

진해·마산만의 성층화 및 DO 농도변화 Stratification and DO Concentration Changes in Chinhae-Masan Bay

조홍연* · 채장원* · 전시영**

Hong Yeon Cho*, Jang Won Chae*, and Si Young Chun**

要 旨 : 진해·마산만에서 수온, 염도 및 DO 농도를 연직방향으로 1년동안 측정하였다. 관측된 수온 및 염도 자료를 이용하여 성층화 특성을 분석하고, DO 농도의 연직변화를 성층화 특성 및 저질오염도와 관련하여 분석하였다. 분석결과, 진해·마산만의 수온 성층화는 4월 이전에 시작되어 10월경에 종료되는 양상을 보이고 있는 것으로 판단되었다. 또한, 1998년 4월 연직방향의 평균 염도변화는 3.9‰ 정도로 증가되고, 1998년 8월 9.3%, 10월 4.3% 정도가 유지되어 가을철에도 염도 성층이 지속되고 있는 것으로 파악되었다. 한편, DO 농도는 성층화가 시작되는 4월을 기점으로 연직방향 평균 DO 농도변화도 2.6(mg/L)에서 6월 8.3(mg/L), 8월 5.9(mg/L), 9월 7.24(mg/L), 10월 4.4(mg/L)로 명확한 성층화 양상을 보이고 있다. DO 농도변화는 전체적으로 해역의 오염도와 밀접한 관련이 있으나, 성층화 기간동안 연직방향 DO 농도편차가 크게 나타나고 있는 것은 수온 및 염도성층에 의한 표·저층간의 물질교환 저해에 의한 영향도 직접적인 요인으로 작용하고 있는 것으로 파악되었다.

핵심용어 : 성층화, 수온, 염도, DO 농도, 진해·마산만

Abstract □ Water temperature, salinity, and DO concentration were measured vertically in the Chinhae-Masan Bay over the course of 1 year. The characteristics of the stratification were analysed using the measured water temperature and salinity data. The vertical DO concentration changes were also analysed through consideration of the degree of stratification and the level of sediment pollution. The results of the analyses show that the thermal stratification appears just before April and disappears after October. The salinity differences between the surface and the bottom were 3.9‰, 9.3‰, 4.3‰ in April, August, and October, respectively. The DO concentration change averaged over water depth was 2.6(mg/L) in April; 8.3(mg/L) in June; 5.9(mg/L) in August; 7.2(mg/L) in September; and 4.4(mg/L) in October. The DO concentration changes were closely related to the levels of contamination and also to the effect of the mass-transfer inhibition between the surface and bottom layers due to the thermal and density stratification.

Keywords : stratification, water temperature, salinity, DO concentration, Chinhae-Masan Bay

1. 서 론

진해·마산만의 오염물질 농도는 시간적·공간적으로 큰 변화를 보이고 있을 뿐 아니라, 해수순환이 활발하지 않은 정체수역 또는 소규모 내만에서는 여름철 수온, 염도 및 DO(Dissolved Oxygen) 항목의 성층화 현상으로 인하여 연직방향으로도 큰 수질변화를 보이고 있다(양, 1990; 한국해양연구소, 1997, 1998, 1999). 특히, DO 항

목의 경우, 수온상승에 따른 포화용존산소량의 감소에도 불구하고 식물플랑크톤의 활발한 광합성 작용으로 인하여 표층의 DO 농도가 과포화 상태를 보이고 있는 경우가 많이 있다(양, 1990; 이, 1991). 반면, 저층에서는 저서생물의 활발한 분해활동에 의한 산소소비 과정으로 인하여 산소가 부족하거나 완전히 고갈되는 빈산소 또는 무산소 상태가 유지되어 저층생태계 및 수산업에 심각한 영향을 미치고 있다.

*한국해양연구소 연안항만공학연구본부(Corresponding author: Hong Yeon Cho, Coastal and Harbor Engineering Lab., KORDI, Ansan PO Box. 29, Seoul 425-600, Korea, hycho@kordi.re.kr)

**원광대학교 토목환경·도시공학부(School of Civil, Environmental and Urban Engineering, Wonkwang Univ.)

흐름이 약한 내만 해역에서는 하계 수온상승에 의한 수온성층화, 유역의 담수유입 및 대기로부터의 강수유입에 의한 염도성층화 현상이 빈발하고 있다(박, 1998; Jorgensen *et al.*, 1996; Smith *et al.*, 1996). 또한, 오염이 심한 해역에서는 성층화 현상에 의한 연직방향의 물질교환이 저해되어 수질변수(water quality parameter)의 성층화 현상도 발생한다. 특히, 표층에서의 활발한 광합성 작용에 의한 산소공급과 저층에서의 분해작용에 의한 산소소비는 연직방향 DO 농도의 큰 차이를 유발한다. DO 농도는 생태계 유지에 직결되는 매개변수로 해역의 성층화 현상에 따른 연직방향 DO 농도분포와 DO 농도분포의 계절적 변화에 대한 현장관측 및 적절한 분석이 요망된다.

따라서, 본 연구에서는 진해·마산만을 대상으로 1997년 12월부터 1998년 10월까지 20개 지점에 대하여 연직방향으로 수온, 염도 및 DO 농도를 연직방향으로 측정하고, 수온 및 염도자료를 이용하여 성층화 특성을 분석하고, DO 농도의 연직변화를 성층화 특성 및 저질오염도와 관련하여 분석하였다.

2. 측정방법 및 지점

진해·마산만 해역의 성층화 특성 및 연직방향 DO 농도의 계절적 변화를 분석하기 위하여 18개 정점(Fig. 1 참조; W0, W19, W20: 추가측정지점)을 선정하여 1997년 12월부터 1998년 10월까지 월별로 관측을 수행하였다(관측일시: Table 1 참조). 필요시 관측정점을 1~2개 정도 추가하였으며, 전기전도도(염도) 및 수온은 CTD 장비(Micro Systems STD)로 관측하였으며, DO 항목은 YSI-58 DO 측정기로 관측하였다. 1998년 4월~6월 관측시에는 CTD 관측장비의 전원공급 불량 및 접촉불량으로 인하여 부분적으로 전기전도도 관측이 수행되지 못하였다. CTD 항목은 연직방향으로 연속적으로 관측(Sampling Rate: 2초)되었으며, DO 농도는 수표면 및 저층을 포함하여 0.5, 1.0, 2.0, 3.0, 5.0, 7.0, 10.0, 12.0, 15.0, 20.0 m 지점에서 관측하였으며 농도변화가 심한 영역에서는 중간지점에서 추가로 농도를 관측하였다.

기존의 연구에서 수행된 연직방향의 CTD 및 DO 측정

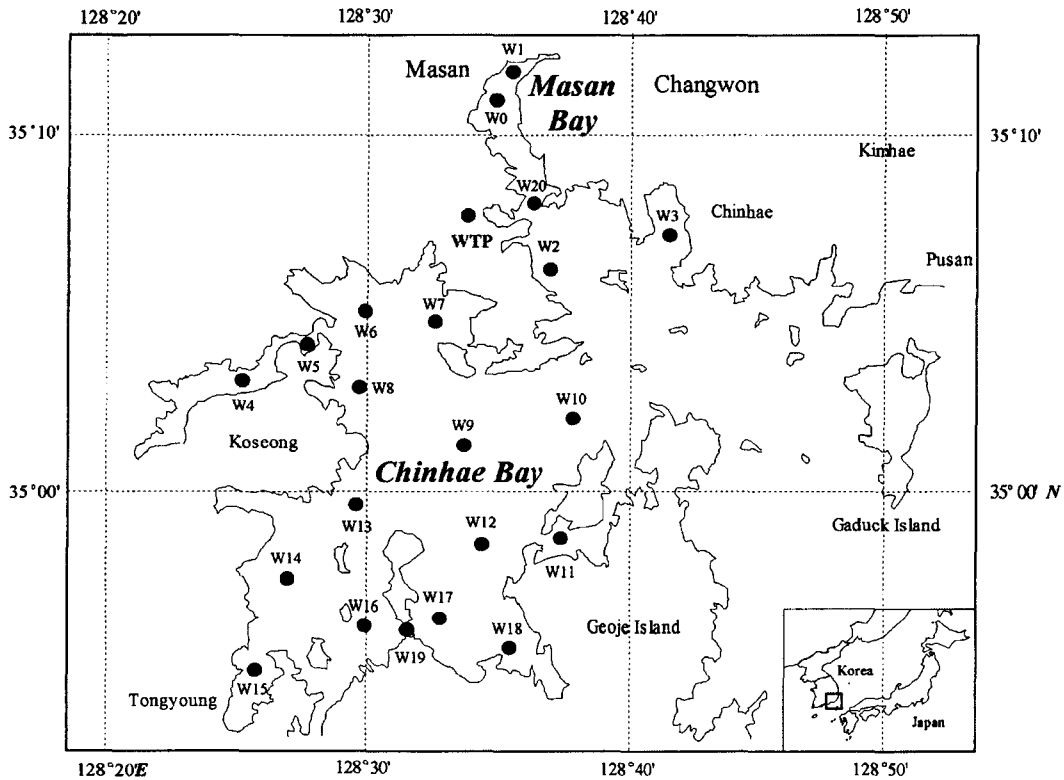


Fig. 1. Monitoring stations of the water temperature, salinity and DO.

Table 1. Information of the CTD and DO Monitoring

측정일시	측정장비	측정지점	참고사항
'97. 12. 16-17	STD, YSI	19	
'98. 02. 18-19	RCM9, YSI	18	염도측정(RCM9, 2.0 m)
'98. 04. 15-16	STD, YSI	18	STD 작동불량(4.15)
'98. 05. 12-13	STD, YSI	18	STD 작동불량(5.12-13)
'98. 06. 14-15	STD, YSI	18	STD 작동불량(6.14)
'98. 08. 18-19	STD, YSI	19	
'98. 09. 15-16	STD, YSI	17	
'98. 10. 23-24	STD, YSI	18	

측정지점의 평균수심정보(m)

측정	수심(m)	측정	수심(m)	측정	수심(m)	측정	수심(m)
W0	10.0	W6	18.0	W12	25.0	W18	20.0
W1	11.6	W7	13.0	W13	23.4	W19	10.0
W2	14.8	W8	17.5	W14	20.0	W20	16.0
W3	9.0	W9	23.5	W15	13.0		
W4	14.0	W10	30.0	W16	15.0		
W5	17.0	W11	20.0	W17	20.0		

은 마산만에 국한되어 수행되었으며, 진해만 전역에 대하여 수행된 경우에도 하계에 국한되어 있거나, 상층·중층·하층의 관측에 국한되어 연직방향의 성층화를 개략적으로만 파악할 수 있었다(양, 1990; 이, 1991). 따라서, 진해만 전역에 대하여 성층화 시기 및 정도를 자세하게 파악하기에는 곤란하였다. 진해만의 수온, 염도 및 수질항목의 공간적인 분포에 대한 분석(조·채, 1999)은 다수 수행되어 있으므로 본 연구에서는 시기별 연직변화를 중심으로 분석하였다.

3. 측정결과 및 분석

수온 및 염도, DO 농도 측정자료는 지점별로 도시하여 전체적인 변화경향분석에 이용하였다(Fig. 2-Fig. 4참조). STD 장비로 측정된 염도자료는 연속적인 자료에서 DO 농도 측정지점에 해당하는 위치의 자료를 추출하여 제시하였다. 수온, 염도 및 DO 농도자료의 계절별 연직변화는 표층과 저층의 변화량(농도차이)를 중심으로 분석하였다.

3.1 성층화 특성

3.1.1 수온의 계절별 연직변화

수온은 공간적(평면) 변화 폭이 1~2°C 내외로 관측되었다(Fig. 2참조). 반면, 하계 연직방향 수온변화 폭은 5~6°C 정도로 크게 나타나 온도에 의한 성층화 현상이 모

든 지점에 대하여 뚜렷하게 나타나고 있음을 알 수 있다. 온도 성층화는 4월경 수표면과 저층의 온도차가 3~4°C 정도로 시작하여 하계에 보다 강화되고, 10월 이후에는 성층이 파괴되고 있음을 알 수 있다. 계절적인 온도변화 양상은 전 지역이 유사하게 나타나고 있다(Fig. 2참조).

진해만의 연직방향 평균 수온변화량(1 표층수온 - 저층수온)은 1997년 12월, 1998년 2월 관측자료에서 제시된 바와 같이 0.1°C 정도에 불과하다. 그러나, 1998년 4월의 수표면과 저층의 평균 수온변화량은 3.5°C(최대 6.4°C, W1 지점) 정도로 증가하기 시작하여, 1998년 8월에는 6.2°C(최대 8.1°C, 최소 2.2°C) 정도를 유지하고 있다. 1998년 9월, 10월의 시기 이후로는 점차 연직방향의 수온변화량이 평균 4°C 정도에서 1°C 이하로 감소하면서 성층화가 파괴되고 있음을 알 수 있다(Table 2).

진해·마산만의 수온 성층화(표층과 저층의 온도차 3°C 기준)는 4월 이전에 시작되어 10월경에 종료되는 양상을 보이고 있는 것으로 판단되었다. 해역의 성층여부를 판단하는 절대적인 온도차 기준은 제시되어 있지 않다. 그러나, 일반적으로 표층과 저층의 뚜렷한 온도차와 수온도약층의 존재는 성층화의 특성이므로, 이와 같은 특성을 파악할 수 있는 정도로 사료되는 온도차 3°C 조건을 본 연구에서의 수온 성층화 조건으로 제안하였다.

3.1.2 염도의 계절별 연직변화

유역의 유출 및 강우의 영향을 받는 염도는 정도의 차

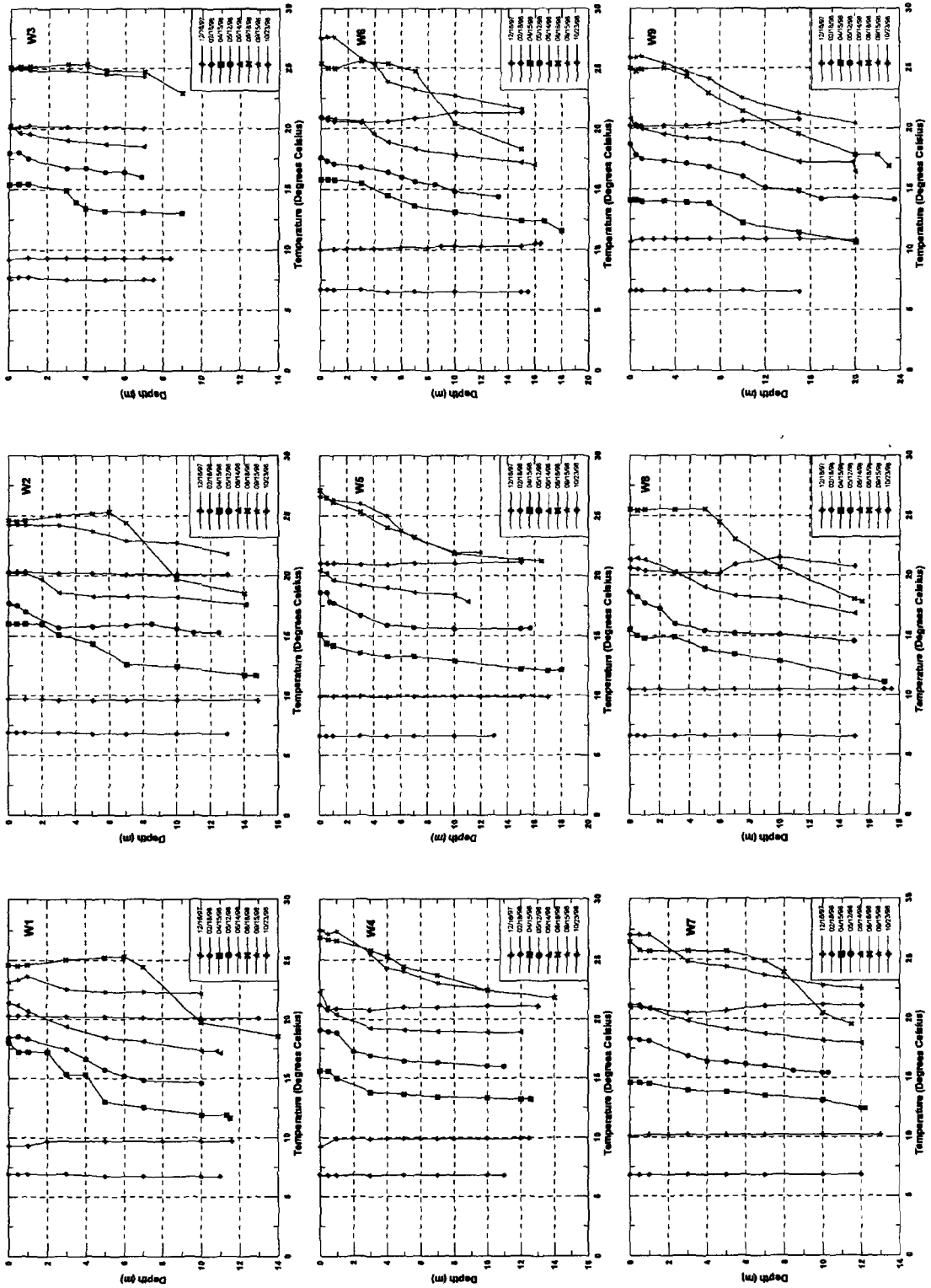


Fig. 2. Vertical water temperature changes (W1~W9).

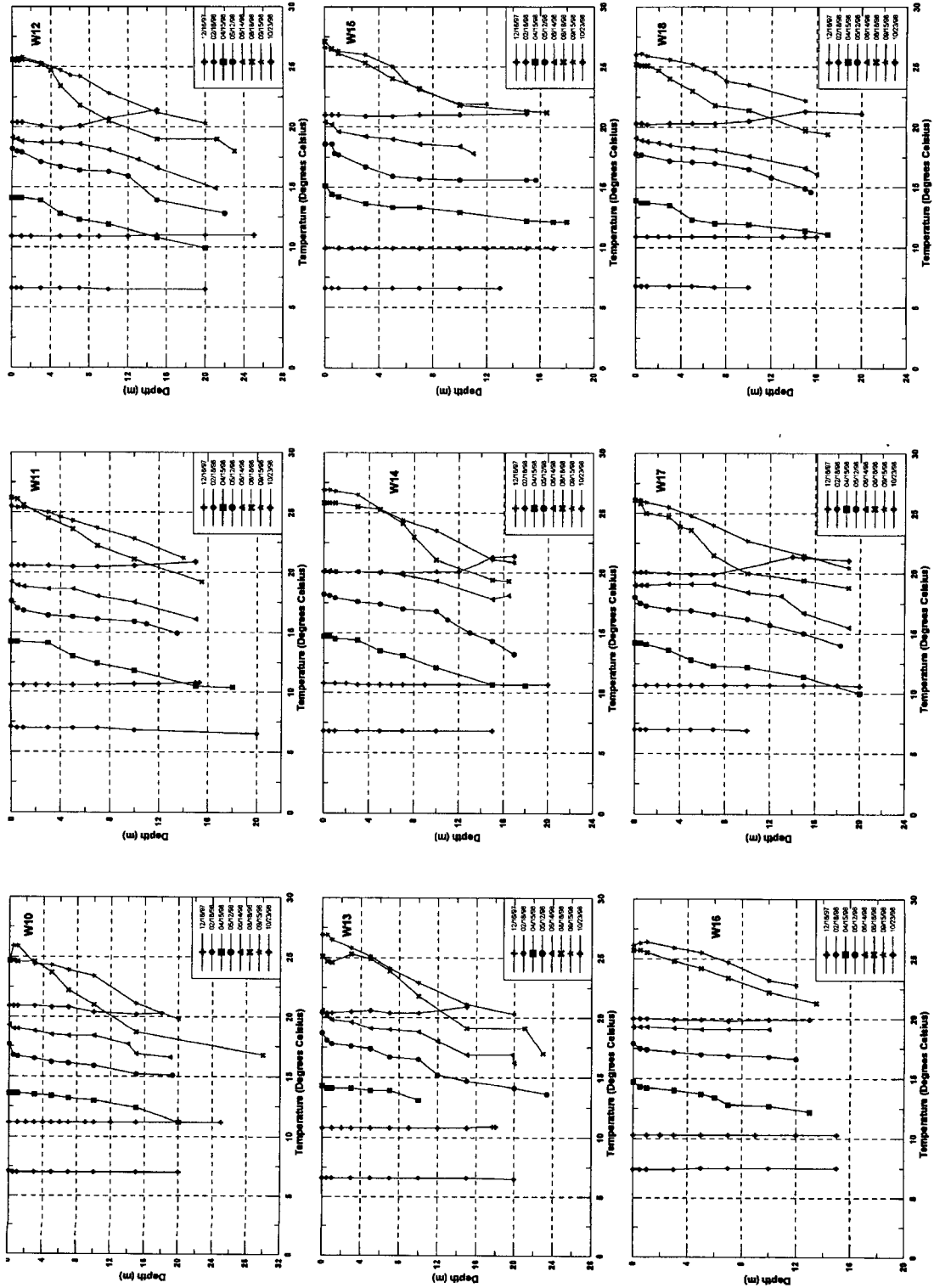


Fig. 2. (Continued) (W10~W18).

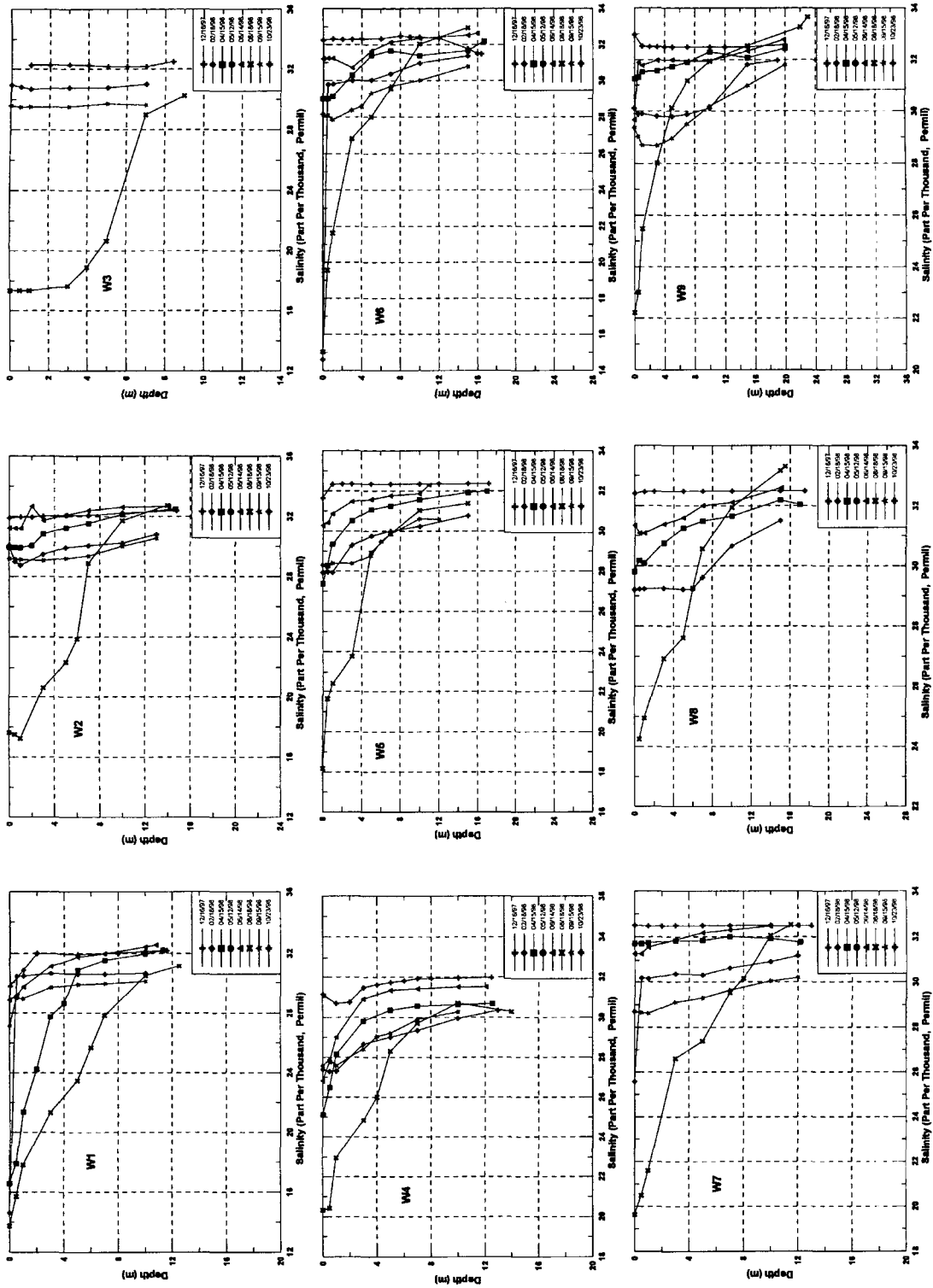


Fig. 3. Vertical salinity changes (W1~W9).

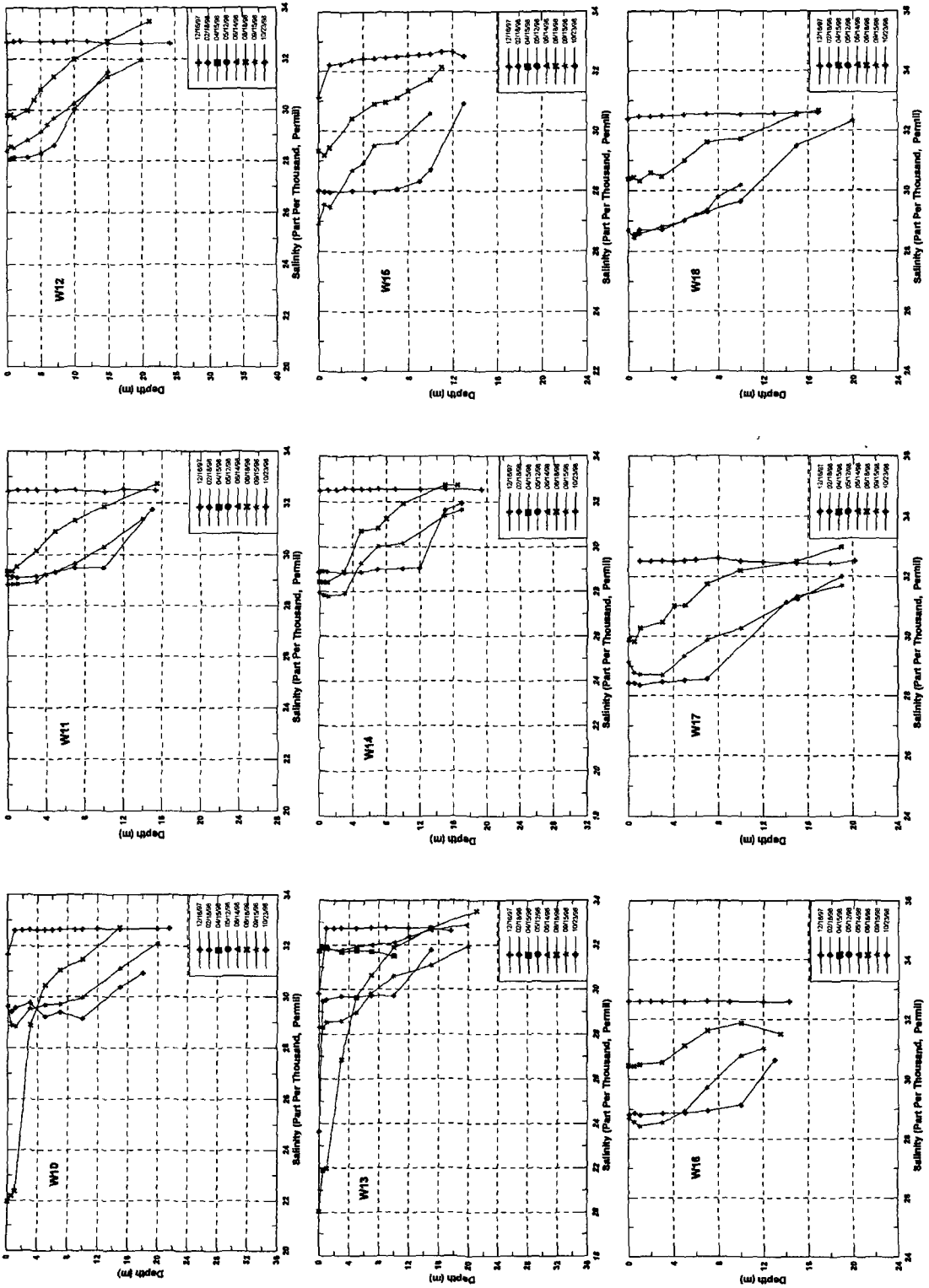


Fig. 3. (Continued) (W10~W18).

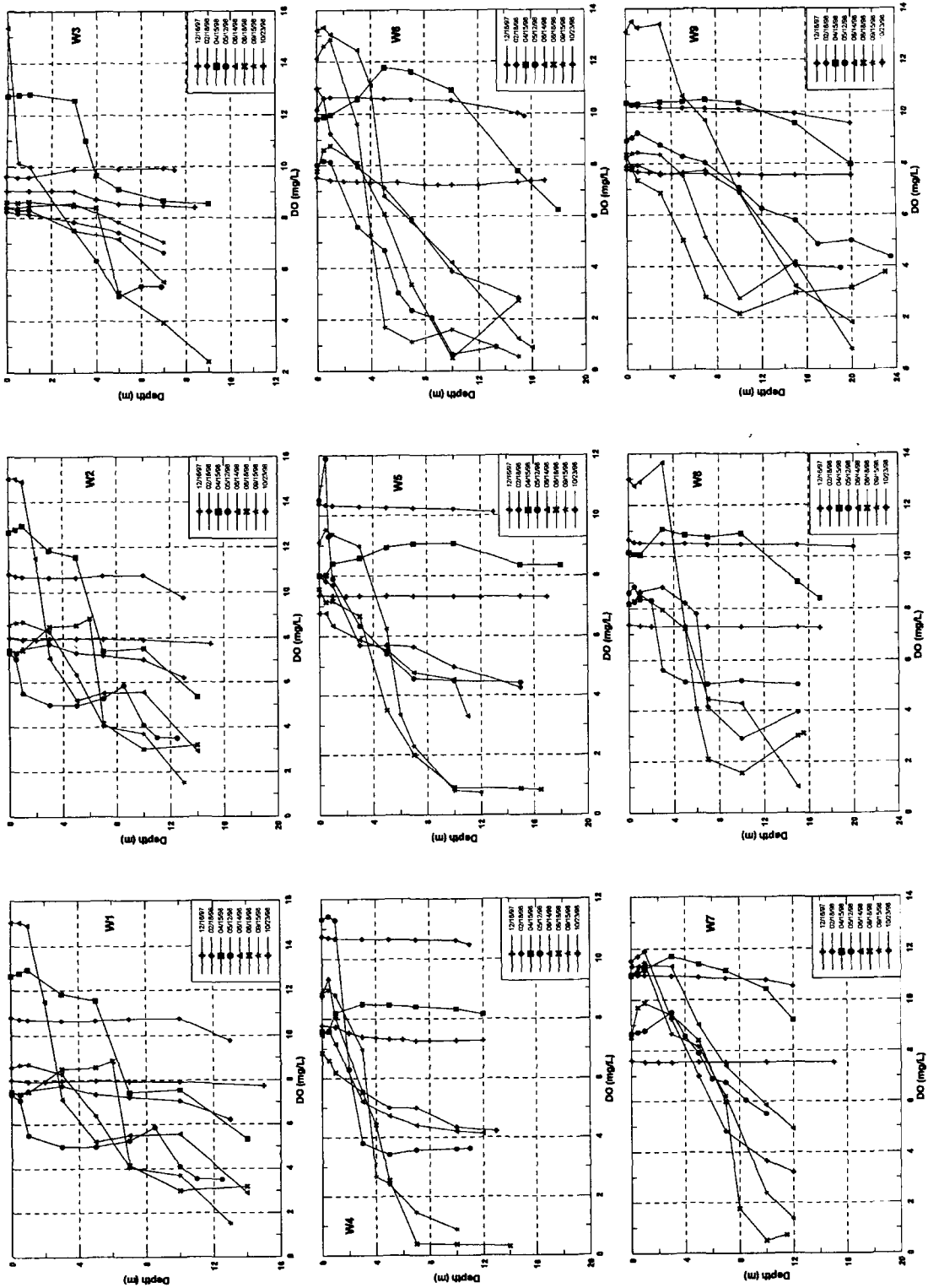


Fig. 4. Vertical DO(Dissolved Oxygen) concentration changes (W1~W9).

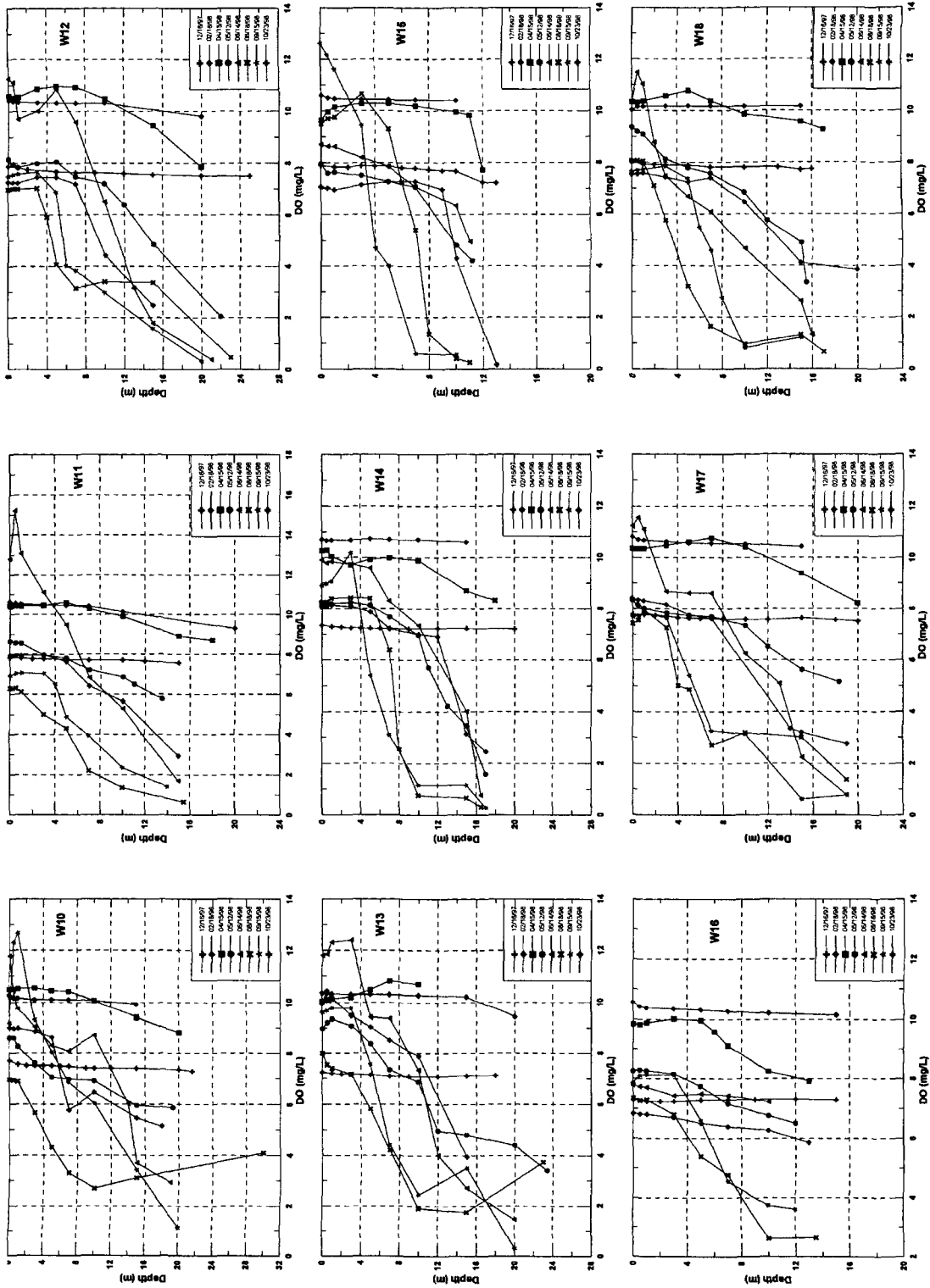


Fig. 4. (Continued) (W10~W18).

Table 2. Difference of the Water Temperature between the Surface and Bottom (°C)

지점 \ 시기	97-12-16	98-2-18	98-4-15	98-5-12	98-6-14	98-8-18	98-9-15	98-10-23
W0	-0.1						1.7	
W1	-0.4	0.2	6.4	3.8	4.3	3.2	0.9	0.4
W2	0.1	0.1	4.3	2.4	2.6	6.1	2.4	0.2
W3	-0.1	0.2	2.4	2.0	1.8	2.2	0.6	0.1
W4	0.7	0.0	2.4	3.0	3.5	5.1	5.1	0.1
W5	0.0	0.0	3.0	3.0	2.6	5.9	4.7	-0.1
W6	-0.5	0.2	4.2	3.2	3.9	7.1	5.9	-0.4
W7	-0.1	0.0	2.2	2.9	3.1	7.0	4.6	0.1
W8	0.0	0.1	4.4	4.1	4.5	7.7		-0.1
W9	-0.1	0.1	3.5	4.6	4.4	8.1	5.5	-0.5
W10	0.0	0.1	2.4	2.6	2.7	7.9	4.8	0.6
W11	-0.2	0.6	3.8	2.7	3.1	7.0	4.3	-0.3
W12	-0.1	0.1	4.2	5.4	4.2	7.6	5.3	-0.3
W13	-0.1	0.1	1.2	5.1	4.4	8.1	6.6	-0.5
W14	0.1	0.0	4.1	5.0	2.1	6.5	6.0	-1.3
W15	-0.2	0.0	4.7	2.5	1.6	5.0	4.8	-1.8
W16	0.0	-0.1	2.5	1.3	0.2	4.4	3.3	0.1
W17	0.1	0.1	4.2	4.0	3.5	7.3	5.7	-1.0
W18	0.0	0.1	2.8	3.2	3.0	5.8	3.8	-0.8
W19		-0.1						
W20						6.5		
평균	-0.05	0.09	3.48	3.38	3.08	6.24	4.22	-0.31
최대값	0.70	0.60	6.40	5.40	4.50	8.10	6.60	0.60
최소값	-0.50	-0.10	1.20	1.30	0.20	2.20	0.60	-1.80

이는 있으나 겨울철을 제외하고는 전 지역에 대하여 성층화(표층과 저층의 염도차 3‰ 기준)가 나타나고 있음을 알 수 있다(Fig. 3). 염도차이에 의한 해역의 성층화를 판단하는 기준도 수온과 마찬가지로 제시되어 있지 않으므로, 본 연구에서는 수온 성층화 판단 제안조건을 감안하여 약 3‰ 정도의 차이를 성층화 판단 기준으로 제안하였다. 유역의 영향을 많이 받는 W1, W2 지점에서는 하계 표층과 저층의 염도차가 약 10‰ 이상으로 매우 크게 나타나고 있으며, 해역의 중앙부에서도 일시적인 강우의 영향으로 인하여 큰 염도변화를 보이고 있음을 알 수 있다(Table 3). 표층염도가 매우 낮은 자료(W3 지점, 97년 12월; W8 지점, 98년 8월; W12 지점, 98년 10월; W17 지점, 97년 12월; W18 지점 98년 10월)는 STD 장비의 반응속도문제 및 국지적인 강우의 영향으로 판단하여 수심 0.5~1.0 m 지점자료를 이용하여 분석·보정하였다. 1998년 4월 관측자료에 제시된 바와 같이 연직방향의 평균 염도변화는 3.9‰ 정도로 증가되고, 1998년 8월 9.3%, 10월 4.3‰ 정도로 가을철에도 염도 성층이 지속되고 있

는 것으로 파악되었다. 특히, 수온과는 달리 염도 연직변화는 지점별 편차(공간적인 편차)가 매우 크게 나타나고 있는 것으로 파악되었다. 한편, 여름철 평균염도는 겨울철 평균염도보다 작은 값으로 관측되었으며, 이는 계절적인 강우 및 유역유출량의 영향으로 사료된다(조·채, 1997).

3.2 연직방향 DO 농도변화

DO 농도를 변화시키는 요인은 대기중의 공급(포기, aeration)과 저층퇴적물에서의 분해작용에 의한 산소소비 작용으로 대별할 수 있다. 특히, 저층 퇴적물에서의 분해 작용은 수온상승에 따라 보다 활발하게 진행되기 때문에 하계 저층의 산소소비량은 증가하게 되며, 그 양은 저질의 오염도에 비례한다고 할 수 있다. 또한, 하계에 강하게 발생하는 성층화의 영향으로 연직방향 산소공급이 차단되기 때문에 표층에는 용존산소가 풍부한 반면, 저층에는 산소가 부족·고갈되는 현상이 발생한다. 반면, 성층화가 약한 동계에는 연직방향으로의 물질교환이 활발하게 이루어지기 때문에 DO 농도가 연직방향으로 고르게 분

Table 3. Difference of the Salinity between the Surface and Bottom (°C)

지점 \ 시기	97-12-16	98-2-18	98-4-15	98-5-12	98-6-14	98-8-18	98-9-15	98-10-23
W0	-0.67						-0.91	
W1	-2.42		-15.59		-3.65	-17.40	-2.93	-16.00
W2	-0.41		-2.55		-1.44	-15.10	-1.36	-0.72
W3	-0.24					-12.90	-0.04	-0.05
W4	-0.84		-5.58		-4.69	-9.97	-2.71	-2.98
W5	-0.73		-4.61		-2.01	-13.21	-2.29	-2.84
W6	-0.10		-3.18		-1.42	-17.92	-2.62	-16.76
W7	0.02		-0.05		-1.20	-12.89	-1.49	-5.62
W8	-0.08		-2.24		-1.25	-9.06		-2.30
W9	0.39		-1.19		-3.11	-11.44	-2.44	-1.85
W10	-1.01					-10.74	-2.47	-1.51
W11	-0.03					-3.40	-2.58	-2.58
W12	0.05					-3.68	-3.56	-3.37
W13	-2.82		0.20		-1.16	-13.49	-3.64	-8.13
W14	-0.07					-4.30	-3.69	-3.08
W15	-1.36					-2.78	-3.67	-2.09
W16	0.02					-1.05	-2.35	-1.83
W17	0.01					-3.11	-2.56	-3.57
W18	-0.20					-2.27	-1.49	-2.93
W19								
W20						-12.44		
평균	-0.55		-3.87		-2.22	-9.32	-2.38	-4.34
최대값	0.39		0.20		-1.16	-1.05	-0.04	-0.05
최소값	-2.82		-15.59		-4.69	-17.92	-3.69	-16.76

포하는 양상을 보이게 된다.

매우 오염이 심한 W1 지점(마산만)은 저층에서의 활발한 산소소비작용으로 인하여 DO 농도가 전반적으로 낮게 나타나고 있다(조·채, 1998). 1998년 2월(겨울철)에 가장 양호한 상태를 보이고 있으며, 1998년 4월에는 표층에서 과포화 상태의 높은 DO 농도가 관측되었으며, 저층에서는 5.0(mg/L) 이하의 낮은 농도를 유지하고 있는 것으로 관측되었다(Fig. 4). 표층에서의 높은 DO 농도는 식물플랑크톤의 활발한 광합성의 영향으로 사료되며, 1998년 4월 W2, W3 지점, 1998년 6월 W2, W3, W6, W8, W9, W13 지점의 높은 DO 농도도 식물플랑크톤의 영향으로 사료된다(양, 1990; Thomann and Mueller, 1987).

비교적 흐름이 강한 W9, W10 지점의 DO 농도는 1998년 5월~9월의 시기에 수심 7~10 m 이하 영역에서 5.0(mg/L) 이하로 낮아지고 있다. W4~W7 지점의 수심 3~5 m 영역에서 DO 농도는 급격하게 감소하는 경향을 보이고 있으며, W13~W16 지점에서는 수심 5~7 m 영역에서 급격하게 감소하는 경향을 보이고 있다. 1997년

12월, 1998년 2월의 연직방향으로의 DO 농도변화는 매우 미미하지만, 수온의 연직변화가 심화되는 1998년 4월부터 DO 항목의 연직변화도 두드러지게 나타나고 있으며, 수온의 연직변화가 미미해지는 1998년 10월 말경에도 DO 연직변화는 크게 나타나고 있다. 또한, 1998년 5~9월의 기간동안의 진해만 저층의 DO 농도는 1~2지점을 제외하고는 전 지역이 5 mg/L 이하의 상태를 유지하고 있는 것으로 관측되었다.

한편, 성층화가 시작되는 4월을 기점으로 연직방향 평균 DO 농도변화도 2.6(mg/L)정도에서 6월 8.3(mg/L), 8월 5.9(mg/L), 9월 7.2(mg/L), 10월 4.3(mg/L) 값을 보이고 있다(Table 4).

DO 농도변화는 전체적으로 해역의 수·저층오염도와 밀접한 관련이 있으나, 성층화 기간동안 연직방향 DO 농도편차가 크게 나타나고 있는 것은 수온 및 염도성층에 의한 표·저층간의 물질교환 저해에 의한 영향도 직접적인 요인으로 작용하고 있는 것으로 추정할 수 있다. 따라서, 해역의 수질관리 매개변수로 DO 항목을 선정할 경우, 해

Table 4. Difference of the DO between the Surface and Bottom (mg/L)

지점	시기	97-12-16	98-2-18	98-4-15	98-5-12	98-6-14	98-8-18	98-9-15	98-10-23
W0		0.12						5.90	
W1		-1.30	-0.31	12.81	2.36	5.36	6.05	2.71	0.41
W2		0.26	1.02	7.31	3.80	12.10	4.26	7.04	1.23
W3		0.65	-0.24	4.17	3.07	9.85	6.21	1.35	1.60
W4		0.50	0.27	-0.58	7.68	3.32	6.54	7.98	4.56
W5		0.06	0.27	-0.33	6.09	3.46	6.74	8.36	3.77
W6		0.13	0.26	3.55	7.09	12.30	5.05	11.57	8.13
W7		0.06	0.48	1.74	3.17	6.40	7.83	9.66	8.30
W8		0.12	0.29	1.79	3.60	12.00	5.07		4.28
W9		0.22	0.80	2.37	4.54	11.29	4.60	7.42	3.98
W10		0.41	0.33	1.68	2.72	8.86	2.86	8.07	3.88
W11		0.25	1.31	1.70	2.84	11.09	5.67	5.52	5.00
W12		0.38	0.61	2.72	6.12	10.87	6.52	7.19	4.78
W13		0.13	0.92	-0.65	5.56	10.35	4.27	9.27	6.01
W14		0.14	0.10	1.97	6.48	9.14	7.92	8.60	5.78
W15		0.68	0.19	1.90	3.76	3.76	9.25	12.05	6.91
W16		0.00	0.43	1.92	1.76	0.55	4.73	4.25	0.97
W17		0.25	0.37	2.13	3.16	10.44	6.03	6.90	5.63
W18		0.30	-0.14	1.06	6.01	9.03	7.40	6.45	3.69
W19			0.23						
W20							5.80		
평균		0.18	0.38	2.63	4.43	8.34	5.94	7.24	4.38
최대값		0.68	1.31	12.81	7.68	12.30	9.25	12.05	8.30
최소값		-1.30	-0.31	-0.65	1.76	0.55	2.86	1.35	0.41

역의 성층화 현상과 병행하여 관리할 필요가 있다.

4. 결론 및 향후 연구방향

진해·마산만 전역은 봄이 시작되는 4월 이전부터 수 온 및 염도의 성층화 현상이 발생·진행하다가 하계에 매우 강한 온도 및 염도 성층이 형성되어 연직방향의 DO 확산을 저해하는 요인으로 작용한다. 염도 성층화는 유역의 유출량 및 강우의 직접적인 영향을 특정기간에 한정되어 받기 때문에 지역적인 편차가 크게 나타나고 있는 것으로 파악되었다.

따라서, 하계 저층의 산소소비가 인하여 빈산소 및 무산소 수층이 광범위하게 형성되고 있음을 알 수 있다. 성층화는 10월이후 완화되다가 동계에는 온도하강 및 유역의 담수유입량 감소로 인하여 성층화 현상이 소멸되기 때문에 DO 분포측면에서는 양호한 수질상태를 유지하게 된다. 또한, DO 농도변화는 수온과 염도의 연직분포와 밀접한 관련이 있기 때문에 수온 관리매개변수로 DO 항목을 선정하는 경우, 성층화를 고려한 예측과정이 수행되어

야 할 것으로 판단된다. 그림에 제시된 자료는 연안해역의 성층화 모델링을 위한 보정 및 검증자료로 활용할 수 있으며, 향후 신뢰성있는 모델링 과정을 통하여 해역의 수질관리를 수행하는 연구가 추진되어야 할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 “진해·마산만 수질환경관리모델 개발 및 연안에서의 육지와 해양상호 작용에 관한 연구” 사업의 일환으로 수행되었습니다. 또한 본 논문의 세번째 저자는 2000년도 원광대학교 교비지원을 받아 본 연구성과에 기여하였으며, 연구비 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- 박상근, 1998. 마산만의 온도모의를 위한 화학산계수의 비교 연구, 서울대학교 대학원 공학석사 학위논문.
- 양동범, 1990. 진해만의 유기물 순환과 무산소 환경 발생에 관한 연구, 한국과학기술연구원.
- 이찬원, 1991. 진해만 일원 오염 실태조사, 환경처, 336-372.

- 조흥연, 채장원, 1997. 마산만의 장기간 물수지 및 해수교환 특성, 한국해양·해양공학회지, 9(2): 74-85.
- 조흥연, 채장원, 1998. 진해·마산만 오염부하량의 특성 분석, 한국해양·해양공학회지, 10(3): 132-140.
- 조흥연, 채장원, 1999. 진해·마산만 일반 수질항목 및 영양염류의 장기 추이분석, 해양연구, 20(1): 13-25.
- 한국해양연구소, 1997. 진해·마산만 수질환경 관리모델 개발(I), 해양수산부.
- 한국해양연구소, 1998. 진해·마산만 수질환경 관리모델 개발(II), 해양수산부.
- 한국해양연구소, 1999. 진해·마산만 수질환경 관리모델 개발(III), 해양수산부.
- Jorgensen, B.B. and Richardson, K., 1996. *Eutrophication in Coastal Marine Systems*, AGU.
- Smith, D.E., Leffler, M., and Mackiernan, G., 1996. *Oxygen Dynamics in the Chesapeake Bay: A Synthesis of Recent Research*, Maryland Sea Grant Book.
- Thomann, R.V. and Mueller, J.A., 1987. *Principles of Surface Water Quality Modeling and Control*, Harper & Row.
-
- Received September 12, 2002
Accepted November 14, 2002