라그랑쥐 측류에 의한 동해 연안역 유동특성 관측

이문진* · 강용균* · 강신영** · 유홍선**

Lagrangian Observations of Currents in the Coastal Regions off East Coast of Korea

Moon-jin Lee · Yong-Q. Kang* · Sin-Young Kang** · Hong-Sun Yu***

〈목 차〉

Abstract
1. 서론
2. 울진해역 라그랑쥐 측류
3. 울기해역 라그랑쥐 측류
4. 논의 및 결론
5. 사사
참고문헌

Abstract

We measured lagrangian currents in the coastal regions off east coast of Korea. The experiment sites are the Uljin region where Polar Front of the East Sea is formed and the Ulgi region where coastal upwelling occurs frequently in summer. Each drifters are equipped with GPS receiver, and their trajectories are monitored by receiving the data transmitted from drifters through radio signal. The experiment with 'transmitting' GPS is very useful in monitering flows in coastal regions.

Trajectories of drifters in the Uljin Polar Front region in October 1994 showed counterclockwise flow pattern. The flow pattern agrees with the SST distributions obtained from NOAA-11 AVHRR image for the same period.

The lagrangian trajectories of drifters at 5m and 15m depths in the Ulgi region for normal period of April 1995 showed that the currents at the top 15m layer are almost uniform and their magnitude is 29 cm/s. However, the currents, measured by KORDI, during the upwelling period of June 1994 showed that the currents at 5m depth were 1.2 times stronger than those at 15m depth. The current pattern in the Ulgi upwelling region agrees with the horizontal and vertical distributions of seawater temperature measured by NFRDA at the same period.

* 부산수산대학교 해양학과
** 정회원, 한국해양대학교 해양공학과 교수

1. 서 론

한국의 동해는 태평양의 부속해로서 한국, 일본, 러시아 등 3개국의 연안에 둘러싸여 있으며, 대한해협, 쓰가루해협, 타타르해협 등 비교적 좁은 수로를 통해 태평양과 연결되어 있다. 이와 같이 지리적 여건은 지중해적인 특성을 보이지만, 동해의 지형이나 해황 등은 대양의 축소형이라 할만큼 복잡하게 나타난다.

동해에서 나타나는 특성들 중 동해 중앙부의 극전선과 남동부 연안역의 용승현상은 해양학적 관심이 집중되고 있다. 이들 현상의 중요성은 해양학적 측면뿐만 아니라 수산자원의 측면에서도 크게 부각되므로, 지금까지 많은 조사와 연구가 수행되고 있다. 극전선과 관련하여 극전선대 자체의 내부구조 및 변동이 주로 연구되었으며(공과 손, 1982 ; 공과 이, 1984 ; Shim and Kim, 1981 ; Hong and Cho, 1983 ; Lim, 1984 ; Kang and Kang, 1987 ; Na, 1988 ; Na and Han, 1988), 극전선대의 변동요인으로서 동한난류의 특성 및 경로에 대해서도 종종 논의되었다(최, 1988 ; Lim, 1971 ; Kawabe, 1982 ; Byun and Chang, 1984 ; Kang, 1988). 동해 남동부해역에서 나타나는 용승현상에 대해서는 남동부해역 저층의 냉수 형성과정에 관련된 연구(김과 김, 1983 ; 임, 1983), 용승과정에 관한 연구(Lee, 1983 ; Byun, 1989) 등이 보고된 바 있다. 이와 같이 극전선역과 용승역에 대한 많은 연구가 이미 수행된 바 있으나, 대부분의 연구가 수온 및 염분에 근거한 해황특성 규명에 치중되어 있다. 실제 유속을 측정하여 역학적인 특성을 고찰한 연구들도 소수 있으나, 이들의 연구에서는 유속계를 계류하여 관측한 오일러 측류자료를 이용하였다(이 등, 1992 ; Byun and Seung, 1984).

이와 같이 유속계를 계류하여 유속을 관측하는 오일러 측류에서는 유속의 시간적 변동은 파악할 수 있으나, 공간적 분포양상은 파악하기 어렵다. 따라서 해황특성이나 물질순환과 관련하여 유동분포를 파악하고자 할 경우 오일러 측류보다는 라그랑쥐 측류가 적합하다. 라그랑쥐 측류는 유동에 따른 해수 이동의 궤적을 추적하여 유동현상을 파악하는 방법인데, 유체의 추적을 위한 추적자로서 부표를 주로 이용한다. 과거의 라그랑쥐 측류에서 문제점은 선박을 이용하여 부표를 추적하므로 장기간 연속적으로 측류하기가 어렵다는 점이다. 이러한 문제점을 극복하기 위하여 인공위성을 이용한 부표추적장치가 활용되고 있는데, 주로 ARGOS 위성을 이용하고 있다. 그러나 ARGOS 위성을 이용하여 부표를 추적할 경우, 부표 위치를 수신하는 시간간격은 4~6시간이며 측위오차는 300m 이상이다(Beardsley et al., 1992). 연안역의 경우 공간규모가 수km 이내이고 수분 정도의 시간규모에서 유속이 크게 변동하는 점을 감안하면, ARGOS 위성을 이용한 부표추적은 부적합하다. 최근 한국해양연구소에서 연안역 라그랑쥐 부표추적장치인 TGPS(Transmitting GPS)를 개발하였다(전 등, 1995). TGPS는 부표에서 수신한 GPS 위치정보를 육상으로 발신하는 장치로서 수분 정도의 시간간격으로 위치를 측정할 수 있다(전 등, 1995). GPS에 의한 측위오차의 표준편차는 20m 정도이다.

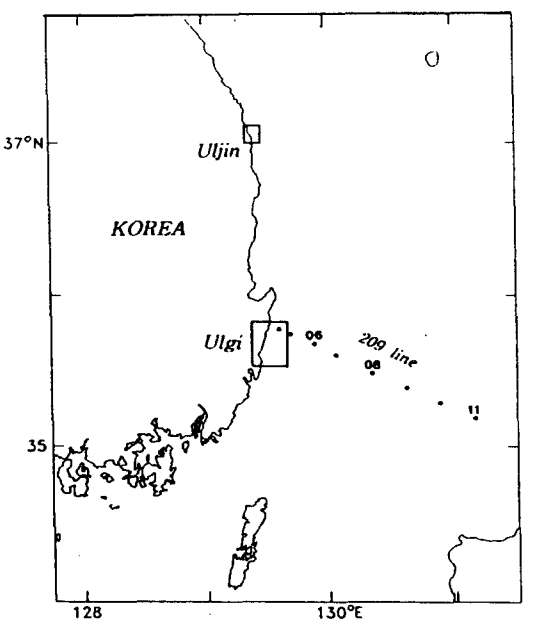

Fig. 1 Areas of experiments. Circles(●) are oceanographic stations along the Line 209 of the NFRDA of Korea.

본 연구에서는 TGPS 부표를 이용하여 장기간 연속적인 라그랑쥐 측류를 수행함으로써, 동해 연안역의 유동특성을 파악하였다. 또한 실측된 유속과 주변허역의 해황특성을 비교하였다. 라그랑쥐 측류를 수행한 해역은 극전선대 연안역인 울진해역과 용승역인 울기해역이다(Fig. 1).

2. 울진해역 라그랑쥐 측류

울진 주변해역의 해황특성과 관련된 유동특성을 파악하기 위하여 TGPS를 이용한 라그랑쥐 측류를 수행하였다. TGPS를 이용한 유동관측은 1994년 10월 25일 12 : 15~17 : 11의 약 5시간 동안 이루어졌으며, 같은 기간 동안 연안역에 유속계(Aanderaa RCM-7)를 계류하여 고정점에서의 유속변화도 관측하였다. 부표는 표층(5m)의 흐름을 반영하도록 측류판을 부착하였으며, 2개의 부표를 동일 지점에 투하하였다. TGPS로부터 1.5분마다 위치를 수신하여 추적한 부표의 이동경로는 Fig. 2와 같다. Fig. 2에서 C점은 RCM-7 유속계 계류지점이다.

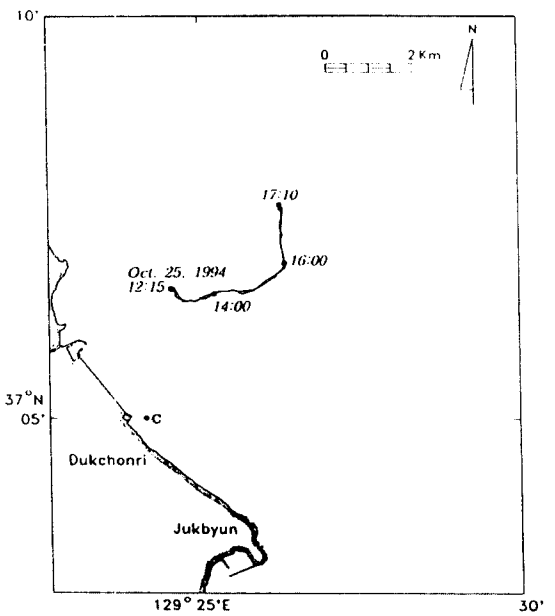

Fig. 2 Trajectories of 2 drifters off the coast of Uljin in Oct. 25, 1994. The point C is the current-meter mooring station.

투하한 부표는 동남동 방향으로 이동하다가 다시 반시계방향으로 이동하는 J자형의 이동경로를 보였으며, 총 5시간 동안 약 5km 정도 이동하였다. 부표의 이동경로에 의하면, 유동은 연안쪽에서 남향류, 외양쪽에서 북향류가 우세한 양상을 보였다. 연안에서의 남향류 양상은 연안부근의 연속측류점 C에서 측류한 유속의 분포에서도 나타났는데, 연속측류 결과에서 평균유속은 2.4cm/s였으며 유향은 남동향이 우세한 것으로 나타났다(Fig. 3).

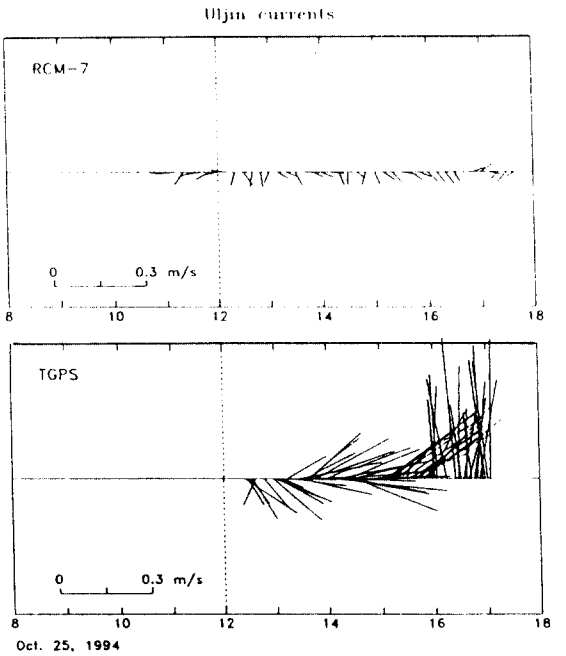

Fig. 3 Velocities of current at the mooring station C (upper figure) and those inferred from the displacements of drifters (lower figure).

부표의 이동경로로부터 추정한 유속의 시간적 변동은 Fig. 3과 같다. 부표이동의 평균유속은 19.4cm/s였으며, 부표이동의 유향 변동에서도 J자형 반시계방향 환류의 특성이 나타나고 있다. 반시계방향 J형 환류의 유속분포는 연안역에서 약한 남향류이고, 외해쪽으로 갈수록 북향류로 바뀌면서 유속이 증가하였다.

부표의 이동경로에 나타난 환류형태의 유동양상은 주변해역의 수온분포에서도 잘 나타나 있다. Fig. 4는 1994년 10월 23일 국립수산진흥원에서 수신한 NOAA 위성의 AVHRR자료를 이용하여 작성한 표면수온 분포이다. Fig. 4에서 화살표는 수온분포로부터 유추한 해류방향이며, 관측된 부표의 이동경로는 외양의 고온수가 연안의 저온수 쪽으로 관입되는 양상과 잘 일치하고 있다.

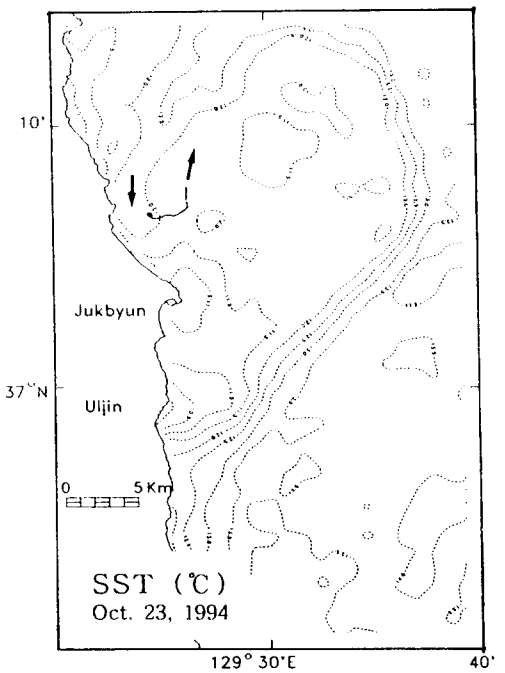

Fig. 4 The SST in Oct. 23, 1994 inferred from NOAA-11 AVHRR data. Arrows are schematic representation of the flow pattern in the study area.

3. 울기해역 라그랑쥐 측류

한국 동남해안의 울기해역은 하계 남풍이 강한 시기에 저층의 냉수가 표층으로 올라오는 용승해역으로 알려져 있다. 이 해역에서는 1994년 6월 용승시기에 한국해양연구소에서 라그랑쥐 측류를 수행한 바 있다(전 등, 1995). 본 연구에서는 용승이 없는 시기의 유동특성과 용승시기의 유동특성을 비교하기 위하여, 용승이 없었던 1995년 4월의 유속을 관측하였다. 본 해역에서의 라그랑쥐 측류는 1995년 4월 11일 14 : 31~4월 12일 12 : 40의 약 20시간 동안 이루어졌는데, 수심 5*m*와 15*m*에 각각 1개씩의 부표를 사용하였다. 수심 50*m*의 부표는 기기 작동불량으로 자료를 회수하지 못하였다. 부표추적의 시간간격은 1.5분으로 하였다.

모든 부표는 동일지점에 동시에 투하하였는데, 수심 5*m*와 15*m* 부표의 이동경로는 Fig. 5와 같다.

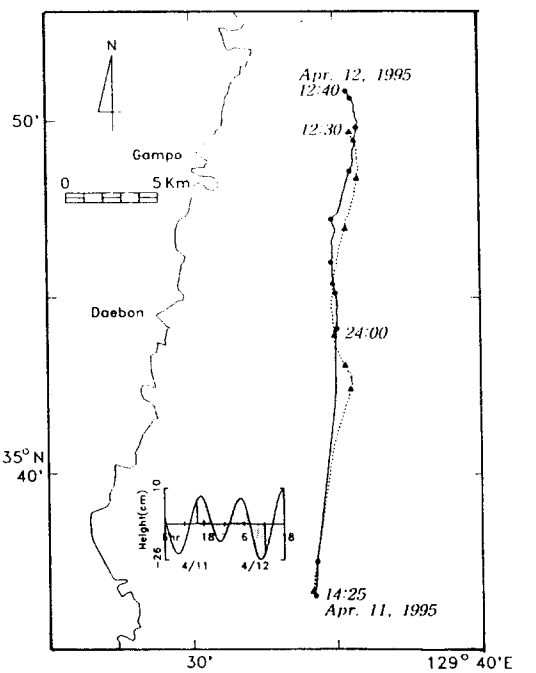

Fig. 5 Trajectories of 2 drifters off the coast of Ulgi in Apr. 11, 1995. Solid and dotted lines are trajectories of drifters at 5m and 15m depth, respectively.

Fig. 5에서 실선으로 표시한 경로는 5*m* 부표의 이동경로이고, 점선으로 표시한 경로는 15*m* 부표의 이동경로이다. 5*m* 및 15*m* 부표는 연안을 따라 북쪽으로 이동하였으며, 20시간 동안 약 20*km* 정도

이동하였다. 부표의 이동경로로부터 추정한 5m와 15m의 유속은 Fig. 6과 같다. 관측기간 동안 평균 유속은 수심 5m에서 29.3cm/s이고 15m에서 29.4cm/s로 표층과 중층에서 유사하게 나타났으며, 유향은 북향이 우세하였다. 본 관측기간인 1995년 4월은 용승이 일어나지 않았는데, 이는 당시의 표면수온 분포에 잘 나타나 있다. 국립수산진흥원의 수온자료속보에 의하면, 4월 8일 울기주변의 표면수온은 11℃이하로서 외양의 표면수온(12℃)보다 약 1℃ 정도 낮았으며, 표면수온의 분포양상은 연안에서 외양으로 갈수록 높아지는 것으로 나타났다(Fig. 7). 또한 1995년 4월 11일 국립수산진흥원 209정선에서 관측된 수층별 수온분포에서도 용승이 나타나지 않았음을 보여주는데, 표층과 저층간에 10℃ 이상의 수온차이를 갖는 강한 성층이 형성된 것으로 나타났다(Fig. 8). 이상에서 알아본 바와 같이 1995년 4월은 용승이 나타나지 않았으며, 5m와 15m 수층의 유속은 거의 균일하게 나타났다.

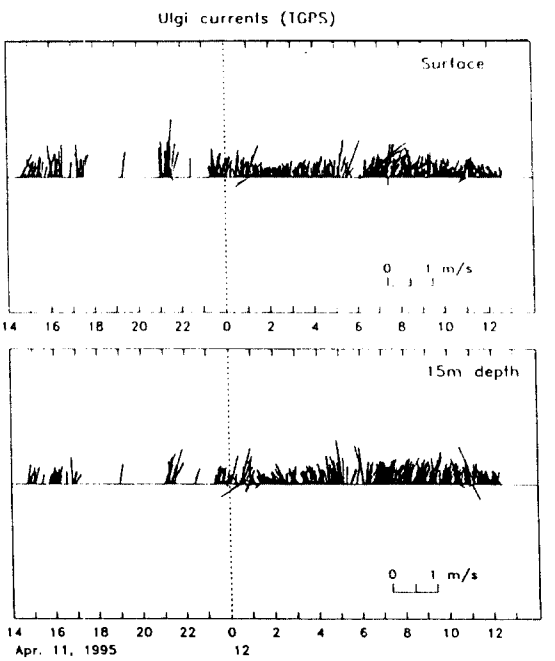

Fig. 6 Velocities of current inferred from the displacements of drifters at 5m (upper figure) and at 15m (lower figure).

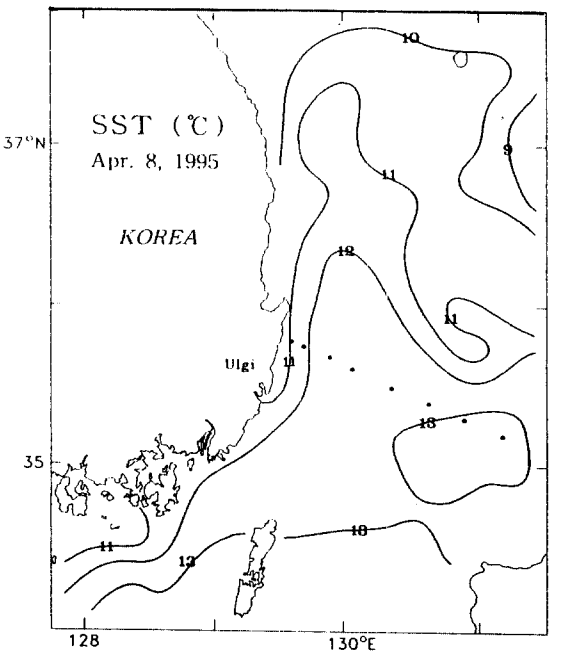

Fig. 7 The SST in Apr. 8, 1995 inferred from NOAA-11 AVHRR data (KODC, 1995a).

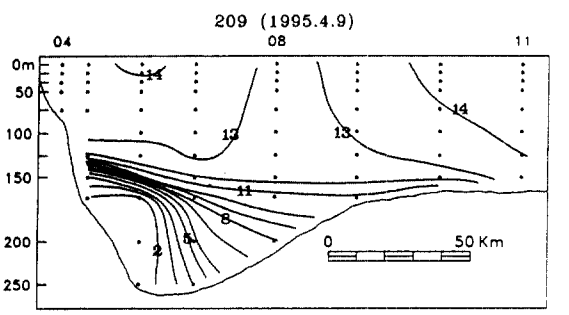

Fig. 8 Vertical distributions of temperature in Apr. 9, 1995 along the NFRDA Line 209 (KODC, 1995b).

용승이 없는 기간에 해양 표층 15m 이내 유속의 연직분포가 균일하게 나타난 반면에, 용승이 발생한 시기에는 수심 5m의 유속이 수심 15m의 유

속보다 빠른 것으로 보고된 바 있다. 1994년 6월 23일 08 : 35~18 : 55의 약 10시간 동안 울기해역에서 TGPS를 이용하여 라그랑쥐 측류를 수행한 전 등(1995)의 결과에 따르면, 수심 5*m*의 유속(96.7*cm/s*)이 15*m*의 유속(80.8*cm/s*)에 비해 약 1.2배 정도 빠른 것으로 나타났다. 약 10시간의 관측기간 동안 부표는 북쪽으로 약 30*km* 정도 이동하였다(Fig. 9). 1994년 6월 27일 국립수산진흥원의 수온자료속보에 따르면, 이 기간중 용승이 활발한 것으로 나타났는데, 울기주변해역의 표면수온은 17℃ 미만으로 외양의 표면수온(19℃)에 비해 2℃ 이상 낮은 것으로 나타났다(Fig. 10). 이러한 용승의 양상은 국립수산진흥원의 209정선상에 6월 27일에 관측된 수층별 수온분포에서도 나타났는데, 울기주변해역의 표면수는 저층수가 용승하여 형성하고 있는 양상을 보인다(Fig. 11).

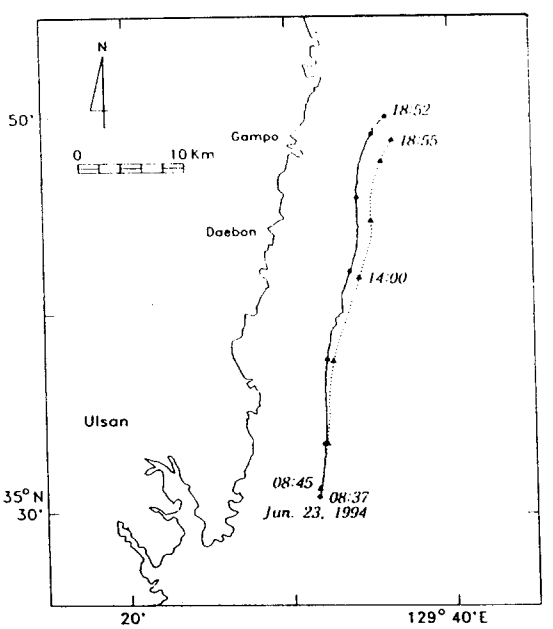

Fig. 9 Trajectories of 2 drifters off the coast of Ulgi in Jun. 23, 1994. Solid and dotted lines are trajectories of drifters at 5m and 15m, respectively (Chun et al., 1995).

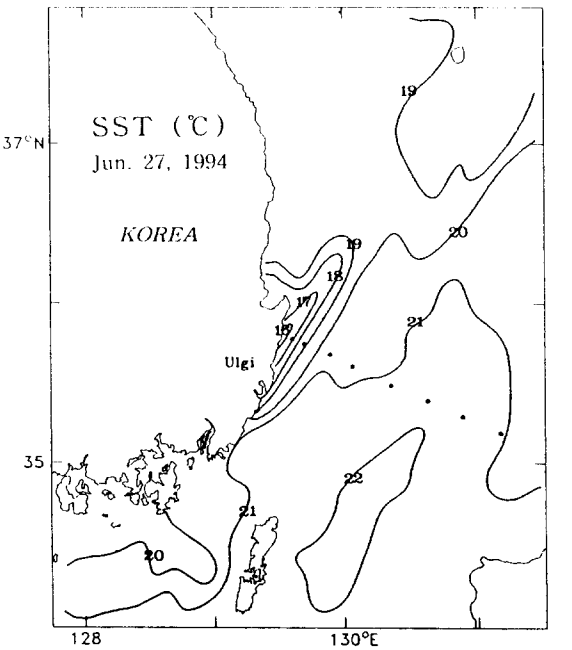

Fig. 10 The SST in Jun. 27, 1994 inferred from NOAA-11 AVHRR data (KODC, 1994a).

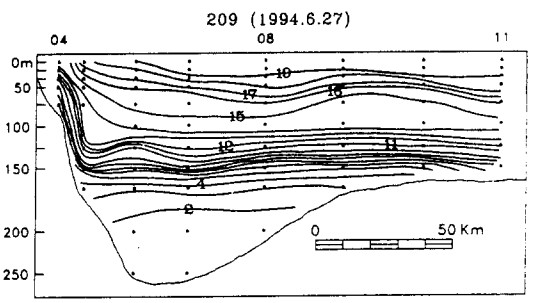

Fig. 11 Vertical distributions of temperature in Jun. 27, 1994 along the NFRDA Line 209 (KODC, 1994b).

이상의 결과에서 볼 때, 울기해역의 유동양상은 용승의 발생여부에 따라 다르게 나타남을 알 수 있다. 용승이 발생한 시기에 수심 5*m*의 유속은 15*m*의 유속보다 빠르게 나타나는 반면에, 용승이 없는 시기에는 표층 5*m*와 15*m* 유속에 거의 차이가 없었다.

4. 논의 및 결론

한국 동해 연안역의 유동특성을 파악하기 위하여 극전선역인 울진해역과 용승해역인 울기해역에서 라그랑쥐 측류를 수행하였다. 해수의 유동특성은 주변해역의 해황과 비교하여 고찰하였는데, 해황은 인공위성에서 관측한 수온자료를 주로 이용하였다.

울진해역은 한국 동해안을 약간 벗어나 북상하는 고온의 동한난류와 연안을 따라 남하하는 북한한류가 만나는 전선역이다. 따라서 이 해역의 유동양상은 시공간적으로 크게 변동하며 수온 분포 역시 매우 복잡하게 나타난다. 울진해역에서의 라그랑쥐 측류 결과에서 반시계방향의 환류 유동이 관측되었는데, 이는 당일 NOAA 위성에서 관측한 표면수온자료로부터 유추한 유동상과 일치한다.

하계에 용승이 빈번하게 발생하는 울기해역에서의 수심 5m와 15m에서 유속을 비교하였다. 본 연구는 용승이 발생하지 않았던 1995년 4월에 수행되었는데, 5m와 15m의 유속은 거의 균일하게 나타났다. 한편 본 연구에서 사용한 기기와 동일한 기기를 이용하여 1994년 6월 용승시기에 5m 및 15m의 유속을 측정한 결과에 따르면, 5m의 유속이 15m의 유속에 비해 약 1.2배 정도 큰 것으로 보고된 바 있다(전 등, 1995).

이상의 유동특성은 유체의 이동경로를 추적함으로써 고찰한 것이며, 이의 결과를 통하여 해역내 유동의 공간적인 분포양상을 추정할 수 있었다. 또한 12시간 이상의 장기간 동안 연속된 추적을 통하여 보다 넓은 해역 내의 유동특성을 알 수 있었다. 본 연구에서 라그랑쥐 측류는 극전선역인 울진해역과 용승해역인 울기연안에서 수행되었는데, 이런 라그랑쥐 측류에 대한 지속적인 연구는 해양의 물리적 특성 파악을 크게 증진시킬 것으로 기대된다. 라그랑쥐 측류에 의한 유동의 특성은 해양 오염물, 항만의 토사, 해상 사고에 의한 누유 등의 확산분포를 파악하는데 유용하게 사용될 수 있을 것이다.

5. 사 사

본 연구는 1994년도 교육부 학술연구조성비 해양·수산과학분야 연구비 지원(과제번호 KIOS-94-1-2)에 의해 수행되었다.

본 연구에 활용된 수온자료속보와 NOAA위성 원격정보자료를 제공해 준 국립수산진흥원의 한상복박사와 서영상씨에게 감사드린다. 그리고 1994년 울기연안 TGPS 자료를 제공해 준 해양연구소의 석문식박사와 전호경씨에게 감사드린다.

참 고 문 헌

공영, 손승정, 1982. 한국동해의 해양 열전선에 관한 연구. 국립수산진흥원 연구보고, 28 : 28-54.

공영, 이홍재, 1984. 동해 남부해역의 열전선 분포. 과학기술처, BSPE 00056-86-7B, 215pp.

김철호, 김구, 1983. 한국 동해안에 출현하는 냉수괴의 특성과 기원. 한국해양학회지, 18 : 73-83.

이홍재, 신창웅, 승영호, 1992. 동해 중변 연안해역에서 조석주기의 내부수온변동. 한국해양학회지, 27 : 228-236.

임근식, 1983. 한국 동남해역 냉수괴의 특성 및 근원. 서울대학교 대학원 석사학위논문, 40pp.

전호경, 함석현, 석문식, 박동원, 1995. 표층해류 관측을 위한 TGPS Buoy 개발 연구. 한국해양학회지, 30 : 27-38.

최용규, 1988. 대마난류 수형의 계절변화. 부산수산대학 대학원 석사학위논문, 42pp.

Beardsley, R.C., R. Limeburner, K. Kim and J. Candela, 1992. Lagrangian flow observations in the East China Yellow and Japan Seas. La mer, 30 : 297-314.

Byun, S.K., 1989. Sea surface cold water near the southeastern coast of Korea : Wind effect. J. Oceanol. Soc. Korea, 24 : 121-131.

Byun, S.K. and S.-d. Chang, 1984. Two branches of Tsushima Warm Current in the western channel of the Korea Strait. J. Oceanol. Korea, 19 : 200-209.

Byun, S.K. and Y.H. Seung, 1984. Description of current structure and coastal upwelling in the south-west Japan Sea in summer 1981-and spring 1982. In : T. Ichiye (Editor), Ocean Hydrodynamics of the Japan and East China Seas. Elsevier, Tokyo, pp. 83-93.

Hong, C.H. and K.D. Cho, 1983. The northern boundary of the Tsushima Current and its fluctuation. J. Oceanol. Soc. Korea, 18 : 1-9.

Kang, Y.Q., 1988. On the formation of the East Korean Warm current. Ocean Research, 10 : 1-6.

Kang, Y.Q. and O.G. Kang, 1987. Annual variation of water temperature in the upper 200m off southeast coast of Korea. J. Oceanol. Soc. Korea, 22 : 71-79.

Kawabe, M., 1982. Branching of the Tsushima Current in the Japan Sea, Part I : Data analysis. J. Oceanol. Soc. Japan, 38 : 95-107.

Lee, J.C., 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.

Lim, B.D., 1971. On the origin of the Tsushima Current Water. J. Oceanol. Soc. Korea, 6 : 85-91.

Lim, K.S., 1984. Structure and spatial variability of front in the southwest part of the East sea. J. Naval Academy, 19 : 103-113.

Na, J.Y., 1988. Wind stress distribution and its application to the upper-layer structure in the East Sea of Korea. J. Oceanol. Soc. Korea, 23 : 97-103.

Na, J.Y. and S.K. Han, 1988. Spatial temperature distributions of wind stress and the thermocline in the East Sea of Korea. Bull. Korean Fis. Soc., 21 : 307-316.

KODC, 1994a. 한국해양자료센타 수온자료속보 940627, 제 519호. 수산진흥원.

KODC, 1994b. 한국해양자료센타 수온자료속보 940701, 제 521호. 수산진흥원.

KODC, 1995a. 한국해양자료센타 수온자료속보 950408, 제 660호. 수산진흥원.

KODC, 1995b. 한국해양자료센타 수온자료속보 940410, 제 662호. 수산진흥원.

Shim, T.B. and K. Kim, 1981. On the variation of the MLD and heat flux in the eastern sea of Korea. J. Oceanol. Soc. Korea, 16 : 49-56.