

황해 중부 연안 수온전선역의 정량적 해석

최현용 · 이상호 · 오임상¹
군산대학교 해양학과, ¹서울대학교 해양학과

Quantitative Analysis of the Thermal Front in the Mid-eastern Coastal Area of the Yellow Sea

HYUN-YONG CHOI, SANG-HO LEE AND IM-SANG OH¹

Department of Oceanography, Kunsan National University, Kunsan 573-360, Korea
¹Department of Oceanography, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea

하계에 연안혼합역과 외해성층역 사이에서 강력한 표층수온전선이 형성되는 한국 서해 중부의 태안반도 인근 해역에서 1994년 7월, 1995년 5월 및 1996년 6월 등 3회에 걸쳐 취득한 해수물성자료를 분석하였다. 수직혼합역은 최저 15 m에서 최고 60 m 이상까지의 다양한 수심의 지형으로 이루어졌으며, 수심에 관계없이 표층과 저층의 수온차가 1°C 이내였다. 관측시기에 관계없이 혼합역 내의 수평적인 표층수온차는 작으면서도 수심에 반비례하는 특징을 보이고 표층수온이 가장 낮은 해역은 태안반도 서단에서 남서방향으로 형성되어있는 수심이 50 m 이상인 깊은 수로를 중심으로 관측되었다. 또한 6월에 관측한 표층수온전선이 태양복사열이 더 강한 7월에 관측한 표층수온전선에 비해 더 강한 특성을 보였다. 이러한 관측결과는 연구해역의 표층수온전선역은 수층의 수직혼합에 의해 형성되지만, 수온전선의 강도는 수직혼합역의 수심 및 외해성층역의 수온의 수직구조 등에 의해 결정되는 것으로 해석된다.

The hydrographic data collected at three different times July, 1994, May, 1995 and June, 1996 around Taean peninsula in the mid-Yellow Sea off Korea, well known for the well-defined surface thermal fronts in summer, were analyzed. In the vertically well-mixed area where water depths varied from 15 m depth to 60 m depth, the temperature difference in the water column was less than 1°C. The temperature observed in the vertically well-mixed area was reversely related with the water depths and the coldest surface water was always observed over the deep channel with the depth of more than 50m, which developed southwestward off the promontory of Taean peninsula, irrespective of the observation period. The strengths of surface thermal front observed in June were much stronger than those in July, even though the surface temperature of stratified area were nearly the same as in July. These observed features could be explained as follows: A major physical process for the formation of the surface thermal front is the vertical mixing of water column but the detailed thermal structure in the study area depend on the physical parameters such as the water depth in the vertically well-mixed side and the vertical thermal structure in the stratified side.

서 론

연안역의 수온전선은 물성이 서로 다른 해수의 수평적 이송, 용승, 혹은 수층의 수직혼합과 같은 서로 다른 물리적 기작에 의해 형성될 수 있다. 이들 기작에 의해 결과적으로 형성된 전선의 역할도 중요하지만, 이들 기작이 서로 다른 물리적 특성을 지니므로, 이 전선의 형성원인은 전선 인근해역의 해양학적 환경에 중요한 의미를 지닐 수 있다. 해양환경에서 전선의 역할에 대한 인식이 있음에도 불구하고, 태안반도 서측해역을 포함한 황해 연안역에서 하계에 형성되는 수온전선에 대한 연구는 미

흡한 실정이다.

태안반도 인근역의 수온전선에 관한 기존의 연구는 해수물성 관측자료를 이용한 수온전선의 개관적 특성 파악이 주를 이루고 있으며(Seung *et al.*, 1990; 조와 승, 1986; 최, 1988), 이외에 수치모델링을 이용한 조석전선의 재현(신과 승, 1993) 및 황해연안역의 조석전선에 의한 지형류의 추정(Seung, 1987) 등으로 대별된다. 이들 연구 결과는 태안반도 인근해역에서 하계에 형성되는 수온전선을 단순히 Simpson and Hunter(1974) 등에 의해 제시된 에너지 균형에 의거해, 조류에 의해 수직적으로 혼합된 수직혼합역과 혼합되지 않은 해역사이에서 나타나는 조석전선

*본 연구는 1995년도 교육부 기초과학육성 연구비(BSRI-97-5409)의 지원에 의한 것임.

으로 설명하고, 표층냉수역의 중심부가 경기만 입구의 천퇴역에 위치하는 것으로 해석하고 있지만, 관측자료를 통한 정량적인 해석은 시도되지 않았다. 하지만 최(1995)는 1994년 7월에 태안반도 인근해역에서 관측한 해수물성자료를 분석하여, 기존의 연구 결과와는 달리 최저표층수온은 천퇴역과 태안반도사이의 수심이 50 m 이상인 깊은 골지역을 중심으로 분포하고 있으며, 수직적으로 해수물성이 균질한 혼합역내에서도 수심에 따라 표층수온의 수평적 차이가 있음을 보고한바 있어 이 해역 전선의 형성원인에 대한 재고가 있어야 한다.

Linden(1991)은 수직 혼합역이라도 혼합역의 수심에 따라 공간적인 수온차가 달라질 수 있으며, 혼합역 내에서도 수심의 변화가 심한 경우에는 수심에 따른 수온차로 인해 혼합역 내에서도 수평적인 수온전선이 형성될 수 있음을 제시한바 있다. 이와 같이 해수의 수직혼합정도에 따라 형성된 수평적 수온전선의 강도는, 성층역의 수직수온구조(수온약층의 깊이, 수온약층 상하의 수온차등)와 혼합역의 수심 등에 의해 결정된다. 수직 혼합해역이라도, 수심이 성층해역의 수온약층의 수심과 같을 경우에는 성층역과 혼합역의 수온차가 나지않게되고, 혼합역의 수심이 성층역의 수온약층보다 깊어질수록 전선 양측의 수온차가 크게 날 수 있다. 천해역에서 형성되는 조석전선은 일반적으로 해저지형에 평행하게 형성되는데 비해(Loder and Greenberg, 1986), 태안반도 서측해역에서 형성되는 수온전선은 해저지형을 가로 질러 형성되며, 수온전선의 규모가 작음에도 불구하고 하계에 전선 양측의 수온차가 5°C 이상으로 매우 강한 특징을 지니고 있다(조와 승, 1986; Seung *et al.*, 1990; 최, 1988; 최, 1995). 연구해역에서 멀리 떨어진 군산 이남해역(수산진흥원 309, 310 관측선)에서도 하계에 연안혼합역과 외해성층역사이에서 조석전선이 형성되지만 전선 양측의 표층수온차는 2°C 이내로 태안반도 인근해역의 전선에 비해 그 강도가 약하며(추와 조, 1984), 이외에도 수산진흥원 정선관측자료(수산진흥원, 1986) 등은 하계 황해 연안역에서는 전체적으로 표층수온은 외양이 높고, 저층수온은 연안역이 높은 조석전선의 수온구조를 보이고 있어, 황해의 외양역과 연안역사이에는 하계에 수온전선이 형성됨을 보이고 있다. 이와 같이 황해 연안역에서 하계에 형성된 전선의 강도가 지역에 따라 다른 것으로부터, 전선의 강도는 해저 지형과 같은 지역 고유의 물리적 인자와 관련이 있음을 추론할 수 있다.

따라서 태안반도 인근해역의 해양환경에 중요한 역할을 할 것으로 추론되는 하계 표층수온전선의 특성을 파악하기 위해서는 먼저 이 전선역의 형성과 관계되는 물리적 현상이 구명되어야 한다. 이를 위해 본 연구에서는 태안반도 인근해역에 형성되는 수온전선역중 남쪽부분인 태안반도 이남해역에서 1994년부터 1996년까지 3회에 걸쳐 관측된 CTD 관측자료를 분석하여 연구해역의 시,공간적 수온분포특성을 파악하고, 이 특성을 수층의 수직혼합기작에 근거하여 정량적으로 해석하였다.

자 료

본 연구에서 사용한 관측자료는 1994년부터 1996년까지 3회에 걸쳐 태안반도 인근해역에서 취득된 정점별 CTD자료 및

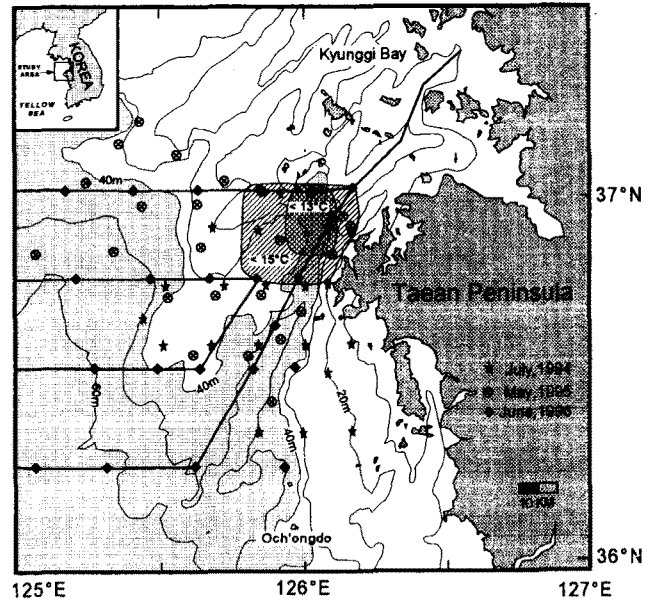


Fig. 1. Bathymetry and the CTD profiling points. A bold line is the ship track along which surface temperature and salinity were obtained in June, 1996. Two gridded areas denote the areas where the surface temperatures along the ship track are lower than 13°C and 15°C, respectively.

Table 1. Details of data set used.

Period	Instruments	No. of observation
July 4-8, 1994	SBE-19	21
May 13-19, 1995	SBE-19	24
June 13-19, 1996	SBE-911	22
June 13-19, 1996	Aanderra RCM-7	Track

1996년 6월에 관측한 항적별 표층수온의 자료이다. 연구해역의 해저지형도 및 CTD 관측정점 위치 그리고 항적은 Fig. 1과 같다. 특징적인 해저지형은 태안반도에 근접하여 북동-남서 방향으로 발달된 수심이 40 m 이상 이고 폭이 약 10 km인 해저곡(channel)이며, 이 해저곡의 서쪽으로는 수심이 40 m보다 얕은 사주(sand bank)가 연구해역 북부에 위치한 경기만으로부터 남서방향으로 발달되어 있고, 동쪽으로는 수심 40 m 이하인 천해역이 발달해 있다.

CTD 자료는 관측년도는 다르지만 각각 5, 6 및 7월에 관측된 자료로서, 해수표면에 유입되는 태양복사열의 강도 및 이에 수반되는 성층의 특성이 서로 다른 시기에 관측되었으며, 정점의 위치 역시 관측시기에 따라 서로 다르지만, 각 자료 공히 성층역과 혼합역을 대표하는 정점들로 구성되어 있다. 항적별 표층수온은 조사선 갑판에 설치한 수조속에 수온감지기가 부착된 Aanderra RCM-7 유속계를 장착하여 항해중에 2분 간격으로 관측된 자료이다. 이용된 자료에 대한 자세한 정보는 Table 1과 같다.

결과 및 토의

연구해역내의 해수물성의 수직적인 분포특성을 파악하기 위해 관측자료로부터 potential energy anomaly(Simpson *et al.*, 1978)를 계산하여 해수의 성층정도를 판별하였다.

$$V = \frac{g}{H} \int_{-H}^0 (\bar{\rho} - \rho) z dz$$

여기서 $\bar{\rho}$ 는 수층이 완전히 혼합되었을 경우의 밀도이고 H는 총 수심이다. Potential energy anomaly(V)는 관측된 수층이 지닌 위

Table 2. (a) Temperature and stratification parameter (log[-V]) of water column observed in July, 1994

Station No.	Depth [m]	Surface temp. [°C]	Bottom temp. [°C]	Stratification parameter [J/m ³]
1	18.0	17.52	16.73	0.525
6	52.5	21.74	9.96	1.999
18	23.0	19.19	14.96	1.316
19	29.0	16.82	15.39	0.882
20	16.5	16.73	16.04	0.344
21	45.0	15.84	15.51	-0.185
22	59.0	16.01	15.60	0.641
23	36.0	16.46	15.79	0.399
24	30.5	16.65	16.24	0.148
25	59.5	15.95	14.99	0.833
26	29.5	16.93	15.47	0.824
27	37.0	19.87	14.83	1.605
28	51.0	21.42	10.57	1.827
29	40.0	21.68	13.24	1.845
30	31.5	20.91	14.08	1.664
31	48.5	19.77	12.80	1.725
32	42.5	18.17	16.43	1.133
33	18.5	18.84	17.78	0.520
34	21.0	20.25	18.11	0.982
35	35.0	20.02	13.54	1.573
36	46.0	21.26	10.71	1.991

Table 2. (b) Temperature and stratification parameter (log[-V]) of water column observed in May, 1995

Station No.	Depth [m]	Surface temp. [°C]	Bottom temp. [°C]	Stratification parameter [J/m ³]
03	55.0	9.358	8.373	0.650
04	55.0	8.876	8.262	0.530
05	52.0	8.722	8.344	0.186
06	30.0	8.928	8.711	-0.090
07	45.0	9.175	8.276	0.670
08	42.0	10.115	8.313	0.869
09	51.0	10.717	6.963	1.289
10	56.0	10.572	6.584	1.479
11	54.0	10.478	7.095	1.316
12	40.0	10.738	7.139	1.329
13	37.0	9.795	7.202	1.064
14	39.0	10.425	7.748	1.184
15	25.0	9.379	8.546	0.447
16	25.0	9.659	9.253	0.141
17	16.0	9.252	9.216	-0.533
18	28.0	9.457	9.269	-0.174
19	51.0	8.679	8.650	-0.976
29	62.0	8.973	8.905	-0.527
30	28.0	9.306	9.144	-0.203
31	28.0	9.518	8.957	0.299
32	46.0	9.761	7.411	1.204
33	42.0	10.618	7.677	1.287
34	48.0	10.232	8.503	1.164
36	51.0	10.276	8.532	1.155

Table 2. (c) Temperature and stratification parameter (log[-V]) of water column observed in June, 1996

Station No.	Depth [m]	Surface temp. [°C]	Bottom temp. [°C]	Stratification parameter [J/m ³]
3	51.5	12.24	12.03	-0.408
4	56.0	11.81	11.81	-0.849
5	58.5	11.79	11.74	-0.072
6	50.0	12.32	11.21	0.606
7	46.5	14.42	10.33	1.447
10	46.0	18.88	6.81	1.984
11	23.5	11.95	11.18	0.391
15	52.0	13.98	8.43	1.660
16	65.5	20.58	6.21	2.099
17	70.5	20.94	6.42	2.149
25	60.5	20.30	6.10	2.122
26	38.5	19.54	7.20	1.903
27	33.5	20.56	8.63	1.895
28	30.0	12.90	11.88	0.518
29	38.0	15.36	9.87	1.403
30	47.5	16.01	7.66	1.804
31	55.5	19.87	5.99	2.109
35	43.0	20.67	8.21	1.825
36	56.5	18.92	7.55	1.904
37	43.5	14.59	9.69	1.351
38	16.0	12.89	12.79	-0.561
39	16.5	12.46	12.34	-0.551

치에너지와 이 수층이 수직적으로 완전혼합되었을 경우의 위치 에너지의 차(V)로서, V가 0이면 완전혼합이고 성층이 강할수록 -V가 커진다.

각 관측점별 수심, 표층과 저층의 수온 그리고 수층의 성층도는 Table 2 a-c에 각각 수록하였으며, Fig. 2는 이를 이용하여 구성한 각 관측시기별 표층수온 및 혼합역의 분포도이다. 각 그림에서 수직혼합역은 빗금친 부분으로 Log(-V)가 1 이하이고, 표층과 저층의 수온차 역시 1°C이내인 해역이다. 각 자료의 관측 시기가 각각 5월, 6월, 7월로서 태양복사열의 강도가 서로 다른 시기임에도 불구하고, 혼합역은 태안반도 서단에 인접한 해역을 중심으로 형성되고 있다. 또한 관측시기에 관계없이, 혼합역인 태안반도 서단해역의 표층수온이 성층역인 외해역보다 저온으로, 이들 사이에서 표층수온전선이 남동-북서방향으로 형성되며 각 관측시기별로 최저표층수온의 등온선이 태안반도 서단을 중심으로 형성되는 공통된 특성을 보이고 있다. 최저 냉수역의 위치는 1996년 6월에 관측된 항적별 표층수온 및 염분자료에서도 확인할 수 있다. Fig. 3은 Fig. 1의 항적을 따라 얻어진 자료의 T-S diagram으로, 연구해역의 표층수온의 분포를 극명하게 보여주고 있다. 연구해역내의 표층수온은 공간적으로 10°C 이상의 수온차를 보이고 있으며, 이 중에서도 수온이 15°C 이하인 해역(Fig. 1의 빗금친 부분)은 CTD자료에 의한 표층냉수역의 위치(Fig. 2)와 일치하고 있다.

성층역과 혼합역의 수온차는 관측시기에 따라 다르게 관측되어, 성층초기 단계인 5월에는 2°C 이내이지만, 성층이 심화되는 6월과 7월에는 약 5°C이상으로 크게 나타나고 있다. 하지만, 혼합역의 경계가 수온전선과 반드시 일치하지는 않는데 이러한 결과는 기존의 연구에서도 제시된바 있다(조와 승, 1986). Fig.

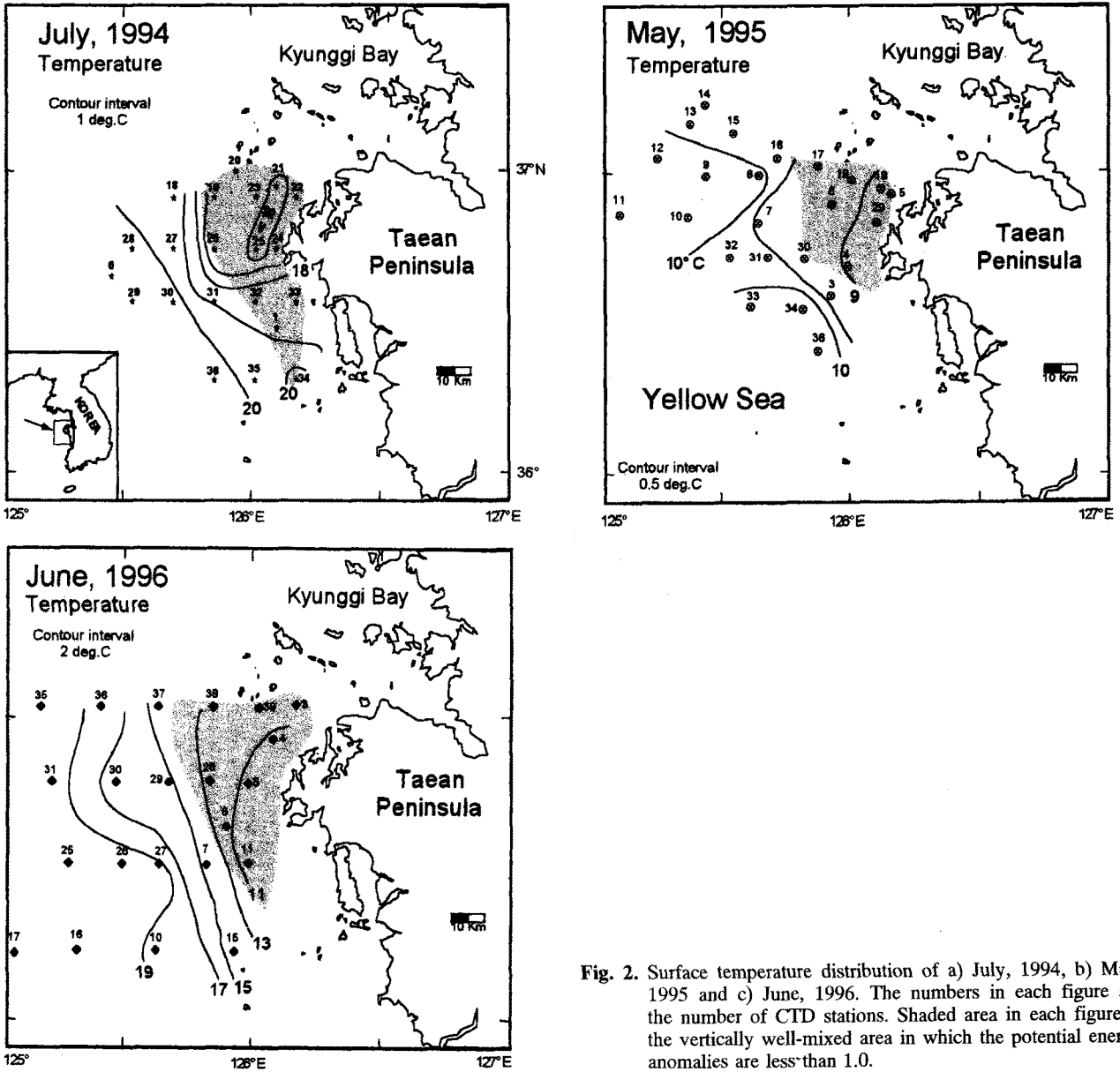


Fig. 2. Surface temperature distribution of a) July, 1994, b) May, 1995 and c) June, 1996. The numbers in each figure are the number of CTD stations. Shaded area in each figure is the vertically well-mixed area in which the potential energy anomalies are less than 1.0.

4는 Log(-V)와 표층수온의 관계로서 연구해역의 표층수온분포 특성이 해수의 성층도와 밀접한 관계가 있음을 뚜렷하게 제시하고 있다. 이 결과에 의하면 외해역의 성층은 5월에 가장 약하고, 7월보다 오히려 6월에 강한 것으로 분석되었으며, 성층역과 혼합역의 최대 수온차 역시 5월, 7월 그리고 6월의 순으로 증가하는 것으로 분석되어 성층역과 혼합역의 표층수온차는 외해성층역 수층의 성층도에 비례하는 특성을 보이고 있다.

3회의 관측결과로부터 본 연구해역은 1) 연구해역의 해수가 계절에 관계없이 외해 성층역과 연안 혼합역으로 구분되고, 2) 성층역과 혼합역의 표층수온차는 외해역 수층의 성층도와 비례 관계가 있으며, 특히 6월에 관측된 수온전선이 7월에 비해 오히려 강하고 3) 3회의 관측시기가 다름에도 불구하고 연구해역내의 최저냉수역의 위치가 거의 일정하다는 특징으로 요약할 수 있다.

최저 냉수역의 위치

연구해역내에서 성층역과 혼합역의 표층수온차는 관측시기에 따라 다르지만, 최저 표층수온역은 관측시기에 관계없이 혼합역내에서도 태안반도에 인접한 정점을 중심으로 관측되는 공통적인 특성을 보이고 있다(Fig. 2). 이와 같이 최저표층수온역의 위치가 관측시기에 관계없이 일정하다는 사실로부터, 연구해역내의 혼합역을 형성하는 물리적인 기작은 시간에 관계없이 거의 일정한 특성을 보이는 물리적인자와 밀접한 관련이 있음을 유추할 수 있다. 이와 같은 물리적 인자의 하나로 해저지형을 들 수 있다. 최저 표층냉수역의 위치는 수온전선의 위치 및 강도와 밀접한 관련이 있고, 이로 인해 형성된 전선은 부차적으로 전선역 주위의 흐름에 영향을 주므로, 연구해역내에서 최저표층냉수역의 위치는 상대적으로 중요한 의미를 지닐 수 있다. 혼합역이 단순히 수층내의 수직혼합기작에 의해 형성되는 경우,

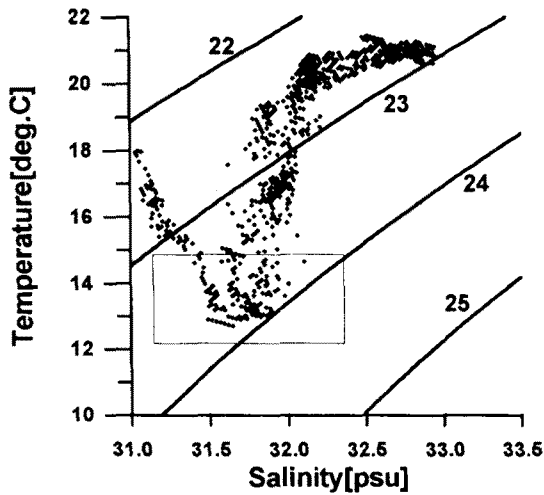


Fig. 3. T-S diagram based on the surface temperature and salinity obtained along the ship track in Fig. 1 at June, 1996. The values in the rectangle correspond to the data over the gridded area in Fig. 1.

혼합역의 수온분포는 혼합역의 수심에 의해 결정되므로 (Prandle and Lane, 1995; Linden, 1991), 이를 검정하기 위하여 혼합역내의 수심과 수온의 관계를 분석하였다. Fig. 5는 Log(-V)가 1 이하인 혼합역의 특성을 보이는 정점들의 수심과 표층수온의 관계이다. 관측시기에 관계없이 혼합역의 해저지형은 최저 15 m에서 최고 60 m 이상까지 다양한 수심으로 구성되어 있으며, 수심이 깊어질수록 수온이 낮아지는 경향을 보이고 있어 최저

수온역의 위치가 수심과 밀접한 관계가 있음을 제시하고 있다. 조와 승(1986)에 의해 제시된 15년 평균 수산진흥원자료 및 신과 승(1993)의 조석혼합효율에 의거한 수치실험결과들은 최저 수온역이 수심이 얇은 경기만 중심부의 천퇴상에 위치하고 있는 것으로 보고한바 있지만, 본 분석결과는 수층내의 수직혼합이 혼합역 형성의 직접적인 원인일수 있음을 반증해주는 자료로서 기존에 제시되었던 최저 표층냉수역의 위치에 대한 새로운 사실이다. 하지만 혼합역내의 수평적인 수심차에 비해 혼합역내 수온의 수평적인 차이가 크지않아, 이에 대한 정량적인 추정이 필요하다.

동일한 태양복사열이 표층에 유입되는 경우, 혼합수심에 따른 수온을 정량적으로 추정하기 위해 다음과 같은 단순한 가정을 취하였다. 연구해역내에서 해수의 수직혼합작용 및 수평적인 열의 이송이 없다고 가정하고, 또한 표층을 제외하고 연구해역과 연구해역 외부와의 열의 교환이 없는 것으로 가정하면, 연구해역의 수온은 수평적으로는 동일하고 수직적인 성층만 있게 된다. 이와 같은 해수가 수직적으로 혼합될 경우, 혼합된 수층의 수온은 혼합수심에 따라 결정된다.

$$\int_{z=0}^{z=H(x)} \rho_c \bar{T} dz = \int_{z=0}^{z=H(x)} \rho_p T(z) dz$$

여기서 T(z)는 혼합되기전 성층역의 수직수온구조

$$\bar{T} = \frac{1}{H(x)} \int_{z=0}^{z=H(x)} T(z) dz \text{는 혼합된 후의 수온}$$

이와 같은 가정은 초기 성층을 주고 이로부터 조석전선의 재

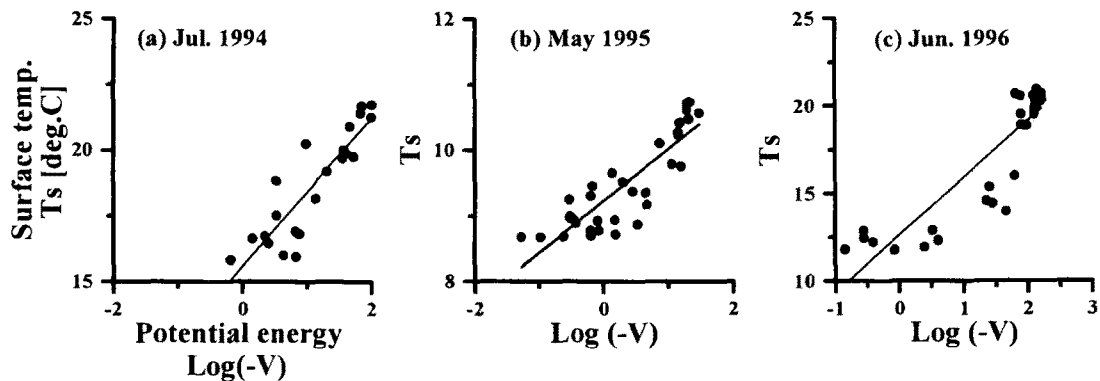


Fig. 4. Surface temperature (Ts) versus potential energy anomaly calculated from the observed CTD data. The value of potential energy anomaly below 1.0 means that a water column is vertically well-mixed.

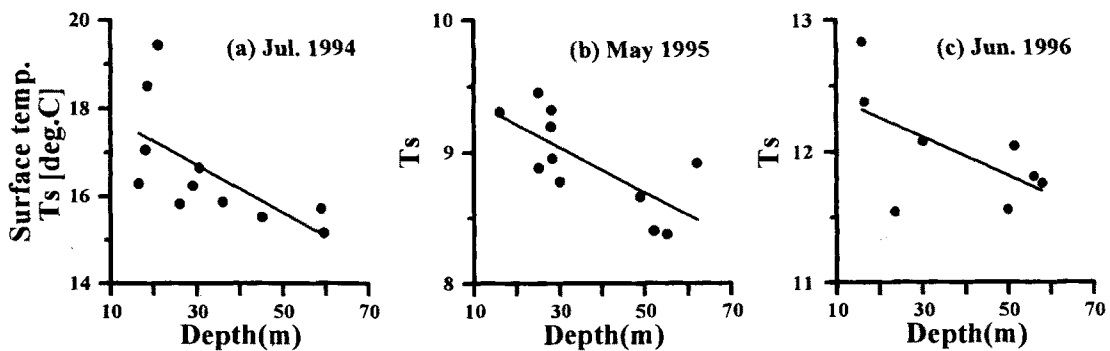


Fig. 5. Surface temperature (Ts) versus water depth in the vertically well-mixed area (shaded area in Fig. 2).

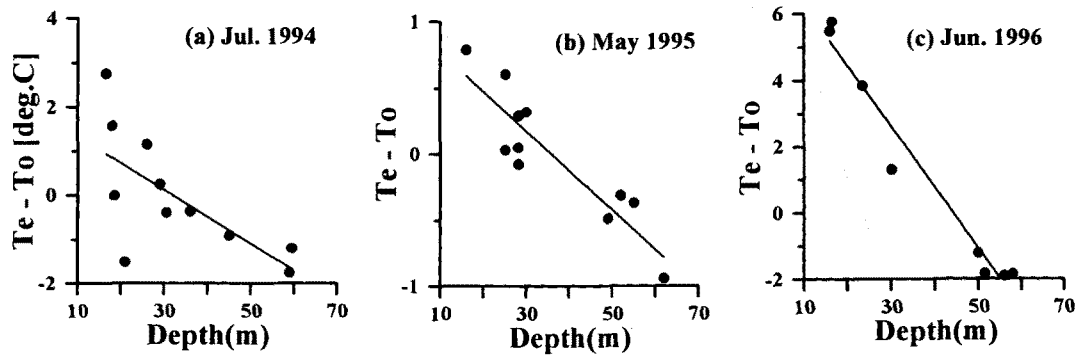


Fig. 6. Temperature differences between the estimated (T_e) and the observed temperatures (T_o) in the vertically well-mixed area. The estimated temperature were calculated using the stratified temperature profile presented in Fig. 7.

현실험을 수행한 Lee and Ahn(1993) 및 Chen and Beardsley (1994) 등에 의해서도 사용된바 있다. 본 연구에서는 각 관측시기별 관측치중 성층이 가장 강한 외해역의 수온구조가 혼합의 영향을 받지 않은 것으로 가정하여, 외해역의 수온수직구조와 위 관계식을 이용하여 혼합역의 수심에 따른 수온을 추정하였다.

Fig. 6은 각 관측시기별로 성층이 가장 강한 외해역의 수온구조 $T(z)$ (Fig. 7의 점선)와 위 식을 이용하여 추정된 혼합수심별 수온추정치 \bar{T} 와 실제 관측수온치의 관계이다. 혼합역의 수심이 얕을수록 관측치가 추정치보다 낮고 수심이 깊어질수록 관측치가 추정치보다 높게 나타나고 있어, 관측치에서 나타난 수온의 수평구배가 추정치에 의한 수온의 수평구배보다 완만하다. 이러한 사실은 혼합역내에서 수직적인 열의 혼합의에도 수평적인 열의 교환이 활발히 일어날 수 있음을 시사하고 있다. Linden(1991)은 혼합역내의 수심이 서로 다른 경우 혼합역내에서도 공간적인 수온차가 발생하여 수온전선이 형성되며, 조류가 약한 시기에는 수평적인 밀도차로 인해 경압순환이 형성되어, 전선을 가로지르는 흐름(gravity current)이 형성되지만, 조류가 강해지면 해저마찰력의 증가로 인해 밀도의 경압구조가 수직적으로 혼합되는 기작이 일어나고, 이 기작의 반복에 의해 결과적으로 전선을 가로지르는 혼합이 일어날 수 있음을 지적한 바 있다. 이와 같은 혼합기작에 의해 상대적으로 수심이 얕은 혼합역의 수온은 표층에 유입된 태양복사열이 수직혼합만에 의해 수층내에 확산되었을 경우의 수온추정치보다 낮아져야 하고, 수심이 깊은 혼합역의 수온은 추정치보다 높아지게 될 수 있다.

위에서 제시한 수직혼합 및 수평혼합 기작이 연구해역내에 작용하는 것으로 가정할 경우, 연구 해역내에서 관측된 혼합역내의 수평적인 표층수온분포가 잘 설명될수 있다. 이 경우 기존의 연구결과들에 의해 연구해역의 표층냉수역의 중심으로 제시된 경기만 입구의 천퇴상의 수온은 단순히 수층의 수직혼합만에 의한 경우 수온이 실제 관측치보다 높아야 하지만, 인접한 태안반도 인근의 수심이 깊은 해역에서 수직혼합에 의해 형성된 상대적인 저온수와의 수평적인 열교환에 의해 수온이 낮게 관측되는 것으로 추론할수 있으므로, 최저 냉수역의 중심은 경기만 입구의 천퇴상이 아니라 천퇴와 태안반도 사이에 형성된 수심이 깊은 해곡상에서 관측되고 있는 사실과 일치한다.

월별 수온전선 강도의 변화

관측시기에 관계없이 연구해역은 성층역과 혼합역으로 구분되지만, 성층역과 혼합역사이의 공간적인 수온차는 5월에는 2°C 이내이지만 6월과 7월에는 각각 최대 10°C 및 6°C 의 공간적인 수온차를 보이고 있어 하계로 진행하면서 수온전선의 강도가 강해지는 중위도 천해 조석전선의 일반적인 특성을 지니고 있다. 하지만 6월과 7월의 수온분포를 비교하면, 성층역의 표층수온은 $21\sim 22^{\circ}\text{C}$ 로 거의 비슷한 반면에 최저 냉수역의 표층수온은 각각 약 11°C , 17°C 이하로 관측되어 태양복사열이 약한 6월에 오히려 수온전선의 강도가 더 강해지는 결과를 보이고 있는데, 이러한 특성은 Seung *et al.* (1990)이 제시한 인공위성 관측결과에서도 제시된바 있다. Fig. 7은 1994년 7월과 1996년 6월의 CTD관측자료중에서 성층역 및 혼합역 정점의 수온수직구조이다. 6월의 경우 강력한 수온약층이 표층 가까이 형성되어 표층과 저층의 수온차가 큰 반면에 7월의 경우에는 표층수온은 6월과 비슷하지만 수온약층의 깊이가 깊어지고, 수온약층의 강도도 6월에 비해 약해진 수온구조를 보이고 있어, 성층역의 수온의 수직구조가 표층수온전선의 강도를 결정하는 중요한 변수임을 시사하고 있다.

앞절에서 수층의 수직혼합을 가정할 경우 관측된 표층냉수역의 특성이 잘 설명될수 있음을 보인바 있다. 수층의 수직혼합이 연구해역 수온전선의 형성원인이라면 연구해역의 계절별 수온전선의 강도 또한 해수의 수직혼합에 의해 설명되어야 한다. 2층 유체의 수온구조를 지닌 성층역이 완전히 혼합될 경우, 혼합역 수온은 다음식에 의해 계산할수 있다.

$$\bar{T} = \frac{T_1 H_1 + T_2 H_2}{H_1 + H_2}$$

여기서 H_1 , H_2 는 각각 상층과 하층의 두께이고, T_1 , T_2 는 상층과 하층의 수온으로, 성층역과 혼합역의 수심이 같더라도 성층역의 수온의 수직구조에 따라 표층수온전선 양층의 수온차가 달라지게 된다. 이 식을 이용하여 Fig. 7의 외해성층역을 2층유체로 가정하여, 이 수층이 수직적으로 완전히 혼합되었을 경우 혼합 전후의 표층수온의 차를 추정할수 있다. 1994년 6월에는 두층의 수온차는 약 14°C , 총수심 65 m 그리고 하층의 두께는 약 50 m로 가정하고(Fig. 7의 a), 7월에는 두층의 수온차 약 10°C , 총수심 50 m, 그리고 하층의 두께는 약 40 m로 가정하여(Fig.

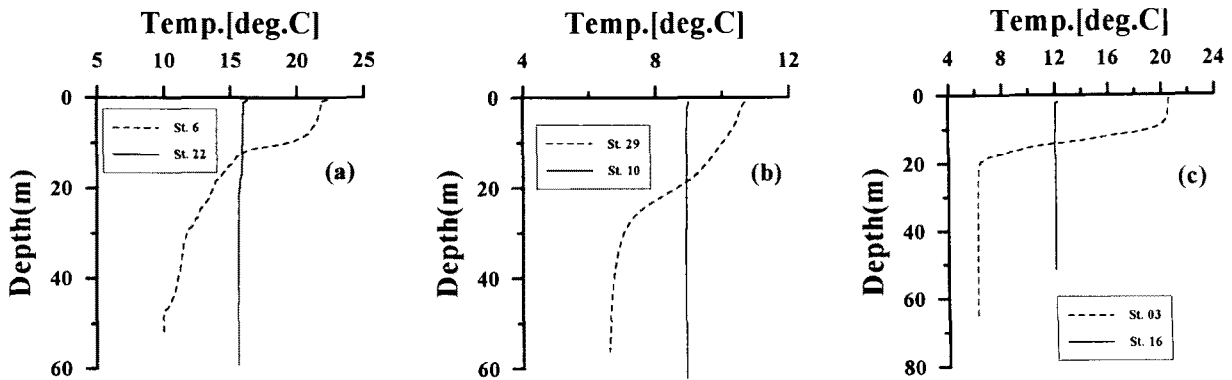


Fig. 7. Temperature profiles observed at highly stratified and vertically well-mixed area in a) July, 1994, b) May, 1995 and c) June, 1996.

7의 c), 성층역과 혼합역의 표층수온차를 계산하면, 6월에는 약 11°C, 7월에는 약 8°C차를 보여, 실제 관측치와 유사한 특성을 보이고 있다. 이 결과는 수온전선의 강도가 성층역의 수온구조에 따라 달라질수 있음을 제시하는 결과로서, 연구해역내의 혼합냉수역이 해수의 수직혼합에 의해 형성되고 있음을 제시하는 또다른 증거이다.

중위도 온대역의 천해 조석전선의 경우, 봄에서 여름으로 갈수록 태양복사열이 점진적으로 증가함에 따라 표층수온전선의 강도도 강해지지만, 태양복사열이 아주 강해지는 한여름에는 혼합역의 표층주위에 성층이 형성되므로서, 오히려 수온전선의 강도가 약해지는 것으로 알려져 있다. 하지만, 황해를 포함한 중위도의 계절적인 수온약층의 특성은 태양복사열이 증가하는 초여름에 표층부근에 강한 수온약층이 형성되지만, 태양복사열이 강해질수록 수온약층의 깊이가 깊어져 수온의 수직구배가 초여름에 비해 완만해지는 특성을 보이므로, 이 해역에서 수직혼합기작에 의해 성층역과 혼합역사이에서 형성되는 표층 수온전선이 형성되는 경우, 혼합역 표층주위의 성층을 고려하지 않더라도 성층역의 수온 수직구조의 계절변화 특성으로 인해 한여름 보다 오히려 초여름에 더욱 강해져야 할 것으로 추론할수 있다.

요약 및 결론

기존의 연구들은 태안반도 인근해역에서 형성된 하계 수온전선의 형성원인에 대해 수층내의 에너지 균형(Simpson and Hunter, 1974)에 의한 수직혼합의 결과라는 정성적인 설명을 제시한 바 있다. 본 연구에서는 성층역과 혼합역의 공간적인 수온의 분포 및 월별 수온전선의 변화 특성을 분석하여, 외부로부터의 냉수의 공급이나 용승과 같은 물리적 요인이 없어도 해수의 수직혼합만으로도 수온전선이 형성될수 있음을 정량적으로 제시하였으며, 밝혀진 결과는 다음과 같이 요약할수 있다.

- 1) 외해성층역과 연안혼합역사이에서 표층수온전선이 형성되며, 표층수온은 해수의 성층도에 비례한다.
- 2) 혼합역의 범위는 관측시기에 관계없이 거의 일정하며, 특히 혼합역내에서도 수온은 수심과 반비례관계로서, 최저 표층냉수역은 3회의 관측 결과 공히 태안반도에 인접한 수로를 중심으로 형성된다.
- 3) 월별 표층수온전선의 강도는 춘계보다는 하계에 강하지만,

태양복사열이 강한 7월보다는 성층 초기인 6월에 관측한 수온전선의 강도가 강한 것으로 분석되었다.

이와 같은 연구해역의 시, 공간적인 수온분포특성은 동일한 태양복사열이 표층을 통해 유입된다는 가정하에서 수층의 수직혼합기작에 의해 설명할수 있었다. 하지만, 혼합역내에서도 수심이 얇은 해역의 관측수온은 수직혼합기작에 의한 추정수온에 비해 낮고, 수심이 깊은 해역은 관측수온이 상대적으로 높아서, 혼합역내에서는 수직혼합외에도 수평적인 혼합이 강하게 일어나고 있음을 시사하고 있다. 이로부터, 태안반도 이남해역에서도 하계에 조석전선이 형성됨에도 불구하고(추와 조, 1984; 조와 승, 1986) 태안반도 인근의 수온전선의 강도가 다른해역에 비해 강하게 형성되는 가장 중요한 물리적인자는 혼합역내에 수심이 50 m 이상인 깊은 골이 발달되어 있는 본 연구해역의 독특한 해저지형구조인 것으로 추론할수 있다.

천해역에서 해수의 수직혼합에 의해 형성되는 전선의 경우, 혼합역의 수심에 따라 수온의 공간적인 구배가 달라지고, 이로 인해 유발되는 부차적인 흐름은 해저지형과의 상호 작용에 의해 특성이 결정되므로서 연안역 물질 순환등에 중요한 물리적인자로 작용한다. 본 연구에서는 태안반도 인근 해역의 수온전선의 특성 및 혼합역내의 수온분포특성을 해수의 수직혼합기작에 근거하여 정량적인 해석을 시도하였지만, 차후에는 이 전선이 연구해역의 해수 순환등 해양환경에 미치는 영향 등에 대한 연구가 계속되어야 할 것이다.

사 사

본 논문은 교육부 기초과학연구소 학술연구 조성비(과제번호: BSRI-97-5409)의 지원에 의해 수행되었습니다. 본 논문의 원고를 세밀하게 검토해주시고 지적해주신 두 분 심사위원들에게 깊은 감사를 드리며, 아울러 본 논문에 이용한 자료의 취득 및 분석을 도와준 군산대학교 해양학과 석사과정 권효근군과 서울대학교 해양학과 박사과정 김선동군에게 감사를 드립니다.

참고문헌

- 국립수산진흥원, 1986. 한국근해 평년해황도. 예문사, 186 pp.
 신상익, 승영호, 1993. 혼합을 개념을 이용한 서해중부 조석전

- 선의 수치모델. 한국해양학회지, **28**(2): 121-131.
- 조철호, 승영호, 1989. 경기만일대의 조석전선 조사연구. 인하대학교 황해연구, **2**: 51-61.
- 최현용, 1995. 태안반도 인근해역의 초여름 해수특성. 군산대학교 해양개발연구, **7**(1): 75-87.
- 최현우, 1988. 여름철 서해안 태안반도 주변해역의 조석전선. 서울대학교 석사논문, 42 pp.
- 추효상, 조규대, 1984. 1982년 하계 서해안 조석전선의 구조. 한국수산학회지, **17**(2): 83-91.
- Ahn, H.S. and H.C. Lee, 1993. Numerical experiment for the formation of the Yellow Sea Cold Watermass. *J. Oceanol. Soc. Korea*, **28**(2): 101-106.
- Chen, C. and R. C. Beardsly, 1995. A numerical study of stratified tidal rectification over finite-amplitude banks. Part I: Symmetric Banks. *J. Phys. Oceanogr.*, **25**: 2090-2110.
- Linden, P.F., 1991. Dynamics of fronts and eddies. In: *Non-linear Topics in Ocean Physics*, edited by Osborne A.R., North-Holland, 996 pp.
- Loder, J.W. and D.A. Greenberg, 1986. Predicted positions of tidal fronts in the Gulf of Maine region. *Cont. Shelf Res.*, **6**(3): 397-414.
- Prandle, D. and A. Lane, 1995. The annual temperature cycle in shelf seas. *Cont. Shelf Res.*, **15**(6): 681-704.
- Seung, Y.H., J.H. Chung and Y.C. Park, 1990. Oceanographic studies related to the tidal front in the Mid-Yellow Sea off Korea: Physical aspects. *J. Oceanol. Soc. Korea*, **25**(2): 84-95.
- Seung, Y.H., 1987. A summer circulation inferred from the density(temperature) distribution in the eastern Yellow Sea. *J. Oceanol. Soc. Korea*, **22**: 63-70.
- Simpson, J.H. and J.R. Hunter, 1974. Front in the Irish Sea. *Nature*, **250**: 404-406.
- Simpson, J.H., C.M. Allen and N.C.G. Morris, 1978. Fronts on the continental shelf. *J. Geophys. Res.*, **83**: 4607-4614.