

동해고유수의 생성가능해역

I. 극전선에 의한 해역구분

최용규 · 양성기* · 조규대 · 이재철 · 홍철훈**

부산수산대학교 해양학과 · 제주대학교 해양토목과
통영수산전문대학 해양토목과
(1993년 3월 10일 접수)

Possible Formation Area of the Japan Sea Proper Water

I. Subareas by the Polar Front

Yong-Kyu Choi, Sung-Kee Yang*,
Kyu-Dae Cho, Jae-Chul Lee and Chol-Hoon Hong**

Department of Oceanography, National Fisheries University of Pusan, Pusan, 608-737, Korea

**Department of Ocean Civil Engineering, Cheju National University, Cheju, 690-121, Korea*

***Department of Ocean Civil Engineering, Tong-Yeoung National Fisheries Technical*

College, Chungmu, 650-160, Korea

(Manuscript received 10 March 1993)

Abstract

Based on the Results of Marine Meteorological and Oceanographical Observations during 1966~1987 and the Ten-day Marine Report during 1970~1989 by Japan Meteorological Agency, the possible area where the Japan Sea Proper Water (JSPW) can be formed is investigated by analyzing the distribution of water types in the Japan Sea.

The Japan Sea can be divided into three subareas of Northern Cold Water(NCW), Polar Front(PF) and Tsushima Warm Current (TWC) by the Polar Front identified by a 6°C isothermal line at the sea surface in winter. Mean position of the Polar Front is approximately parallel to the latitude 39~40°N.

The standard deviation of the Polar Front from the mean position of about 130km width is the smallest in the region between 136°E and 138°E where the Polar Front is very stable, because the branches of the Tsushima Current are converging in this region. However, standard deviations are about 180~250km near the Korean peninsula and the Tsugaru Strait due to greater variability of warm currents.

In the NCW area north of 40°30'N and west of 138°E, the water types of the sea surface to the 100m depth are similar to those of the JSPW. This fact indicates that the surface layer of the NCW area is the possible region of the JSPW formation in winter.

Key words : Japan Sea Proper Water, Polar Front, water type

1. 서 론

동해에는 쓰시마 난류의 분지류인 동한난류가

서안경계류의 특성을 나타내고, 북쪽에는 저온저염수인 북한한류가 있다. 이들 두 수괴의 경계역에는 극전선이 위치하고 있고, 특히 동해 북부의 한류역에는 겨울철 냉각으로 인해 심층수가 생성

되는 곳이기도 하여 해양 특성으로 보아 동해는 대양의 축소형이라고 할 수 있다.

전선은 성질이 서로 다른 두 수괴의 수렴역으로, 전선역의 해황은 변동이 커서, 불안정하고 규모가 다양한 사행과 와류가 발생된다. 이러한 전선역의 표면에는 부유물의 집적과 한·난류성 어족의 서식 범위가 제한되기도 하여 어획 능률이 향상되기 때문에 좋은 어장을 형성하는 경우가 많다. Uda (1938)에 의해 처음 제시된 전선은 해면에서의 수렴선으로, 거품과 여러 종류의 부유물이 해면상에서 좁고 긴 띠모양으로 나타나는 것으로 이를 '潮目(Siome)'이라고 불렀다. Yanagi(1987)는 이 潮目を, 같은 특성을 갖는 한 수괴내에서의 수렴을 'Streak'이라 하였고, 서로 다른 특성을 갖는 두 수괴의 수렴을 'Front'라고 하였다. 그리고 표층수는 이러한 두 종류의 潮目を 따라서 끊임없이 수렴하여 침강한다고 하였다.

동해에서 나타나는 극전선은 북쪽의 저온저염한 한류계수와 남쪽의 고온고염한 쓰시마 난류계수가 서로 만나는 동해 중부 해역의 경계역에서 형성된다. 이 경계역에서는 성질이 서로 다른 두 표층수가 서로 상접하므로써 사행과 와류가 뚜렷하다 (Kolpack, 1982). 이러한 동해의 전선에 대해서, Uda(1936)는 고온고염수와 34.1‰이하의 냉수와의 경계역이 동해의 극전선과 일치한다고 하였고, Hata(1962)는 수심 50m의 6°C 등온선을 한·난류계의 경계역의 지표 수온으로 보았다. 그리고 Kitani and Uda(1969)는 수심 200m의 5°C 등온선을 냉수역과 난수역의 경계인 극전선의 지표 수온으로 보았고, Minami et al.(1987)은 동해의 겨울철 표면에서 3~5°C 등온선이 위치하는 위도 40° N을 극전선역이라고 정의하고 있다.

이와같이 동해에서의 극전선은 아열대수(Subtropical Water)와 아극대수(Subarctic Water)의 경계로 설명되고 있으며(Isoda et al., 1991), 이러한 극전선의 평균 위치를 보면, 한국 동해안에서 쓰가루해협(Tsugaru Strait)이나 혹은 소야해협(Soya Strait)으로 이어져 있다. 극전선이 소야해협에 까지 이르는 경우에는 사행이 나타나나, 이 극전선이 쓰가루해협에 이르는 경우에는 위도와 난란함을 알 수 있다(Fig.1).

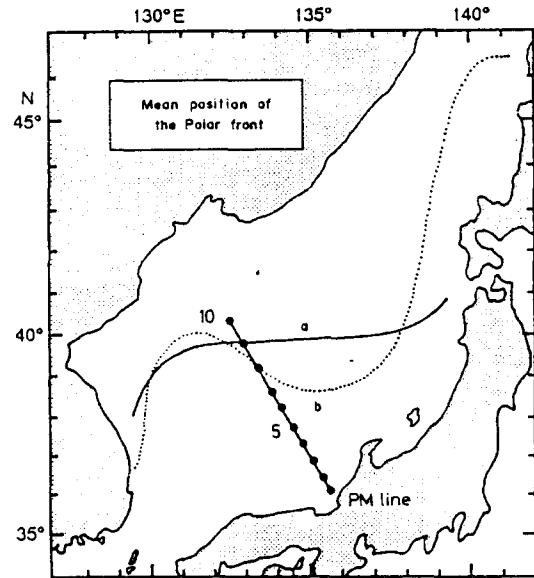


Fig. 1. Mean positions of the Polar Front in the Japan Sea(after (a) 和達 and (b) 宮崎). The solid line connected with solid circle indicates PM line observed by Maizuru Marine Observatory of the Japan Meteorological Agency.

그러나 위와같은 연구들은 수온이나 염분 혹은 용존산소의 특성 분포도로 부터 극전선을 유추한 결과이며, 아직 동해의 극전선에 대해서 그 평균적인 위치나 분포 범위를 보다 구체적으로 나타낸 조사 결과는 거의 없다고 생각된다.

한편, 겨울철 동해의 해황은 표면 냉각에 의한 연직 혼합으로 인하여 100m 이천에서의 수온, 염분, 용존산소의 특성은 연직적으로 유사한 분포를 보이고 있으며(Minami et al., 1987), 대한해협을 통해 동해로 유입되는 쓰시마 난류수도 겨울에는 거의 균질수로 형성되어 있다(Ogawa, 1983). 따라서 겨울철 냉각기 동안의 동해는 연직혼합으로 인해 표면 수온만으로도 해황 특성을 쉽게 파악할 수 있으리라 생각된다.

그러므로 본 연구에서는 표면 수온 자료로서 겨울철 동해에 나타나는 극전선을 파악하여, 정량적인 전선의 지표가 될 수 있는 등온선을 찾으려고 하였으며, 그 위치 및 누년변동에 대해서도 살펴 보았다. 그 결과 겨울철 동해 극전선의 평균적인

위치에 의해서 해역을 구분하여, 동해 고유수의 생성 가능 해역의 범위가 어디인지를 표층의 수형군의 분포로서 검토해 보았다. 본 연구에서는 극전선을 수온 분포의 특성으로 부터 우선 분석하였으므로 편의상 열전선이라는 용어를 사용하였다.

2. 자료 및 방법

본 연구에서는 일본해구수산연구소(日本海區水産研究所) 발행의 '일본해에 있어서 수온의 평균상'의 자료를 사용하였다. 이 자료는 1953년부터 1980년까지 동해에서 조사된 해양 관측 자료를 위도 및 경도 각 0.5° 격자별로 구분하여, 각 수층별 월별 평균 수온과 그 표준 편차를 계산해 놓은 것이다. 그리고 일본기상청(日本氣象廳) 발행의 해양기상관측자료(1973~1987)와 북서태평양 순별 표면 수온 자료(1970~1989)중 2월 하순의 것을 사용하였다. 북서태평양 순별 표면 수온 자료 중에서 2월 하순의 것만 사용한 이유는, 일본 기상청의 겨울철 동해 해양 관측 조사가 대체로 2월 중순~3월 초순에 행하여 지기 때문에, 이 관측 기간중의 중간에 해당되는 2월 하순의 순별 표면 수온 자료를 사용하였다.

자료의 해석 방법으로서 '일본해에 있어서 수온의 평균상'의 자료를 사용하여, 동해의 위도 및 경도의 0.5° 격자별 월별 평균 수온으로서 수온수평구배(horizontal temperature gradient, ΔT)를 계산하였다.

그리고, 2월 하순의 북서태평양 순별 표면 수온 자료를 사용하여 동해에 속하는 위도 35~45°N과 경도 128~140°E 범위의 연구 해역내에서 위도 및 경도를 각 0.5° 격자별로 구분하였다. 열전선의 위치는 경도를 0.5° 씩의 경도대(meridional belt)로 나누어 이 대(belt)내에서 위도 0.5° 사이의 남북 방향의 등온선이 3개 이상 포함된 격자 중 가장 많은 곳을 수온 증가 최대(ΔT maximum)라 하고 열전선의 위치로 정의하였다. 수온 증가 최대가 격자 경계에 위치할 경우에는 그 중 가장 북쪽에 위치한 격자를 선택하였다.

이와 같이 정의된 열전선에서의 해황을 살펴보기 위해서, 일본 연안에서 연해주쪽을 향해 관측

되는 일본 기상청의 정선 PM(Fig.1)에서의 수온, 염분, thermosteric anomaly 및 용존산소의 분포 특성을 단면도로서 나타내었다. 그리고 극전선역에 의해 분리되는 각 해역의 수형군의 분포 범위를 T-S도로서 살펴 보았다. 이것은 동해고유수(Japan Sea Proper Water)의 특성치의 분포 범위가 수온은 0~1°C 이고, 염분은 34.0~34.1‰(Uda, 1934)이므로, 이러한 수형군이 어느 해역의 표층에 분포하는가를 살펴서 동해고유수의 생성 가능 해역을 보다 명확히 하기 위해서 이다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 극전선의 지표수온

동해에서 나타나는 극전선은 북쪽의 저온저염한 한류계수와 남쪽의 고온고염한 쓰시마 난류계수가 서로 만나는 동해 중부 해역의 경계역에서 형성되며, 이 경계역에서는 성질이 서로 다른 두 표층수 간의 상호 작용으로 인하여 사행과 와류가 뚜렷하다(Kolpack, 1982). 또한 Minami et al.(1987)은 위도 40°N지역을 경계로 하여 그 이북의 한류역과 그 이남의 쓰시마 난류역으로 구분하여 동해의 평균적인 해황을 설명하고 있다.

Fig. 2는 1970~1989년까지 2월 하순의 서북태평양 순별 해면수온 자료를 이용하여 위도 35°~45°N, 경도 128°~140°E사이의 연구 해역내의 격자 내에서 수온 수평 구배 최대치(ΔT maximum)가 나타난 격자의 빈도수를 Fig. 2a에, 그리고 Fig. 2a의 수온 수평 구배 최대치역과 그 분포역이 가장 유사한 등온선인 6°C 등온선이 포함된 격자의 빈도수를 Fig. 2b에 각각 나타내었다. 이 그림에서 빈도수의 간격이 1, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35회인 각각의 등치선은 실선으로 표시하였다.

ΔT maximum 및 6°C 등온선의 최대 빈도가 나타나는 격자의 위치는 위도 39°30'~40°30'N과 경도 138°~139°E사이의 지역에서 10~35회까지로 가장 많다. 특히 6°C 등온선의 경우(Fig. 2b), 위도 39°~41°N과 경도 135°~139°E사이의 쓰가루 해협(Tsugaru Strait)과 노토반도(Noto Peninsula)를 직선으로 이은 선의 중앙부의 약간 북쪽 부분에 6°C 등온선이 20~35회로 집중적으로 분포하고 있

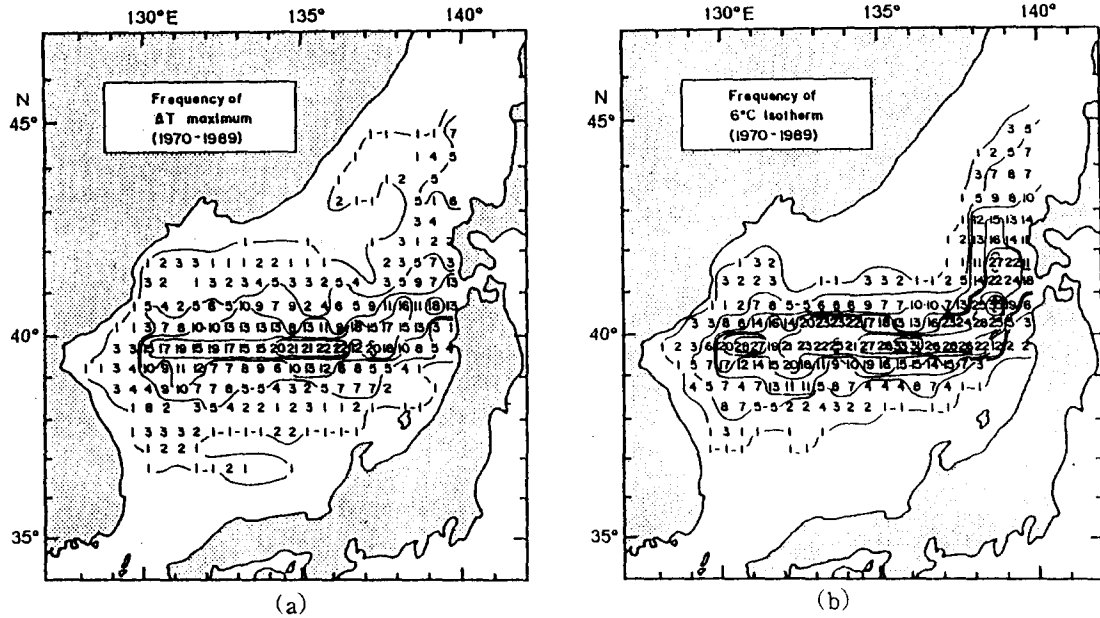


Fig. 2. Frequency distributions of (a) ΔT maximum and (b) 6°C isotherm with $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ rectangular in February during 1970~1989. Lines denote the isopleth of the frequency with interval by 1, 5, 10, 15, 20, 25, 30, respectively.

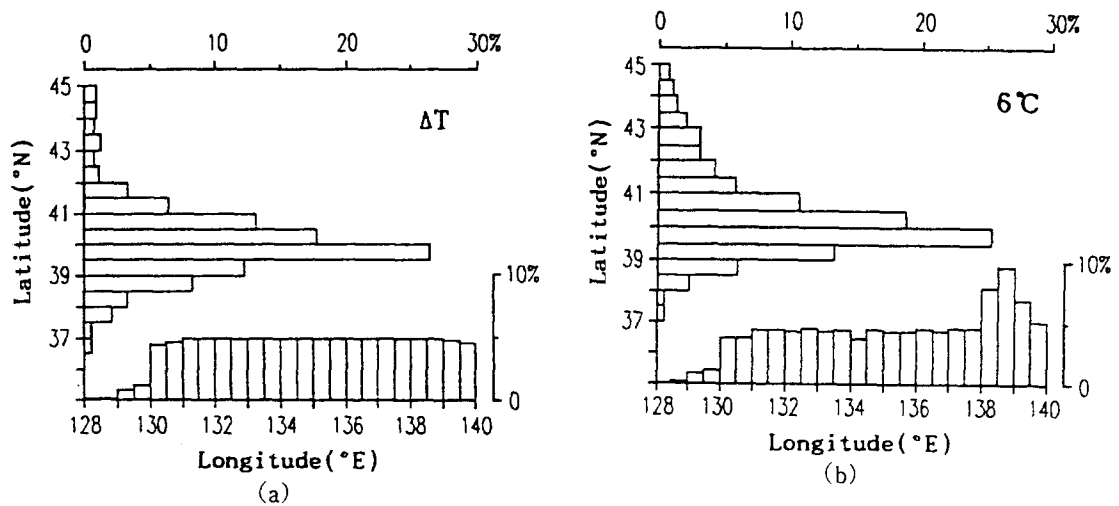


Fig. 3. Histograms of (a) ΔT maximum and (b) 6°C isotherm with latitude and longitude by 0.5° .

다. 이와 같은 경향은 ΔT maximum의 빈도 분포 (Fig. 2a)에서도 거의 유사하다. 이 지역은 동해로 들어온 쓰시마 난류가 모이는 해역이며, 또한 쓰시마 난류수의 대부분이 북서태평양으로 유출되는 쓰가루 해협의 바로 입구역이기도 하다(Hata, 19

62; Isoda et al., 1991). 그리고 동해의 동서로 뻗어 있는 수온 수평구배의 최대 빈도 출현역을 중심으로 하여 한국 동해 연안역이나 북쪽의 연해주역이나 남쪽의 일본의 혼슈(Honshu) 연안쪽으로 갈수록 그 출현 빈도수는 점점 작아져서 5회 이하

이거나 나타나지 않는 해역도 있다. 또한 6°C 등온선의 최대 빈도역과 ΔT maximum의 최대 빈도역이 거의 유사하게 분포되어 있음을 알 수 있다. 그러므로 열전선을 잘 대표하는 지표 등수온선은 6°C 등온선이라고 할 수 있다.

Fig. 3은 ΔT maximum과 6°C 등온선이 어느 위도에 위치하는 가를 알아보기 위하여, 즉 극전선의 위치를 알아보기 위하여 위도 및 경도 각 0.5° 별로 구분하여 ΔT maximum(Fig. 3a)과 6°C 등온선(Fig. 3b)의 빈도분포를 histogram으로 표시한 것이다.

ΔT maximum의 경우(Fig. 3a), 최빈치(mode)는 위도 39°30'N~40°N에서 나타나고 있으며, 6°C 등온선의 경우(Fig. 3b)도 ΔT maximum과 같은 분포 양상을 나타내고 있다. 여기서, 경도선상에서 ΔT maximum의 빈도가 모두 5% 이하로 일정한 것은 극전선이 등위도상에 동서 방향으로 고루 분포하고 있기 때문이다. 이와 같이 ΔT maximum 혹은 6°C 등온선의 빈도는 위도 39°30'~40°30'N 사이에서 전체 위도별 빈도의 약 50% 이상을 나타내고 있고, 경도 138°~139°E 사이에서 전체 경도별 빈도의 약 18% 이상을 나타내고 있어, 다른 지역 보다도 이 위도 및 경도 상에 집중되어 분포하고 있음을 알 수 있다.

이와 같이 동해에서는 ΔT maximum 및 6°C 등온선의 최대 빈도가 나타나는 위도 39°30'~40°30'N 및 경도 138°~139°E(위도 39°30'N 이북)에 포함되는 해역을 전선대역으로 하여, 그 이북의 한류 지역과 그 이남의 쓰시마 난류 지역으로, 크게 3해역으로 구분할 수 있다. 이 전선대역은 Kawai(1972)가 북서태평양에서 설명한 혼란수역(perturbed area)과 같은 해역이라고 생각된다.

위의 결과를 더 자세히 보기 위해 1973~1976년 까지의 2월에 있어서, Fig. 1에 표시한 PM 정선에 따른 평균 수온의 수평 및 연직 분포도를 Fig. 4a에, 그리고 그 표준 편차의 수평 및 연직 분포도를 Fig. 4b에 각각 나타내었다. 여기서 1973~1976년 까지 4개년만을 택한 것은 이 기간 동안에 정점 조사 및 정점 사이의 XBT관측이 하나도 빠짐없이 균일하게 행하여져서, 자료를 비교 및 검토하기에 가장 적당했기 때문이다. PM정선에 따른 수온의 수평 구배는 정점 PM 8과 정점 PM 10 사이에서 약 0.064°C/km로 가장 크게 나타나고, 또한 표준 편차도 이들 정점사이에 위치한 정점 PM 9에서 약 3°C로 가장 높게 나타나고 있다. 이것으로 2월에 있어서의 열전선은 정점 PM 9를 중심으로 형성되고 있음을 알 수 있다.

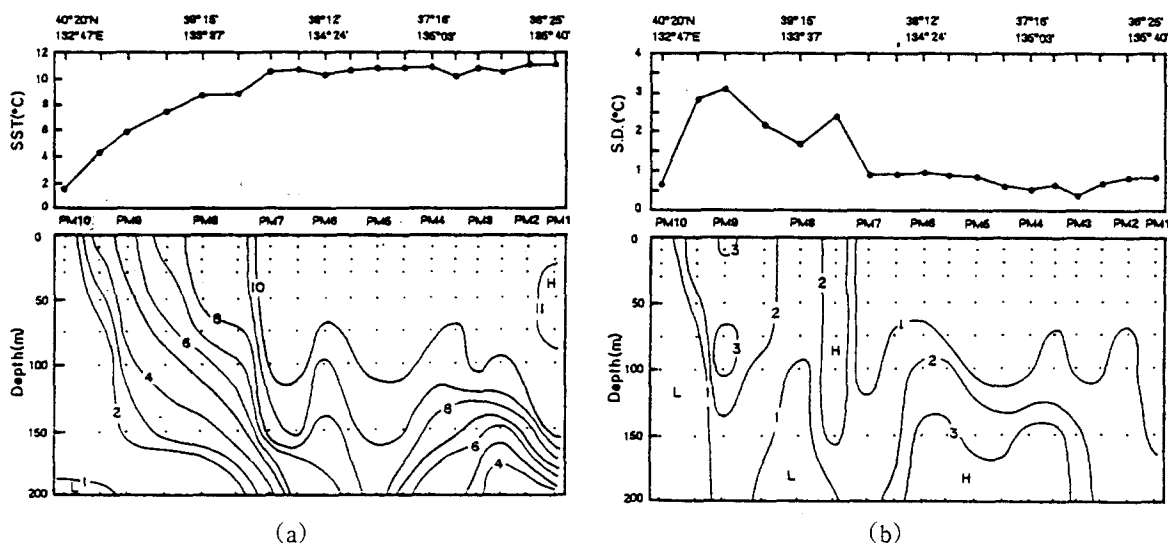


Fig. 4. Horizontal(upper) and vertical(lower) distributions of (a) mean temperature and (b) its standard deviation along the PM line in February during 1973~1976.

Fig. 5는 Fig. 4와 같은 방법으로 하여, 염분에 대해 나타낸 것으로, PM 정선에 따른 1973~1976년까지의 평균 염분의 수평 및 연직 분포도를 Fig. 5a에, 그리고 그 표준 편차의 수평 및 연직 분포도를 Fig. 5b에 나타내었다. 염분의 수평 구배는 정점 PM 8과 정점 PM 10사이에서 약 $0.001\%/\text{km}$ 로 가장 크다. 그러나 염분의 표준 편차는 열전선이 나타나는 정점 PM 9에서는 0.5% 이하로 정점 PM 10의 외양과 정점 PM 1의 연안의 0.5% 이상에 비해서 작다. 위와 같이 열전선이 형성되는 정점 PM 9에서 염분의 변동이 작은 것으로 보아 뚜렷한 염분 전선은 나타나지 않는다고 할 수 있다.

겨울철 동해에 있어서 깊이 100m이전은 연직 혼합때문에 해수의 수온, 염분, 용존산소의 특징이 연직적으로 유사한 분포를 보이며, 수평적으로 염분분포를 보면, 40°N 이북의 한류역에서는 염분이 34.1% 이하이고, 쓰시마 난류역에서는 염분이 34.

$1\sim 34.5\%$ 이다(Minami et al., 1987). 또한 대한 해협을 통해 동해로 유입되는 쓰시마 난류수도 겨울철에는 거의 균질수로 형성되어 있으며, 쓰시마 난류가 유입되는 동해 입구역인 대한 해협역에서의 $34.3\sim 34.5\%$ 의 일부 고염분 지역을 제외하고는, 겨울철 동해에서의 수평적인 염분분포는 큰 차이가 없이 거의 균질하다(Ogawa, 1981, 1983). 여름철에는 동중국해로 부터 유입되는 담수가 해표면을 얇은층으로 덮고 있기 때문에 표층과 그 하층 사이에는 뚜렷한 염분차가 있으나, 가을 이후의 수온 하강기에는 대륙극기단에 의해서 표면에서의 증발이 강화되고 기온 강하로 인한 상하층간의 대류 현상으로 인하여 잘 혼합되기 때문에 균질한 염분을 갖게 된다. 그러므로 동해의 열전선은 뚜렷한 염분전선을 동반하지 않는 것이라고 생각된다. 그리고 염분의 변동이 열전선역에서 보다는

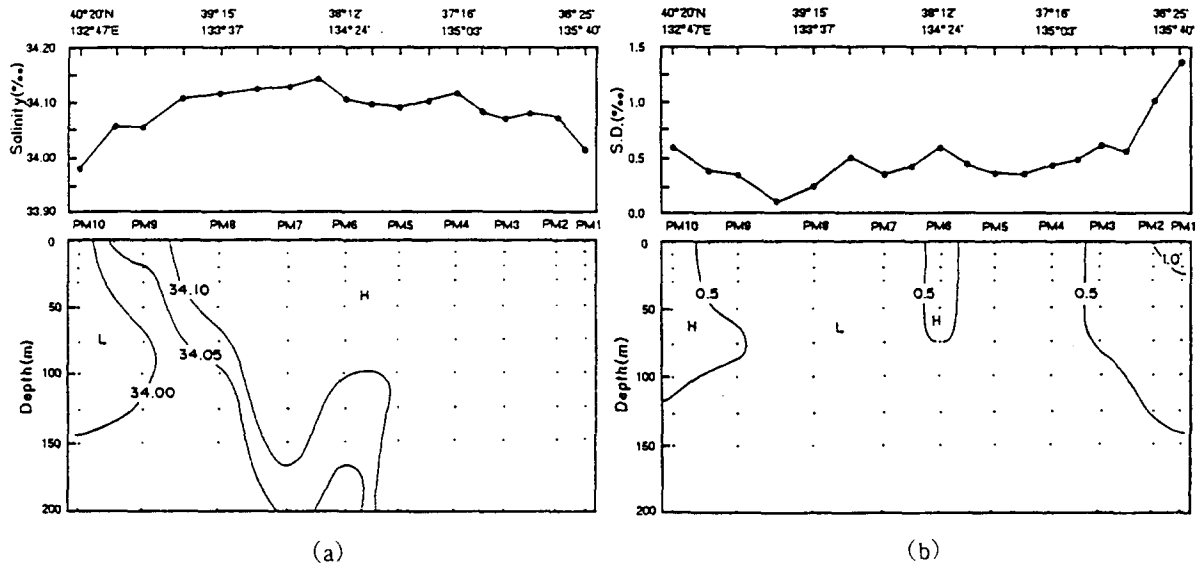


Fig. 5. Horizontal(upper) and vertical(lower) distributions of (a) mean salinity and (b) its standard deviation along the PM line in February during 1973~1976.

오히려 연안역에서 크게 나타나는 것은, Kano(1980)가 설명한 일본 혼슈(Honshu)연안역에서의 저염수의 소장에 기인하기 때문이라는 것과 같은 현상때문이라고 생각된다.

Fig. 6은 Fig. 4와 같은 방법으로 하여, 열염편차

(thermohaline anomaly)에 대하여 나타낸 것으로 평균 열염편차의 정선에 따른 수평 및 연직 분포도를 Fig. 6a에, 그리고 그 표준 편차의 수평 및 연직분포도를 Fig. 6b에 각각 나타내었다. 수온의 경우와 마찬가지로 정점 PM 8과 정점 PM 10에서

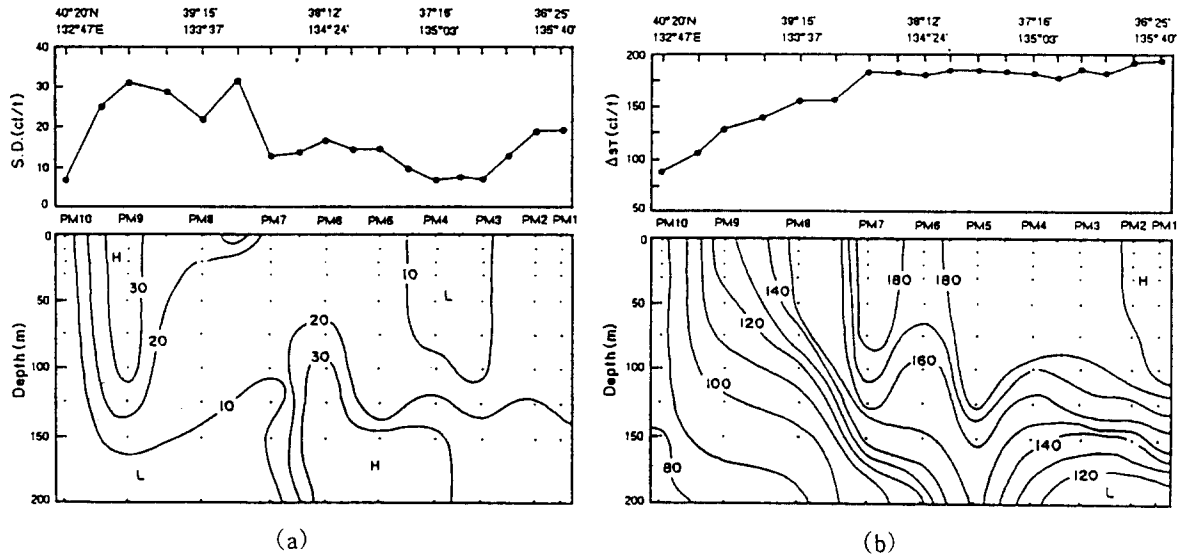


Fig. 6. Horizontal(upper) and vertical(lower) distributions of (a) mean thermosteric anomaly and (b) its standard deviation along the PM line in February during 1973~1976.

열염편차의 수평구배도 급격히 변하고 그 표준편차도 20~30 cl/t으로 가장 크다. 따라서 수온 전선이 나타나는 위도 30°~40°N사이의 정점 PM 9에서는 밀도 전선을 동반하고 있음을 알 수 있다. 이와 같이 겨울철의 동해는 수평적으로나 연직적으로 균질한 염분 분포보다는 고온의 특성을 나타

내는 쓰시마 난류수의 수온 분포에 의해 밀도가 크게 좌우됨으로 밀도 분포와 비슷한 양상을 띄고 있다.

Fig. 7은 Fig. 4와 같은 방법으로 하여, 용존산소에 대해 나타낸 것으로, 평균 용존산소의 PM 정선에 따른 수평 및 연직 분포도를 Fig. 7a에, 그리

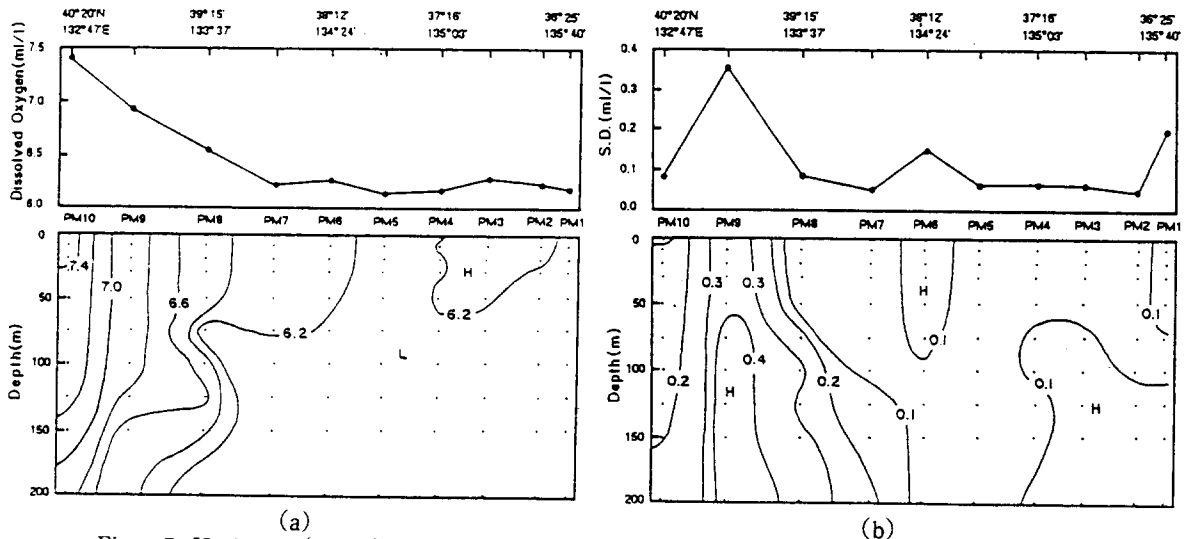


Fig. 7. Horizontal(upper) and vertical(lower) distributions of (a) mean oxygen and (b) its standard deviation along the PM line in February during 1973~1976.

고 그 표준 편차의 수평 및 연직 분포도를 Fig. 7 b에 각각 나타내었다. PM 정점에 따른 용존산소의 수평 구배는 정점 PM 7과 정점 PM 10 사이에서 가장 크며, 열전선이 나타나는 정점 PM 9에서 용존산소의 표준 편차가 약 0.38ml/l 로 가장 크게 나타나고 있다. 이와 같이 위도 $39^{\circ}\sim 40^{\circ}\text{N}$ 사이에 위치한 정점 PM 9에서 나타나는 열전선은 뚜렷한 염분 전선을 동반하지는 않으나, 이 열전선을 중심으로 북쪽의 저온저염이며 용존산소가 많은 북방 한류계수와 남쪽의 고온고염이며 용존산소가 적은 쓰시마 난류계수로 분리되고 있음을 알 수 있다(Fig. 4~7).

이상의 결과를 자세히 보기 위하여, 6°C 등온선의 평균 위치와 그 표준 편차를 Fig. 8에 나타내었다. 6°C 등온선의 평균 위치는 경도 $130^{\circ}\sim 137^{\circ}\text{E}$ 사이의 해역에서는 위도 $39^{\circ}\sim 40^{\circ}\text{N}$ 사이로 위도와

나란하지만, 경도 $137^{\circ}\sim 140^{\circ}\text{E}$ 사이의 해역에서는 일본 북해도 연안쪽으로 향해 굽어지고 있다. 또한 경도 $135^{\circ}\sim 137^{\circ}\text{E}$ 사이에서의 평균 위치의 편차 폭은 약 130km 로 가장 좁고, 경도 130°E 와 경도 140°E 근처에서의 평균 위치의 편차폭은 약 $180\sim 250\text{km}$ 로 가장 넓다. Isoda et al.(1991)의 설명과 같이 위치의 편차폭이 좁게 나타나는 해역은 대한 해협을 통해서 유입된 쓰시마 난류수가 북서태평양으로 유출되기 위해 쓰가루 해협의 입구역으로 모이는 해역이며, 위치의 편차폭이 넓게 나타나는 쓰가루 해협쪽에서는, 유출되지 못한 쓰시마 난류수의 일부가 북해도 연안을 따라 북쪽으로 흐르기 때문이라 생각된다. 이와 같이 동해에서 겨울철의 열전선은 6°C 등온선과 일치하고 있으며, 따라서 겨울철 동해에서 나타나는 열전선은 6°C 등온선을 표면 지표 수온으로 하여 나타나고 있음을 알 수 있다.

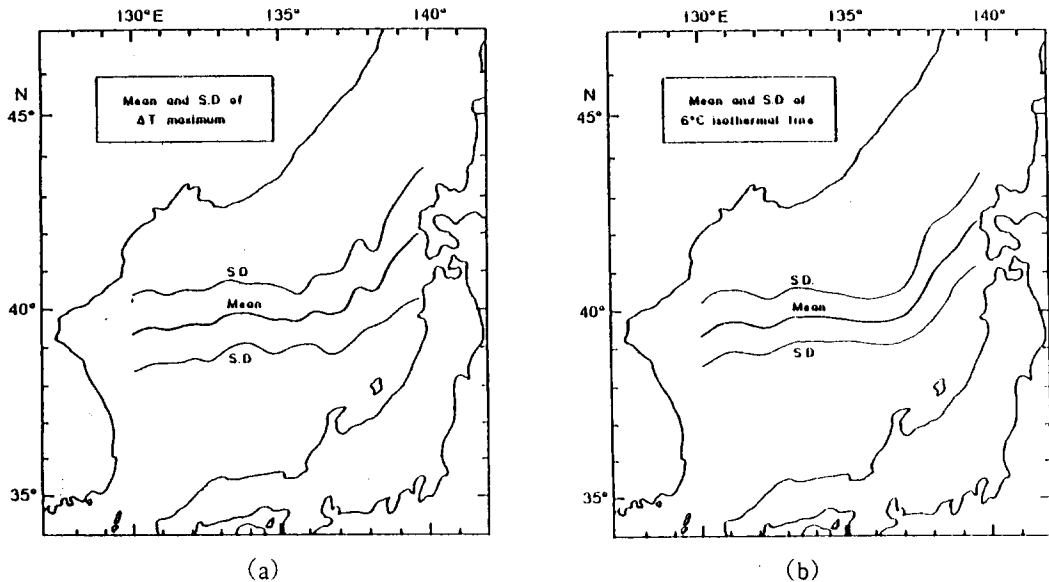


Fig. 8. Mean position and its standard deviation of 6°C isotherm in February during 1970~1989.

3.2. 극전선의 시공간적 변동

Fig. 9는 1970~1989년까지 2월 하순에 있어서 6°C 등온선의 영년변화를 보기 위해 5개년씩 분리하여 각각 나타낸 것이다. 여기서는 1970년대와

1980년대로 크게 구분하여 볼 수 있다. 1970~1974년에는 6°C 등온선이 쓰가루 해협을 지나 일본 북해도 서쪽 연안에까지 치우쳐 북상하고 있으며 또한 사행이나 요철이 크게 나타나고 있다. 그러나 6°C 등온선이 쓰가루 해협으로 이어지는 1980년대

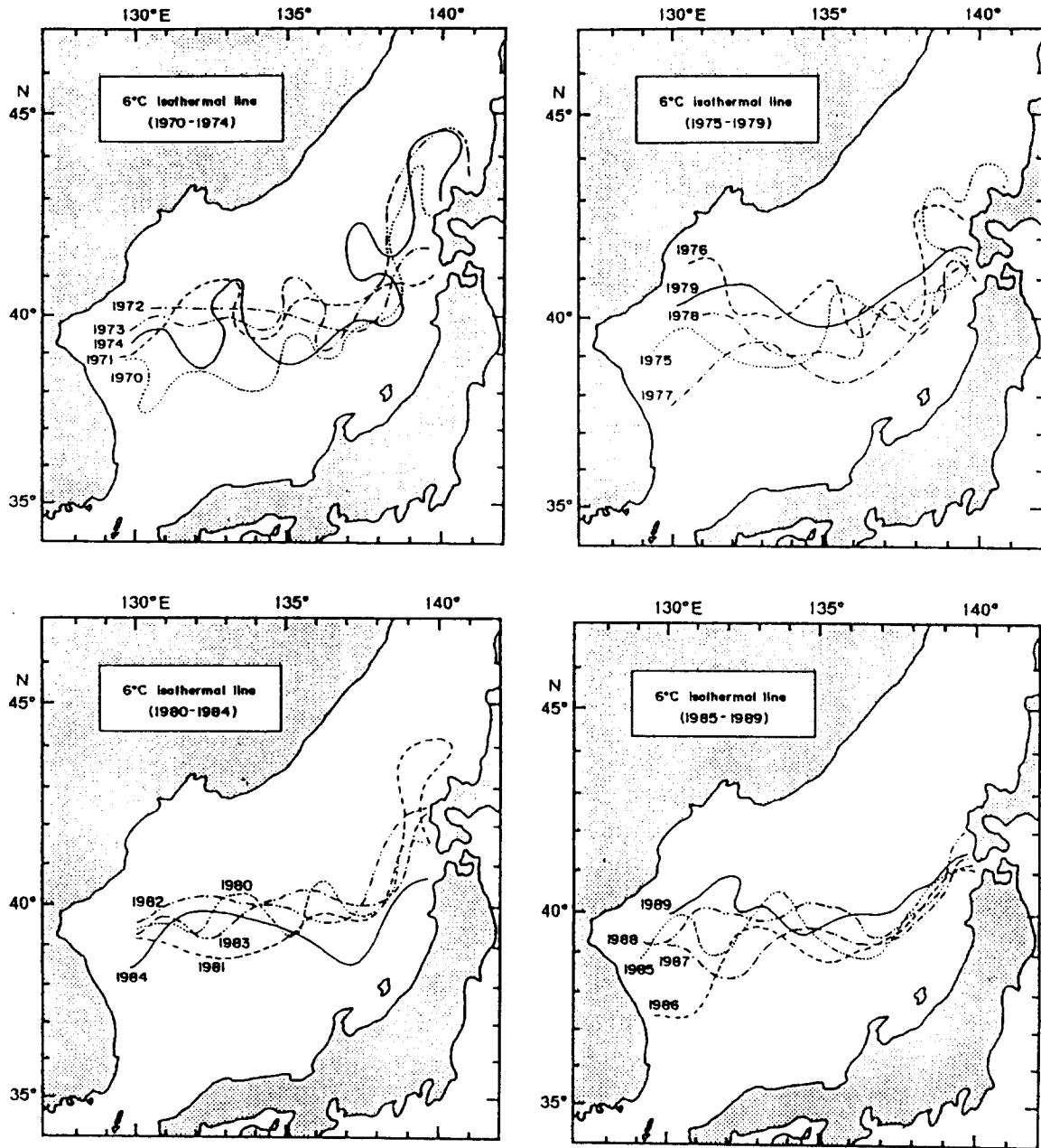


Fig. 9. Year to year variations of 6°C isotherm in February during 1970~1989.

의 경우에는 사행이나 요철이 그렇게 크지 않다. 이러한 동해에서의 극전선은 겨울에서 봄에 사행이 크게 나타나며(Isoda et al. 1991), 이와 같은 사행에 대해서 Yoon and Sugihara(1977)는 β 효과로 인한 불안정 vortices로 설명하고 있다. 이에

따라 열전선의 사행이 일정하지 않고 해에 따른 변동이 크다고 생각된다.

이와 같은 특성을 자세히 살펴보기 위해 6°C 등온선의 사행과 요철이 심하고 일본 북해도 연안에 까지 치우쳐 복잡한 해인 1973년과, 이와는 반대로

6°C 등온선의 사행과 요철이 비교적 크지 않고 쓰가루 해협으로 이어진 해인 1979년을 예로서 각각 Fig. 10a와 Fig. 10b에 각각 나타내었다. 이것은 200db를 기준으로 한 역학 심도이다. 여기서 보면, 사행과 요철이 심하지 않았던 1979년의 경우에는

쓰시마 난류가 연안경계류의 특성을 나타내면서 일본연안쪽에 근접하여 쓰가루 해협으로 곧 바로 유출이 되고 있음을 알 수 있다. 이것은 Hong and Cho(1983)가 설명한 것처럼, 쓰시마 난류가 한국 동해안 쪽으로 치우쳐 북상한 해에는 냉수와의 경

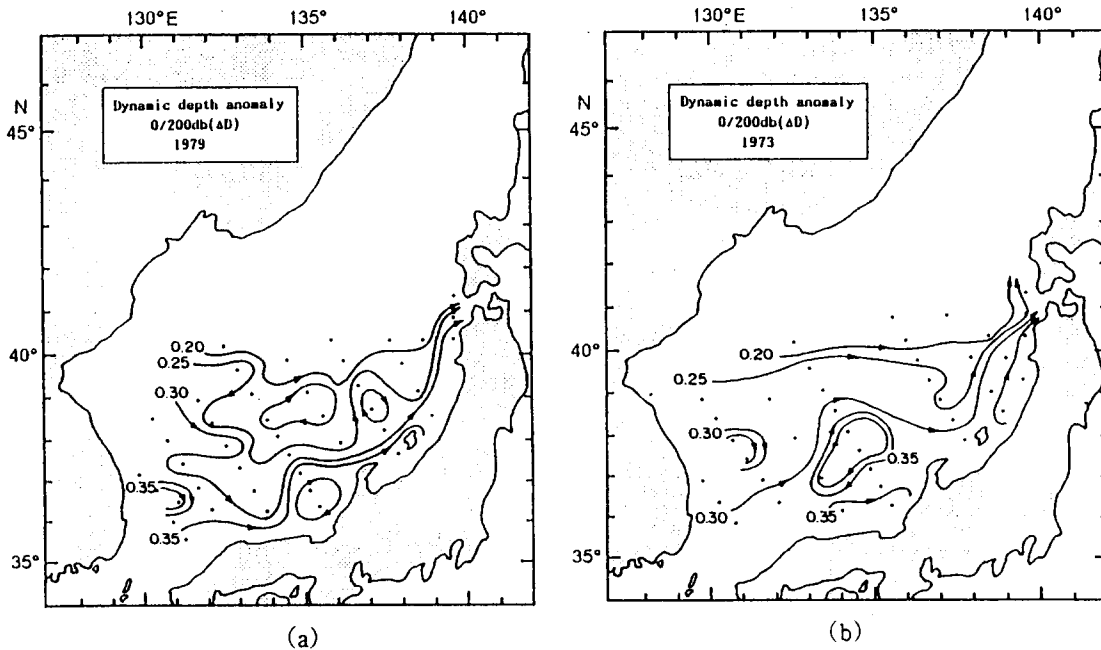


Fig. 10. Dynamic depth anomaly at the sea surface based on 200 db in (a) 1973 and (b) 1979.

계역에서 사행이 심하나, 일본연안쪽으로 주류가 북상한 해의 경우는 냉수와의 경계역이 남하하고 사행도 적다는 결과와 다소 상반된다. 위도 40°N 근처에서의 사행을 나타내는 역학심도(dynamic depth anomaly)의 등치선은 쓰시마 난류가 연안 경계류의 특성을 지니고 쓰가루 해협으로 바로 유출되는 1979년의 경우에 요철이 더 심하게 나타나고 있다. Hong and Cho(1983)는 여름철에 있어서 쓰시마 난류의 주축인 아표층하의 염분 최대층에서 연구한 결과이고, 여기서는 겨울철 표면에 대한 흐름이기 때문에 나타나는 불일치라고 생각된다.

Fig. 11은 PM 정선에서의 영년변화를 보기 위해 1973~1987년까지의 2월의 표면에 있어서 PM 정선에 따른 시간적 변화를 나타낸 것으로 수온에 대해서는 Fig. 11a에 염분에 대해서는 Fig. 11b에,

열염편차(thermosteric anomaly)에 대해서는 Fig. 11c에, 그리고 용존산소에 대해서는 Fig. 11d에 각각 나타내었다. 정점 PM 9에서의 수온 전선은 뚜렷하지만 염분 전선은 분명하지 않다. 그러나 밀도 전선은 수온 전선과 같은 형태로 유사하게 변화하고 있다. 1981년의 경우, 수온이 6°C 이하 이고 열염 편차가 130 cl/t 이하이며 용존산소가 6.5ml/l 이상인 한류수계가 다른해에 비해 많이 남하해 있다. 그러나 1978~1980년과 1982~1983년, 그리고 1986년의 경우, 수온이 10°C 이상이고 열염 편차가 180 cl/t 이상인 난류수계가 많이 북상하여 있다. 또한 열염 편차의 분포도는 수온의 분포도와 유사하다. 이와 같이 해에 따른 한류수계의 남하나 난류수계의 북상이 크게 변동하고 있음을 알 수 있다. 그러나 대체적으로 정점 PM 9 이북에서는 저

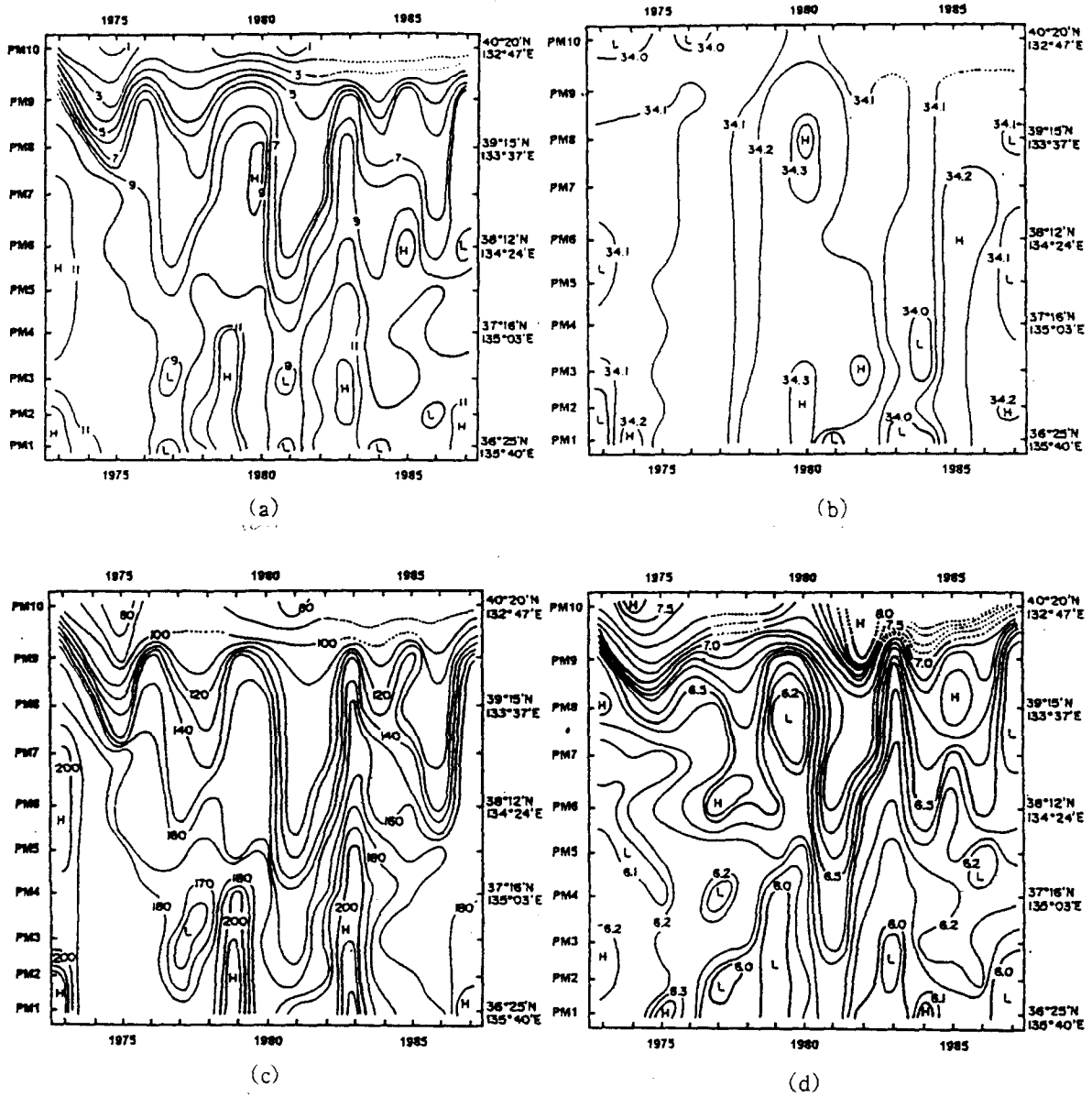


Fig. 11. Time sequences of (a) temperature, (b) salinity, (c) thermocline anomaly and (d) dissolved oxygen at the sea surface along the PM line in February during 1973~1987.

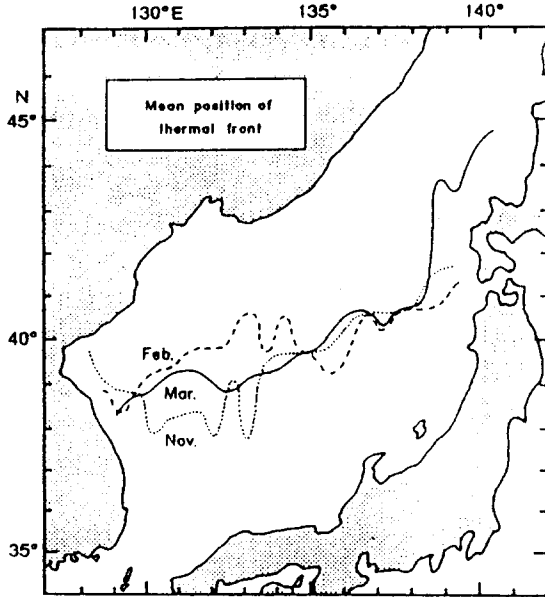
온저염이며 무거운 고용존산소인 한류수계가 나타나고 있으며, 그리고 점점 PM 8 이남에서는 고온고염이며 가벼운 빈용존산소인 난류수계가 분포하고 있음을 알 수 있다. 또한 수온이 6°C인 등온선과 용존산소가 6.5ml/l인 등량선의 변화가 거의 일치

하고 있다.

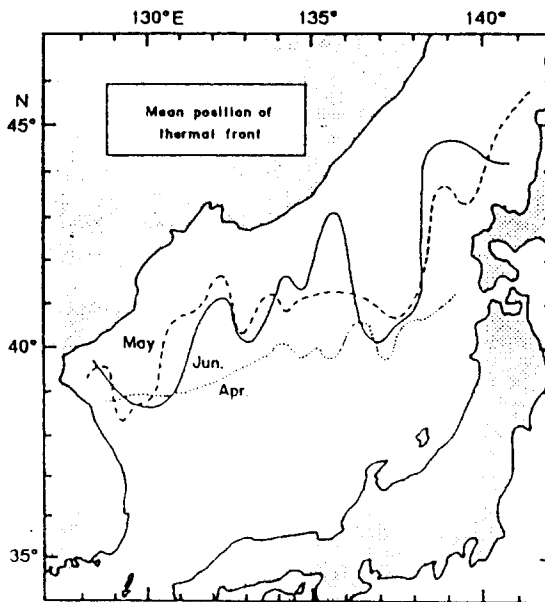
Kolpack(1982)은 북쪽의 저온 저염한 한류계수와 남쪽의 고온 고염한 쓰시마 난류수가 접하는 동해의 극전선역에서 나타나는 파동형태의 사행은 대한 해협을 통해 동해로 유입되는 쓰시마 난류수

의 세력소장에 영향을 받고 있다고 하였으며, Toba et al.(1982)은 대한 해협을 지나는 쓰시마 난류수의 수송량은 계절 및 영년변동이 크다고 하

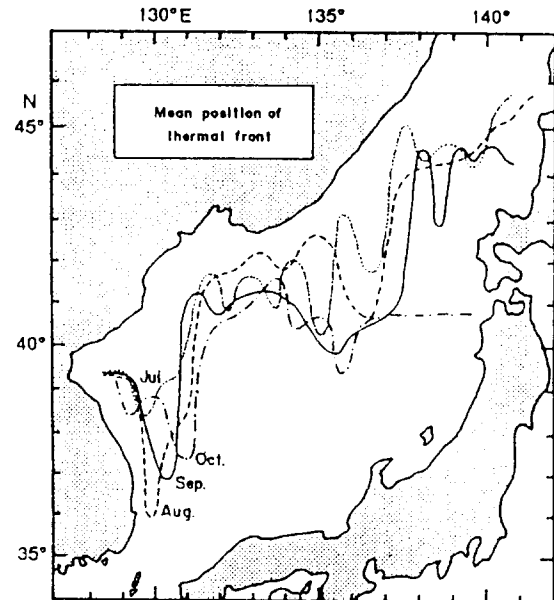
였다. 이처럼 극전선의 사행이나 요철은 쓰시마 난류수의 세력소장에 의해 그 영년 변동이 크다고 생각된다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 12. Monthly mean position of thermal front of (a) November~March, (b) April~June and (c) July~October in the Japan Sea during 1953~1980.

Fig. 12는 1953년부터 1980년까지 동해에서 조사된 해양 관측 자료를 위도 및 경도 각 0.5° 격자별로 구분하여, 각 수층별 월별 평균 수온과 그 표준 편차를 계산해 놓은 '일본해에 있어서 수온의 평균상'을 이용하여, 표면에 있어서 열전선의 월별 평균 위치를 나타낸 것이다. 여기서 열전선은 위도 및 경도 각 0.5° 격자별 수온수평구배(ΔT)를 구하여, 각 0.5° 씩의 경도대(Meridional belt)에서 남북방향으로 보았을 때, 수온구배가 최대값을 갖는 격자점들을 서로 연결한 것이다. 11월, 2월 그리고 3월의 열전선은 Fig. 12a에, 4월~6월은 Fig. 12b에, 그리고 7월~10월은 Fig. 12c에 각각 나타내었다. 12월과 1월은 자료의 부족으로 열전선을 파악할 수가 없었다.

겨울철의 열전선(Fig. 12a)은 여름철의 열전선(Fig. 12c)보다도 사행이나 요철이 비교적 심하지 않고, 또한 위도 $39\sim 40^\circ\text{N}$ 과 거의 나란하다. 또한

여름철(Fig. 12c)의 경우, 한국 동해남부 해역에서의 열전선은 월변화와 함께 점차 북동쪽으로 이동하고 있는 것이 특징이다. 열전선의 형성이 비교적 위도와 평행하게 나타나고 있는 계절은 여름보다는 겨울철임을 알 수 있다.

Fig. 13은 Fig. 12에서 나타난 열전선의 월별 평균 위치로부터, 이 열전선에 따른 각 격자내의 수온 수평 구배에 대한 평균과 그 범위를 나타낸 것이다. 겨울(2월)에 평균수온수평구배가 약 0.027°C/km로 최대값에 이르렀다가 서서히 감소하기 시작하여, 여름(8월)에 평균수온수평구배가 약 0.010°C/km로 최소값을 보이며 다시 증가하는 계절

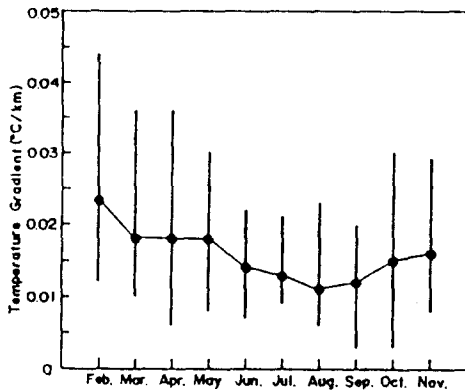


Fig. 13. Monthly mean temperature gradient and its ranges along the Polar Front during 1953~1980.

변화를 나타내고 있다. 평균 수온 수평 구배의 범위는 겨울(2월)이 0.012~0.044°C/km로 대체로 범위가 넓고, 여름(8월)이 0.005~0.023°C/km로 겨울보다 범위가 좁다. 이와 같이 겨울이 여름보다 평균 수온 수평 구배의 평균값이 크고, 그 범위가 넓다. 이것은 겨울이 여름보다 남북으로의 수온차가 크며, 또한 열전선은 겨울이 여름보다 더 뚜렷하다는 것을 보이고 있다.

여름보다 겨울에 극전선이 뚜렷하게 나타나고, 그 수온 구배의 범위가 여름보다 넓은 것은, 동해에서 여름보다는 겨울에 남북으로의 수온 구배가 크며 고온과 저온의 남북차이는 여름에는 약 6°C이지만 겨울에는 약 15°C로, 겨울이 여름보다 고온과 저온의 남북차이가 약 2배이상 크기 때문이다

(Mariyasu, 1972). Lee(1983)는 한국동해 남부 해역에서 여름에 용승에 기인한 냉수괴의 출현을 설명했다. 그리고 Tanioka(1968)는 대한 해협을 통해 동해로 유입된 쓰시마 난류의 분지류인 동한 난류는 봄에 연안에 가장 가까이 접근하고, 여름과 가을에 동쪽으로 점차 이동하며, 겨울에 서쪽으로 다시 접안한다고 하였다. 또한 이러한 동한 난류는 가을에 가장 북상한다고 하였다. 이와 같이, 여름철 한국동해남부 해역에서의 냉수괴의 발달과 동한난류와의 상호작용에 의해 나타난 열전선이, 계절 변화에 따라 동한난류의 유축이 외양으로 점차 이동하므로써, 또한 동한 난류가 가을에 가장 북쪽으로 북상함에 따라서, 8, 9, 10월의 열전선이 월에 따른 변화와 함께 점차 북동쪽으로 이동되는 것이라고 생각된다. 그리고 동해의 극전선은 수온 상승기인 봄부터 여름까지는 분명하지 않으나, 수온 하강기인 가을부터 겨울동안에는 뚜렷하며 한국동해안 측에서 쓰가루 해협쪽으로 위도와 거의 나란하게 이어지고 있다.

3.3. 동해고유수의 생성 가능 해역

대부분의 해양수괴들은 해양 표면에서 대기와의 접촉에 의해서 특성의 영향을 받으며, 그러한 기 후과정은 해양표면에서 수형(water type)을 만들고, 이러한 수형들의 혼합 결과로 수괴(water mass)가 형성된다.

겨울철의 동해에서는 6°C표면 등온선을 극전선의 지표 수온으로 볼 수 있으며(Fig. 2, 3, 8), 이러한 6°C 등온선의 평균위치 및 그 위치 변화에 의해 Fig. 14와 같이 위도 40°30'N 이북과 경도 138°E 이서의 북방한류역과 그리고 위도 39°30'N 이남과 경도 139°E 이동의 쓰시마 난류역으로 구분될 수 있다.

이와 같이 극전선을 경계로 하여 구분되는 북방한류역에서는 깊이 30m이천에 불과한 표층수와 그 이심의 동해고유수라고 하는 단순한 2층 구조로 되어 있으며(須田, 1932 ; 宮崎, 1953), 또한 겨울철 동해에 있어서 깊이 100m이천은 연직 혼합때문에 해수의 수온, 염분, 용존산소의 특징이 연직적으로 같은 분포를 보인다(Minami et al., 1987).

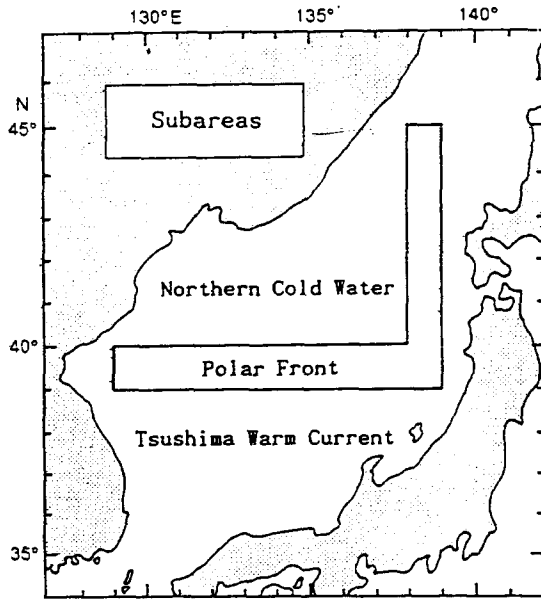


Fig. 14. Subareas divided by the Polar Front.

Fig. 15는 1966~1987년까지 일본 기상청의 해양기상관측자료중에서 겨울철에 해당하는 2~3월에 동해에서 관측된 모든 정점들에 대해서, Fig. 14와 같이 해역별로 구분하여 표면에서 깊이 100m

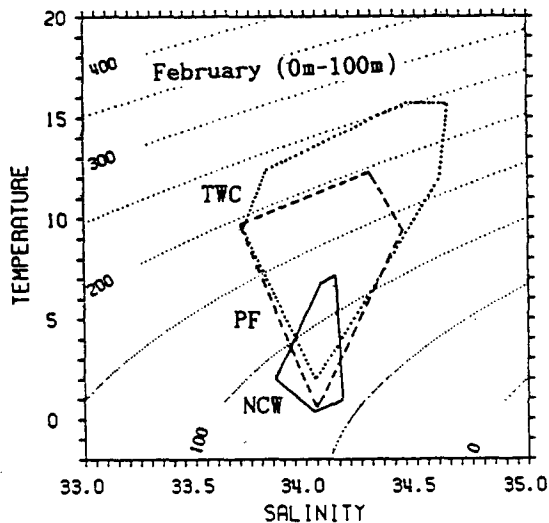


Fig. 15. The envelopes of water type belonging to the subareas from surface to 100m depth in February during 1966~1987.

까지에 대한 수형(water type)의 분포 범위를 T-S도에 나타낸 것이다. 여기서 TWC는 쓰시마 난류역(Tsushima Warm Current area)을, PF는 극전선역(Polar Front area)을 그리고 NCW는 북방한류역(Northern Cold Water area)을, 각각 나타내고 있다.

쓰시마 난류역에서 극전선역을 지나 북방한류역으로 갈수록 수형군들의 수온 분포범위는 점점 좁아지면서 또한 낮아지고 있다. 이는 Fig. 14의 모식도에서도 볼 수 있는 것 처럼 위도의 범위에 따라 각해역이 분포하고 있기 때문에 수온의 T-S도 분포 범위가 북방한류역으로 갈수록 좁아지며 또한 낮아진다.

이와 같은 경향은 염분의 경우에서도 똑같이 쓰시마 난류역에서 북방한류역으로 갈수록 수형군들의 염분의 분포 범위는 좁아지고 또한 적어지고 있다. 그리고 혼합수역 혹은 전이역에 해당되는 극전선역의 수형군들의 분포 범위는 쓰시마 난류역과 북방한류역의 수형군의 분포 범위의 중간 성질을 가지고 있음을 알 수 있다. 이와 같이 겨울철 동해에서는 극전선역을 중심으로 따뜻하고 고염한 성질을 지닌 쓰시마 난류수와 차고 다소 저염한 특성을 지닌 북방한류수들로 뚜렷하게 구분됨을 알 수 있다.

동해 고유수는 일반적으로 수온이 0~1°C이고 염분이 34.0~34.1‰로 특성치들의 분포 범위가 좁은 아주 균질한 수괴이며, 용존 산소도 다른 대양의 심층수에 비해서 비교적 높아서 표층에서 대기와의 접촉이 다른 대양의 심층수에 비해 활발하게 이루어 지고 있다(須田, 1932; Uda, 1934; Gamo et al., 1986). 이와 같은 특성을 지닌 수형군들이 표층에서 나타나는 해역은 북방한류역으로(Fig. 14, 15), 이 해역에서는 겨울철 냉각으로 인하여 표층수와 저층수의 연직 대류 혼합으로 인하여 동해 고유수의 생성 및 침강이 가능한 지역이라 생각된다.

4. 결 론

겨울철 동해에 있어서 동해고유수의 생성이 어디서 어떻게 이루어 지는가를 구명한다는 것은,

동해 해수 순환이나 심층수의 거동을 파악하기에 앞서 아주 중요한 문제라고 생각된다. 그러나 동해고유수의 생성 해역이 극전선 이북의 북방한류역이라는 사실이 단편적으로 확인되었으나, 북방한류역의 범위가 어디인지 구체적으로 밝힌 연구 결과는 거의 없었다.

그러므로 본 연구에서는 먼저 겨울철 동해에서 관측된 해양조사자료를 이용하여 겨울철 동해에서 뚜렷하게 나타나는 극전선을 살펴 보았으며, 이것에 의해서 해역 구분을 하여 동해고유수의 생성 가능 해역을 검토하였다. 그 결과로서 다음과 같은 것이 명확해 졌다.

- 1) 겨울철 동해에 있어서의 극전선은 표면의 6°C 등온선을 지표수온으로 할 수 있으며, 그 평균 위치는 위도 39°N~40°N 사이에서 등위도 방향으로 분포하고 있었다. 또한 극전선의 지표선인 6°C 등온선을 중심으로, 북방한류역, 극전선역 및 쓰시마 난류역으로 뚜렷하게 구분할 수 있었다.
- 2) 경도 136°E~137°E 사이에서 나타나는 겨울철 극전선의 평균위치의 편차는 약 130km로 가장 좁으며, 이 해역은 대한해협을 통해서 유입된 쓰시마 난류수가 쓰가루 해협쪽을 향해 모여서 북서태평양으로 유출하는 해역으로 극전선의 변동이 작으며 비교적 안정된 해역이다. 이에 비해서 한국 동해안측과 쓰가루 해협역은 극전선의 평균위치의 편차가 약 180km~250km로 위치하고 있기 때문에 남북 방향의 편차가 크다.
- 3) 위도 40°30'N 이북과 경도 138°E 이서의 북방한류역에서는, 겨울철 연직 혼합에 의해 표면에서 깊이 100m까지, 수온이 0~1°C이고 염분이 34.0~34.1‰의 균질한 특성을 나타내는 동해고유수(Japan Sea Proper Water)와 같은 특성을 가진 수형군들이 존재하고 있었다. 따라서 겨울철 북방한류역(위도 40°30'N 이북 및 경도 138°E 이서 지역)의 표층에서는 동해고유수의 생성이 가능한 해역임을 잘 나타내고 있었다.

앞으로 이러한 북방한류역에서의 표층수의 밀도 증가에 따른 혼합 및 침강 현상을 구명하여, 이제 까지 명확하게 밝혀지지 않은 동해고유수의 생성

과정을 보다 구체적으로 밝혀야 할 필요가 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 1991년도 교육부 기초과학 연구비 지원에 의해 수행되었습니다. 그리고 부산수산대학교 응용지질학과 김희준 교수님의 유익한 조언에 감사드립니다.

참고문헌

- Gamo, T., Y. Nozaki, H. Sakai, T. Nakai and H. Tsubota, 1986, Spacial and temporal variations of water characteristics in the Japan Sea bottom layer, *J. Mar. Res.*, 44, 781-793.
- Hata, K, 1962, Seasonal Variation of the Volume Transport in the Northern Part of the Japan Sea, *J. Oceanogr. Soc. Japan*, 20th Anniv. Vol., 168-179(in Japanese).
- Hong, C. H. and K. D. Cho, 1983, The Northern Boundary of the Tsushima Current and Its Fluctuations, *J. Oceanol. Soc. Korea*, 18(1), 1-9.
- 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.
- Japan Meteorological Agency, 1966-1987, The Results of Marine Meteorological and Oceanographical Observations, No. 39-79.
- Japan Meteorological Agency, 1970-1989, The Ten Day Marine Report, No. 837-1556.
- Kano, Y, 1980, The annual variation of the temperature, salinity and oxygen content in the Japan Sea, *Oceanogr. Mag.*, 31, 15-16.
- Kawai, H, 1972, Hydrography of the Kuroshio Extension, in *KUROSHIO*, eds. Stommel H. and K. Yoshida, Univ. Tokyo Press, pp. 241.

- 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.
- Kolpack, R. L., 1982, Temperature and Salinity Changes in the Tsushima Current, La mer, 20, 199-209.
- Lee, J. C., 1983, Variation 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.
- 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).
- 宮崎道夫, 1952, 日本海の熱經濟(海況豫想の研究 I), 北海道區水産研究所報告, 4, pp. 34.
- 宮崎道夫, 1953, 日本海の水塊に就いて(海況豫想の研究 II), 北海道區水産研究所報告, 7, 1-65.
- Moriyasu, S., 1972, The Tsushima Current, in KUROSHIO, eds. Stommel H. and K. Yoshida., Univ. Tokyo Press, 353-369.
- 日本海區水産研究所, 1985, 日本海における水溫の平均像 -1953-1980年の平均水溫とその標準偏差-, 日本海グロック試験研究集録第5號, 1-100.
- Ogawa, Y., 1981, The relation between the high saline water in the Japan Sea and Tsushima Current, Bull. Fish. Oceanogr. Soc. Japan, 24, 1-12(in Japanese).
- Ogawa, Y., 1983, Seasonal Changes in Temperature and Salinity of Water Flowing into the Japan Sea through the Tsushima Straits, Bull. Fish. Oceanogr. Soc. Japan, 43, 1-8.
- 須田院次, 1932, 日本海の底層水に就いて, 海洋時報第4卷第1號, 221-240.
- Tanioka, K., 1968, On the East Korean Warm Current(Tosen Warm Current), Oceanogr. Mag., 20(1), 31-38.
- 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.
- Uda, M., 1936, Hydrographical Studies Based on Simultaneous Oceanographical Surveys Made in the Japan Sea and in its Adjacent Waters During May and June, 1932, Imper. Fish. Exper. Stat., Records of Oceanographic Works in Japan VI, 19-107.
- Uda, M., 1938, Researches on 'Siome' or current rip in the seas and oceans, Geophys. Mag., 11, 307-372.
- 和達清夫, 1987, 海洋大事典, 東京堂出版, pp. 300.
- Yanagi, T., 1987, Classification of 'Siome', Streaks and Fronts, J. Oceanogr. Soc. Japan, 45, 149-158.
- Yoon, J. H. and N. Suginoara, 1977, Behavior of Warm Water Flowing into a Cold Ocean, J. Oceanogr. Soc. Japan, 33, 272-282.