

## 한국 서해의 수온역전 현상

김희준\* · 윤홍주\* · 양성기\*\*

### Inversion Phenomena of Temperature in the Yellow Sea

Hee-joon KIM, Hong-joo YOON, Seong-ki YANG

Temperature inversions are investigated by using the oceanographic data obtained in the Yellow Sea from 1965 to 1979. The temperature inversions are found in every depth in almost all areas of the Yellow Sea. While in summer, they frequently occur below thermocline in the west region of the Jeju Island. Such phenomena in winter can be explained by surface cooling effects associated with a net heat loss at the surface and a southward advection of cold water, and those in summer result from the process of mixing between the Yellow Sea Warm Current and the Yellow Sea Bottom Cold Water.

### 서론

해양의 수온은 일반적으로 수심이 깊어짐에 따라 낮아진다. 그러나 수심이 깊어짐에 따라 수온이 상승하는 경우에 이것을 수온역전(Temperature inversion)이라 한다.

수온역전 현상은 연안용승(Coastal upwelling)해역(Collins et al., 1968; Lee, 1978), 난류와 한류의 혼합해역(Nagata, 1967; 1970) 등에서 일어난다. 우리나라 동해에서는 겨울에 표층(0-20m)에서 많이 일어나는 것으로 알려졌다(Kim and Cho, 1982).

서해는 우리나라 주변해역 중 수심이 평균 44m로서 가장 얇은 해역으로서, 그 수온구조는 여름과 겨울에 각각 특이하다. 즉, 겨울에는 대기의 강한 냉각 효과와 탁월한 북서 계절풍에 의해서 연직혼합이 잘 이루어지고, 여름에는 현저한 수온약층(Thermo-

cline)의 발달로 연직혼합이 거의 없는 2층구조를 형성하게 된다.

본 연구에서는 한국 서해에서 일어나는 수온역전 현상의 계절별 특성을 조사하고, 그 발생원인에 대해서 검토한다.

### 자료 및 방법

수온역전 현상의 조사에 있어서는 국립수산진흥원의 15년간(1965-1979) 해양관측자료 중, 2월(겨울)과 8월(여름)의 자료를 사용하였으며, 해당 월의 자료가 없는 경우에는 필요에 따라 그 전월 또는 다음월의 자료를 사용하였다. 수온을 비롯한 해양구조의 조사에 대해서는 1979년도 해양관측자료와 한국해양편람(1979)을 사용하였다. 해양관측점의 위치는 Fig. 1에 나타내었다.

Fig. 2는 온도차가  $\Delta T$ 인 수온역전을 나타낸 모식

\* 부산수산대학 : National Fisheries University of Busan

\*\* 통영수산전문대학 : National Tongyoung Fisheries Junior College

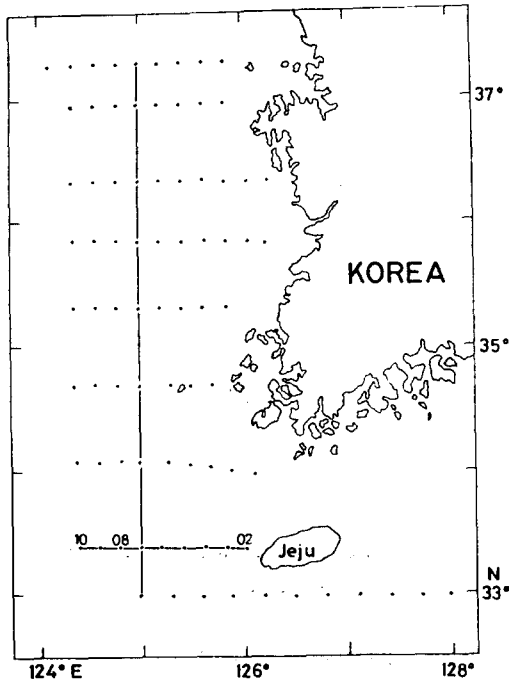


Fig. 1 Stations of oceanographic observation in the Yellow Sea.

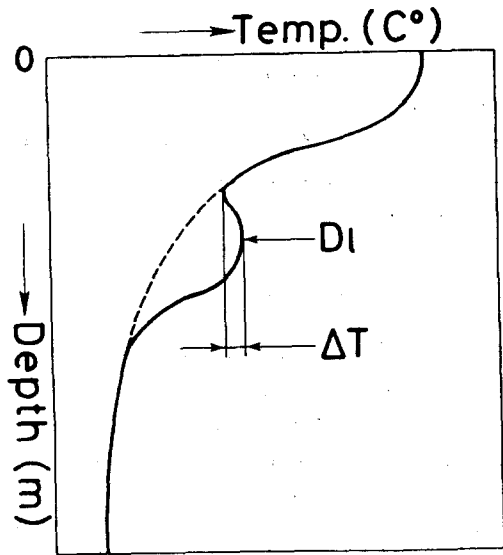


Fig. 2 Schematic view of a temperature inversion layer.  $\Delta T$  and  $DI$  represent the temperature difference and the depth of lower end of the inversion layer, respectively.

도이다. 여기서는 역전층 아랫부분의 수심  $DI$ 에 대해서 조사하였다. 결과는 각층관측 수심을 기준으로 정리하였으며, 그 수심에서 역전빈도  $F_i(\%)$ 는 다음 식으로 구하였다.

$$F_i = (n_i/N_i) \times 100, \quad (1)$$

$$i = 0 \sim 10m, 10 \sim 20m, \dots, 100m \sim,$$

여기서  $n_i$ 는 역전이 일어난 회수이고  $N_i$ 는 관측수이다. 따라서  $F_i$ 는 각 수심에서의 단위 관측당 역전 빈도를 나타낸다(Fig. 3).

또한, 수온역전 현상의 출현빈도  $F_{oj}(\%)$ 는 각 관측점에 있어서 관측이 이루어진 년수  $N_j$ (최고 15년)에 대한 역전현상이 관측된 년수  $n_j$ 를 비율로 나타내었다(Fig. 4, Fig. 6). 즉,

$$F_{oj} = (n_j/N_j) \times 100. \quad (2)$$

표층(0~10m)에서 해수의 연직 안정도(Stability)를 알기 위하여 Brunt-Väisälä주파수  $N(\text{sec}^{-1})$ 을 근사식(Kim and Cho, 1982)으로 계산하였다. 즉,

$$N^2 = -(\Delta\sigma_t/\Delta z), \quad (3)$$

여기서

$$\Delta\sigma_t = \sigma_{t,0} - \sigma_{t,10} \text{ (g/cm}^3\text{)},$$

$$\Delta z = 10 \text{ (m)}.$$

단,  $\sigma_{t,0}$  및  $\sigma_{t,10}$ 는 각각 표층 및 10m에서의  $\sigma_t$ 이다.

## 결 과

겨울과 여름의 수온역전 현상에 대한 조사결과를 Table 1에 나타내었다. 이것으로 역전빈도는 겨울

Table 1 Frequencies of temperature inversion layers

	Total no. of observations	Total no. of inversions	Percent of occurrences
Winter	5,241	2,146	40.95
Summer	5,346	305	5.71

이 여름보다 약 7배정도 많은 것을 알 수 있다. 또한, Fig. 3의 수심별 역전빈도를 보면, 겨울은 전 수심에서 수온역전이 일어나고, 여름에는 50-75m와 75-100m의 2개 층에서 주로 일어나고 있다.

겨울 역전현상의 출현빈도를 Fig. 4에 나타내었다. 겨울의 수온역전은 평균 88%로, 한국 연안의 일부에서 빈도가 비교적 작을 뿐 거의 모든 해역에서 빈도가 80% 이상이 된다. Fig. 5는 겨울에 125°00'E 선(Fig. 1)에 대한 1963년부터 1978년까지의 평균 수온 단면도이다. 이 그림에서 수온은 북쪽이 남쪽보다

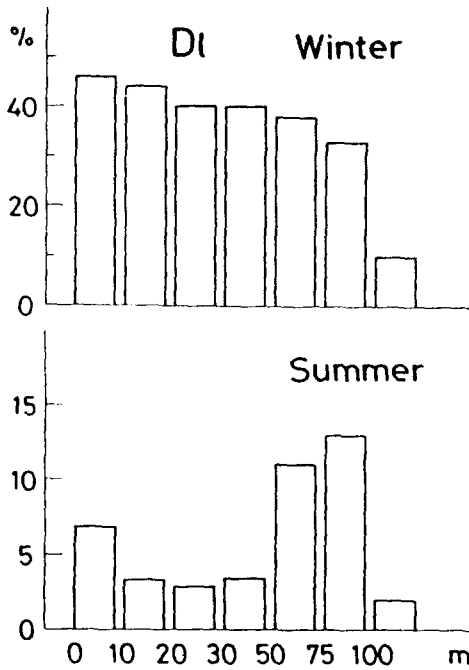


Fig. 3 Frequency distribution of the depths of lower ends for the inversion layers in winter (upper) and summer (lower).

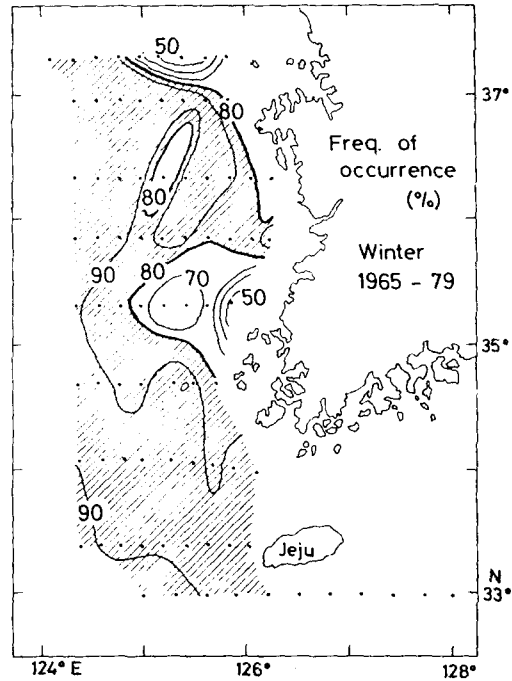


Fig. 4 Frequency distribution of the occurrence of temperature inversions each winter from 1965 to 1979. A diagonally-lined area indicates a region over 80 percent of the occurrence frequency.

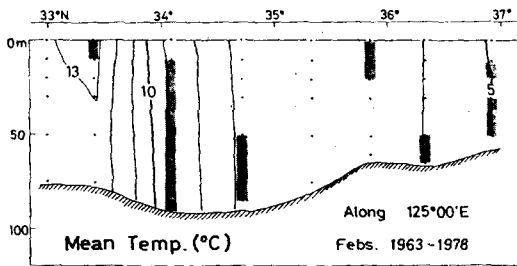


Fig. 5 Mean temperature profile along 125°00'E each February from 1963 to 1978. Shaded parts indicate positions of the temperature inversion layers.

낮고, 등온선이 거의 연직적이며, 35°20'N의 관측점을 제외한 모든 점의 여러수심에서 수온역전이 일어나고 있다.

Fig. 6은 여름의 역전 출현빈도를 나타낸 것으로,

출현빈도는 평균 22%로 겨울보다 적다. 일반적으로 한국 연안측에서 황해중양부 해역으로 갈수록 출현 빈도가 많아지며, 특히 제주도 서방 해역에서는 40% 이상으로 비교적 많이 일어나는 것은 주목할 만 하다. 이 해역에서 일어나는 역전현상을 더욱 구체적으로 파악하기 위해서, 1979년 8월에 33°24'N 선 (Fig. 1)의 수온단면도를 Fig. 7에 나타내었다. 이 그림에서 수온역전은 수온약층 밑에 형성됨을 알 수 있다. 이들 역전층은 Fig. 3에서 *DI*가 50m 이하에 해당 된다. Fig. 8은 1963년부터 1978년까지 수온약층 아래에 있는 50m층에 대한 평균 염분분포를 나타낸 것인데, 제주도 서방해역에서 남북방향의 Gradient가 비교적 큰 것으로 보아, 여기서 고염수로 알려져 있는 쿠로시오(Kuroshio)의 지류인 황해난류와 비교적 저염인 황해 저층냉수가 경계를 이루고 있는 것으로 생각된다.

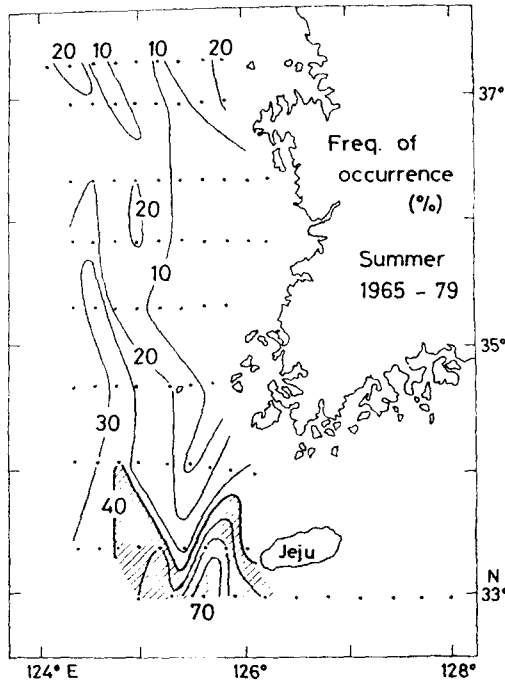


Fig. 6 Frequency distribution of the occurrence of temperature inversions each summer from 1965 to 1979. A diagonally-lined area indicates a region over 40 percent of the occurrence frequency.

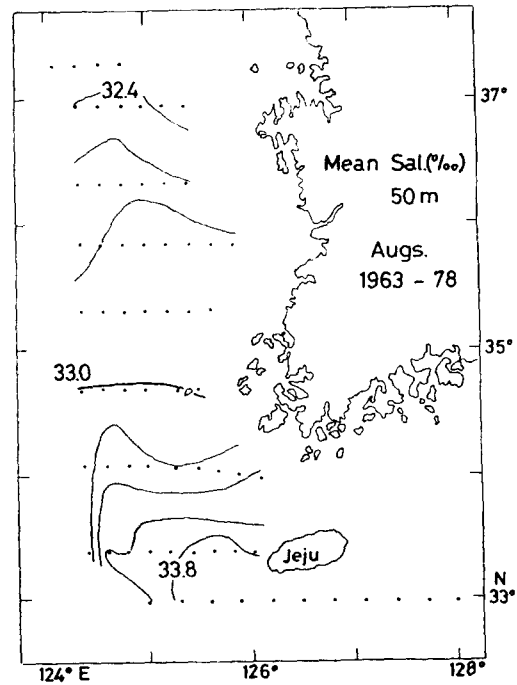


Fig. 8 Mean salinity distribution at 50m each August from 1963 to 1978.

## 고 찰

### (1) 겨울의 수온역전

서해는 수심이 얇아 겨울에 차고 강한 북서 계절풍의 영향으로 전 해역이 해수표면으로부터 해저까지 거의 혼합층이 된다(Fig. 5).

겨울에는 수온역전층이 전 해역에 걸쳐 일어날 뿐만 아니라, 모든 수심에서 골고루 형성되는 것을 알 수 있다(Fig. 3~5). 이와같은 수온역전층의 형성은 표면 냉각효과(Surface cooling effects)로 설명할 수 있다.

Kang(1982)의 이론모델에 의하면, 겨울의 수온역전은 해수 표면에서의 열손실, 계절적 온도변화의 하방 전파 및 바람에 의한 냉수의 이류 등으로 일어난다. 이들 중 표면 냉각효과로서는 현열손실(Sensible heat loss)과 잠열손실(Latent heat loss) 및 강한 북서 계절풍에 의한 표층 Ekman수송 등을 생각할 수 있다.

Lee and Chang(1975)에 의하면, 서해에 있어서 열손실은 주로 증발에 의한 것이지만, 겨울에는

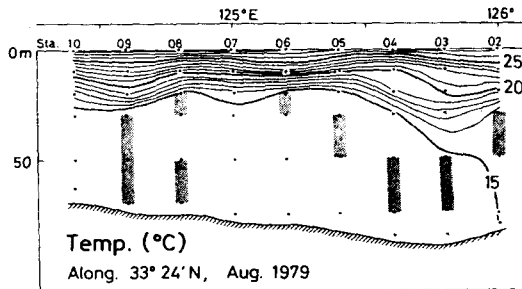


Fig. 7 Temperature profile along 33°24'N in August, 1979. Shaded parts indicate positions of the temperature inversion layers.

Bowen's ratio가 0.8이상이 되므로 현열손실도 무시할 수 없다고 하였다. 한편 Kim and Cho(1982)에 의하면 겨울에 탁월한 북서 계절풍은 북쪽의 냉수를 지속적으로 남쪽에 공급하며, 이로 인해서 수온역전이 일어난다고 하였다.

동해에서는 대부분의 역전층이 수심 20m 이내에서 형성되는 것과 비교하면(Kim and Cho, 1982), 서해는 20m 이십에서도 수온역전이 많이 형성되는데, 이것은 동해와 서해의 수심차로 인한 것 같다. 즉, 해수표면에서 열이 대기로 나갈 때 밑에서 열공급이 있어야 되는데, 서해는 수심이 얕으므로(평균 44m) 열공급에 한계가 있다. 그러므로 서해의 역전층은 거의 전 수심에 걸쳐 형성되는 것으로 생각된다.

### (2) 여름의 수온역전

여름에는 겨울과는 대조적으로 등온선이 수평적이며, 표층에서는 강한 수온약층이 형성된다(Fig.7).

여름의 수온역전이 제주도 서방 해역에서, 또한 거의 대부분이 수온약층 밑에서 일어남을 알 수 있다(Fig.3, Fig. 6~7). 이것은 성질이 서로 다른 두 수괴의 혼합현상으로 설명할 수 있다.

Nagata(1967)는 쿠로시오(Kuroshio)와 오야시오(Oyashio)의 혼합해역에서 수온역전층이 많이 형성된다고 하였다. Fig.8을 보면, 제주도 서방 해역에서 남북방향의 염분 Gradient가 비교적 큰 것으로 보아 비교적 고온 고염으로 알려진 황해난류와 저온 저염인 황해냉수가 만나는 해역이라고 생각된다. 이들 두 수괴의 경계역에서 등밀도면을 따라 침투(Intrusion)현상이 일어난다면, 두 수괴의 염분값에 차이가 있어 같은 밀도의 물이라도 온도차가 생긴다. 즉, 기본적으로는 밀도역전(Density inversion)을 수반하지 않는 수온역전이 일어난다. 여름에 제주도 서방 해역에서 비교적 많이 일어나는 수온역전 현상은 주로 성질이 서로 다른 두 수괴의 혼합과정에서 형성되는 것으로 생각된다.

### (3) 밀도역전

겨울의 해수 안정도를 알기위하여 1979년 2월의 0~10m에 대한 Brunt-Väisälä주파수를 계산하였다(Fig.9). 여기서 북쪽 해역의 일부와 제주도 서방 해역을 포함한 남쪽 전 해역에서  $N^2$ 값이 음(Negative)이 되므로 밀도역전이 일어나는 것을 알 수 있다. 이것은 앞에서 언급한 바와같이 겨울에 수온역전을 일으키는 원인으로 생각되는 표면 냉각효과에

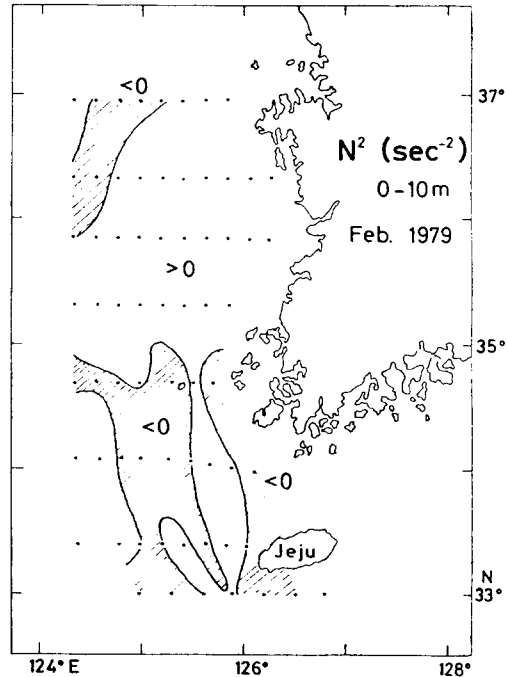


Fig.9 Brunt-Väisälä frequency ( $N^2$ ) distribution in the upper 10m in February, 1979. Diagonally-lined areas indicate regions with density inversion layers.

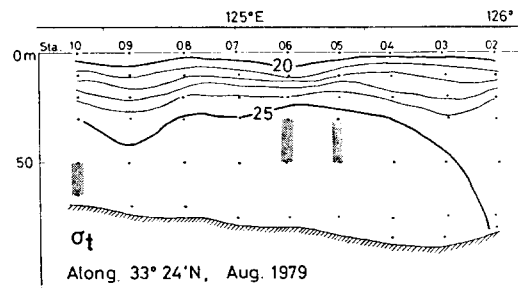


Fig.10 Density ( $\sigma_t$ ) profile along 33°24'N in August, 1979. Shaded parts indicate positions of the density inversion layers.

의하여 밀도역전도 일어난 것으로 생각된다.

Fig.10는 Fig.7과 동일한 33°24'N 선의 여름의 밀도( $\sigma_t$ ) 단면도이다. 두 그림을 비교하면, 밀도역전이 수온역전보다 적게 일어나는 것을 알 수 있다.

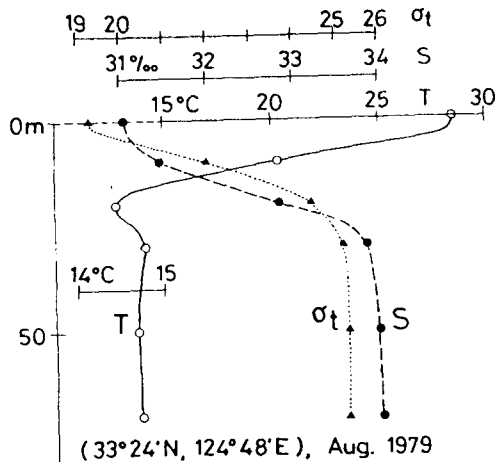


Fig. 11 Profiles of temperature (○), salinity (●) and density ( $\sigma_t$ , ▲) at 33°24'N and 124°48'E in August, 1979. The scale between 14°C and 15°C is lengthened to five times compared with over 15°C.

이러한 현상을 검토하기 위해서 33°24'N과 125°48'E가 서로 교차하는 지점(Sta. 8, Fig. 1)에서 수온, 염분 및 밀도( $\sigma_t$ )를 서로 비교하였다(Fig. 11). 이 그림에서 수온은 20~30m사이에서 역전되지만, 이 층의 염분값이 크게 증가하여 밀도는 역전되지 않는다. Fig. 7과 Fig. 10의 비교에 있어서 수온역전이 일어나는 최수만큼 밀도역전이 일어나지 않는 것은 이러한 염분의 보상효과(Compensation effect) 때문이라고 생각된다.

## 요 약

1965년부터 1979년까지의 해양관측자료를 사용하여 우리나라 서해에서 일어나는 수온역전 현상을 조사하였다. 그 결과는 다음과 같다.

- (1) 겨울의 수온역전 현상은 전 해역과 모든 수심에 걸쳐서 일어난다.
- (2) 여름은 제주도 서방 해역에서만 비교적 많이 일어난다.

이와같은 수온역전 현상은 겨울의 경우는 현열손실, 잠열손실 및 남하 Ekman수송 등에 의한 표면 냉각효과 때문으로 생각된다. 여름의 경우는 온도와

염분의 성질이 서로 다른 황해저층수와 황해난류가 제주도 서방 해역에서 경계를 이루고, 서로 혼합되는 과정에서 생기는 것으로 보여진다.

## 사 사

본 연구에 조언을 해 주신 부산수산대학 해양공학과 장선덕 교수님과 해양학과 조규대 교수님께 감사를 드립니다. 자료정리를 도와준 육상설 군에게도 감사한다.

## References

- Collins, C. A., C. N. K. Mooers, M. R. Stevenson, R. L. Smith and J. G. Pattullo, 1968: Direct current measurements in the frontal zone of a coastal upwelling region. *J. Oceanogr. Soc. Japan*, **24**, 295-306.
- Fisheries Research and Development Agency, 1979: Oceanographic handbook of the neighbouring seas of Korea. 650p.
- Kang, Y. Q., 1982: On the mechanism of temperature inversion in the surface layer. (Manuscript in preparation)
- Kim, H. J. and K. D. Cho, 1982: Inversion phenomena of density in the Japan Sea. *J. Oceanol. Soc. Korea*. (in print)
- Lee, K. B., 1978: Study on the coastal cold water near Ulsan. *J. Oceanol. Soc. Korea*, **13**, 5-10.
- Lee, D. Y. and S. D. Chang, 1976: Sea-air energy exchange in the eastern Yellow Sea. *Bull. Korean Fish. Tech. Soc.*, **12**, 37-46.
- Nagata, Y., 1967: On the structure of shallow temperature inversions. *J. Oceanogr. Soc. Japan*, **23**, 221-230.
- \_\_\_\_\_, 1970: Detailed temperature cross section of the cold-water belt along the northern edge of the Kuroshio. *J. Marine Res.*, **28**, 1-14.