

한국 남해의 수온역전현상*

김 희 준 · 육 상 섭
부산수산대학 응용지질학과 부산수산대학 해양공학과

Inversion Phenomena of Temperature in the Southern Sea of Korea*

Hee-Joon KIM

Department of Applied Geology, National Fisheries University of Pusan
Pusan, 608 Korea

and

Sang-Sup YUG

Department of Ocean Engineering, National Fisheries University of Pusan
Pusan, 608 Korea

Temperature inversions are investigated by using the oceanographic data (1965-1979) obtained in the Southern Sea of Korea. The temperature inversions in winter occur about six times more frequently than those in summer.

In the west region of the Southern Sea, the inversions are found at any depth in winter. In the east region of the Southern Sea, however, they usually appear in surface layer in winter. Such inversion phenomena in winter can be explained by surface cooling effects associated with a net heat loss at the sea surface and a southward advection of surface cold water due to north-westerly monsoon.

In summer the inversion layers are usually formed below the thermocline in the west region of the Southern Sea, and in surface layer in the east region. The former results from the mixing between the Tsushima Warm Current and the Yellow Sea Bottom Cold Water, and the latter is generated by an offshore flow of cold water near coast due to southwesterly wind.

서 론

수온역전(temperature inversion)은 해양에서 수심이 깊어짐에도 불구하고 수온이 상승하는 현상을 말한다. 이러한 현상은 연안용승(coastal upwelling) 해역(Collins et al., 1968; Lee, 1978), 난류와 한류가 경계를 이루는 해역(Nagata, 1967; 1970) 등에서 일어난다.

우리나라 주변 해역인 동해 및 서해에서도 수온역전은 찾아 볼 수 있으며, 특히 겨울의 표층혼합층(surface mixed layer)에서는 보편적인 현상이라고 할 수 있고, 여름에는 대한해협을 일부해역 및 제

주도 서방해역에서 비교적 많이 일어난다(Kim and Cho, 1982; Kim et al. 1982).

한국 남해는 쿠로시오(Kuroshio)의 지류인 쓰시마난류(Tsushima Current)의 경로이다. 쓰시마난류의 대부분은 대한해협을 통해 동해에 유입되어 있고, 또 일부는 서해에 유입되고 있다. 따라서 남해 동부는 난류의 영향을 많이 받은 해역이고, 서부는 적게 받은 해역이라 할 수 있으며, 양해역에서 일어나는 역전현상에도 차이가 있을 것으로 예상된다.

본 연구에서는 1965년부터 1979년까지 국립수산진흥원에서 관측된 해양관측자료를 이용하여, 한국 남해에서 일어나는 수온역전현상의 계절별 및 지역별 특성을 조사하고, 그 발생원인에 대해서 검토한다.

* 부산수산대학 해양과학연구소 연구업적 제81호(Contribution No. 81 of Institute of Marine Sciences, National Fisheries University of Pusan)

자료 및 방법

수온역전현상의 조사에는 국립수산진흥원의 15년간(1965~1979) 해양관측자료중, 2월(겨울)과 8월(여름)의 자료를 사용하였으며, 해당월의 자료가 없는 경우에는 필요에 따라 그 앞의 달 또는 다음달의 자료를 사용하였다. 조사 대상해역인 남해에서 해양관측점과 관측선의 위치는 Fig.1과 같다.

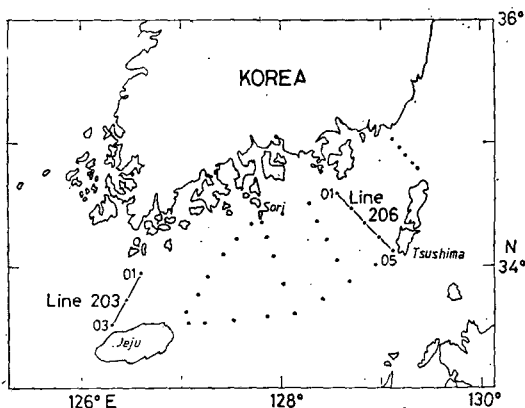


Fig. 1. Stations of oceanographic observations in the Southern Sea of Korea.

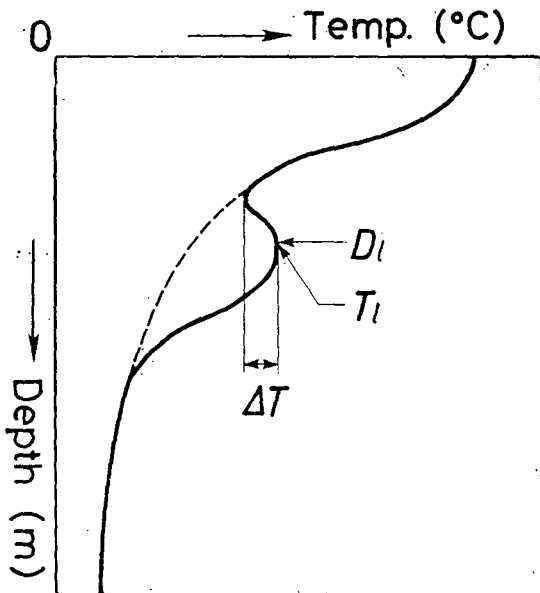


Fig. 2. Schematic view of a temperature inversion layer.

Fig.2는 온도차가 ΔT 인 수온역전을 나타낸 모식도이다. 여기서 수심이 깊어짐에 따라 수온이 상승하는 부분이 역전층에 해당된다. 본 연구에서는 역전층 아래 부분의 수심 D_I 및 수온 T_I 에 대해서 조

사하였으며, 결과는 D_I 는 각종관측의 수심간격으로, T_I 는 5°C 간격으로 각각 정리하였다(Fig.3 및 Fig.4). 이때의 계산식은 각각 다음과 같다.

$$FD_i = (n_i/N_i) \times 100 (\%), \dots\dots\dots(1)$$

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

$$FT_j = (n_j/TI) \times 100 (\%), \dots\dots\dots(2)$$

$$j = 0 \sim 5^\circ\text{C}, 5 \sim 10^\circ\text{C}, \dots, 20^\circ\text{C} \sim,$$

여기서 FD 및 FT 는 각각 수심별 및 수온별 역전빈도, n 는 역전이 일어난 회수, N 는 각 수심범위에 대한 관측수 그리고 TI 는 종역전수이다.

역전현상의 공간적 분포는 다음의 (3)식으로 계산된 출현빈도 $FO_k(\%)$ 로 나타내었다(Fig.5 및 Fig.6).

$$FO_k = (n_k/N_k) \times 100 (\%), \dots\dots\dots(3)$$

여기서 N_k 및 n_k 는 각각 관측점 k 에서 관측이 실시된 년수(최고 15년) 및 역전현상이 발견된 년수이다.

또한, 밀도역전현상은 해수의 안정도(stability)를 나타내는 Brunt-Väisälä 주파수 $N(\text{sec}^{-1})$ 로 나타내었으며(Fig.11 및 Fig.12), 다음과 같이 계산하였다.

$$N^2 \approx -g/\rho(\Delta\sigma_t/\Delta Z), \dots\dots\dots(4)$$

여기서 $g(\text{cm}/\text{sec}^2)$ 는 중력가속도, $\rho(\text{g}/\text{cm}^3)$ 는 현장밀도, 그리고 $\Delta\sigma_t(\text{g}/\text{cm}^3)$ 및 $\Delta Z(\text{m})$ 는 각각 각종관측 수심간의 σ_t 및 수심의 차이이다.

결 과

겨울과 여름의 역전빈도는 Table 1과 같다. 이것으로 수온역전은 겨울이 여름보다 6배정도 많이 일어나는 것을 알 수 있다. 또한, 식 (1)에 의하여 구

Table 1. Frequencies of temperature inversion layers in the Southern Sea of Korea.

	Total no. of observations	Total no. of inversions	Percent of occurrences
Winter	1,944	592	30.45
Summer	2,220	119	5.36

한 수심별 역전빈도를 Fig.3에 나타내었다. 겨울에는 $0 \sim 10m$ 에서 최대값을 나타내고 수심이 깊어짐에 따라 감소하는 반면, 여름에는 $0 \sim 20m$ 와 $50 \sim 100m$ 에서 비교적 높은 값을 보여준다. 식 (2)에 의하여 구한 수온별 역전빈도 Fig.4를 보면, 겨울은 $10 \sim 15^\circ\text{C}$ 에 집중하고 있지만, 여름에는 $10 \sim 15^\circ\text{C}$ 및 20°C 이상의 2가지로 분리할 수 있다.

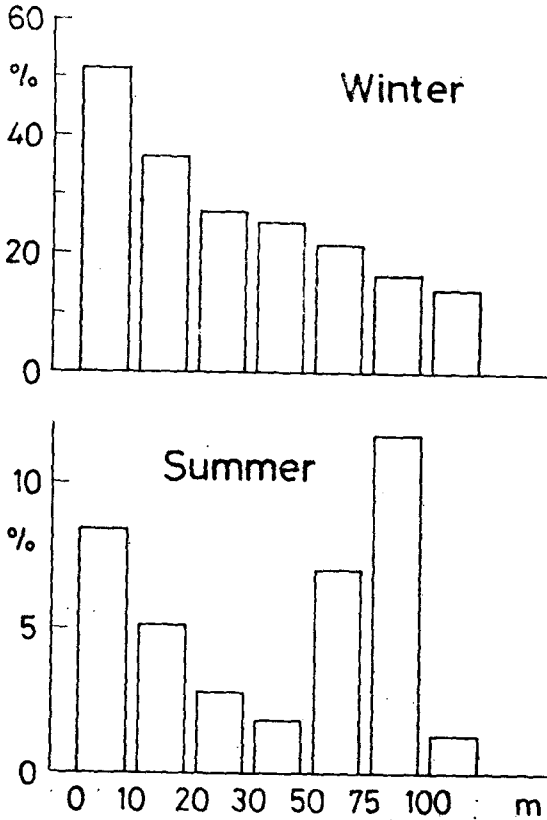


Fig. 3. Frequency distributions of the depth corresponding to the lower end of inversion layers(DI) in winter(upper) and in summer (lower).

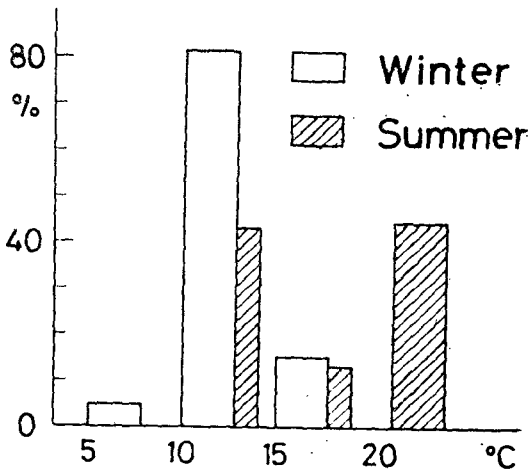


Fig. 4. Frequency distribution of the temperature at the lower end of inversion layers(TI) in winter and in summer.

역전현상의 공간적 분포를 알기 위해서 출현빈도를 식(3)으로 계산하여 Fig.5(겨울) 및 Fig.6(여름)에 각각 나타내었다. 겨울에는 소리도 근해를 중심으로 멀어질수록 출현빈도가 높아진다. 한편, 여름에는 대체로 한국 연안에 평행한 분포를 이루고 있으나, 제주도 주변해역과 쓰시마(Tsushima Island) 북서해역에서 출현빈도가 비교적 높다.

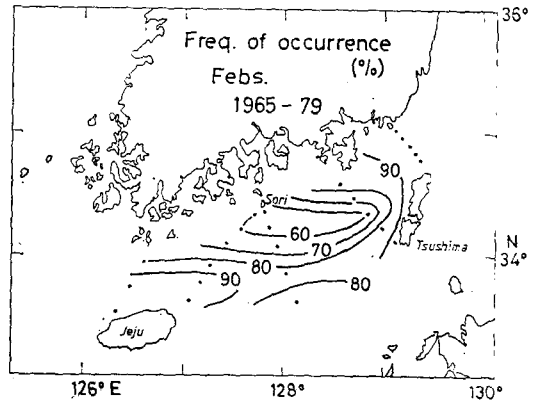


Fig. 5. Frequency of occurrence in percent of temperature inversions in winter.

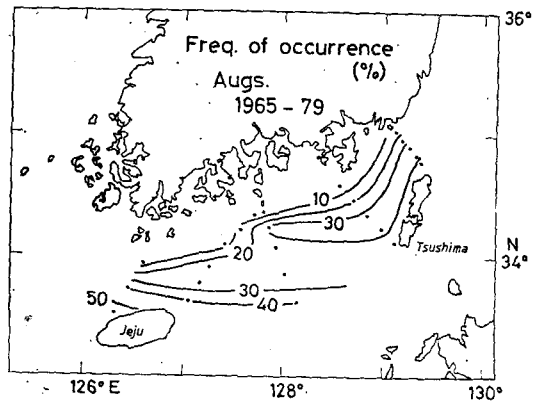


Fig. 6. Frequency of occurrence in percent of temperature inversion in summer.

수온역전이 일어날 때의 수온의 연직구조를 파악하기 위하여 남해 서부해역인 Line 203과 동부해역인 Line 206을 예를 들어 1979년의 겨울과 여름의 수온단면도를 Fig. 7~Fig. 10에 나타내었다. 서부해역에서는 겨울의 경우 연직적으로 거의 균일(homogeneous)한 상태이며, 수온역전은 모든 수심에서 골고루 발견된다(Fig. 7) 그러나 여름에 경우는 표층에서 뚜렷한 수온약층(thermocline)의 발달로 상·하

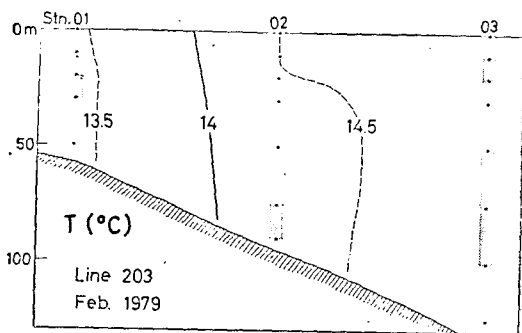


Fig. 7. Temperature section along line 203 marked on Fig.1 in February, 1979. Shaded parts indicate temperature inversion layers at each station.

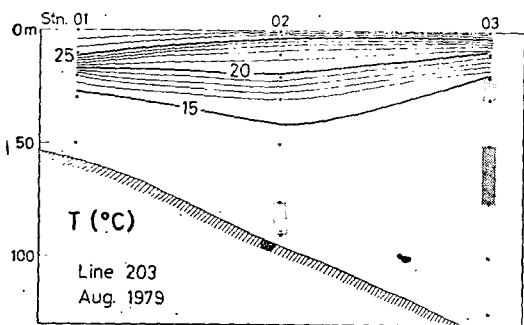


Fig. 8. Temperature section along line 203 marked on Fig.1 in August, 1979. Shaded parts indicate temperature inversion layers at each station.

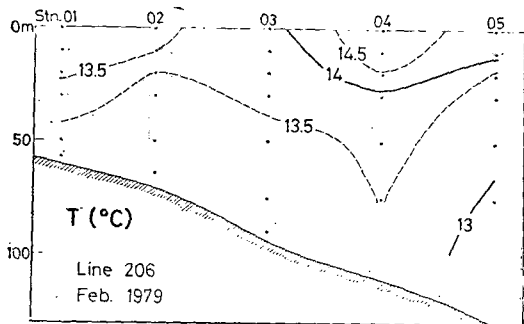


Fig. 9. Temperature section along line 206 marked on Fig.1 in February, 1979. Shaded parts indicate temperature inversions layers at each station.

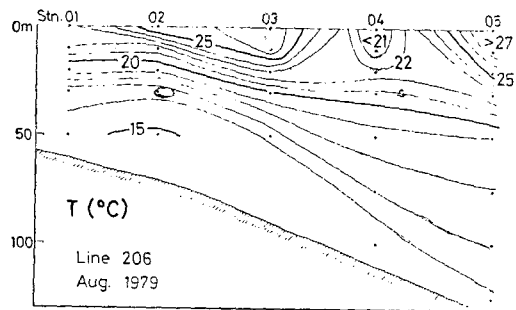


Fig. 10. Temperature section along line 206 marked on Fig.1 in August, 1979. Shaded parts indicate temperature inversion layers at each station.

2층구조를 나타내고 있으며, 역전층이 모두 수온약층 아래에서 형성되고 있음을 알 수 있다(Fig. 8). 한편, 동부해역에서 겨울의 경우인 Fig. 9를 보던 Fig. 7에 비해서 수온이 다소 성층화(stratified)된 경향이 있으며, 수온역전은 주로 표층에서 일어나고 있다. 여름의 경우인 Fig. 10도 역시 서부해역(Fig. 8)과는 달리 수온약층이 그렇게 뚜렷하지 못하고, 수온역전은 표층에서만 일어나고 있다.

고찰

1) 겨울의 수온역전

Fig. 11에 식 (4)에 의하여 계산한 1979년 겨울 표층(0~10 m)에서의 Brunt-Väisälä 주파수 분포도를 나타내었다. 여기서 밀도역전이 일어나고 있는 부분이 조사대상해역의 절반이상을 차지하고 있음을 알 수 있다. 즉, 겨울에는 수온역전과 밀도역전이 동시에 일어난다. 이것은 온도하강에 따른 염분의 보상효과(compensation effects)를 고려하더라도 안전성층(stable stratification)을 형성하지 못하는 것을 의미한다. 그러므로 이와 같은 역전현상은 기본적으로는 주로 표면냉각효과(surface cooling effects) 때문에 일어나는 것으로 생각된다(Kang, 1983). 표면냉각효과로서는 잠열손실(latent heat loss), 현열손실(sensible heat loss) 등의 열손실과 북서계절풍에 의한 Ekman 수송 등을 들 수 있다. 이들중 Ekman 수송은 수온이 보다 낮은 연안수(coastal water)를 남쪽(외해쪽)으로 이동시키는 효과를 말한다.

겨울의 수온역전 현상은 크게 두가지로 나눌 수

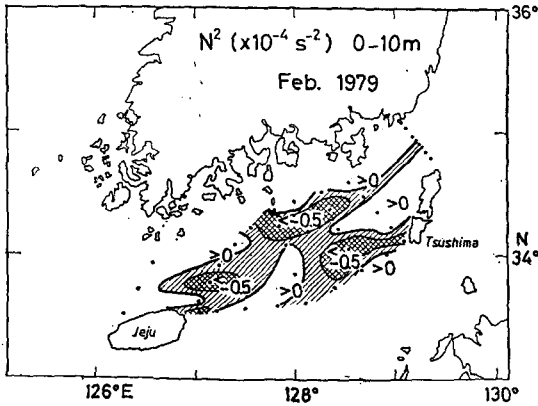


Fig. 11. Brunt-Väisälä frequency (N^2) distribution in the upper 10 m in February, 1979. Diagonally-lined and hatched areas indicate regions with $0 > N^2 \geq -0.5 \times 10^{-4} \text{ sec}^{-2}$ and $N^2 > -0.5 \times 10^{-4} \text{ sec}^{-2}$, respectively.

있다. 즉, 수온역전이 모든 수심에서 골고루 일어나는 남해 서부해역의 경우(Fig. 7)와 주로 표층에서 일어나는 동부해역의 경우(Fig. 9)이다. 이들 현상은 각각 서해의 경우(Kim et al., 1982) 및 동해의 경우(Kim and Cho, 1982)와 유사하다. 이러한 차이는 쓰시마난류 영향의 정도에 의한 것으로 생각된다. 서부해역에서는 난류의 영향을 적게 받으므로 표면에서의 열손실은 주로 저층에서의 열공급에 의해서 이뤄져야 되지만, 수심이 얕아 열공급에 한계가 있다. 수온구조가 연직적으로 거의 균일한 상태가 되는 사실(Fig. 7)은 이를 뒷받침하고 있으며, 역전층은 거의 전 수심에 걸쳐 형성되게 된다. 한편, 동부해역에서는 난류의 경로가 됨으로 지속적인 열공급을 받을 수 있다. 이는 수온구조가 어느 정도 성층화되고 있는 것으로도 알 수 있으며(Fig. 9), 역전층은 주로 표층에만 형성되게 된다.

2) 여름의 수온역전

여름의 역전현상도 역시 두가지로 나눌 수 있다. 즉, 수온역전이 수온약층 아래에서 일어나는 서부해역의 경우(Fig. 8)와 표층에서 일어나는 동부해역의 경우(Fig. 10)이다. 이들은 각각 Fig. 3에서 50~100 m 및 0~20m의 부분과 Fig. 4에서 10~15°C 및 20°C 이상의 부분에 대체로 일치한다.

이와같은 현상을 더욱 구체적으로 파악하기 위해서 Fig. 12에 1979년 8월을 예로 들어 수온 및 밀도

역전이 일어나는 관측점을 나타내었다. 이것으로 남해 중앙부를 경계로 서부해역에서는 주로 수온역전만이 일어나고 있는 반면, 동부해역에서는 대체로 수온역전과 밀도역전이 함께 일어나고 있음을 알 수

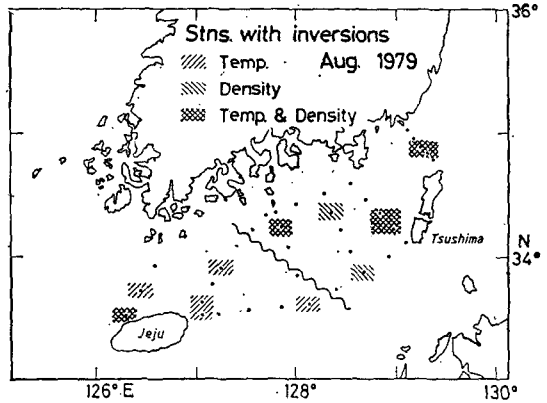


Fig. 12. Stations with inversion layer of temperature (////), density (\\\\\\), and both temperature and density (XXXX) in August, 1979. ~~~~ roughly represents a boundary between regions having stations with temperature inversions and with density inversions.

있다. 또한 이들 역전층을 보면, 서부해역은 모두가 수온약층 아래에 있고, 동부해역은 Line 207의 Stn. 04를 제외하면 모두가 20m보다 얕은 표층에 있다.

서부해역에서의 수온역전은 서해를 향하는 고온고염인 쓰시마난류의 일부(황해난류)가 저온저염인 황해저층냉수(Yellow Sea Bottom Cold Water)와 서로 혼합되는 과정에서 생기는 것으로 생각된다. 이 해역은 일반적으로 표층은 강한 성층상태를 이루고 있지만, 그 밑에는 거의 균일한 상태이므로(Fig. 8), 여기서 성질이 다른 두가지 수괴(water masses)가 혼합되면, 염분의 보상효과를 받고 밀도역전을 수반하지 않는 수온역전이 생긴다. Kim et al. (1982)의 결과를 고려하면, 이러한 수온역전이 일어나는 해역은 제주도 주변 해역으로 확대된다.

한편 동부해역에서는 표층에서 수온역전 뿐만 아니라 밀도역전도 일어나고 있으므로, 이 해역에서의 역전현상은 표층에서 냉수의 이류(advection)에 의하여 생기는 것으로 생각된다. 냉수를 이동시키는 원인으로서는 여름에 타월한 남서계절풍, 쓰시마난류의 강한 흐름에 따른 시어(shear) 등을 생각할 수 있다.

요 약

1965년부터 1979년까지의 해양관측자료를 사용하여 우리나라 남해에서 일어나는 수온역전현상을 조사하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 역전현상은 여름보다 겨울에 6배정도 많이 일어난다.

2) 겨울의 경우, 남해 서부해역에서는 수온역전이 모든 수심에서 골고루 일어나는 반면, 동부해역에서는 주로 표층에서 일어난다.

3) 여름의 경우, 서부해역에서는 역전층이 주로 수온약층 아래에 형성되는 반면, 동부해역에서는 주로 표층에 형성된다.

겨울의 역전현상은 기본적으로는 표면 냉각효과에 의해서 생기는 것으로 생각된다. 다만, 서부와 동부해역에서 역전층이 형성되는 수심에 차이가 있는 것은 쓰시마난류 영향의 정도가 양해역에서 크게 다르기 때문이라고 보여진다. 여름의 경우 서부해역에서는 쓰시마난류와 황해 저층냉수가 수온약층 밑에서 혼합되는 과정에서 생기는 것으로 보이고, 동부해역에서는 보다 수온이 낮은 물이 표층을 따라 유입하기 때문에 일어나는 것으로 생각된다.

사 사

본 연구에 조언을 해 주신 부산수산대학 해양학과 조규태 교수님께 감사사를 드립니다. 자료정리를 도와 준 윤홍주 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.
- Kang, Y.Q. 1983. On the mechanism of temperature inversion in the surface layer (*J. Oceanol. Soc. Korea*. (in print).
- Kim, H.J. and K.D. Cho. 1982. Inversion phenomena of density in the Japan Sea. *J. Oceanol. Soc. Korea* 17, 51—58.
- Kim, H.J., H.J. Yoon and S.K. Yang. 1982. Inversion phenomena of temperature in the Yellow Sea. *Bull. Korean Fish. Tech. Soc.* 18, 91—96. 17, 51—58.
- Lee, K.B. 1978. Study on the coastal cold water near Ulsan. *J. Oceanol. Soc. Korea* 13, 5—10.
- 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.