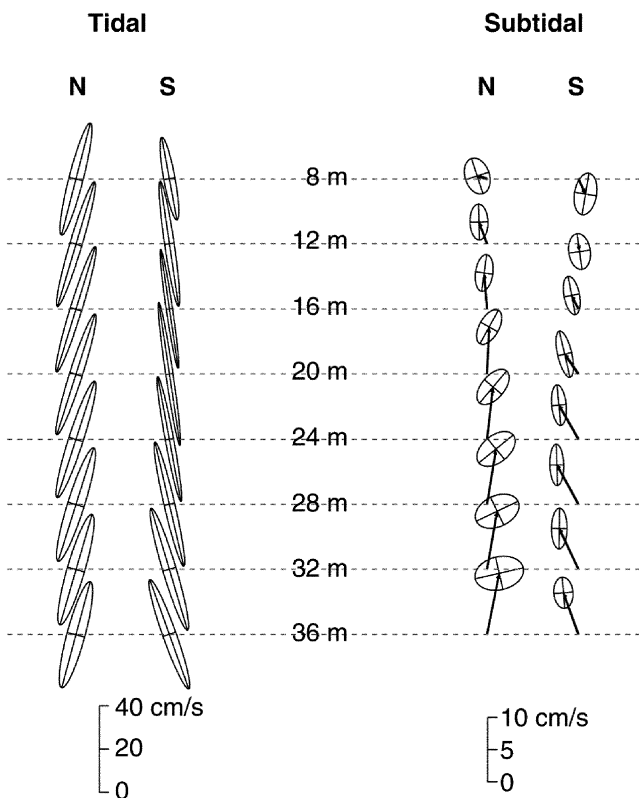


Fig. 3. Standard deviation ellipses with mean velocity vectors of current.

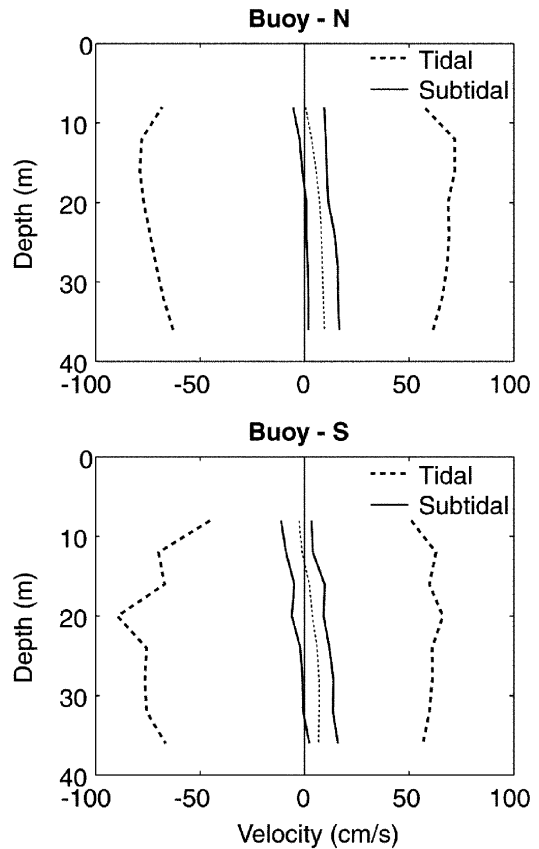


Fig. 4. Ranges of tidal and subtidal velocities in the principal directions.

기준으로 4도 시계방향으로, 남쪽 부표에서는 27.8도 반시계 방향으로 기울어져서 국지적인 등심선의 방향과 비슷해진다. 한편 조류에 있어서 표준편차타원의 평균방향은 북쪽 부표에서는 시계방향으로 16.6도, 남쪽 부표에서는 반시계 방향으로 11.9도 기울어진다. 이들 방향을 국지적인 좌표계의 y-축으로 하여 주축성분을 구하면 조류와 해류 각각의 전체유속을 대표할 수 있다.

이렇게 구한 주축성분 유속의 범위를 Fig. 4에 나타내었다. 바깥 쪽의 굵은 사선이 수심별 조류의 최대·최소값이고 실선은 해류의 범위, 그 내부의 점선은 해류의 평균유속이다. 조류의 크기는 표층과 저층에서 감소하고 10-20 m의 상층부에서 가장 강한 양상을 보인다. 조류의 최대 범위는 북쪽 부표의 -78.8~71.9 cm/s, 남쪽 부표의 -89.4~66.2 cm/s로서 낙조류의 유속이 더 큰 특징을 보이는데 이와 같은 조류의 비대칭성은 담수의 유출이 있는 하구역에서 보편적으로 나타나는 현상이다. 해류의 변동폭은 약 15 cm/s이고 상층에서는 남향류에 해당하는 음의 값을 갖는 경향이며 수심이 깊어질수록 양의 값이 증가하여 2층 구조의 양상을 보여준다.

해류 성분의 EOF 분석

해류의 주축성분 유속을 가지고 EOF 분석을 하여 각 모드의 연직구조를 나타낸 것이 Fig. 5로서 양의 값은 북향류를 나타낸다. 첫 번째 모드는 순압모드(barotropic mode)로서 모든 수심에서 북향류이고 중층에서 가장 커서 북쪽 부표에서는 8 cm/s, 남쪽 부표에서는 6 cm/s 가까이 이른다. 두 번째 모드는 가장 우세한 제 1 경압모드(first baroclinic mode)로서 상층의 남향류(-)와 저층의 북향류(+)인 2층 구조를 가진다. 남쪽 부표의 상층부에서는 음의 값이 모드 1의 양의 값을 능가하여 남향류가 우세하게 나타났지만 북쪽 부표에서는 약간 못 미치므로 서북서 방향의 약한 평균유속이 기록되었던 것이다. 모드 2의 유향이 반전되는 수심은 20-22 m 정도이지만 순압모드와의 중첩에 의해서 실제의 반전 수심은 남쪽 부표에서 14 m로 나타나고 북쪽 부표에서는 관측결과에서는 보이지 않지만 8 m 보다 앞을 것으로 예상된다. 세 번째와 네 번째 모드는 좀 더 복잡한 경압구조를 가지며 크기는 대체로 1 cm/s 이하로 작다. 모드 별 분산 점유율은 북쪽 부표에서 각각 74.0%, 17.8%, 4.7%, 1.8%이고 남쪽 부표에서 66.8%, 22.1%, 6.11%, 3.4%로서 남쪽 부표에서 경압 모드의 비율이 비교적 크다. 조류

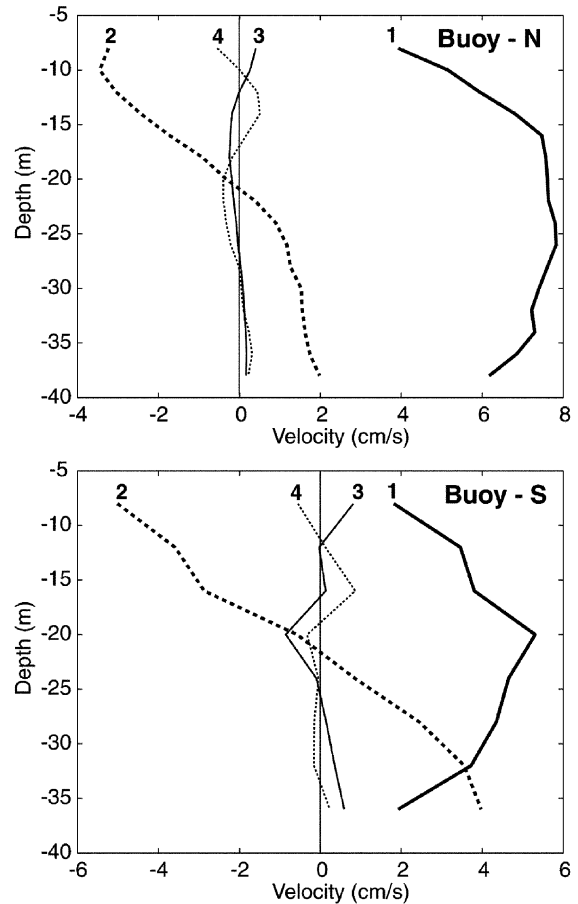


Fig. 5. Modal structures of subtidal velocities in the principal directions. Mode numbers are on top of each curve.

에 있어서 모드 1의 분산 점유율은 99% 이상으로서 순압성분이기 때문에 나머지 경압모드는 실질적으로 고려할 필요가 없다.

각 모드의 시간 변화는 Fig. 6에서 볼 수 있다. 이 결과를 Fig. 5의 모드 별 연직구조와 관련시키면 유속구조의 시간변화를 함께 파악할 수 있게 된다. 북쪽 부표의 제 1 모드는 남쪽 부표에 비해서 훨씬 크다.

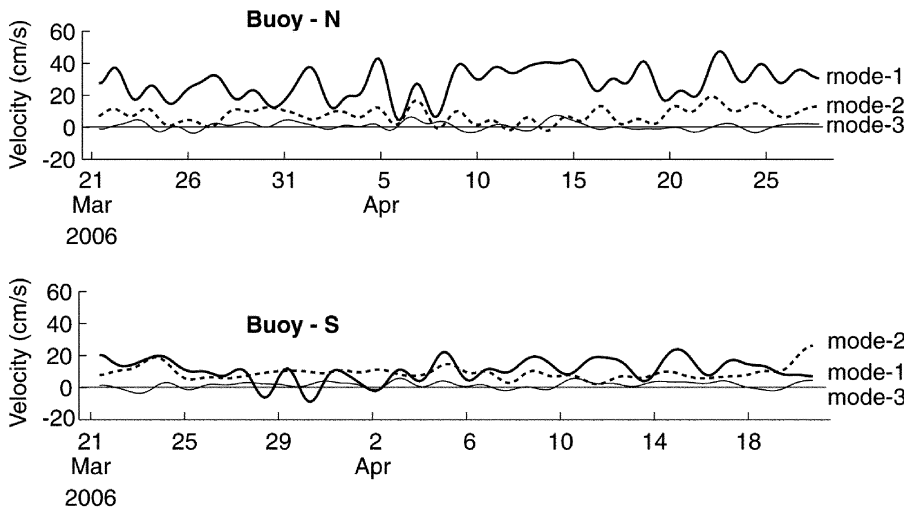


Fig. 6. Temporal amplitudes for each mode of principal velocity.

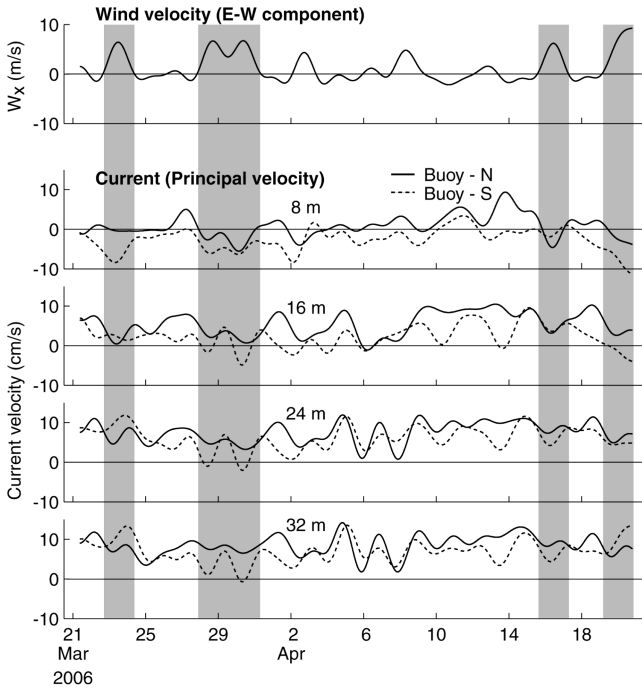


Fig. 7. Comparison of E-component of wind velocity (W_x) and principal current velocities (v) with depth. Major wind events are depicted with shaded bars.

해류와 바람의 상관성 분석 및 순환에 대한 고찰

수심 별 주축성분 유속(v)의 시간적 변화와 상호 관련성을 알아보기 위해서 Fig. 7에 도시하였다. 우선 각 수심에서 양쪽 부표의 유속을 비교하면 많은 경우에 변화의 양상이 매우 유사하지만 그렇지 않은 시기도 상당히 있음을 알 수 있다. 이 유사성은 남쪽 부

표의 유향이 반전된 16 m 수심에서 가장 작고 나머지 수심에서는 비교적 크다. 해류의 변동이 외해의 영향을 받는다면 남쪽 부표의 변화가 북쪽 부표에 선행되어야 하지만 4월 4-7일의 변화와 같이 북쪽 부표에서 먼저 시작된 경우도 있음을 발견하였다. 이 등(2006)의 연구에서와 같이 광양만의 순환은 밀도분포의 영향이 가장 크므로 담수의 유입이 이루어지는 상류 쪽의 변화가 지배적인 경우도 있고 또한 외해의 영향이 큰 경우도 있을 것이므로 남-북쪽 지점 사이의 유속 상관성은 단순하지 않을 것으로 생각된다.

Fig. 7의 가장 윗 부분은 동-서 성분의 풍속(W_x)으로서 양의 값이 동쪽 방향의 풍속(서풍)에 해당한다. 이 성분만 포함시킨 것은 10도 방향의 풍속 성분과 상층 유속과의 상관성을 비교했을 때 0-10도의 동-서 성분이 가장 높은 상관성을 가졌고 90도 방향인 남-북 성분의 풍속(W_y)과는 상관성이 가장 낮았기 때문이다. 강한 서풍이 해류에 미친 영향이 비교적 뚜렷하다고 판단되는 경우가 4차례 있어서 그 기간을 어두운 부분으로 표시하였는데, 서풍이 증가하면 유속이 감소하는 현상을 볼 수 있다. 이 현상은 비국지적 영향(non-local forcing effect)에 해당하는 것으로서(Wang and Elliott, 1978; Wang, 1979; Valle-Levinson *et al.*, 2001) 광양만의 외해에서 서풍에 의한 에크만 수송(offshore Ekman flux)이 증가하면 만 안으로 유입되는 해류가 약해지거나 오히려 유출되기 때문이다.

이 영향은 주파수 영역의 상관성 분석에서도 확인된다. Fig. 8은 풍속과 유속(W_x-v)의 주파수 별 상관성을 나타낸 것인데, 양쪽 부표 공통적으로 수심 8 m인 상층부에서 양호한 상관성을 볼 수 있고 위상은 비국지적 영향에 해당하는 180도 가까운 반면에 하층부인 32 m 수심에서는 관련성이 상당히 감소한다. 그러므로 광양만에서 바람의 영향을 직접 받는 국지적 효과는 거의 없고, 상대적으로 바람의 영향을 받는 면적이 훨씬 넓은 외해에서 동-서 방향의 풍속성분에 의한 에크만 수송의 영향이 주로 상층부에 나타난다는 것을 알 수 있다. 그러므로 광양만의 해수유동은 평균적

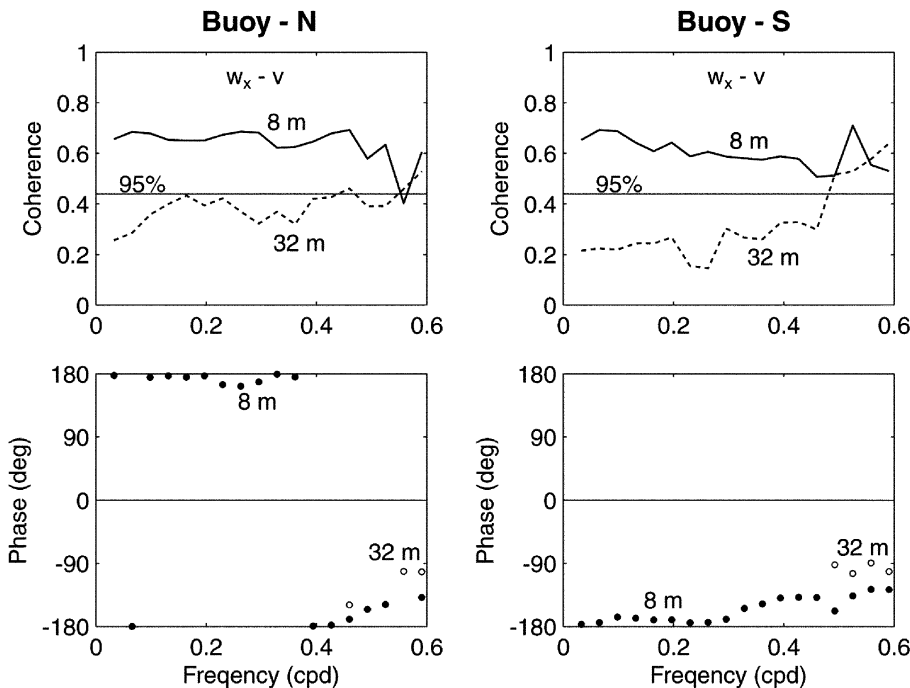


Fig. 8. Coherence analysis between E-component of wind and principal current velocities at 8 and 32 m depths. Only significant parts of the phase are shown.

으로 여수해만-광양만의 동편에 치우쳐서 유입되고 유출은 서쪽에 치우치는 반시계방향의 순환에, 외해에서 바람에 의해서 일어나는 에크만 수송의 영향에 따른 변화가 상층부의 유속에 중첩되는 결과로 해석된다.

결 론

광양만의 순환을 이해하기 위하여 2006년 봄철에 광양만의 깊은 골을 따라 두 지점에서 모니터링 부표를 설치하여 약 1개월 동안 ADCP를 이용한 층별 유속관측을 하였다. 남-북 방향으로 위치한 두 지점이 동쪽으로 치우친 관계로 공통적으로 북향류가 우세하여 이 등(2006)이 주장한 반시계 방향의 순환이 있기 때문으로 해석된다. 북향류는 북쪽 부표에서 더욱 강해지는데, 이는 북쪽의 단면적이 감소함에 따라 해류가 가속된 결과이며 남쪽 부표에서는 14 m 수심에서 유향이 바뀌는 2층 구조가 뚜렷하여 부분 혼합형 하구의 특성을 보인다. 유속의 EOF 분석을 통한 연직구조에서 순압 성분인 첫 번째 모드가 전체 분산에서 차지하는 비율은 북쪽과 남쪽 부표에서 각각 74%와 67%이고 2층 구조에 해당하는 두 번째 모드는 각각 18%와 22%이다. 북향류의 전형적인 유속은 약 10 cm/s이고 추후에 서쪽 지역에서 유속관측을 하여 남향류의 존재를 확인할 필요가 있다. 이러한 평균적인 순환에 중첩

되는 주기적인 변동은 외해에서 동-서 방향의 바람에 의한 에크만 수송으로 인한 영향으로서 풍속이 강할 경우에 주로 나타나는 반면에 광양만 내부에서 바람이 직접적인 영향을 끼치는 국지적인 효과는 거의 없다.

참고문헌

- 이재철, 김정창, 박명원. 2006. 광양만 북동부 해역의 해류관측. '바다', 한국해양학회지, **11**: 136-142.
- Valle-Levinson, A., K.-C. Wong and K.T. Bosley, 2001. Observations of the wind-induced exchange at the entrance to Chesapeake Bay. *J. Mar. Res.*, **59**: 391-416.
- Wang, D.P. and A.J. Elliott, 1978. Non-tidal variability in the Chesapeake Bay and Potomac River: Evidence for non-local forcing. *J. Phys. Oceanogr.*, **8**: 225-231.
- Wang, D.P., 1979. Subtidal sea level variations in Chesapeake Bay and relations to atmospheric forcing. *J. Phys. Oceanogr.*, **9**: 413-421.

2007년 1월 18일 원고접수

2007년 8월 20일 수정본 채택

담당편집위원: 장경일