

양양 남대천 하구의 빈산소 수괴 출현과 변동

권기영^{1*} · 이용화² · 심정민¹ · 이필용³

¹국립수산과학원 동해수산연구소 자원환경과

²국립수산과학원 어장환경과

³국립수산과학원 서해수산연구소

Occurrence and Variation of Oxygen Deficient Water Mass in the Namdae Stream Estuary, Yangyang, Korea

KEE-YOUNG KWON^{1*}, YONG-HWA LEE², JEONG-MIN SHIM¹ AND PIL-YONG LEE³

¹East Sea Fisheries Research Institute, NFRDI, Gangnung 210-861, Korea

²Fisheries Environment Division, NFRDI, Busan 619-705, Korea

³West Sea Fisheries Research Institute, NFRDI, Incheon 400-420, Korea

본 조사는 양양 남대천 하구에서 발생하는 빈산소 수괴의 발생 시기 및 영역을 파악하고 빈산소 수괴가 형성되는 원인을 추정하기 위해서 수행되었다. 현장조사는 2008년 4월부터 11월까지 6회에 걸쳐 하구 유역 5개 정점에서 수 환경과 퇴적물환경을 조사하였다. 양양 남대천 하구입구에는 해안사주가 발달해 있으며, 하구입구로부터 2.3 km 상류부근까지 주변에 비해 수심이 깊고 폭이 좁은 소(pool)가 형성되어 있었다. 양양 남대천 하구에서 빈산소 수괴는 소를 중심으로 5월에 발생되어 10월까지 약 6개월간 지속적으로 출현하였다. 빈산소 수괴의 수직적 범위는 8월에 저층에서 수심 2 m까지 상승하였으며, 빈산소 수괴가 최대로 확장되는 수평적 범위는 하구입구로부터 2.3 km 부근 상류까지였다. 퇴적물의 강열감량은 평균 7.5~9.0%, 산 휘발성 황화물 농도는 평균 0.282~1.106 mg/g-dry wt로 유기물의 함량이 높았으며, 염분성층과 빈산소 수괴가 형성된 시기에 저층의 암모니아 질소 농도는 표층에 비해 4~23 배 높게 유지되었다. 양양 남대천 하구에서는 해수가 하구로 침투하여 수심이 깊은 소에 채워지면서 강한 염분약층이 형성되었고 소를 중심으로 퇴적된 다량의 유기물질에 의해서 저층의 산소가 소모되면서 빈산소 수괴가 형성되는 것으로 판단되었다.

The occurrence and variation of oxygen deficient water mass (ODW) in Namdae stream estuary, Yangyang were studied. Field observations for water properties and sediment environments were conducted at 5 stations of the estuary from April 2008 to November 2008. The coastal sandbar is developed at the estuary mouth, and there is a pool between the estuary mouth and about 2.3 km upstream of the estuary. The pool is relatively deep and narrow compared to riverbed of the estuary. The ODW was observed continuously in the pool from May to October. The ODW extends vertically up to 2 m depth in August, and maximum length of the ODW were about 2.3 km. Mean concentration of ignition loss (IL) and acid volatile sulfide (AVS) of sediment was 7.5~9.0%, 0.282~1.106 mg/g-dry wt, respectively. Ammonium concentration in the bottom layer during formation period of the halocline and the ODW was 4~23 times higher than that of surface layer. ODW was initiated by the introduction of seawater into bottom of the estuary pool to make a strong halocline, and then decomposition of organic matter within sediment accelerated the formation of the ODW.

Keywords: Oxygen deficient water, Halocline, Pool, Coastal sandbar, Namdae stream estuary

서 론

해양 또는 하구역에서 여름철에 발생하는 빈산소 또는 저산소 수괴는 주변 육상으로부터의 담수 유입과 표층의 수온상승으로 인해 해수가 성층화되어 표층으로부터 저층으로의 산소공급이 차단되고 저층으로 침강된 유기물과 퇴적물내의 유기물이 분해되는 과

정에서, 저층수의 용존산소가 급격하게 소비되면서 발생하게 된다(이, 1993). 빈산소 수괴는 일반적으로 해수층의 용존산소가 저서생물이 폐사하기 시작하는 약 3.6 mg/L 이하의 농도로 간주하고 있으며(Pearson and Rosenberg, 1978; Diaz and Rosenberg, 1995), 그 발생해역과 빈도가 전 세계적으로 증가하고 있다(Diaz and Rosenberg, 2008). 우리나라에서도 빈산소수괴는 해안선이 복잡하고 내만이 발달해 있으며 조류소통과 해수교환이 원활하지 못하고 저층 퇴적물에 유기오염물질이 다량으로 축적되어 있는 서해

*Corresponding author: kwonky@nfrdi.go.kr

안과 남해안에서 여름철에 빈번하게 발생하고 있다(김과 김, 2003; 박 등, 2003; 김 등, 2006a; 박 등, 2006; 국립수산과학원, 2009). 이에 반해 해안선이 단조롭고 육상으로부터의 담수 및 유기물 공급량이 적으며, 연안 퇴적물이 대체로 모래로 형성되어 있는 동해안에서는 빈산소 수괴가 보고되지 않고 있다.

우리나라 동해안으로 유입되는 하천은 동해안의 지형적 특성에 의해 서남해안으로 유입되는 강과 하천에 비해 유량이 적고 유로가 짧은 특징을 가지고 있다(김 등, 2006b). 또한 상·하류간의 표고차가 크고 유속이 빨라 다량의 모래가 하류로 운송되어 동해안으로 공급되고 있으며, 유역면적이 작고 유역 내 인구밀집도가 낮으며 상류로부터 유입되는 유기물질의 양이 상대적으로 적어 대체로 깨끗한 수질을 유지하고 있다(홍 등, 2000).

그러나 동해안에 위치한 주요 하천의 하구에는 해안사주가 잘 발달되어 있다. 해안사주는 홍수 및 대규모 파랑 등 외부의 물리적인 힘에 의해서 간헐적으로 개통되기도 하나 대부분의 시기에는 견고하게 형성되어 있어 자연적으로 형성된 하구둑의 역할을 하고 있으며, 하구유역이 해안사주에 의해 폐쇄내만의 지형조건을 가지게 된다. 또한 해안사주는 하구에서의 담수와 해수의 원활한 교환과정을 제한하고, 하천수가 해양으로 원활하게 빠져 나가지 못하게 하며, 하천수의 하구역 정체를 유발하여 하천수로 유입된 각종 육상기원물질들이 해양으로 배출되지 못하고 하구 수역 내에서 집중적으로 침적되는 주요 원인이 되고 있다(홍 등, 2000). 이와 같은 상황은 동해안 하천 하구역에서 빈산소 수괴가 발생할 지형적 또는 환경적 요인이 갖추어져 있다고 볼 수 있으며, 실제로도 동해안으로 유입되고 있는 양양 남대천(홍 등, 2000)과 강릉 남대천의 하구(윤 등, 1999)에서는 무산소 또는 빈산소 수괴의 발생이 보고된 바 있고 저산소에 의한 서식 어류의 급작스런 대량폐사가 기사화되기도 하였다.

빈산소 수괴가 상습적으로 발생하는 진해만(이, 1993; 김과 이, 1994; 김과 김, 2003; 이 등, 2008; 국립수산과학원, 2009), 기막만(김 등, 2006a), 영산강 하구(임과 박, 1998), 천수만(박 등, 2006), 시화호(최와 김, 2001; 박 등, 2003) 등에서 빈산소 수괴에 대한 연구는 지속적으로 수행되어 왔다. 대부분의 해역은 반폐쇄성 내만의 지형조건에 해저퇴적물에 고농도의 유기물이 함유되어 있으며, 여름철 표층의 수온상승과 담수유입에 의한 밀도성층의 생성으로 발생하기 시작한다고 보고되고 있다. 그러나 동해안 하천 하구에서 발생하는 빈산소 수괴의 발생 시기, 영역 및 발생기작 등에 대한 연구가 전무하며, 빈산소 수괴에 대한 일반적 정보조차 미흡한 편이다.

수중의 용존산소 결핍은 어패류의 호흡이나 생리작용에 직접적으로 영향을 미치며, 저서군집의 출현종과 개체수에도 민감하게 작용하는 등 생물의 생존에 큰 영향을 준다(Karim *et al.*, 2003; 김 등, 2006a). 양양 남대천 하구의 경우, 하구 유역에 일본 재첩이 서식하고 있고 6~7월경에 재첩이 생산출하되고 있으며(권 등, 2002), 10~12월에는 우리나라에서 연어가 가장 많이 소상하고 있다(이 등, 2007). 연어 이외에도 황어, 송어 등 기수성 어종과 냉수성 어종 등 다양한 생물군이 서식하고 있다(김 등, 2006b). 그러나 하구 유역에서 발생하는 빈산소 수괴는 재첩의 서식범위를 제한하고 폐사의 원인이 될 수 있으며, 연어의 소상환경, 시기, 경로 등에 영향을 주게 될 것이다.

따라서 양양 남대천 하구에서 환경 및 생태계 관리와 어업 생

산성 유지를 위해서 하구유역에서 발생하고 있는 빈산소 수괴에 대한 정보를 정확히 파악할 필요가 있다. 본 연구에서는 양양 남대천 하구에서 나타나는 빈산소 수괴의 발생 시기 및 발생영역을 파악하고 빈산소 수괴가 형성되는 원인을 밝히고자 한다.

재료 및 방법

연구지역 개황

양양 남대천은 동해안에 위치한 하천으로서는 비교적 대형하천으로 유로연장이 54 km, 유역면적이 474.8 km²이며, 동해안의 지형적 특성에 의해 서남해로 유입하는 하천에 비해 유속이 빠르고 풍수기 때의 유량 변화가 심하다. 상류지점인 강원도 양양군 서면 영덕리 일원에는 100만 kw 용량의 양수발전소가 2006년에 완공되어 현재 가동 중에 있다. 연구지역인 남대천 하류수역은 중상류에 비해 유속이 느리고, 인구집중이 상대적으로 높은 지역으로, 수질오염의 가능성이 가장 높은 수역이며, 최하부 바다와 접하는 곳에는 모래톱이 발달해 있다(홍 등, 2000). 한편 하루 9,000톤의 생활하수를 처리할 수 있는 양양하수종말처리장이 하구입구에서 약 1 km 상류에 완공되어 2003년 7월부터 가동 중에 있으며, 처리 후 방류수는 하구역으로 배출되고 있다.

현장조사

양양 남대천 하구역의 빈산소 수괴 발생 상황을 살펴보기 위하여 하구입구에서부터 약 2.5 km 상류부근까지 5개 정점을 선정하여 2008년 4월부터 11월까지 총 6회에 걸쳐 조사하였다(Fig. 1).

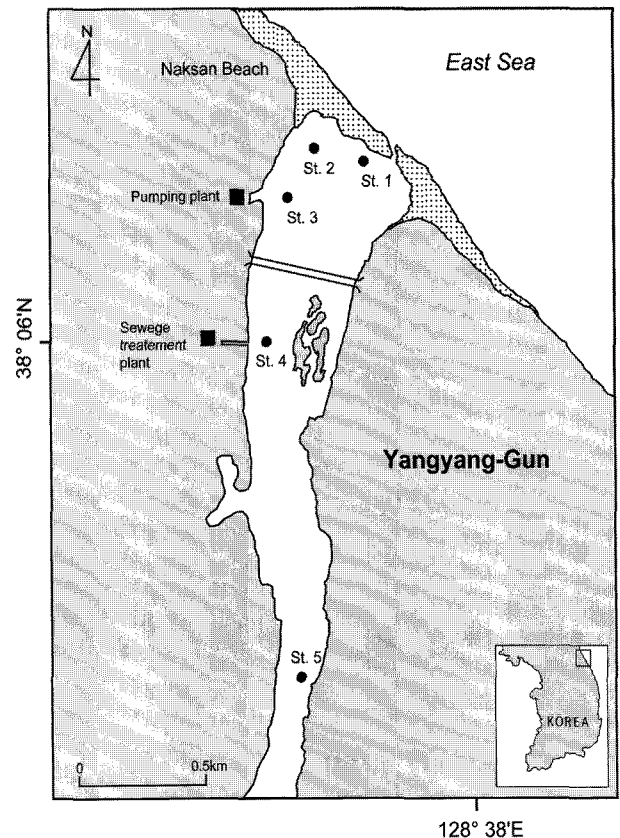


Fig. 1. Map showing the sampling stations.

현장관측과 수질 및 퇴적물 분석을 위한 시료채집은 고무보트를 이용하였다. 수온, 염분, pH, 용존산소는 다항목 수질측정기(YSI 6600, USA)로 수심별로 측정하였고, 채수는 니스킨(Niskin) 채수기를 이용하였으며, 수심이 3 m 이상인 정점 4와 5에서만 지층수를 채수하였다. 퇴적물은 정점 2~5에서 그랩(Grab) 채니기를 이용하여 채취하였다.

영양염 분석을 위해서는 채수한 시료수 500 mL를 공경 0.45 μ m 멤브레인 여과지(Whatman)로 여과한 후, 여과된 시료를 분석 시까지 냉동 보관하였다. 영양염은 해양환경공정시험방법(해양수산부, 2005)의 비색법으로 아질산질소, 질산질소, 암모니아질소, 인산인, 규산규소를 측정하였다. 수중 엽록소 *a* 측정을 위해서 시료수 500 mL를 공경 0.45 μ m 멤브레인 여과지로 여과하고, 여과지를 90% 아세톤 10 mL로 냉암소에서 24시간동안 침적시킨 후, 그 상등액을 형광광도계(Fluorometer; TurnerDesign 10AU, USA)를 사용하여 농도를 측정하였다. 퇴적물 분석을 위해서는 채집한 시료를 분석 시까지 냉동 보관하였다. 퇴적물의 입도는 Ingram(1971)의 방법에 따라 분석하였다. 분취한 퇴적물 시료 내의 탄산염과

유기물을 제거한 후, 4 ϕ 보다 조립한 시료는 건식 체질법으로, 이하의 입자에 대해서는 Stock's law의 침전속도를 적용한 피펫팅 방법으로 분석하였으며, 퇴적물의 입도조직은 Folk and Ward(1957)의 도식방법에 따라 계산하였다. 퇴적물의 강열감량과 산화발생량 화물은 해양환경공정시험방법에 따라 분석하였다.

양양 남대천 하구역의 하상 형태를 파악하기 위하여 하구의 7개 단면을 선정한 후, 휴대용 수심측정기(HONDEX PS-7, JAPAN)를 이용하여 약 1~10 m 간격으로 수심을 측정하였다(Fig. 2). 양양 남대천 유량은 국가 수자원관리종합정보 시스템(국토해양부, 2008)에서 수위유량관계곡선식에 의해 계산된 자료를 이용하였다.

결 과

하상 형태 및 강우량

양양 남대천 하구의 하상 형태는 하구입구로부터 2.3 km 상류 부근까지 주변에 비해 수심이 깊고 폭이 좁은 소(pool)가 형성되어 있는 것이 특징적이었다(Fig. 2). 소는 하구입구로부터 1.3 km

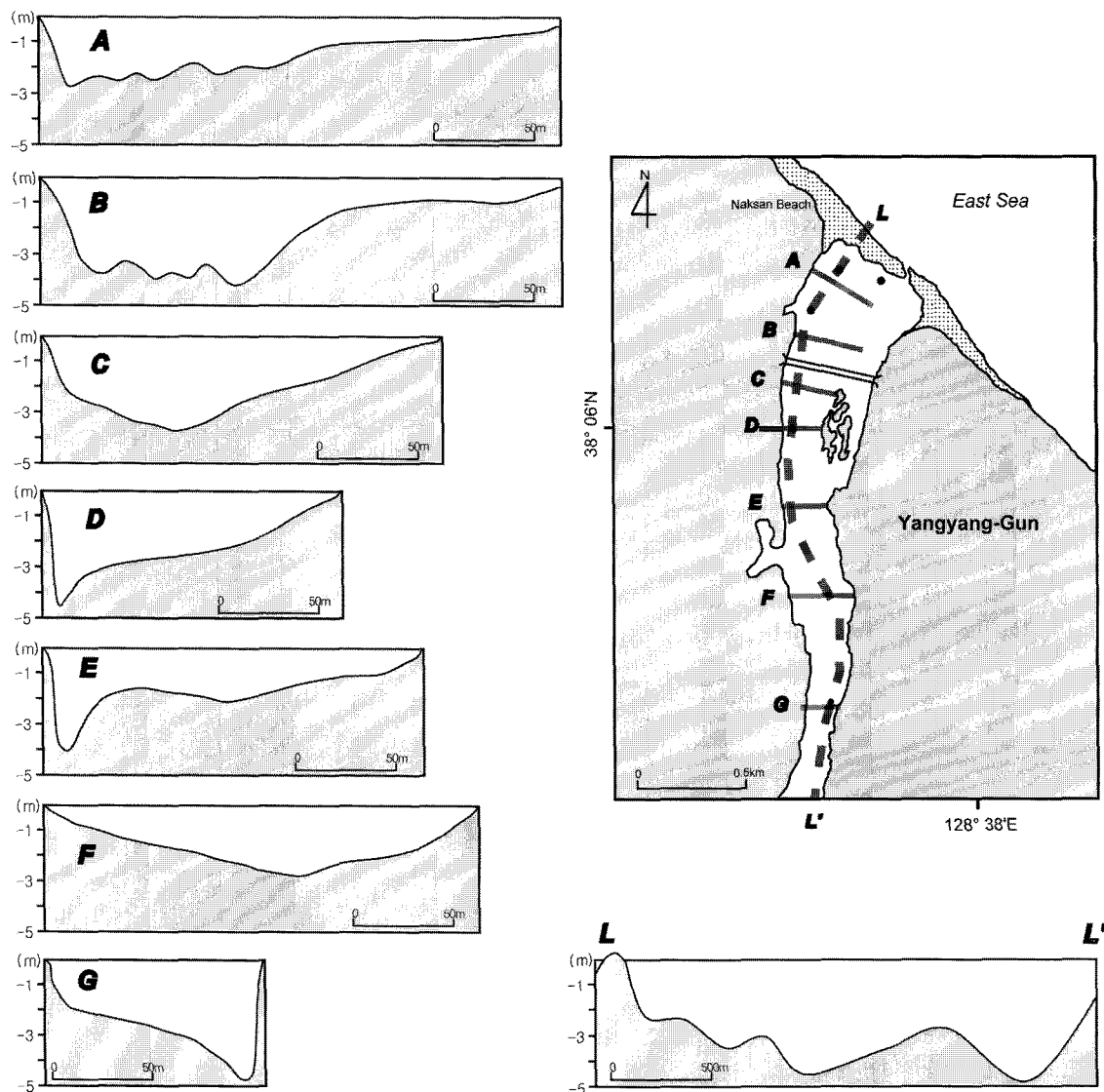


Fig. 2. Diagrams of transection (A~G line) and longitudinal-section (L line) of riverbed at Namdae stream estuary, Yangyang.

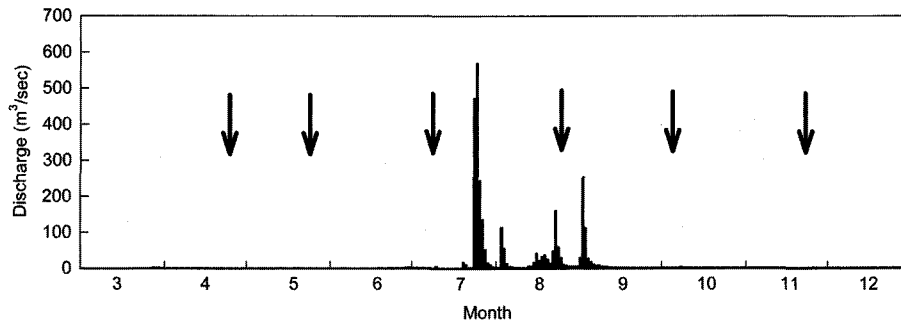


Fig. 3. Discharge of the Namdae stream from March to December, 2008 (Data from WAMIS, 2008). Sampling dates are shown by arrows.

상류부근까지는 하천의 서측에 형성되어 있고, 점차 하천 중앙을 가로 지른 후 상류 1.9~2.4 km 까지는 하천의 동측에 형성되어 있다.

소의 수심은 약 2.5~5 m의 범위로 하구입구로부터 약 1 km 상류(정점 4) 부근과 약 2 km 상류(정점 5) 부근에서 수심 4~5 m로 깊었다. 수심이 상대적으로 깊은 소가 형성된 구역에서는 소의 폭이 상대적으로 좁았으며, 반대로 수심이 상대적으로 낮은 소가 형성된 구역에서는 소의 폭이 넓었다. 이 소는 하구입구로부터 약 2.5 km 상류 부근에서 소멸되어 하천의 수심은 약 1 m 내외로 낮아졌다.

조사 기간동안 양양 남대천의 담수 유량을 살펴보면(Fig. 3), 3월부터 7월 중순까지는 하루 최고 유량 10 m³/sec를 초과하는 일수가 없을 정도로 전형적인 갈수기였다. 강우기로 접어들면서 7월 25일을 전후해 가장 많은 유량(569 m³/sec)이 기록되었고, 8월말과 9월초에 100 m³/sec 이상의 많은 유량이 기록되었으며, 특히 8월

조사 이틀 전에는 많은 강우에 의해 유량이 크게 증가하였다(161 m³/sec). 이후 9월 중순부터 12월까지의 전반기와 같이 5 m³/sec를 초과하는 일수가 없는 갈수기의 형태를 보였다.

수 환경

조사 기간동안 양양 남대천 하구의 수온은 표층의 경우 월 평균 7.2~27.8 °C, 저층 수온은 월 평균 10.3~22.9 °C의 범위였으며, 표·저층 모두 7월에 수온이 가장 높고 11월에 가장 낮았다. 표층 수온이 저층수온보다 높은 시기는 5월과 7월이었으며, 그 외 조사시기에서는 표층수온이 저층수온에 비해 다소 낮은 분포를 보였다(Fig. 4).

염분은 표층의 경우 월 평균 0.21~3.01로 낮았으나, 저층에서는 월 평균 1.36~20.79의 범위로 4월을 제외하면 염분이 15 이상으로 표층보다 월등히 높았다(Fig. 4). 수심별로는 4월의 경우 수심

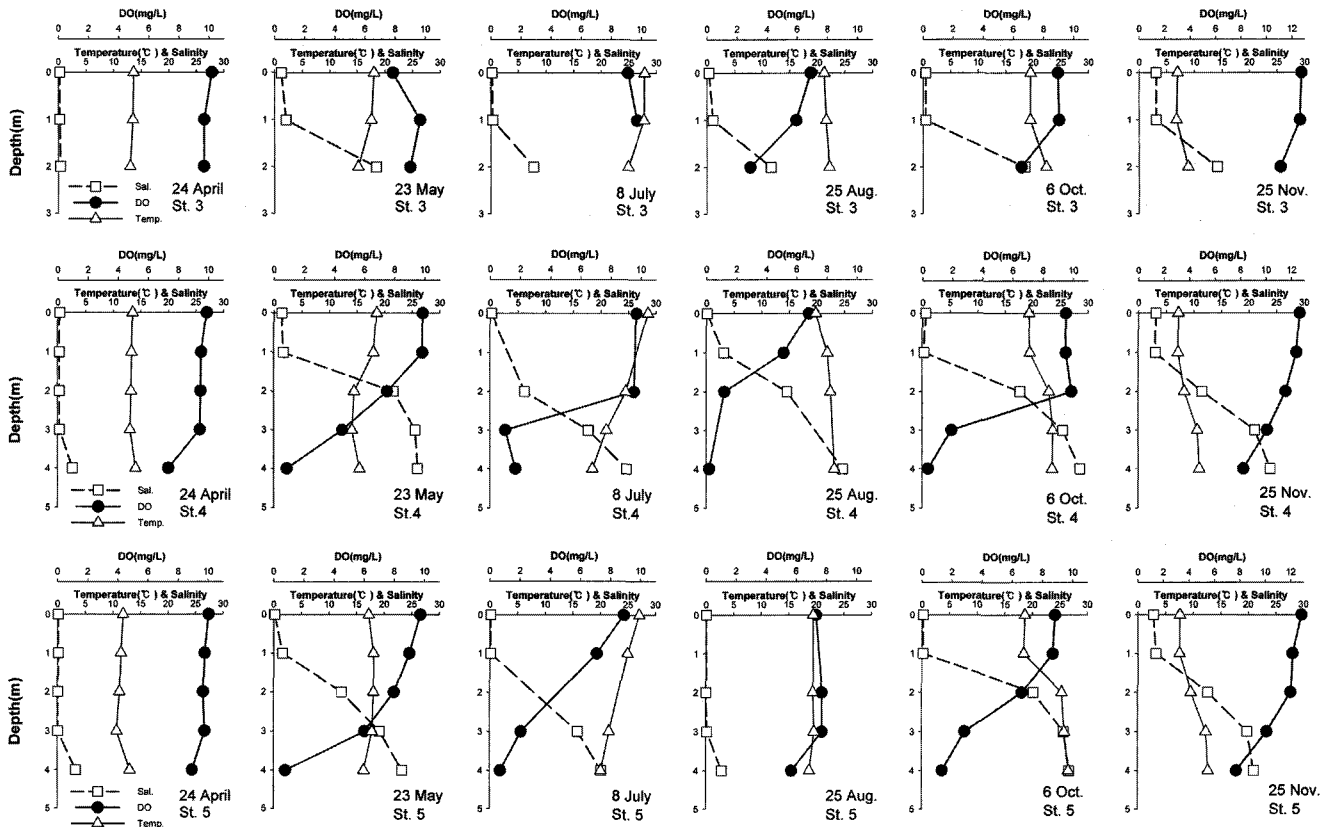


Fig. 4. Variations of vertical distribution of water temperature, salinity and dissolved oxygen (DO) concentration in the station 3, 4 and 5.

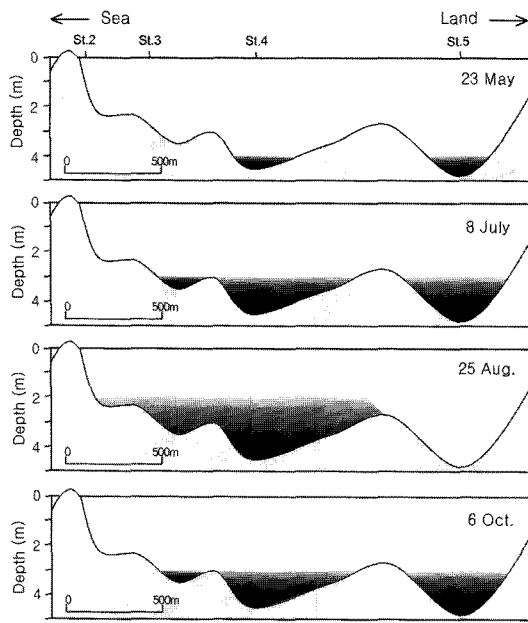


Fig. 5. Variation of oxygen deficient water mass (DO < 3 mg/L) along longitudinal-section from May to October at Namdae stream estuary, Yangyang.

4 m까지 염분이 5 이하로 낮았으나, 이후 조사시기에는 2 m 수심에서 염분이 10 이상으로 높아졌다. 정점 4와 5의 경우 수심 4 m에서는 4월을 제외하면 염분이 25 이상으로 높게 유지되고 있었으나, 예외적으로 정점 5에서는 8월에 전 수심에서 염분이 5 이하로 낮았다.

용존산소는 표층의 경우 6.80~12.9 mg/L의 범위로 8월에 다소 낮은 농도를 보였으며, 저층에서는 0.20~11.6 mg/L의 범위로 시

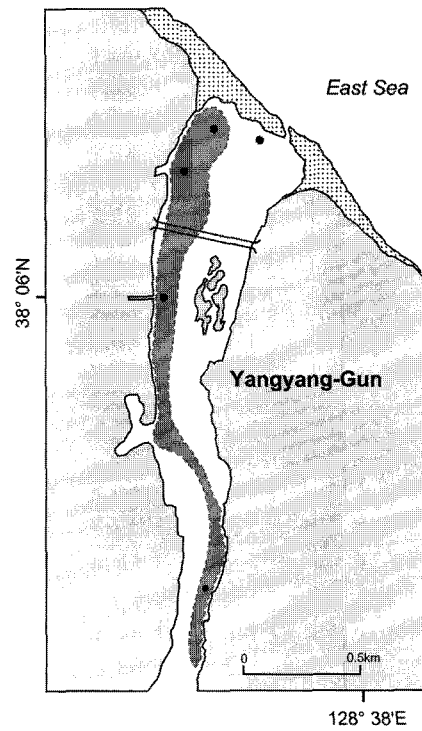


Fig. 6. Horizontal distribution of oxygen deficient water in summer at Namdae stream estuary, Yangyang.

공간적 변동 폭이 크게 나타났다. 특히 5월에서 10월 사이에 정점 4와 정점 5의 저층(4 m)에서는 용존산소 농도가 1 mg/L 이하로 감소하여 무산소 환경을 보여주었다(Fig. 4). 정점 3(정점 깊이 2.5 m)의 경우 8월에만 수심 2 m에서 용존산소가 3 mg/L로 낮았다. 정점 4(정점 깊이 4.5 m)에서는 용존산소가 3 mg/L 이하로 나타

Table 1. Variations of temperature, salinity, dissolved oxygen, nutrients (NO₂-N, NO₃-N, NH₄-N, PO₄-P, SiO₂-Si) and chlorophyll *a* in the surface (St.1~5) and bottom (St.4, 5) water of Namdae stream estuary, Yangyang (Mean value and standard deviation)

		24 Apr.	23 May	8 July	25 Aug.	6 Oct.	25 Nov.
Temp. (°C)	Surface	13.0±0.8	18.0±0.5	27.8±0.5	20.5±1.0	19.3±0.4	7.2±0.3
	Bottom	13.2±0.6	15.2±1.0	22.9±3.7	21.4±1.7	22.8±2.6	10.3±2.0
Salinity	Surface	0.21±0.10	1.04±0.49	0.24±0.09	0.25±0.17	0.47±0.15	3.01±0.12
	Bottom	1.36±1.49	20.8±4.5	13.0±9.7	11.5±10.2	18.5±11.1	17.7±5.8
DO (mg/L)	Surface	9.70±1.37	9.42±0.88	9.81±0.87	7.54±0.77	9.18±0.28	12.8±0.1
	Bottom	9.15±1.09	5.30±4.15	5.75±5.34	3.81±3.30	4.97±3.89	9.68±1.94
NO ₂ -N	Surface	1.36±0.48	0.78±0.14	0.83±0.31	0.50±0.51	0.40±0.09	0.22±0.04
	Bottom	1.57(St.4)	0.74(St.4)	1.77±1.19	0.36±0.29	0.29±0.05	0.21±0.03
NO ₃ -N	Surface	174±15	78.6±48.9	115±4	44.8±1.6	28.9±9.3	31.8±7.1
	Bottom	190(St.4)	124(St.4)	20.0±11.5	35.6±7.3	17.6±15.1	11.4±1.4
NH ₄ -N	Surface	3.17±0.86	3.77±0.95	2.97±0.56	0.84±0.36	1.58±0.46	2.27±0.3
	Bottom	3.71(St.4)	17.1(St.4)	9.97±5.41	7.89±9.90	10.3±13.1	4.69±4.23
DIN (μM)	Surface	179±15	83.2±49.2	119±4	46.1±1.8	30.9±9.7	34.3±7.4
	Bottom	195(St.4)	142(St.4)	31.7±18.1	43.8±2.9	28.1±1.9	16.3±2.9
PO ₄ -P (μM)	Surface	1.11±0.74	1.03±0.59	0.93±0.90	1.14±0.63	0.82±0.42	0.87±0.35
	Bottom	1.23(St.4)	1.32(St.4)	5.85±2.78	0.57±0.21	0.17±0.04	0.27±0.02
SiO ₂ -Si (μM)	Surface	134±3	115±5	118±18	149±7	68.2±22.2	115±2
	Bottom	138(St.4)	59.4(St.4)	199±13	130±33	55.4±31.3	40.1±1.0
Chl. <i>a</i> (μg/L)	Surface	0.87±0.27	2.27±1.52	2.15±0.97	0.63±0.15	2.41±1.11	1.43±0.41
	Bottom	2.13(St.4)	1.24(St.4)	1.37±0.76	1.95±2.19	9.18±2.58	2.53(St.4)

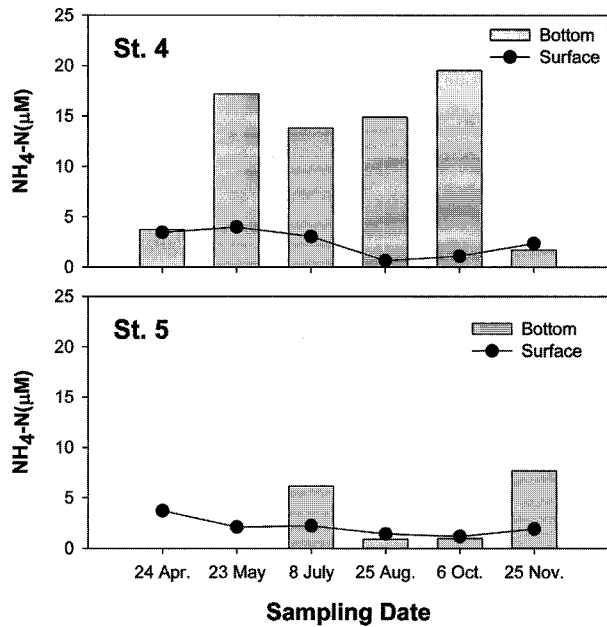


Fig. 7. Monthly variations of ammonium (NH₄-N) concentration in the surface and bottom water of station 4 and 5.

나는 수심이 5월에는 4 m, 7월에는 3 m, 8월에는 2 m, 10월에는 3 m로 변화하였다(Fig. 5). 정점 5(정점 깊이 4.5 m)에서는 용존산소가 3 mg/L 이하로 나타나는 수심이 정점 4의 양상과 유사하였으나, 8월에는 전 수심에서 용존산소가 5 mg/L 이상으로 유지되었다. 양양 남대천 하구에서 용존산소 농도 3 mg/L 이하의 빈산소 수괴가 최대 확장하는 수직적 범위는 저층에서 2 m 수심까지였으며(Fig. 4, 5), 수심 2 m를 기준으로 하여 영향을 받는 최대 수평적 범위는 하구입구로부터 약 2.3 km 부근 상류까지로 추정되었다(Fig. 6).

조사기간동안 영양염의 농도변화를 살펴보면(Table 1), 용존무기질소(DIN)는 표저층 월 평균 16.3~195 μM의 범위로, 4월과 5월에는 저층의 농도가 표층에 비해 높았으나 7월부터는 저층의 농도가 표층에 비해 낮았다. 그러나 용존무기질소 중 암모니아 질소는 정점 4의 경우 표층에서는 조사기간동안 약 5 μM 이내의 농도로 큰 변화를 보여주지 않았으나, 저층에서는 5월부터 10월까지 13 μM 이상으로 표층에 비해 약 4~23배 높은 농도를 보였다(Fig. 7). 반면 정점 5에서는 표저층의 농도가 비교적 낮게 유지되었고, 농도 차이도 크지 않았다. 인산 인은 표저층 월 평균 0.17~5.85 μM의 범위로 시기별 표저층 농도 차이가 크지 않았으나, 7월 저층에서만 가장 높은 농도를 보였다. 규산 규소는 표저층 월 평균 40.1~199 μM의 범위로 10월의 표저층, 5월 및 11월에 저층의 낮

은 농도를 제외하면 농도 변화가 크지 않았다. 엽록소 *a*는 표저층 평균 0.63~9.18 μg/L의 범위로 영양염의 변동과 달리 8월 이후에 저층에서 농도가 증가하여 10월 저층에서 9.18 μg/L로 가장 높았다.

퇴적물 환경

조사 기간동안 남대천 하구의 퇴적물 환경을 살펴보면(Table 2), 퇴적물의 평균입도는 0.8~6.0 φ의 범위로 퇴적상은 극조립사(very coarse sand)에서 중립실트(medium silt)까지의 다양한 퇴적상을 보였으나, 평균적으로 세립사(fine sand)에서 극세립사(very fine sand) 사이의 모래질(모래구성비율 평균 35~80%)로 구성되어 있었다. 퇴적물의 강열감량(IL)은 각 정점 평균 7.5~9.0%의 범위로 높게 나타났으며, 정점 간 농도차이는 크지 않았다. 퇴적물의 산화발성 황화물(AVS) 농도는 각 정점 평균 0.282~1.106 mg/g dry wt의 범위로 정점 3과 정점 4에서 농도가 높고, 정점 5에서 농도가 낮았다.

고 찰

양양 남대천 하구에서 빈산소 수괴(3 mg/L 이하)는 5월에 발생되어 10월까지 약 6개월간 지속적으로 형성되어 있는 것으로 나타났다(Fig. 4). 양양 남대천 하구역에서 빈산소 수괴가 최대 확장되는 수평적 범위는 길이 2.3 km로 나타났으며(Fig. 6), 빈산소 수괴의 수직적 범위는 8월에 수심 2 m까지 최대 확장되었다(Fig. 5). 매년 하계에 빈산소 수괴가 출현하는 진해만의 경우 김과 김(2003)은 진동만에서 용존산소 농도 3 mg/L 이하의 빈산소 수괴가 7월부터 8월까지 저층에서 유지되고 있음을 보고하였고, 국립수산과학원에서 2000년 이후 실시하고 있는 진해만 빈산소 수괴 모니터링 자료에서도 빈산소 수괴는 주로 7~8월에 출현하고 있다고 하였다(국립수산과학원, 2009). 이외에도 남해안에 위치한 가막만(김 등, 2006a), 서해안의 천수만(박 등, 2006) 및 영산강 하구(임과 박, 1998) 등에서도 빈산소 수괴는 주로 7월과 8월 사이에 출현하고 있다. 그러나 시화호에서는 4월부터 11월까지 장기간 동안 빈산소 수괴의 출현이 보고된 바 있다(최와 김, 2001; 박 등, 2003). 양양 남대천 하구에서의 빈산소 수괴 출현 기간은 우리나라 연안역에서의 빈산소 수괴 출현기간에 비해 장기간이었으며, 방조제에 의해 해수교환이 제한되어 있는 시화호의 빈산소 수괴 출현 기간과 유사하였다. 양양 남대천에서는 홍등(2000)이 여름철 대형저서동물 군집 조사에서 저층의 무산소 및 빈산소 환경을 보고한 바 있으며, 윤 등(1999)도 강릉 남대천의 하류에서 6월에 1.6 mg/L의 낮은 용존산소 농도를 보고하였다. 양양 남대천 하구의 빈산소 수괴는 5월에 하구역의 가장자리에

Table 2. Grain size and chemical conditions of sediment at each stations in Namdae stream estuary, Yangyang (Values in parentheses indicate mean and standard deviation)

	Depth (m)	Sand (%)	Mean grain size (φ)	IL (%)	AVS (mg/g dry wt)
St. 2	2.0	11.3~78.2(43.5±28)	1.2~6.0(3.7±2.0)	2.9~16.5(8.6±5.4)	0.051~1.612(0.590±0.59)
St. 3	2.5	13.7~57.9(35.5±25)	2.9~5.9(4.4±1.7)	4.1~13.2(9.0±3.7)	0.105~2.367(0.968±1.01)
St. 4	4.5	28.4~93.2(61.0±36)	0.8~5.3(3.2±2.4)	2.1~14.7(8.2±4.6)	0.026~3.830(1.106±1.41)
St. 5	4.5	58.3~92.5(79.9±15)	1.2~3.9(2.6±1.0)	2.4~12.7(7.5±4.1)	0.021~0.575(0.282±0.20)

형성되어 있는 소(pool)의 가장 깊은 수심(4-5 m)에서 발생하기 시작하였다(Fig. 4, 5). 이 시기에 염분은 표층에서 1 이하, 수심 2~3 m에서는 20 이상으로 약 1 m 간격사이에서 염분이 급격하게 증가하여 매우 강한 염분약층을 형성하고 있었다. 4월말 조사에서는 염분약층 및 빈산소 또는 저산소 수괴가 발생되지 않았음을 고려하면, 양양 남대천 하구의 빈산소 수괴는 5월에 형성되는 것으로 판단된다. 5월 이후, 빈산소 수괴가 소멸된 11월 말까지 염분약층 또한 대체로 1~2 m 층에서 지속적으로 형성되어 있어 양양 남대천 하구에서 빈산소 수괴의 발생 시기는 염분약층 형성 시기와 연관이 있음을 시사해 준다.

이에 반해 수온은 7월에 정점 4와 5에서 표층의 수온이 저층에 비해 약 7~10°C로 높았던 경우를 제외하면 대부분의 조사기간 동안 표·저층 수온차이가 적거나 오히려 표층의 수온이 낮은 분포를 보여(Fig. 4) 수온이 양양 남대천 하구역의 밀도약층 형성에는 주된 영향을 주지 않는 것으로 판단된다. 그러나 수온이 상승되는 5월부터 빈산소 수괴가 형성되고, 11월에 염분약층이 형성되어 있음에도 불구하고 빈산소 수괴가 소멸되었던 사실은 수온이 저층의 산소 소모를 가속화시키는 유기물의 분해 환경과 밀접한 관련이 있음을 의미한다.

일반적으로 해양에서 수직적 밀도성층은 여름철 표층수온의 상승으로 인한 표·저층의 간 수온차이로 형성되지만, 연안의 반폐쇄성이나 폐쇄성 내만에서는 수온의 영향은 물론 담수유입으로 인한 표층염분의 감소로 인해 밀도성층의 세기가 강화된다. 연안의 폐쇄성 내만에서 표·저층의 순환을 제한하는 밀도성층의 형성은 빈산소 수괴를 발생시키는 중요한 요인 중에 하나이다. 앞서 언급한 진해만, 천수만, 영산강 하구 및 시화호 등에서 염분약층과 밀도성층이 대체로 담수 유입에 의해 형성되었으며, 가막만의 경우에는 오목한 지형 중앙부에 형성된 저층 고립 냉수괴에 의해서 밀도성층이 형성되었다(김 등, 2006a).

연안 내만에서 대부분의 염분약층 형성은 주변육상으로부터의 담수유입이 주요원인 중에 하나이지만, 양양 남대천 하구에서는 해수가 하구로 침투하여 수심이 깊은 소에 채워지면서 강한 염분약층이 형성되는 것으로 보여진다. 양양 남대천 하구의 하상은 하구입구가 해안사주에 의해 수심이 얇게 형성되어 있고 입구로부터 1~2 km 사이에는 수심이 약 5 m인 소가 존재하고 있으며, 다시 2.5 km 부근에서 수심이 1 m로 얕아지는 오목한 지형을 형성하고 있다. 해수가 해안사주를 넘어 하구로 유입될 경우 해수는 깊은 수심을 형성하고 있는 소 구역부터 채워질 것이며, 오목한 하구 지형에 채워진 해수는 장기간 동안 정체되면서 강하고 지속적인 염분약층을 유지시킬 것으로 판단된다.

염분약층 형성에 의해 지속되는 밀도성층은 표층에서 저층으로의 산소 공급을 차단시키게 된다. 더불어 밀도약층 아래의 저층에서는 생물의 호흡과 유기물의 분해로 인해 산소가 점차 소모되면서 저산소, 빈산소, 무산소 환경으로 전환하게 된다. 양양 남대천 하구역의 소를 중심으로 채집된 퇴적물의 강열감량 즉 유기물 함량은 정점별 평균 7.5~9.0%의 범위였으며, 산취발성황화물(AVS) 농도는 정점별 평균 0.282~1.106 mg/g-dry wt의 범위(Table 2) 유기물 오염이 심한 연안 내만의 퇴적물에서 나타나는 높은 농도를 나타내었다. Kang *et al.*(1993)은 우리나라 주요연안의 퇴적물 강열감량이 1.4~10.8%의 범위로 진해만, 한산만, 부산연안에서 높

았다고 하였으며, 진해만의 경우 최와 김(2002)은 퇴적물의 강열감량이 평균 10.7%, 산취발성황화물이 평균 0.156 mg/g-dry wt, 이 등(2003)은 산취발성황화물이 0.92~3.93 mg/g-dry wt로 보고하였다. 이 외에 강열감량의 경우 광양만에서 2.5~22.1%(조 등, 2006), 가막만에서 3.0~9.2%(윤 등, 2008), 영산강 하구역에서 3.3~15.5%(임과 박, 1998) 등으로 보고되었다. 따라서 양양 남대천 하구역에서 저층의 산소 소모를 가속화시키는 주요 원인은 퇴적물에 침적되어 있는 다량의 유기물질 분해과정으로 판단되며, 진해만, 마산만, 영산강 하구 등 빈산소 수괴가 빈번하게 발생하는 해역에서도 대부분 밀도약층이 형성된 이후 퇴적물내의 고농도 유기물의 분해에 의해 저층 산소가 소모된다고 보고되고 있다(김과 이, 1994; 임과 홍, 1994; 임과 박, 1998; 국립수산과학원, 2009)

하구역 소를 중심으로 빈산소 수괴가 형성되기 시작하였던 것은 이 구역에 유기물질이 집중적으로 쌓여있는 것을 의미하며, 육상으로부터 유입된 유기물질이 하구역에서 정체·침강되면서 수심 4~5 m의 V자형 소를 중심으로 침적되었을 것으로 판단된다. 홍 등(2000)은 1997년 조사에서 남대천 하구역의 무생물구역 수심이 7 m이고 사실로 구성되어 있다고 보고하고 있으나, 본 조사에서는 가장 깊은 수심이 약 5 m이고 모래함량이 평균 36~80%로 비교적 낮았던 것을 고려하면, 그동안 육상으로부터 유입된 토사 및 유기물질이 하구역의 소 구역에 약 2 m 정도로 쌓여졌다는 것을 의미하며, 특히 2002년 태풍 루사 및 2003년 태풍 매미에 의한 대규모 홍수에 영향을 많이 받았을 것으로 판단된다.

조사기간 동안 정점 4의 저층 암모니아 질소 농도는 5월부터 10월까지 13 µM 이상으로 표층에 비해 약 4~23배 높은 농도를 보였다(Fig. 7). 정점 4의 위치가 양양 하수종말처리장의 배출구와 근접하였음에도 불구하고 표층보다 저층의 암모니아 질소 농도가 월등히 높았다는 것은 다량의 유기물이 침적되어 있는 저층 퇴적물에서 다량의 암모니아 질소가 용출되었음을 의미한다. 또한 염분성층과 빈산소 수괴가 형성된 시기에만 저층의 암모니아 질소 농도가 높았다는 것은 저층의 빈산소 환경이 퇴적물의 유기물 분해와 암모니아 질소의 수중 용출을 촉진시켰음을 의미한다. 이에 반해 정점 5에서는 표·저층간 암모니아 질소의 뚜렷한 농도차이가 나타나지 않았으며(Fig. 7), 인산 인과 규산 규소의 경우 빈산소 수괴 형성기간 동안에 7월을 제외하면 저층의 농도가 표층보다 낮은 경향을 보였다(Table. 1). 일반적으로 혐기성(환원) 환경에서는 저층 퇴적물로부터 영양염과 철, 망간 등 금속원소의 용출이 촉진되고(Diaz and Rosenberg, 2008; 국립수산과학원, 2009), 특히 인산 인은 철과 인의 결합력이 약화되어 인산 인의 용출량이 크게 증가하는 것으로 알려져 있다(Boers, 1991). 또한 저층 퇴적물에서 무기 영양염의 용출에 영향을 미치는 요인은 다양하며, 온도, pH, 혐기성 정도, 유기물함량, 미생물이나 저서동물과 같은 생물 요인, 퇴적물내 무기물의 화학적 특성 등에 따라서 크게 변화한다(정과 조, 2003; Jansson *et al.*, 1988). 따라서 암모니아 질소외의 영양염 성분이 저층에서 증가하지 않았던 이유는 저층의 수온, 하수종말 처리장, 퇴적물의 유기물 함량 및 빈산소 수괴의 지속 여부 등이 영향을 주었을 것으로 판단되며, 육상기원이 우세한 영양염이 하천을 통해 하구역 표층으로 유입됨에 따라 표층의 영양염 농도가 저층에 비해 상대적으로 높게 유지되고 있는 것으로 보여

지나, 이에 대한 정확한 이해를 위해 보다 심도있는 연구가 필요할 것으로 판단된다.

더불어 빈산소 수괴 형성 시 퇴적물에서 용출된 다량의 영양염은 식물플랑크톤의 대발생을 초래하고 이 후 식물플랑크톤이 사멸하여 사체가 저층으로 침강하여 분해되면서 저층의 산소를 소모시켜 빈산소 수괴를 더욱 악화시키며 해역 또는 호수의 부영양화를 가속화시키기도 한다(Hanazato, 1997; 김 등, 2006a). 양양 남대천 하구에서는 권 등(2005)이 2003년 양양 남대천 하구 표층에서 식물플랑크톤의 대량 증식을 보고한 바 있으나, 본 조사에서는 빈산소 수괴의 소멸시기인 10월에 엽록소 *a*의 농도가 다소 높았을 뿐, 빈산소 수괴가 형성되기 이전은 물론 빈산소 수괴가 진행되는 기간 동안 뚜렷한 식물플랑크톤의 증가가 발견되지 않아 (Table 1) 식물플랑크톤이 저층의 산소 소모를 유발하는 주요 원인은 아닌 것으로 판단된다.

한편, 조사구역의 상류 지점(정점 5)에서는 8월 조사에서 염분 약층이 사라지고 용존산소가 전 수심에서 약 6 mg/L 이상으로 회복되는 현상을 보였으나, 10월 조사에서는 다시 염분약층과 저층 빈산소가 형성되어 있었다(Fig. 5). 이는 8월 조사 직전 기록된 하천 유량을 고려할 때, 하천 유량이 급격하게 증가하면서 하구 상류의 저층 빈산소 수괴가 하구 하류 쪽으로 밀리고 담수가 채워지면서 용존산소가 회복되었으며, 이후 하천 유량이 감소되면서 해수와 빈산소 수괴가 다시 하구 상류의 저층에 채워진 결과로 판단된다. 강우기에 하구 상류 구역의 빈산소 소멸과 빈산소 재발생의 시간적 추이는 하천 유량의 급격한 변동과 관련하여 비교적 짧은 시간에 이루어질 것으로 판단되나, 이에 대한 정확한 정보는 보다 면밀한 조사가 수행되어야 얻을 수 있을 것으로 생각된다.

수중의 용존산소 결핍이 수중에 서식하는 어패류 및 저서동물의 생존 및 서식범위에 영향을 주는 것은 잘 알려진 사실이다(Karim et al., 2003). 양양 남대천하구에서 발생하는 빈산소 수괴 또한 남대천 하구에 서식하는 수중 생물들의 서식범위에 영향을 미칠 것으로 판단된다. 양양 남대천 하구에서 보여지는 빈산소 수괴 수심의 월별 변동과 하천 유량에 따른 빈산소 수괴의 공간적 변동 양상은 이동력이 약한 저서동물은 물론 회피공간이 극히 제한된 소규모 하구에 서식하는 유영생물의 생존에 큰 영향을 미칠 것으로 판단된다. 윤(1998)은 빈산소화 된 저층수가 바람에 의한 취송류의 영향으로 용승할 경우 직접적인 생물폐사를 초래한다고 하였다.

따라서 양양 남대천 하구역에서는 재첩이 서식·생산되고 있고 국내에서 연어가 가장 많이 소상하는 하천임을 고려하면, 이들 수산자원의 안정적인 생산성 확보를 위해서 빈산소 수괴 발생에 대한 기본적인 모니터링이 수행되어야 할 것으로 판단된다. 또한 4월에서 5월 사이에 빈산소가 급격하게 진행되는 과정에 대한 정보를 얻기 위하여 수층-퇴적물간의 산소공급 및 산소 소모량, 퇴적물의 유기물 분해 속도 및 빈산소 수괴의 확산시간 등에 대한 정량적 분석 등이 차후에 연구되어야 할 것으로 판단된다. 더불어 해안사주가 잘 발달해 있는 동해안의 여러 하천 하구 유역은 상황에 따라 빈산소 수괴가 발생할 수 있는 여건을 충분히 가지고 있다고 볼 수 있으며, 동해안으로 유입되는 하천의 하구 유역에 대한 조사도 병행되어야 할 것으로 생각된다.

사 사

본 연구는 국립수산과학원의 “동해해양환경연구(RP-2010-ME-030)”의 일환으로 수행되었으며, 현장조사를 위하여 보트와 조사 인원을 지원해 주신 국립수산과학원 냉수성어류연구센터 관계자 분들께 감사드립니다. 본 논문의 내용을 보다 논리적으로 전개할 수 있도록 조언해 주신 세 분의 심사위원들께 진심으로 감사드립니다.

참고문헌

- 국립수산과학원, 2009. 한국연안의 빈산소 수괴, 173pp.
- 권기영, 김주경, 홍관의, 성기백, 이철호, 문창호, 2005. 남대천 하구역의 식물플랑크톤과 영양염 변동. 한국수산학회지, **38**(1): 55-64.
- 권대현, 강용주, 김완기, 이채성, 2002. 강원도 양양 남대천에서 채집된 일본재첩, *Corbicula(Corbicula) japonica* Prime의 수산자원학적 연구. 한국수산학회지, **35**(6): 686-695.
- 국토해양부, 2008. 국가 수자원관리종합정보 시스템. <http://www.wamis.go.kr/>.
- 김동선, 김상우, 2003. 진동만의 빈산소 수괴 형성기구. 한국해양학회지-바다, **8**(2): 177-186.
- 김정배, 이상용, 유준, 최양호, 정창수, 이필용, 2006a. 가막만 빈산소 수괴의 특성. 한국해양환경공학회지, **9**(4): 216-224.
- 김차겸, 이필용, 1994. 진해만의 수괴구조와 용존산소 분포. 한국수산학회지, **27**(5): 572-582.
- 김치홍, 이완옥, 홍관의, 이철호, 김종화, 2006b. 양양 남대천의 어류상과 어류군집. 한국어류학회지, **18**(2): 112-118.
- 박준건, 김은수, 조성록, 김경태, 박용철, 2003. 시화호 수질의 연변화 양상에 대한 연구. Ocean and Polar Res., **25**(4): 459-468.
- 박홍식, 강래선, 이재학, 2006. 천수만 조하대 연성저질에 서식하는 저서동물 우점종의 분포양상과 저서환경. 한국수산학회지, **39**: 214-222.
- 윤상필, 김연정, 정래홍, 문창호, 홍석진, 이원찬, 박중수, 2008. 가막만의 2005년과 2006년 동계 저서환경 및 대형저서다모류 군집구조. 한국해양학회지-바다, **13**(1): 67-82.
- 윤이용, 김대현, 이승목, 1999. 강릉 남대천 하류의 정체현상과 강릉수력 발전방류수의 영향. 대한환경공학회지, **21**(11): 2221-2230.
- 윤종성, 1998. 연안연에서의 저층 빈산소수의 용승현상(청조현상)에 관한 연구. 한국환경과학회지, **7**: 291-299.
- 이대인, 조현서, 이문옥, 2003. 진해만 서부해역의 하계 환경특성 연구-수질 및 저질의 공간적 변동. 한국물환경학회지, **19**(6): 723-730.
- 이인철, 오유진, 김헌태, 2008. 진해만 빈산소 수괴의 경년변동 특성. 한국수산학회지, **41**(2): 134-139.
- 이채성, 성기백, 이철호, 2007. 연어 방류사업의 역사와 현황. 한국해양학회지-바다, **12**(3): 73-80.
- 이필용, 1993. 원문만에서 저산소 수괴의 출현과 계절적 변동. 한국수산학회지, **25**(4): 392-400.
- 임현식, 박경양, 1998. 영산강 하구역의 연성저질에 서식하는 저서동물 군집. 1. 저서환경. 한국수산학회지, **31**(3): 330-342.
- 임현식, 홍재상, 1994. 진해만 저서동물의 군집생태 1. 저서환경. 한국수산학회지, **27**(2): 200-214.

- 정하영, 조경재, 2003. 낙동강 하류 수계에서 저질퇴적층의 SOD와 영양염 용출. 한국하천호수학회지, **36**(3): 322-335.
- 조현서, 조천래, 강조해, 이규형, 2006. 2004-2005년 평양만의 해양수질 및 저질의 계절적변동에 관한 연구. 2006년 해양환경안전학회 춘계학술발표회 요약집.
- 최정훈, 김미옥, 2001. 시화호 배수갑문 운용에 따른 용존산소와 pH 변화. 한국지구과학회지, **22**(3): 195-207.
- 최상덕, 김정균, 2002. 진해만 남서부 해역의 해수와 저질의 세균학적 및 이화학적 특징. 한국수산학회지, **35**(6): 621-626.
- 해양수산부, 2005. 해양환경공정시험방법. pp.42-189.
- 홍재상, 서인수, 이창근, 윤상필, 정래홍, 2000. 양양 남대천 하구역의 여름철 대형저서동물 군집의 생태학적 특성. 한국수산학회지, **33**(3): 230-237.
- Boers, P.C.M., 1991. The influence of pH on phosphate release from lake sediments. *Wat. Res.*, **25**: 309-311.
- Diaz, R.J. and R. Rosenberg, 1995. Marine benthic hypoxia: a review of its ecological effects and the behavioural responsis of benthic macrofauna. *Oceangr. Mar. Biol. Ann. Rev.*, **33**: 245-303.
- Diaz, R.J. and R. Rosenberg, 2008. Spreading dead zone and consequences for marine ecosystems. *Science*, **321**: 926-929.
- Folk, R.L. and W.C. Ward, 1957. Brazos river bar: A study in the significance of grain size parameter. *J. Sediment. Petrol.*, **27**: 3-26.
- Hanazato, T., 1997. Development of low-oxygen layer in lake and its effet on zooplankton communities. *Korean. J. Limnol.*, **30**: 506-511.
- Jansson, M., M. Enell, S. Fleischer, R. Gachter, P. Kelderlmann, S. Lofgren, G. Nurnberg, A. Provini and A. Sinke, 1988. Phosphorus release from sediments. *Arch. Hydrobiol. Beih.(Ergebn Limnol.)*, **30**: 90-93.
- Ingram, R.L., 1971. Sieve analysis. In: *Procedures in sedimentary petrology*, edited by Carver, R.E., Willey-Inter Science. pp. 49-67.
- Kang, C.K., P.Y. Lee, J.S. Park and P.J. Kim, 1993. On the distribution of organic matter in the nearshore surface sediment of Korea. *Bull. Korean Fish. Soc.*, **26**(6): 557-566.
- Karim, M.R., M. Sekine, T. Higuchi, T. Imai and M. Ukita, 2003. Simulation of fish behavior and mortality in hypoxic water in an enclosed bay. *Ecological Modelling*, **159**: 27-42.
- Pearson, T.H. and R. Rosenberg, 1978. Macrobenthic succession in relation to organic enrichment and pollution of the marine environment. *Oceangr. Mar. Biol. Ann. Rev.*, **16**: 229-311.

2010년 6월 28일 원고접수

2010년 8월 11일 수정본 채택

담당편집위원: 장경일