

## 한국 남동해안의 용승과 관련된 물리환경

이재철\* · 김대현<sup>1</sup>

부경대학교 해양학과, <sup>1</sup>오션테크(주) 해양시스템연구소

## Physical Environment Associated with Upwelling off the Southeast Coast of Korea

Jae Chul Lee\* and Dae Hyun Kim<sup>1</sup>

Department of Oceanography, Pukyong National University, Busan 48513, Korea  
Oceantech Co., Jwadongsunwhanro, Haeundaegu, Busan 48097, Korea

Data from the two bottom moorings of ADCP (acoustic doppler current profiler), coastal weather station and CTC (conductivity temperature depth) observations for 2001 were analyzed to describe the physical processes associated with upwelling off the southeast coast of Korea. Winds were favorable for upwelling during summer, but were not correlated with currents. Shoaling of isotherms toward the coast due to the baroclinic tilting of the strong East Korean Warm Current (EKWC) provided a favorable background for immediate upwelling-response of surface temperature to southerly winds. This baroclinic effect was supported by a significant inverse coherence between the upper-layer current and bottom temperature near the coast. This upwelling is similar to the Guinea Current upwelling, which is driven by remote forcing (Houghton, 1989). Persistent southward flow was observed below approximately 10 °C isotherm throughout the observation period.

**Key words:** Upwelling, East Korean Warm Current (EKWC), Baroclinic tilting, Coherence, Bottom temperature

### 서 론

한국 남동해안에서 여름철에 발생하는 용승에 대해서는 An (1974)과 Lee (1978)가 수온·염분 자료를 이용하여 냉수괴의 발생을 보고한 이후에 Lee (1983)는 부산의 바람과 남동해안 표층수온의 일별 자료를 이용하여 남서풍에 의해서 수온이 낮아지는 높은 상관성을 발견하였고 Byun (1989)과 Lee et al. (1998)도 바람과 표층수온의 관계를 연구하였다. 해류관측을 병행하려는 시도는 Lee et al. (2003)에 의해서 이루어졌는데, 울산 연안의 20 m 수심에 Aanderaa RCM-9 유속계를 설치하여 유속을 측정하였고 동시에 울산 해안에서는 wave-tide gauge로 조위와 표층수온도 관측하였으며 부산의 바람 자료를 이용하였다. 이를 통하여 남서풍이 시작되면 하루 이내에 수온이 감소함을 밝혔고 해류와 해수면은 바람과의 상관성이 낮음을 알 수 있었다. 또한 Lee (2011)에 의하면 해운대의 냉수대도 용승 반응의 결과로 발생하는 것으로 알려졌다.

앞의 연구에서는 해류의 층별 관측이 결여되고 수온·염분을

충분히 반복 관측하여 서로 비교할 수 없었으나, 본 연구를 위해서는 ADCP (acoustic doppler current profiler)를 두 곳(Fig. 1의 P와 Q)에 설치하고 간절곶의 돌출된 해안에 기상관측 장비도 설치하여 5개월간의 시계열 자료를 확보하는 동시에 용승이 발생하는 여름 동안 조밀한 CTD (conductivity temperature depth) 관측을 6회 실시함으로써 종합적인 물리환경 자료를 직접 확보하였다. 이 자료들을 이용하여 해류의 변동에 따르는 성층 구조의 변화가 용승에 미치는 영향, 저층 냉수괴의 운동, 그리고 시계열 자료에 대한 보다 자세한 비교 연구를 할 수 있었다.

### 재료 및 방법

한국 남동해역의 용승현상과 관련된 수온과 염분의 분포 및 변화를 연구하기 위하여 Fig. 1에 표시된 Line-A로부터 Line-E까지의 정점에서 2001년 6월 18일부터 8월 10일까지 6 차례 CTD 관측을 하였다. 풍속, 기압, 층별 유속, 수압, 그리고 저층

<https://doi.org/10.5657/KFAS.2018.0579>



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Korean J Fish Aquat Sci 51(5), 579-589, October 2018

Received 13 July 2018; Revised 9 August 2018; Accepted 17 August 2018

\*Corresponding author: Tel: +82. 51. 629. 6571 Fax: +82. 51. 629. 6568

E-mail address: [jaechul@pknu.ac.kr](mailto:jaechul@pknu.ac.kr)

수온의 시계열 자료는 6월 18일부터 11월 19일까지 154일간 수집되었는데, Aanderaa Weather Station을 간절곶의 돌출된 해안에 설치하여 기압과 바람 등의 기상 요소를 측정하고 울산 연안의 P 및 간절곶 남동방 Q 위치의 해저에 ADCP를 설치하여 4 m 간격의 층별 유속, 저층 수온 그리고 수압 자료를 획득하였다. P와 Q의 해저 수심은 각각 84 m와 124 m였다. 해수면 자료는 ADCP의 수압으로부터 구하는 것 외에도 추가적인 비교를 위하여 국립해양조사원의 울산 검조소 자료를 받았다. 해수면 자료를 대기압 보정함에 있어서 ADCP의 수압자료에는 대기압이 포함되어 있으므로 해당 기압을 제거하였고(Sea-Bird Electronics, 2000), 울산 검조소 자료는 기압이 높아질수록 수면이 낮아지는 inverse barometric effect를 보정하였다. 바람과 표층수온의 관계는 이전의 연구에서 충분히 규명되었다고 판단되어 표층수온의 연속 관측은 직접 하지 않고 국립수산물과학원에서 제공하는 감포, 울산, 기장의 일별 연안정지관측자료를 이용하였다.

ADCP에 의한 유속 및 해수면 자료와 울산 검조소의 자료는 조화분석을 한 후에 조류와 조석 성분을 제거했으며, 저층수온을 포함한 시계열 자료를 40시간 low-pass filtering에 의한 장주기 성분으로 변환하였다. 바람의 해안에 평행한 성분을 구하기 위해서 Lee (1983)와 Lee et al. (2003)과 같이 좌표축을 시계방향으로  $22.5^\circ$  회전시켰다. 해류의 경우, P에서는 전체 수심의 평균 유속 방향인  $17^\circ$  시계방향으로, Q에서는 102 m 보다 깊은 저층에서 남향류가 지속되었으므로 상층부의 수심 평균 유향인  $46^\circ$  시계방향으로 좌표축을 회전시킨 주축 방향의 유속을 사용하였다.

## 결 과

### 바람의 조건

용승에 영향을 많이 주는 바람의 조건을 파악하기 위해서 Fig. 2에 4시간 간격의 풍속 벡터를 이용하였다. 8월 초순까지는 남서풍이 많이 불다가 그 이후에는 북풍 계열의 바람이 강하게 지속되며 10월 후반부터 다소 약해지는 경향을 보인다. 용승에 유리한 남서풍은 관측 개시일의 경우를 제외하면 6월 22일부터 7월 6일의 24일간, 7월 8-15일의 8일간, 7월 19-24일의 6일간, 7월 28일-8월 2일의 6일간, 그리고 8월 6-9일의 4일간 지속되어, 그

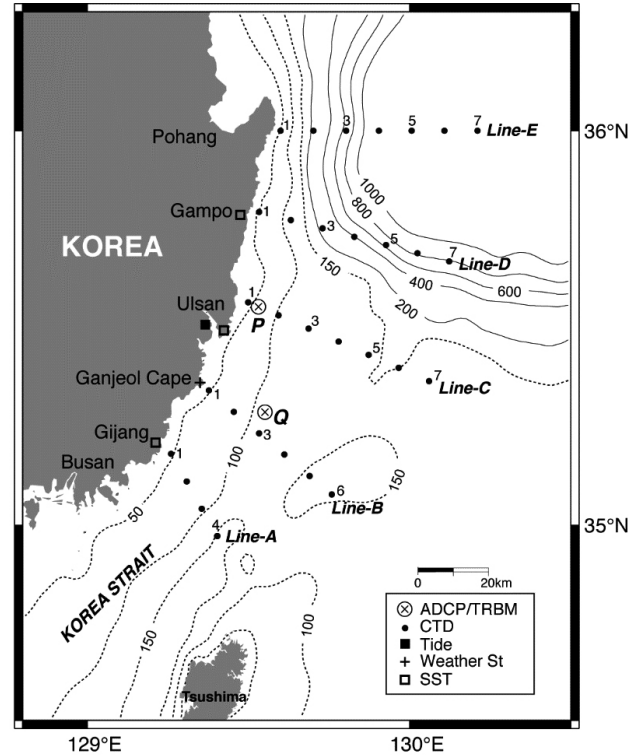


Fig. 1. Positions of ADCP mooring (⊗), CTD observation (●), tide gauge (■) at Ulsan, weather station (+) at Ganjeol Cape, and coastal SST (□) observations at Gampo, Ulsan and Gijang. ADCP, Acoustic doppler current profiler; CTD, Conductivity temperature depth; SST, Sea-surface temperature.

사이에는 2-4일간의 짧은 북풍으로만 바뀔으로써 용승에 유리한 바람이 지배적인 환경이었다. 그리하여 바람의 조건으로는 모두 5번의 용승 기간이 기록되었다. 그림의 하단에는 6 차례의 CTD 관측 기간이 표시되어 있다. 관측 I과 III은 북풍이 부는 동안 실시되었고, 관측 V는 용승 기간 동안, 그리고 관측 II, IV, VI은 용승 기간의 끝 무렵에 이루어졌다.

### 수온과 유속의 수평 분포

남동해역의 용승과 관련된 해황을 전반적으로 파악하기 위한 가장 우선적인 자료로서 6번의 CTD 관측 결과 중에서 표층과

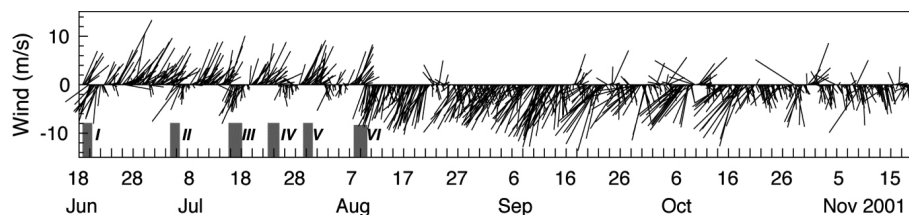


Fig. 2. Stick vector plot of wind velocity at 4-hour interval. Vertical bars with numbers from I to VI at the bottom are periods of CTD observation. CTD, Conductivity temperature depth.

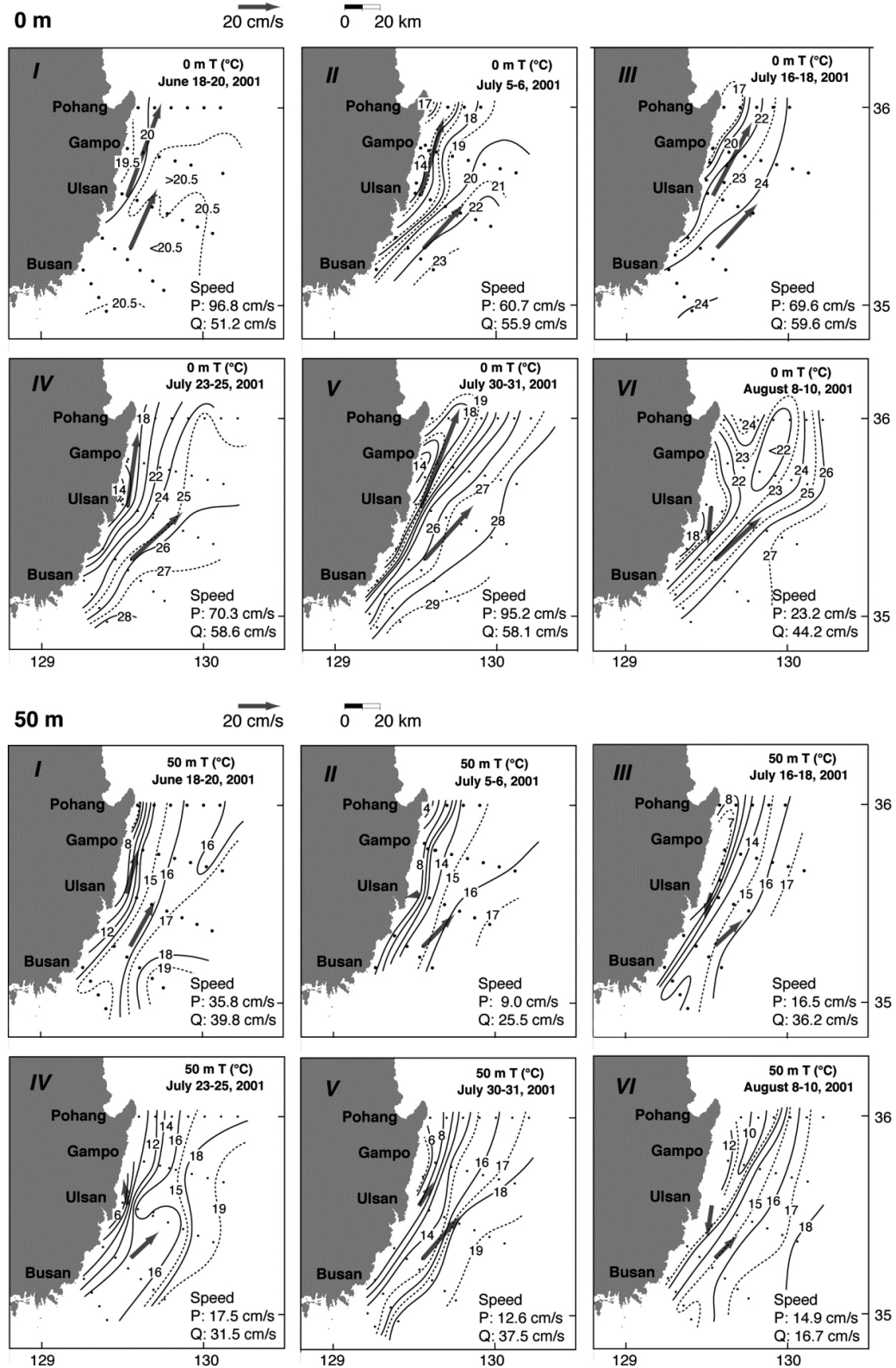


Fig. 3. Distribution of temperature of near-surface (upper group) and 50 m depth (lower group). Thick arrows depict the daily mean current velocity of 12 m at P and 14 m at Q. Magnitudes of respective velocity are given at the lower right corner of each figure.

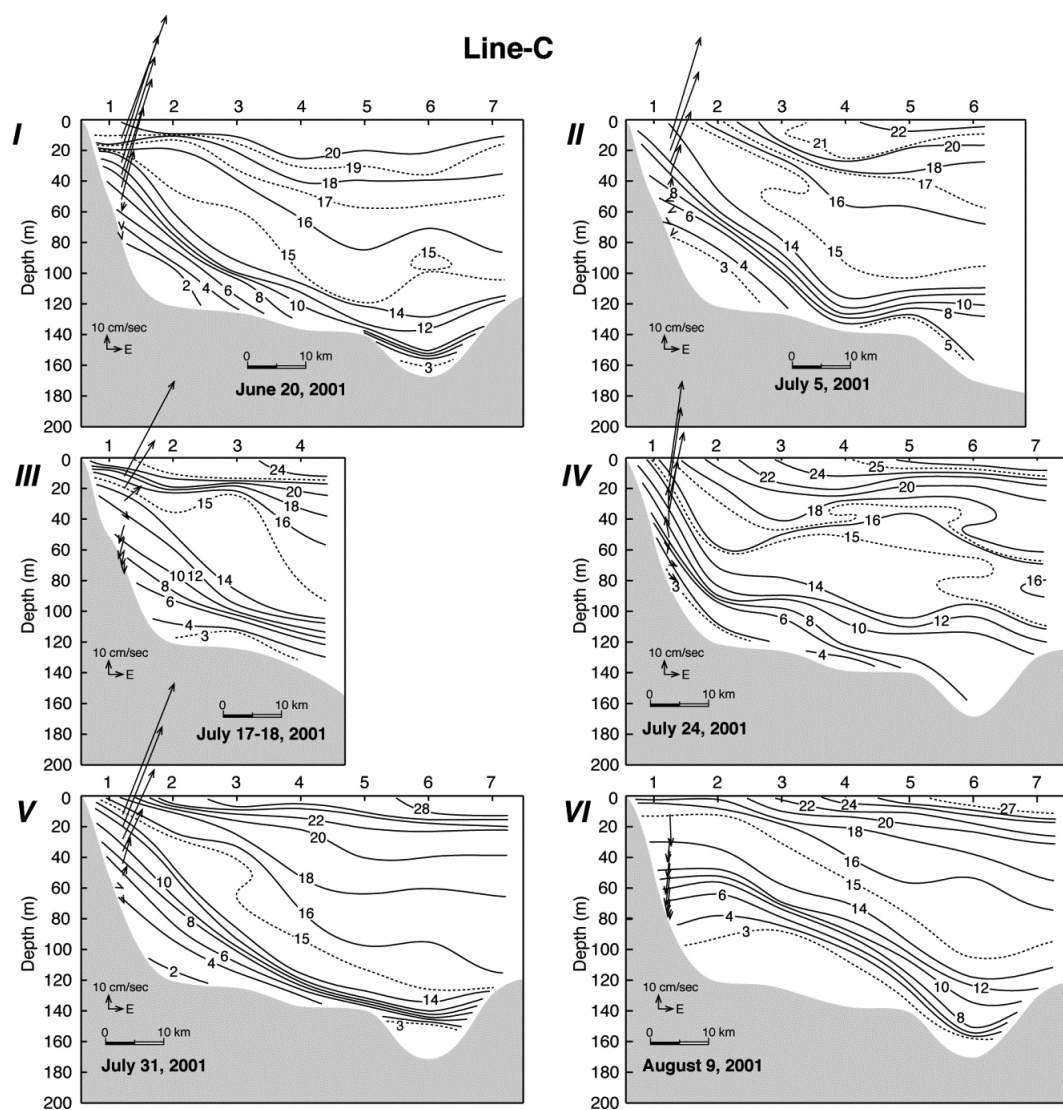


Fig. 4. Vertical distribution of temperature at Line-C and current velocity at P. Upward arrow indicates northward flow.

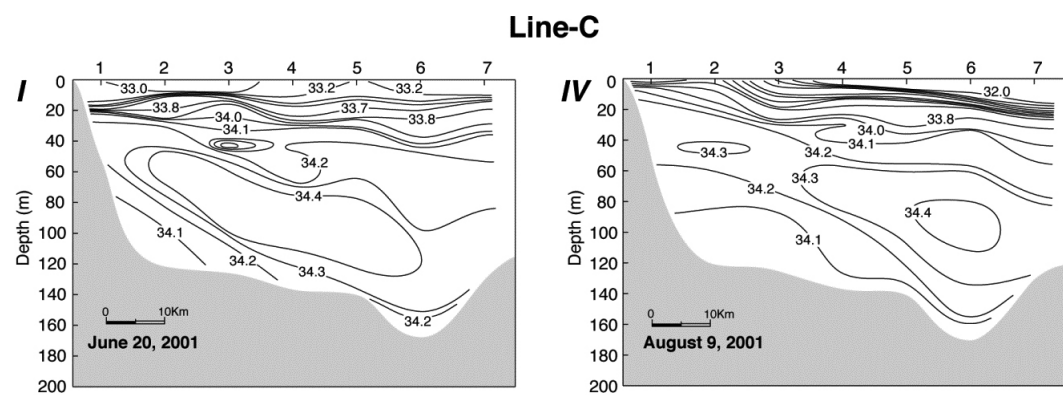


Fig. 5. Vertical distribution of salinity for the Cruise-I and IV at Line-C.

50 m 수심의 수온 분포 및 CTD관측 당일의 일평균 유속의 벡터를 Fig. 3에 제시하였다. 표층(0 m)의 그림에서 유속 벡터의 수심은 P와 Q 위치의 자료에서 각각 최상층인 12 m와 14 m이다.

관측 자료 전체에서 공통적으로 울산-감포 해안에 저수온이 분포하며, 가장 수온이 낮은 냉수괴의 중심은 울산보다 감포 쪽으로 치우치는 경우가 상대적으로 많다. 외해 쪽의 표층수온은 6월 중순의 20℃ 내외에서 7-8월의 27-29℃까지 상승하는 반면에 해안에서는 14℃ 이하까지 낮아짐으로써 외해와의 수온차가 큰 용승전선이 형성된다. 특히 5차 관측과 용승 기간의 끝 무렵인 6차 관측에서는 해안에 국한되던 냉수괴가 띠를 형성하면서 뿔어 나가는 현상도 발견된다. 50 m층에서도 연안 약 30 km 이내의 지역에서 수온의 변화율이 매우 크며 등온선은 대체로 해안에 평행한 경향을 띤다.

유속 벡터는 대체적으로 부근 등온선의 접선 방향과 유사한 경우가 많으며 표층의 P에서는 북북동향류, 그리고 Q에서는 북동향류가 지배적이다. 그러나 6차 관측의 경우에는 예외적으로 P의 남향류가 특징적인데, 이는 용승된 수괴가 외해 쪽으로 뿔어 나가면서 반시계 방향의 소용돌이나 사행운동을 만드는 과정이 진행된 결과로 이해되며 이 남향류는 50 m층에도 나타난다. 50 m층에서 남향류가 기록된 것은 관측 II와 III도 있는데 이 경우에는 8℃ 이하인 저층 냉수괴 내부의 흐름으로서 유향이 자주 바뀌는 것을 Fig. 8에서 볼 수 있다. 유속 값이 각 그림 우측 하단에 나와 있는데, 표층유속은 P에서 61-97 cm/s로 Q의 44-60 cm/s보다 훨씬 강한 반면에 50 m층에서는 Q의 유속이 17-40 cm/s로 더 강하다.

### 수온과 유속의 연직 구조

CTD 관측을 통해서 Line-A로부터 Line-E까지 5개 단면의 연직 구조를 모두 파악하였으나 여기에서는 유속 자료와 비교가 가능한 울산의 Line-C와 간절곶의 Line-B 두 단면만 제시한다. 해황에 있어서 가장 중요한 수온의 연직 단면에 유속 벡터의 연직 분포를 중첩 시켜서 도시했으며 염분은 참고로 최초의 관측 I과 마지막 관측 VI의 자료를 따로 제시하였다.

Fig. 4는 울산의 Line-C에서 관측한 수온의 단면도인데, 해안 쪽으로 등온선이 상승하는 현상이 공통적이며 표층의 강한 북북동향류가 수심에 따라 급격히 약해지면서 약 50 m 이심에서 남향류로 바뀌는 경향을 보인다. 유향이 반전되는 수심은 관측 III의 42 m에서 관측 V의 60 m 범위이며 수온은 6-11℃의 범위로 추정되는데 CTD 정점과 ADCP의 위치가 다르고 그 사이에 등온선의 경사가 급하므로 정확하게 결정하기는 어렵다. 이러한 성층 구조와 유속 분포의 관계는 기본적으로는 지형류의 온도풍 방정식으로 이해할 수 있으며 등온선이 해안으로 상승하는 현상을 지형류에 의한 baroclinic tilting이라 부르기도 한다(Lee and Na, 1985). 외해 쪽에 위치한 Q에 비해서 해안에 가까운 P의 유속이 더 빠르므로 등온선의 경사도 더 크고 그 결

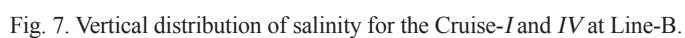
과 4℃ 이하의 냉수괴가 가장 깊은 골짜기가 아닌 더 얇은 해안 쪽으로 치우쳐서 머무르게 된다. 일시적으로 북풍이 불었던 관측 I에 있어서 바람의 영향은 20 m 이하의 상층부에 등온선이 하강하는 효과를 주었을 것으로 추정되지만 그림에도 불구하고 표층의 북북동향류는 매우 강한 상태를 유지하였다. 특히 마지막 관측 VI의 경우 표층에서 저층까지 기록된 남향류는 2 번 정점으로부터 해안 쪽으로 깊어지는 등온선과 관련되며, 이는 앞의 Fig. 3에서와 같이 연안 해류의 사행운동으로 인한 것임을 알 수 있다.

Line-C의 염분 분포는 Fig. 5와 같다. 상층에는 염분 34 이하의 대마난류 표층수가 있는데 8월 초에는 32 이하로 감소하며 20-30 m 수심에 염분약층이 있고 중층에 34.3 이상의 고염인 부분은 대마난류중층수에 해당한다. 수온과 비교하면 대마난류중층수 영역에서는 14-16℃ 등온선의 간격이 매우 넓어서 상대적으로 균질한 수괴에 해당한다. 그 아래 수온 6℃ 이하의 저층에는 34.2 이하로 염분이 다시 낮아지며 34.1 등염선의 위치가 4℃ 등온선의 위치와 유사한 것은 후포퇴 근해에서 관측한 Lee (2016)의 결과와 같은 것으로서 북한한류수에 해당하는 것이다.

간절곶 단면인 Line-B의 수온 단면도는 Fig. 6과 같다. 전반적인 양상은 북쪽 단면(Fig. 4)과 같으나 저층 냉수가 해안 쪽으로 치우치는 경향은 비교적 강하지 않고 수온도 북쪽 단면에 비해 약간 높아져서 3℃ 이하의 수온이 보이지 않는다. 유속 관측 지점이 3번 정점에 가까워서 해저 수심이 124 m로 깊으며 100 m 이하에서는 뚜렷한 남향류가 일관되게 존재한다. 북향류에서 남향류로 전환되는 수심은 관측 IV와 VI에서 각각 92 m, 82 m였고, 나머지는 100-104 m였다. 유향 반전 수심에서의 수온은 관측 I 시기에 14℃로 높았지만 10℃였던 기간이 II, IV, VI의 3 회였고 나머지는 7-8℃였다. 염분 분포(Fig. 7) 또한 Line-C의 경우와 같이 34.3 이상의 대마난류중층수의 영역에서 수온이 14-16℃이고, 그 아래에는 다시 염분이 감소하지만 Line-C의 저층에 보였던 34.1 이하의 수괴는 관측되지 않았다. 따라서 저층 냉수괴가 남하하면서 수온과 염분이 약간 높아진 결과로 판단된다. 유향 반전 수심의 수온과 염분이 대한해협 가장 깊은 골에서 8-10℃, 34.23-34.28인 Lee and Kim (2016)과 비교하면 관측 I을 제외한 나머지 경우에서도 유사하다.

### 유속의 연직 구조와 변화

수심에 따른 유속의 시간 변화를 쉽게 알아볼 수 있도록 P와 Q의 유속 벡터 시계열을 각각 Fig. 8과 Fig. 9에 도시하였다. 울산 해안에 가까운 P에서는 상당히 빠른 북북동향류가 우세한 가운데 유향과 유속의 시간적 변화가 매우 크다. 상층의 평균 유속은 크기 56 cm/s에 방향은 동쪽 기준 74°이다. 최대 속력은 8월 3일에 기록된 110 cm/s이다. 각 수심에서 모두 남향류로 반전되는 현상이 3회 발생했는데, 8월 4일에 80 m 이심에서 시작된 남향류가 8일에는 표층으로 확장되어 10일 까지 전체 수심에서



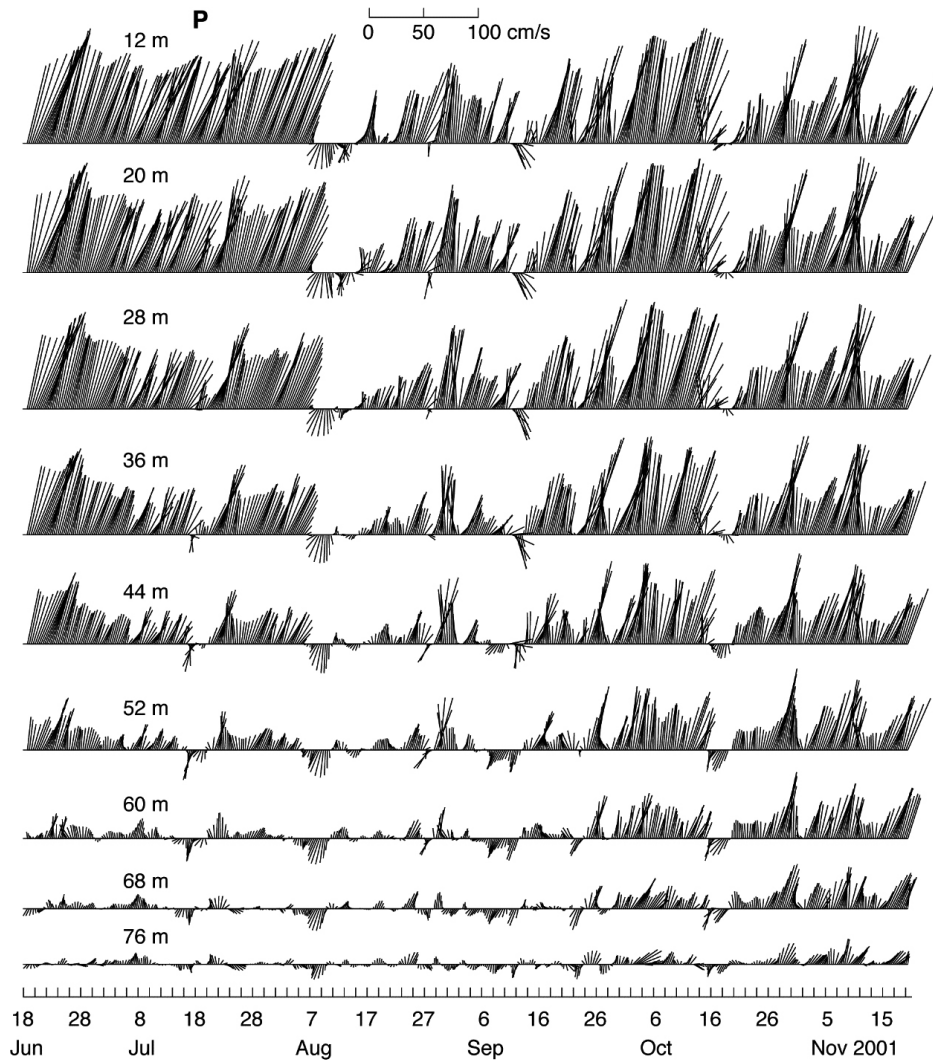


Fig. 8. Stick vector plot of current velocity with 4 hour interval at P.

남향류가 유지되었다. 같은 시기의 CTD 관측 결과(Fig. 3VI)를 보면 표층에서 22℃ 등온선이 외해쪽으로 돌출되고 북쪽으로 뻗어 나가는 양상으로서 해류의 사행운동이 있었기 때문이라고 추정할 수 있으나 같은 현상이 발생한 9월 11-12일과 10월 17-18일에는 비교할 자료가 없다. 저층 68-76 m 수심에서는 약한 남향류가 더 빈번해지는데 이것은 남하하는 북한한류의 변동과 관련 지을 수 있을 것이다.

정점 Q에서는 북동향류가 지배적인데 P의 자료보다 크기와 방향의 변화가 훨씬 작다. 평균 유속은 상층에서 크기 45 cm/s, 방향은 47°이고 최대 유속은 26-30 m 수심에서 9월 20일에 기록된 92 cm/s이다. 특기할 사항은 106 m 이심에서 11월 초까지 지속되는 남향류의 존재로서 114 m 수심에서는 오히려 더 강해진다. 이렇게 지속적인 남향류는 대한해협 최심부에서 관측된 적이 있으나(Lee and Kim, 2016) 울산 근해에서는 이전에 관

측·보고된 바가 없으며, CTD 단면 자료(Fig. 4-7)와 비교할 때 북한한류의 남하가 그 원인으로 설명되어야 한다.

해류의 주축 방향을 결정하기 위해서는 수심 전체의 유향을 평균해야 하지만 Q의 경우에는 저층에 남향류가 지속되므로 북동향류가 우세한 층에 대해서 유향을 평균한 결과는 극좌표 기준으로 44°이고 P에서 전층의 평균 유향은 73°이다. 이와 같은 각도로 좌표축을 회전시켜서 구한 주축 유속은 상층부에서 전체 분산의 90% 이상을 차지하는데, 수심에 따른 평균값을 나타낸 것이 Fig. 10a이다. 정점 P의 주축 유속은 상층 56 cm/s에서 저층의 2 cm/s로 급격히 감소하는 반면에 Q에서는 상층 45 cm/s에서 완만하게 감소하다가 102 m 수심에서 유향이 반전되어 저층에서 10 cm/s의 크기를 갖는다. 오른쪽 Fig. 10b는 유향의 안정도(Rikiishi and Ichiye, 1986)를 계산한 결과인데 상층부에서 유향의 변화가 작고 깊어질수록 변화가 커지는 공통점

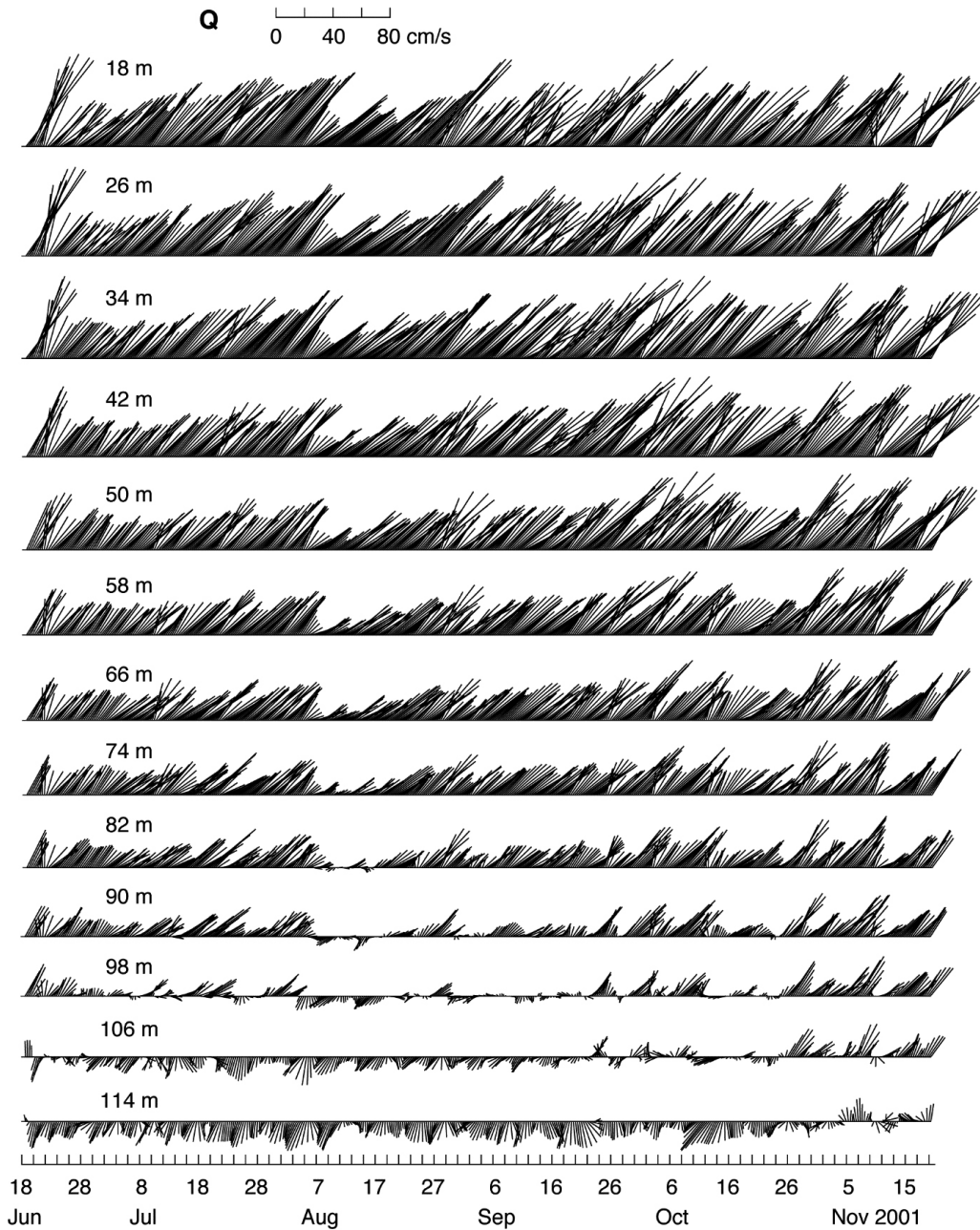


Fig. 9. Stick vector plot of current velocity with 4 hour interval at Q.

은 있으나 P의 안정도가 상대적으로 더 작다. Q의 경우에는 상층의 안정도가 1에 가깝고 80 m 수심부터 급격히 감소하는데, 102 m에서 최소값을 갖는 것은 유향의 반전이 빈번하게 일어나기 때문이다(Lee and Kim, 2016). 저층에서 안정도가 다시 증가하는 것은 지속적인 남향류에 의한 것이다.

Fig. 11은 해안에 평행한 바람, 표층수온, 저층수온, 주축 유속, 해수면 편차의 변화를 비교한 그림으로 수직 막대는 CTD 관측 기간을 표시한다. 6월 22일부터 8월 9일 사이에 5번에 걸쳐서

남서풍이 불었으므로 용승에 유리한 조건이 조성되었다. 이에 대해서 가장 민감한 반응을 보인 것은 표층수온인데, 일별 자료에 결측이 많은 단점에도 불구하고 남서풍 기간에 수온이 감소하는 현상이 세 곳에서 공통적으로 발견되며 수온의 감소폭은 감포에서 가장 두드러진다. 용승에 의해 낮은 수온이 유지되는 가운데 8월 중순까지는 변동이 심하다가 그 이후에는 계절 변화에 따라 서서히 감소한다.

ADCP로 관측한 저층수온은 바람과는 관련이 없는 것으로 보

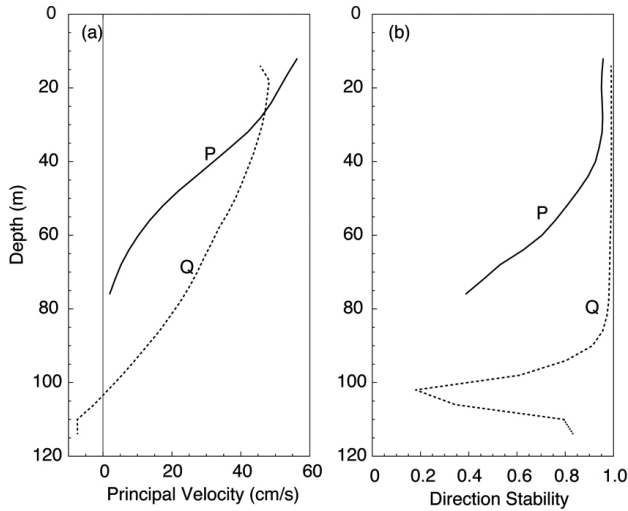


Fig. 10. (a) Average principal velocity and (b) direction stability of current velocity at P (solid curve) and Q (dashed curve).

이고 주축 유속과 비교해 보면 P에서는 8월 초까지 낮은 수온을 유지하는데 북북동향류가 강했던 시기와 일치하여 지형류의 tilting 효과에 의해서 냉수괴가 해안 쪽에 치우쳐 있었기 때문이고 8월 초-중순에 사행운동에 따른 남향류 기간에는 수온이 상승하는데, 이 현상은 특히 10월 중-하순에 더욱 현저해서 유속의 감소와 함께 큰 폭의 수온 상승으로 이어진다. Q의 경우에는 주축 유속의 변동이 P에 비해서 작고 저층유속과의 시각적 상관성도 뚜렷하게 보이지 않는다. 10월 중순 이후에 수온이 서서히 높아지는 것은 계절변화에 따른 성층 환경의 변동도 영향을 줄 것으로 예상된다.

바람과 주축 유속의 관계는 P에서 8월 초까지의 강한 북향류와 남서풍의 기간이 비슷하기는 하지만 세부적인 변동에서 상관성이 보이지 않고 이후의 자료에서도 역시 상관성이 결여되는 것은 이전의 연구 결과와 같다(Lee et al., 2003). Q의 자료에서도 또한 바람과 유속의 상관성은 잘 보이지 않는다.

한국 남동해의 해수면 변동에 있어서 울산항의 자료는 용승기

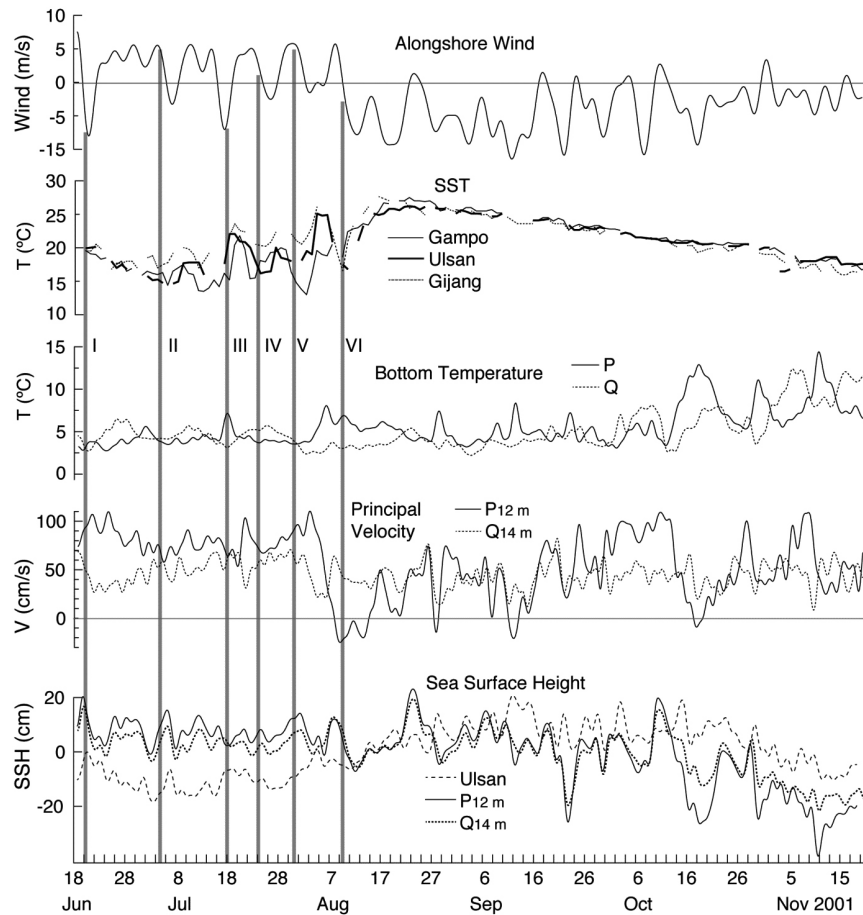


Fig. 11. Time series of alongshore wind, coastal SST, bottom temperature, de-meaned sea level and principal velocity of currents. Vertical bars represent the periods of CTD observation along the Line B and C. SST, Sea-surface temperature; CTD, Conductivity temperature depth; SSH, Sea surface height.

간에 대체로 낮은 상태가 유지되므로 바람의 영향을 받은 것으로 볼 수 있으나 전체적으로는 바람의 변동과 상관성이 크지 않은 것 역시 Lee et al. (2003)의 결과와 같다. P와 Q의 해수면도 바람과의 상관성은 크지 않으나 두 곳의 변동 경향이 매우 유사한 점이 특징적이다. 세 곳 모두 10월 중순부터 해수면이 낮아지는 경향을 보이는 것은 가을에 수온이 전반적으로 낮아지는 계절 변화의 영향으로 보아야 할 것이다.

앞에서 설명한 자료들 사이의 시각적 상관성 유무를 더욱 구체적으로 확인하기 위해서 wavelet coherence (Grinsted et al., 2004) 방법을 이용하여, 시간에 따른 주파수 영역의 분석을 했는데, 가장 현저하게 높은 상관성을 보인 것은 P에서의 주축 유속과 저층수온의 관계였다(Fig. 12). P에서는 2-8일 주기에 8월 중순부터 유의한 상관성을 가지며 특히 16일 이상의 장주기에서는 전체적으로 상관성이 높다. 그리고 위상을 나타내는 화살표가 모두 왼쪽으로 향하는 것은 일관된 역상관을 말해주며 북상하는 동한난류가 강해질 때 geostrophic tilting에 의해 냉수괴가 해안쪽으로 치우치는 정도가 심해짐으로써 수온이 감소함을 의미한다. Q에서는 이러한 상관성이 나타나지 않았는데 이것은 관측 기간 동안 거의 항상 남향류가 흐르는 동시에 앞의 단면도(Fig. 6)에서와 같이 냉수괴가 폭넓게 존재하기 때문에 그 유속 변화의 효과가 저층수온에 큰 영향을 주지 않기 때문으로 해석된다. 그러므로 해안 가까이에 강한 동한난류가 흐르게 되면 지형류의 baroclinic tilting에 의해서 등온선이 해안 쪽으로 상승하는 기층기가 증가하고 그에 따라 저층의 냉수괴는 해안 쪽으로 치우쳐서 얇은 곳에 머무르는 경향이 강해지며, 이러한 조건은 남서풍에 의한 표층의 에크만 수송에 따라 냉수괴가 쉽게 용승하게 되면서 표면 수온이 신속하게 감소하는 반응 때문에 바람-표층수온의 상관성이 높은 원인이 된다.

## 고 찰

한국 남동해역의 두 곳에서 ADCP를 해저에 설치하고 간절곶 해안에서 기상관측을 실시한 자료들을 여섯 차례에 걸친 CTD 자료와 비교하여 용승과 관련된 분석을 하였다. 2001년 6월 18일부터 154일간의 해류 관측 결과에서 가장 주목할 사항은 수심 124 m인 Q 정점에서 약 100 m 이하의 저층에는 지속적인 남향류가 기록되었다는 것이며 수심 84 m인 P의 저층에서도 간헐적으로 나타났다. 이 남향류는 수온 10°C 이하, 그리고 염분 34.3 이하로서 대한해협 최심부에 지속적으로 흐르는 저층 해류(Lee and Kim, 2016)로 이어지는 것으로 보인다. 이 남향류는 한국 동해안을 따라 남하하는 북한한류로써 올진(Lee and Chang, 2014) 연안과 후포(Lee, 2016) 연안에서 관측된 남향류의 남하 경로를 파악하는 데 중요한 자료가 된다.

여름철 성층의 특징은 등온선이 해안 쪽으로 상승하는 것으로 강한 동한난류의 baroclinic tilting에 의해서 저층의 냉수괴가 가장 깊은 외해의 골짜기가 아닌 해안 쪽으로 치우치는 경향을 보인다. 상층 유속과 저층수온과의 wavelet coherence 분석

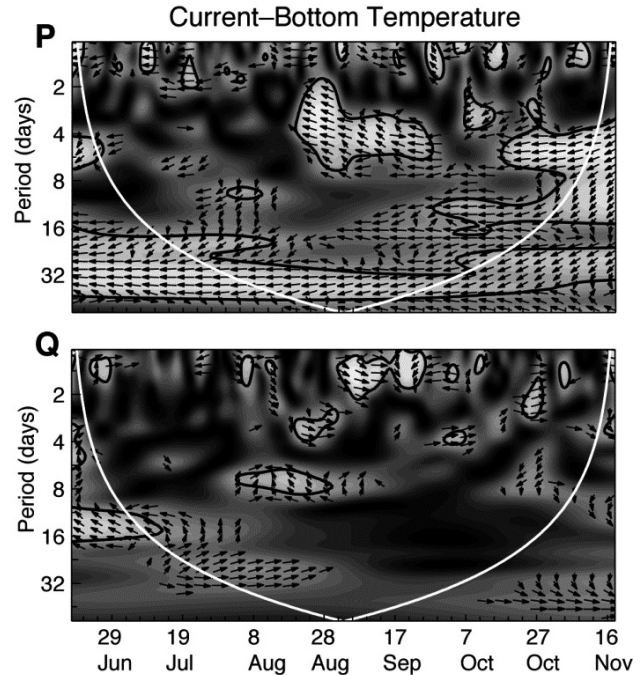


Fig. 12. Wavelet coherence between principal velocity of current and bottom temperature. Thick curves are the boundaries of 95% confidence level. White line indicates the cone of influence. Leftward phase arrows indicate the inverse coherence.

에서 장주기의 높은 역상관 결과는 이 관계를 뒷받침 해준다.

이러한 해류 조건에 의해 냉수괴가 해안의 표면 가까이에 상승한 상태에서 용승에 유리한 남서풍이 불면 해안의 표층수온이 신속히 낮아지는 반응을 보이게 된다. 그렇지만 바람의 영향이 해류에는 명확하게 나타나지 않는데, 그 이유는 강한 서안경계 해류의 성격을 띠는 동한난류가 대마난류의 한 지류이고 대마난류 또한 쿠로시오로부터 분리되므로(Lie et al., 1998; Teague et al., 2003) 대마난류와 동한난류가 각각 분리·형성될 당시의 제반 조건에 따라서 유속분포나 수송량의 변화(Takikawa et al., 2005)가 야기될 것이고, 대마난류의 경로 변화와 동해 전체의 기압변동에 의한 2-10일 주기의 중규모 변동(Lyu and Kim, 2005)까지 다양한 변동성이 존재하므로 국지적인 바람의 효과가 큰 비중을 차지하지 못하기 때문일 것이다. 반면에 동안 경계해류 지역에서는 배경 해류가 본래 약하기 때문에 바람의 영향이 상대적으로 커서 그 효과가 뚜렷하게 나타난다(Smith, 1974). 동한난류가 그 근원인 대마난류와 쿠로시오의 영향을 많이 받는다는 점에 있어서 아프리카의 기니아만에서 발생하는 용승(Bakun, 1978; Philander, 1979; Houghton, 1989)과 매우 흡사한데, 대서양의 바람에 의해서 적도반류가 강해지면 그 연장선에 위치한 기니아해류도 강해져서 baroclinic tilting에 의해 기니아만의 등온선이 상승한 상태에서만 용승이 왕성하게 발달하는 것으로서 remote forcing에 의한 용승으로 알려져 있다.

## 사 사

이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2017-2018년)에 의하여 연구되었음. CTD/ADCP 관측을 위해 도와주신 탐양호 선장님과 직원들에게 감사한다.

## References

- An HS. 1974. On the cold water mass around the southeast coast of Korean Peninsula. *J Oceanol Soc Korea* 9, 10-18.
- Bakun A. 1978. The Guinea upwelling. *Nature* 271, 147-150.
- Byun SK. 1989. Sea surface cold water near the southeastern coast of Korea: Wind effect. *J Oceanol Soc Korea* 24, 121-131.
- Grinsted A, Moore JC and Jeverjeva S. 2004. Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series. *Nonlinear Processes in Geophysics* 11, 561-566.
- Houghton RW. 1989. Influence of local and remote wind forcing in the Gulf of Guinea. *J Geophys Res* 94, 4816-4828.
- Lee KB. 1978. Study on the coastal cold water near Ulsan. *J Oceanol Soc Korea* 13, 5-10.
- Lee DK, Kwon JI and Hahn SB. 1998. The wind effect on the cold water formation near Gampo-Ulgi coast. *J Korean Fish Soc* 33, 359-371.
- Lee JC. 1983. Variations of sea level and sea surface temperature associated with wind-induced upwelling in the southeast coast of Korea in summer. *J Oceanol Soc Korea* 18, 149-160.
- Lee JC and Na JY. 1985. Structure of upwelling off the southeast coast of Korea. *J Oceanol Soc Korea* 20, 6-19.
- Lee JC, Kim DH and Kim JC. 2003. Observations of coastal upwelling at Ulsan in summer 1997. *J Korean Soc Oceanogr* 38, 122-134.
- Lee JC. 2011. Upwelling-response of the cold water off Haewundae in summer. *J Korean Soc Oceanogr* 16, 206-211.
- Lee JC and Chang KI. 2014. Variability of the coastal current off Uljin in summer 2006. *Ocean and Polar Res* 36, 165-177. <http://dx.doi.org/10.4217/OPR.2014.36.2.165>.
- Lee JC. 2016. Water mass distribution and currents in the vicinity of the Hupo Bank in summer 2010. *Korean J Fish Aquat Sci* 49, 61-73. <http://dx.doi.org/10.5657/KFAS.2016.0061>.
- Lee JC and Kim DH. 2016. Observations of bottom currents in the Korea Strait. *Korean J Fish Aquat Sci* 49, 393-403. <http://dx.doi.org/10.5657/KFAS.2016.0393>.
- Lie HJ, Cho CH and Lee JH. 1998. Separation of the Kuroshio water and its penetration onto the continental shelf west of Kyushu. *J Geophys Res* 103, 2963-2976.
- Lyu SJ and Kim K. 2005. Subinertial to interannual variations in the Korea Strait and their possible mechanisms. *J Geophys Res* 110, C12016, <http://dx.doi.org/10.1029/2004JC002651>.
- Philander SGH. 1979. Upwelling in the Gulf of Guinea. *J Mar Res* 37, 23-33.
- Rikiishi K and Ichiye T. 1986. Tidal fluctuation of the surface currents of the Kuroshio in the East China Sea. *Prog Oceanogr* 17, 193-213.
- Sea-Bird Electronics. 2000. SBE 26 Seagauge wind and tide recorder Operating Manual. Sea-Bird Electronics manual version 3, 54.
- Smith RL. 1974. A description of current, wind, and sea level variations during coastal upwelling off the Oregon coast, July-August 1972. *J Geophys Res* 79, 435-443.
- Takikawa T, Yoon JH and Cho KD. 2005. The Tsushima Warm Current through Tsushima Straits estimated from ferryboat ADCP data. *J Phys Oceanogr* 35, 1154-1168.
- Teague WJ, Jacobs GA, Ko DS, Tang TY, Chang KI and Suk MS. 2003. Connectivity of the Taiwan, Cheju, and Korea Strait. *Continental Shelf Res* 23, 63-77.