

동해에서 쓰시마난류의 변동과 관련한 극전선의 공간적 변화

이 충 일 · 조 규 대 · 최 용 규*

부경대학교 해양산업개발연구소 · 부경대학교 해양학과 · 국립수산물과학원 남해수산연구소
 (2003년 5월 26일 접수; 2003년 7월 31일 채택)

Spatial Variation of the Polar Front in relation to the Tsushima Warm Current in the East Sea

Chung Il Lee, Kyu Dae Cho* and Yong Kyu Choe**

Research Center for Ocean Industrial and Development, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea

*Department of Oceanography, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea

**South Sea Fisheries Research Institute, National Fisheries Research and Development Institute, Yeosu 556-820, Korea

(Manuscript received 26 May, 2003; accepted 31 July, 2003)

Variation of the polar front in the East Sea is studied using temperature and dissolved oxygen data obtained from Japan Meteorological Agency from 1972 to 1999. Variation of the polar front in the East Sea has a close relation to the variation of the Tsushima Warm Current (TWC). When the TWC spreads widely in the East Sea, polar front moves northward. The spatial variation of the polar front is greater in the southwestern area of the East Sea and the northern area of Tsugaru Strait where the variation of the TWC's distribution area is greater than those in others of the East Sea. Hence, in the southeastern area of the East Sea, that is, between near Noto peninsula and Tsugaru Strait, the spatial variation of the polar front is not so wide as in the southwestern area because the flow of TWC is stable.

Key words : East Sea, Polar front, Tsushima Warm Current, Noto peninsula

1. 서 론

동해의 표층부는 북쪽의 저온 저염한 한류계수와 남쪽의 고온 고염한 쓰시마난류계수가 서로 만나는 위도 약 40°N 부근에서 위도와 거의 나란하게 극전선이 형성되며^{1,2)}, 이 경계역에서는 성질이 서로 다른 수괴들간의 상호 작용으로 인하여 meandering과 eddy가 뚜렷하게 나타난다³⁾. 동해에서 형성되는 극전선은 외양전선 (open sea front)의 한 형태로서⁴⁾ (Fig. 1), 아열대수 (subtropical water)와 아극대수 (subarctic water)의 경계에 의한 것으로 설명되고 있다⁵⁾.

동해에서 극전선의 정의 및 생성 위치에 관한 연구를 결과를 보면, 고온·고염수와 34.1‰ 이하의 냉수와의 경계역을 극전선이라 하였으며, 그 경계역의

수온을 극전선의 지표 수온으로 보았다⁶⁾. 그리고 수심 200m의 5°C 등온선을 냉수역과 난수역의 경계인 극전선의 지표 수온으로 언급하였으며⁷⁾, 또한 동해의 겨울철 표면에서 3~5°C 등온선이 위치하는 위도 40°N을 극전선역이라고 정의하고 있다¹⁾. 그리고 위

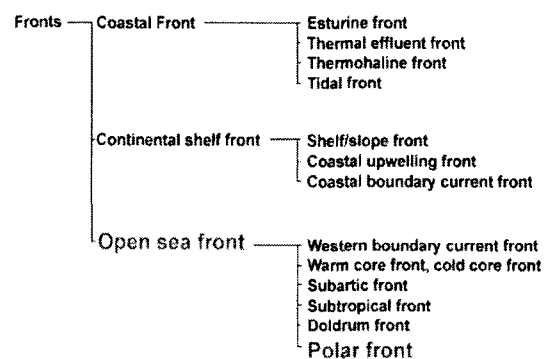


Fig. 1. Classification of ocean fronts (Yanagi, 1987).

Corresponding Author : Chung Il Lee, Research Center for Ocean Industrial and Development, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea
 Phone : +82-51-620-6954
 E-mail : leeci@mail1.pknu.ac.kr

도 35~45°N과 경도 128~140°E의 범위의 연구 해역내에서, 단위 거리당 수온의 변화율이 최대인 곳을 극전선 생성 가능해역으로 보았으며 이것은 6°C 등온선의 분포위치와 거의 유사하게 나타난다고 하였다²⁾.

극전선의 변동 형태를 보면 겨울에서 봄에 파동 형태의 meandering이 크게 나타나며⁵⁾, 겨울철이 여름철에 비해 meandering이나 요철이 비교적 심하지 않으며, 위도 39°~40°N과 거의 나란하게 분포한다²⁾. 극전선의 변동에 영향을 주는 인자에 관한 것으로서 북쪽의 저온 저염한 한류계수와 남쪽의 고온 고염한 쓰시마 난류수가 서로 접하는 경계역에서 형성되는 meandering은 대한해협을 통해 동해로 유입되는 쓰시마난류 변동의 영향을 받을 가능성이 높은 것으로³⁾ 설명되고 있다. 그리고 대한해협을 지나는 쓰시마난류수의 수송량은 계절 및 연 변동이 하며^{8,9)}, 동해에서 쓰시마난류는 그 세기에 따라서 분포역의 확장과 축소 현상이 나타나는 것으로¹⁰⁾ 설명되고 있다.

그러므로 본 연구에서는 일본기상청의 해양관측 자료를 활용하여 동해에서 극전선의 변동을 파악하고자 하며, 이러한 경계역의 변동이 동해 해황 변동에 중요한 인자로 작용하는 쓰시마난류의 변동과 관련이 있음을 설명하였다.

2. 자료 및 방법

동해에서 극전선 변동을 살펴보기 위하여 1972년부터 1999년까지 일본기상청 (Japan Meteorological Agency, JMA) 에서 정선 D, PM, F, G lines 에 대

하여 측정한 수온과 용존산소 자료를 사용하였다 (Fig. 2, Table 1). 극전선은 위도 40°N을 중심으로 위도와 거의 나란한 분포를 보이며, 평균위치의 편차 폭은 동해 중앙부 해역에서는 약 130km로 좁은 반면 동해의 서쪽 (한국의 동해안 부근)과 동쪽 연안 (쓰가루 해협 부근)에서는 180 - 250km로 넓게 나타난다²⁾. 따라서 극전선의 변동을 파악하기 위해서는 위도 39 - 40°N을 중심으로 주변 해역을 포함한 관측 자료가 요구되나, 일본 기상청의 정선 D, PM, F, G lines의 분포 위치는 경도 132 - 138°E와 위도 36 - 41°N사이에 주로 분포하므로 동해의 동-서쪽 해역에 대한 정보는 파악하기 어려움이 있다. 이러한 자료의 공간적인 제약을 보충하기 위해 일본기상청의 위도 및 경도 1°격자별로 평균 (1904년 - 1994년) 된 수온자료도 사용하였다.

본 연구에서는 난류성 수괴와 한류성 수괴의 경계를 연중 가장 잘 파악할 수 있는 수심 100m^{6,11,12)}를 중심으로 극전선의 분포 및 변동을 살펴보았다. 표층의 경우, 하계에 동해 전역이 강한 태양 복사에너지의 영향을 받기 때문에 한류수역과 난류수역의 경계가 수심 100m에 비해 상대적으로 뚜렷하지 못한 단점이 있다. 극전선의 지표수온으로 동해에서 극전선의 분포에 관한 연구 결과^{1,2,7)}를 근거로 하여 5 - 6°C의 범위를 설정하였다. 동해 전체에 걸친 극전선의 월별 평균 분포 위치와 쓰시마난류 분포역의 변동을 살펴보기 위해 해황 변동이 큰 겨울과 여름철 위도 및 경도 1°간격의 평균수온 자료를 이용하여 극전선 지표 수온과 쓰시마난류의 북상 한계지표수온인 10°C 등온선^{6,11-14)}의 수평 분포를 나타내었다. 위·경도 1°

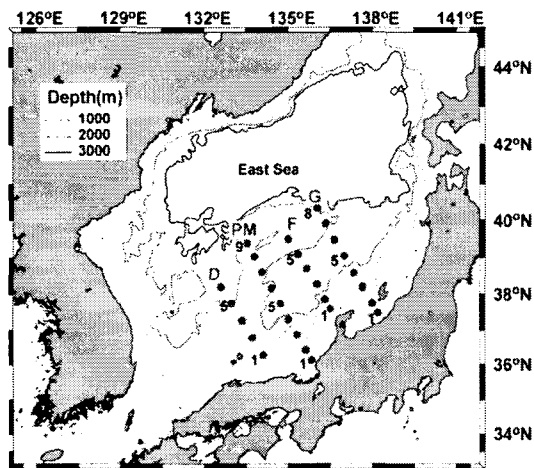


Fig. 2. The map showing study area and bathymetry in the East Sea. Lines D, PM, F and G represent serial station of JMA.

Table 1. Table showing observation period of each serial station carried out by JMA

Observation lines	D				PM				F				G											
	Win		Spr		Sum		Aut		Win		Spr		Sum		Aut		Win		Spr		Sum		Aut	
	Y	M	Y	M	Y	M	Y	M	Y	M	Y	M	Y	M	Y	M	Y	M	Y	M	Y	M	Y	M
72																								
73																								
74																								
75																								
76																								
77																								
78																								
79																								
80																								
81																								
82																								
83																								
84																								
85																								
86																								
87																								
88																								
89																								
90																								
91																								
92																								
93																								
94																								
95																								
96																								
97																								
98																								
99																								

격자별 자료는 광역에 대한 수온의 평균상을 볼 수 있는 장점이 있으나, 시·공간에 따른 극전선의 변동 양상을 보기에는 자료의 분해능에 부족한 면이 있다. 따라서 D, PM, F, G lines의 자료 (Table 1)를 이용하여 난류성 수괴와 한류성 수괴의 경계를 연중 가장 잘 파악할 수 있는 수심 100m^{6,11,12)}에 대하여 수온의 수평 분포도를 작성하였다. 그리고 북쪽의 한류 수역과 남쪽의 난류 수역을 가로질러 놓여 있는 PM line 자료를 이용하여 수온 시계열 변동을 나타내었다.

3. 결 과

3.1. 극전선의 평균적인 분포 위치

Fig. 3은 일본 기상청의 위·경도 1° 격자별 평균 자료를 이용하여 작성한 것으로 수심 100m에서 5°C와 10°C 등온선의 월별 평균분포 위치를 보여준다. 2월-12월까지 격월 간격을 중심으로 나타내었으며 극전선 지표 수온 범위 중 더 북쪽에 위치한 수온 5°C 등온선 및 쓰시마난류 북상 한계지표수온인 10°C 등온선의 분포 위치가 최북단에서 다시 남하하여 최남단에 이르는 시기를 나타내고자 1월과 3월의 경우를 함께 표시하였다. 그림에서 점선은 10°C 등온선을 나타내며, 실선은 5°C 등온선을 나타낸다. 그리고 각 등온선에 표시된 숫자는 해당 월을 나타낸다. 극전선의 분포를 보기 위하여 동해에서 쓰시마난류의 분포 및 남쪽의 난류수와 북쪽의 한류수와의 경계를 가장 잘 파악할 수 있는 수심 100m^{6,11,12)}에 대하여 등온선의 분포를 작성하였다. 극전선과 쓰시마난류 북상 한계역의 시·공간적인 변동을 비교하였다 (Fig. 4).

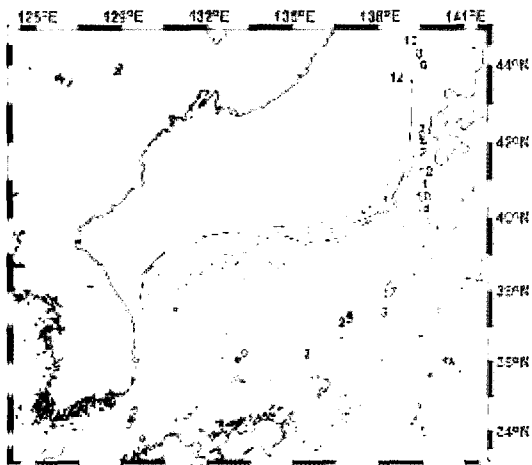


Fig. 3. Horizontal distributions of 5°C (solid lines) and 10°C (dashed lines) isothermal lines in the East Sea. Numerals represent month.

5°C 등온선은 한국 동해안의 죽변 연안으로부터 2월 - 4월은 쓰가루해협 (Tsugaru Strait)에 인접한 북쪽 해역으로 이어지며, 6월 - 12월은 위도 약 45°까지 연결된다. 그리고 위도 39-40°N에서 경도 135-138°E에서는 공간적인 변동 폭이 작은 반면, 이 해역을 중심으로 동쪽과 서쪽 해역에서는 높게 나타난다. 10°C 등온선은 한국 동해안의 포항과 울산 연안에서 시작하여 6월까지의 Noto 반도 (Noto peninsula) 주변해역으로 이어지며, 동계로 갈수록 북상하여 쓰가루해협을 향해 연결된다. 월별 10°C 등온선의 한국 동해안 쪽 분포 위치는 유사하게 나타난다. 월별 분포를 보면, 4월 이후 12월까지의 10°C 등온선의 분포 위치가 북상하는 반면 12월 이후 남하하여 3월에 최남단에 위치한다. 5°C와 10°C 등온선의 한국 동해안 쪽 위치는 거의 일정한 것으로 보여진다.

5°C와 10°C 등온선의 시·공간적인 분포역의 변동은 서로 관련이 있는 것으로 보인다. 10°C 등온선이 12월 이후 그 위치가 남하하여 3월경에 최남단에 위치하며 이후 4월부터 다시 북상하기 시작하여 12월에는 쓰가루해협 부근에 도달하게 된다. 5°C 등온선의 분포 위치를 보면, 10°C 등온선이 한국 및 일본 연안에서 동해 중앙부로 확장하는 경우는 5°C 등온선의 위치도 북상하게 되며 등온선간의 거리가 좁아지는 것으로 나타난다. 반면 10°C 등온선이 Noto 반도 주변해역까지 남하할 때는 5°C 등온선의 분포 위치 또한 남하하여 10°C 등온선과의 거리 또한 멀어지는 것으로 나타난다.

3.2. 극전선의 변동

3.1절에서 극전선 평균 위치의 월별 변동을 살펴 보았으며, 극전선의 변동은 쓰시마난류의 북상 한계 지표수온인 10°C의 변동과 서로 높은 상관성을 가지는 것으로 생각된다. 그러나 Fig. 3은 위·경도 1° 격자별로 평균된 자료를 사용한 것으로 광역에 대한 극전선의 평균적인 위치의 월별 변동은 나타낼 수 있으나, 극전선의 연 변화 같은 시계열 변동 경향을 보여주지는 못한다. 따라서 동해에서 극전선을 가로질러 한류수역과 난류수역에 대해서 장기간 관측이 이루어진 PM line에 대한 수온 및 용존산소의 시계열 변화를 나타내었다 (Fig. 4 - Fig. 5).

Fig. 4는 1972년부터 1999년 까지 수심 100m에 대한 2월과 7월의 수온의 시계열 변화를 나타낸 것이다. 실선과 표시된 것은 극전선을 나타내는 5 - 6°C의 등온선이다. 점선은 10°C 등온선으로서 쓰시마난류의 북상 한계지표수온을 나타낸다. 2월과 7월의 경우를 보면, 80년대 초에 저수온이 일본 연안에 인접한 정점 PM 1에까지 출현하였으며, 이후 다시 고수온역이 외양역으로 확장하는 형태를 나타낸다. PM

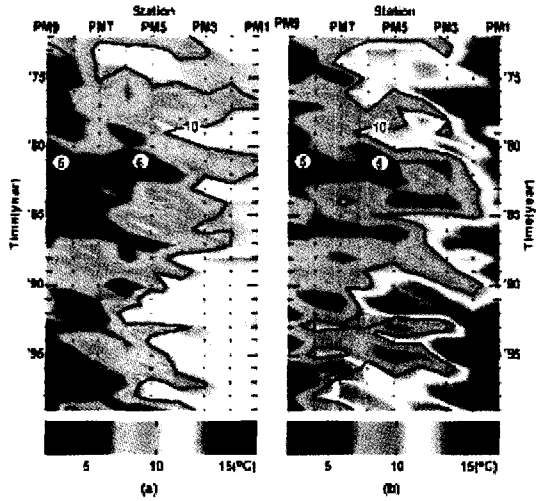


Fig. 4. Time series of temperature ($^{\circ}\text{C}$) at 100m of each station along PM line February (a) and July (b) from 1972 to 1999. Solid lines indicate isothermal line. The isothermal lines of 10°C and $5\text{--}6^{\circ}\text{C}$ indicate the northern boundary of the TWC and polar front respectively.

line상에서 고수온과 저수온의 분포 영역의 변화는 서로 관련성이 있는 것으로 생각된다. 저수온이 정점 PM 1 혹은 PM2 에까지 남하한 경우 극전선 ($5\text{--}6^{\circ}\text{C}$)의 위치 또한 정점 PM 5까지 남하한 것을 알 수 있다. 반면, 여름철에 10°C 이상의 고수온역이 외양(정점 PM 7 - PM 8)으로 확장한 경우는 극전선이 정점 PM 8 - PM 9로 후퇴하였거나, 더 북쪽에 위치하여 PM line 상에 나타나지 않는 시기가 된 것으로 생각된다. 그리고 2월과 7월의 극전선 위치의 시간에 따른 변동 형태는 유사하게 나타난다.

Fig. 5는 용존산소의 시계열 변화를 나타낸 것으로, 점선과 실선은 극전선 ($5\text{--}6^{\circ}\text{C}$)과 쓰시마난류 북상 한계지표수온 (10°C)을 나타낸다. 용존산소의 시계열 변동은 수온의 변동과 거의 유사한 형태를 나타낸다. 이것은 쓰시마난류의 시간에 따른 분포역의 변동과 관련된 것으로 생각된다. 상대적으로 높은 용존산소의 농도가 외양역의 정점에 분포하는 경우와 연안역 정점에 분포하는 경우에 따라서 극전선의 분포 위치 또한 다르게 나타나며, 이것은 수온의 변동 경우와 거의 일치하여 나타난다.

4. 고 찰

동해에서 극전선의 시·공간적인 변동은 쓰시마난류 분포역의 변동과 밀접한 관계가 있는 것으로 나타난다 (Figs. 3 - 5). 쓰시마난류 분포역의 변동

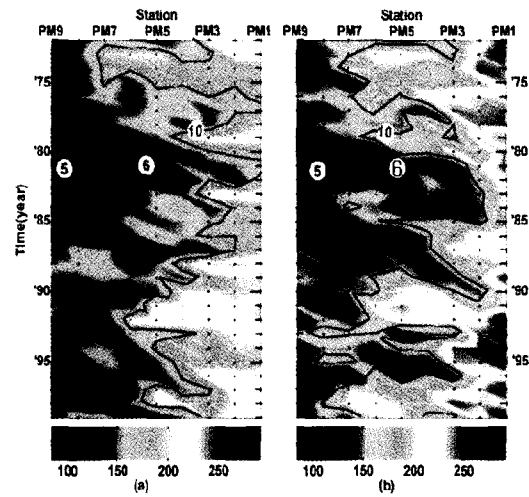


Fig. 5. Time series of dissolved oxygen ($\mu\text{M/l}$) at 100m of each station along PM-line February (a) and July (b) from 1972 to 1999. Solid lines indicate isothermal line. The isothermal lines of 10°C and $5\text{--}6^{\circ}\text{C}$ indicate the northern boundary of the TWC and polar front respectively.

은 곧 쓰시마난류의 세기 변동과도 관련이 깊은 것으로 생각된다. Hong and Cho (1983)에 따르면 쓰시마난류는 그 세력의 강약에 따라 한국 동해안과 일본연안으로 치우쳐 흐르는 경우가 다르게 나타나며, 이 (2003)는 수온과 염분 그리고 용존산소의 시계열 분석 결과를 토대로 쓰시마난류의 세기가 강한 시기와 약한 시기에 따라 그 분포역의 확장 정도가 다른 것으로 설명하고 있다. 극전선은 고온·고염수인 쓰시마난류수와 상대적으로 저온·저염수인 북쪽의 한류수와의 경계역으로서 각 수괴들간의 변동에 따라 그 분포 위치 및 형태가 다르게 나타날 것이다.

극전선의 월별 평균위치의 변동폭은 경도 약 $130^{\circ} 30' \text{E} - 136^{\circ} 30' \text{E}$ 사이에서는 크게 나타나며, 쓰가루 해협 주변에 인접한 $136^{\circ} 30' \text{E} - 138^{\circ} 30' \text{E}$ 에서는 작게 나타난다. 그리고 $138^{\circ} 30' \text{E}$ 을 지나서 쓰가루 해협의 북쪽에서는 다시 변동폭이 크게 나타난다. 이러한 극전선의 시·공간적인 변동의 경향은 쓰시마난류의 변동 경향과 밀접한 관련이 있는 것으로 생각된다. Fig. 6을 보면 쓰시마난류 분포역의 확장 정도에 따른 극전선의 위치 변화를 알 수 있다. Fig. 6은 쓰시마난류가 동해 중앙부로 확장하여 흐르는 경우와 일본 연안에 근접하여 분포할 때 극전선과 10°C 등온선의 분포 형태이다. Fig. 6(a)에서는 Fig. 6(b)에 비해 고온수가 분포하

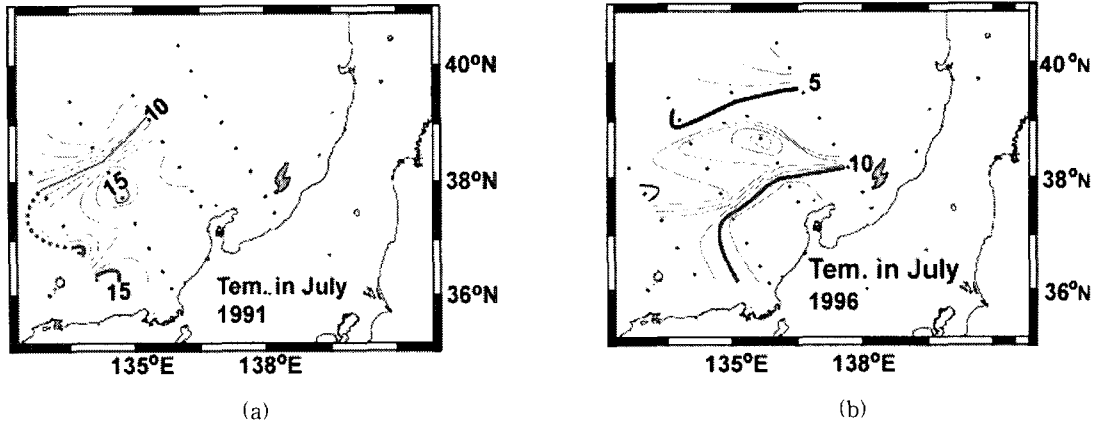


Fig. 6. Horizontal distribution of temperature (°C) at 100m in July, 1991 (a) and 1996 (b).

며 10°C 등온선이 더 북쪽에 위치한다. 그리고 5 - 6°C 사이의 극전선의 위치가 Fig. 6(b)에서는 존재하지만, Fig. 6(a)에서는 더 북쪽에 위치한다.

쓰시마난류 북상 한계지표수온의 월별 평균 위치의 변동을 보면, 쓰시마난류가 각 분지로 분리되어 이동하는 대한해협과 Noto 반도 사이에서는 크게 나타나며 각 분지들이 다시 합류하는 Noto 반도와 쓰가루 해협 사이에서는 변동폭이 작게 나타난다. 동해에서 쓰시마난류 분지의 운동과 관련하여 동해 남부 해역에서 일본 연안을 따라 이동하는 쓰시마난류 분지의 이동경로가 일정하지 않으며¹⁴⁾, 계절별로 쓰시마난류의 분지 형태가 다르게 나타나는¹²⁾ 것으로 설명하고 있다. 이러한 이유 등으로 인해 대한해협과 Noto 반도 사이의 해역에서는 쓰시마난류의 변동이 크게 나타나며 이것은 극전선의 공간적인 변화에도 영향을 끼치는 것으로 생각된다.

본 연구는 극전선의 변동을 파악하기 위해서 쓰시마난류의 세력변동을 중심으로 분석하였다. 그러나 동해에서 형성되는 극전선은 쓰시마난류의 변동뿐만 아니라, 한류수역의 변동과도 밀접한 관계가 있을 것으로 생각된다. 따라서, 해양관측자료의 확보를 통해 극전선 북쪽 해역에 대한 정밀 분석과 함께 계절풍의 영향과 같은 기상학적인 인자의 영향에 대한 분석이 지속적으로 진행되어야 할 것으로 생각된다.

5. 결론

동해에서 일본기상청의 관측 자료를 이용하여 극전선의 변동에 대하여 살펴보았다. 극전선의 변동요인으로는 기상 및 해양학적인 인자들의 복합적인 작용을 들 수가 있다. 본 연구에서는 동해해황 변동의 중요한 인자로 작용하는 쓰시마난류의 영향을 고려하여 극전선의 변동을 알아보려고 하였다.

동해에서 극전선의 변동은 쓰시마난류의 변동 형태와 밀접한 관련성이 있는 것으로 나타났다. 쓰시마난류의 세기가 강한 (분포역이 넓어지는) 경우 극전선의 위치는 북상하게되며, 쓰시마난류의 세기가 약한(일본 연안에 치우쳐 분포) 경우에는 극전선의 위치가 남하하는 것으로 나타났다. 그리고 쓰시마난류의 변동이 큰 해역 동해 남서부 해역에서는 극전선의 변동폭이 크게 나타났으며, 쓰시마난류의 변동이 작은 Noto반도와 쓰가루해협 사이에서는 극전선의 변동폭 또한 작게 나타났다.

현재 동해에서 정기적으로 진행되고 있는 해양관측은 한국의 동해 연안 (국립수산과학원)과 극전선 남쪽인 동해 남부 해역 그리고 쓰가루-쓰야해협을 잇는 연안역(일본기상청)에 집중되어 있다. 본 연구에서는 이러한 관측 해역 및 자료의 제한성을 다소 극복하기 위하여 위·경도 1°격자별 평균 자료와 Noto 반도를 중심으로 한 주변 해역에서 정기적으로 관측된 자료를 이용하였다. 따라서 동해 전역에 대한 극전선의 시·공간적인 변동 경향을 분석하기 위해서는 현장 관측 자료 및 인공위성을 이용한 자료를 보완하여 지속적으로 연구할 필요가 있는 것으로 생각된다.

감사의 글

이 연구는 2002년도 해양수산개발원의 수산특정연구개발사업 “위성원격탐사기술을 활용한 어장변동 및 예측에 관한 연구”의 일부 지원에 의해 한국과학재단 지정 우수공학연구 센터인 위성정보과학연구소에서 수행하였습니다.

참고 문헌

- 1) Minami, H., Y. Hashimoto, Y. Konishi and H.

- Daimon, 1987, Statistical feature of the oceanographic condition in the Japan Sea, Umi to Sora, 62(4), 163-175(in Japanese).
- 2) 최용규, 양성기, 조규대, 이재철, 홍철훈, 1993, 동해고유수의 생성가능해역 I, 극전선에 의한 해역구분, 한국환경과학회지, 2(1), 27-42.
 - 3) Kolpack, R.L., 1982, Temperature and salinity changes in the Tsushima Current, La mer, 20, 199-209.
 - 4) Yanagi, T., 1987, Classification of "siome", streaks and fronts, J. Oceanogr. Soc., Japan, 43, 149-158.
 - 5) Isoda, Y., S. Saito and M. Mihara, 1991, SST structure of the polar front in the Japan Sea. in oceanography of Asian Marginal Seas. ed. K. Takano, Elsevier Oceanography Series, 54, 103-112.
 - 6) Uda, M., 1934, Hydrological studies based on simultaneous oceanographical survey made in the Japan Sea and its adjacent waters during May and June, 1932, Imper. Fish. Exper. Stat., Records of Oceanographic Works in Japan VI, 19-107pp.
 - 7) Kitani, K. and M. Uda, 1969, Variability of the deep cold water in the Japan Sea - Particularly on the abnormal cooling in 1963, J. Oceanogr. Soc. Japan, 25(1), 10-20.
 - 8) Toba, Y., K. Tomizawa, Y. Kurasawa and K. Hanawa, 1982, Seasonal and year to year variability of the Tsushima-Tsugaru Warm Current system with its possible cause, La mer, 20, 41-51.
 - 9) 김호균, 2001, 대한해협에서 해류의 분포와 변동. 부경대학교 대학원 박사학위논문, 94pp.
 - 10) 이충일, 2003, 동해의 쓰시마난류 변동과 해류순환과의 관계, 부경대학교 대학원 박사학위논문, 93pp.
 - 11) Ogawa, Y.H., 1971, The oceanographic condition of the westsouthern area of the Japan Sea, Yamaguchi Gaikai Fish. Exa. Stn., 1-42pp(in Japanese).
 - 12) Kawabe, M., 1982, Branching of the Tsushima Current in the Japan Sea- part I. Data analysis, J. Oceanogr., 38, 95-107.
 - 13) Hong, C.H. and K.D. Cho, 1983, The northern boundary of the Tsushima Current and its fluctuation, J. Oceanol. Soc. Korea, 18(1), 1-9.
 - 14) Hideaki, H., J.H. Yoon and W. Koterayama, 1999, The path of the Tsushima Current along the Japanese coast, J. Oceanogr., 55, 217-235.