

가막만 빈산소 발생 시 해수-퇴적물 경계면에서 인산염플럭스 특성

김숙양 · 전상호^{1)*} · 이영식²⁾ · 이용화 · 김병만³⁾

국립수산과학원, ¹⁾강원대학교 환경과학과, ²⁾국립수산과학원 남동해수산연구소, ³⁾국립수산과학원 남서해수산연구소
(2010년 9월 29일 접수; 2011년 3월 31일 수정; 2011년 7월 29일 채택)

Characteristics of Phosphate Flux at the Sediment-water Interface in Gamak Bay during the Hypoxic Water Mass

Sook-Yang Kim, Sang-ho, Jun^{1)*}, Young Sik-Lee²⁾, Yong-Hwa Lee, Byeoung-man Kim³⁾

National Fisheries Research & Development, Busan 619-705, Korea

¹⁾Department of Environmental Science, Kangwon National University, Chuncheon 200-701, Korea

²⁾South_East Sea Fisheries Research Institute, NFRDI, Tongyeong 650-943, Korea

³⁾South_West Sea Fisheries Research Institute, NFRDI, Jeonnam 556-823, Korea

(Manuscript received 29 September, 2010; revised 31 March, 2011; accepted 29 July, 2011)

Abstract

The environmental changes related to hypoxic water mass were investigated at Gamak bay in summer times, June, July and August 2006. The hypoxic water mass was found, in first, at the northern area of Gamak bay on 27 June. This water mass has been sustained until the end of August and disappear on 13 September. In Gamak bay, the hypoxic water mass was closely related to geography. During the formation of oxygen deficiency, changes in dissolved nutrients was studied and found that on surface layer and lower layer, DIN were 0.80 μM ~19.8 μM (6.03 μM) and 1.13 μM ~60.83 μM (10.66 μM), and DIP were 0.01 μM ~0.92 μM (0.24 μM), and 0.01 μM ~3.57 μM (0.49 μM), respectively, far higher distribution on lower layer of the water where hypoxic water mass was occurred. The configuration of phosphorus was analyzed to figure out the possibility of release of phosphorus from sediments. It was found that the Labile-Phosphorus, which is capable of easy move to water layer by following environmental change was found more than 70%. Therefore, in Gamak bay, it was found that the possibility of large amount of release of soluble P into the water, while hypoxic water mass was occurred in deep layer was higher. It is suggested that DIP in the northern sea of Gamak bay mainly sourced from the soluble P from lower layer of the waters where hypoxic water mass was created more than that from basin. However, existence form of phosphorus in sediments during normal times, not during creation of hypoxic water mass, needs further study.

Key Words : Gamak Bay, Hypoxic water mass, Phosphorus fraction in sediment, Labile phosphorus, Bottom water, Sedimen-Water interface

1. 서론

가막만은 여수 남단에 위치한 해역으로 여수시, 소라면, 돌산읍, 화양면, 화정면, 남면으로 둘러싸인 반폐쇄적인 천해역이며 해양오염방지법 제 4조 5항에

*Corresponding author : Sang-Ho, Jun, Department of Environmental Science, Kangwon National University, Chuncheon 200-701, Korea
Phone: +82-33-250-8573
E-mail: junsang@kangwon.ac.kr

의거하여 해역 154.17 km², 육역 101.13 km²가 환경보전 해역으로 지정(2002. 2. 9)되어 있고, 국토 계획 및 이용에 관한 법률 제 40조에 의하여 해역 209.08 km², 육역 79.38 km²가 수산자원보호구역으로 지정(1982.1.8)되었다. 남북방향으로 약 15 km, 동서방향으로 약 9 km, 평균수심은 약 9 m인 천해로서 대조차는 약 3 m이고, 만내의 해수는 조류에 의해 여수항과 돌산도 사이의 북쪽의 좁은 수로와 남쪽의 크고 작은 여러 수로로 흐른다(이, 1990). 가막만의 북쪽과 북동쪽으로부터 소호동 주변 생활하수와 구 여수시의 생활하수가 지속적으로 유입되고 있으며 지형적인 특성과 부영양화 등에 의하여 북서 내만을 중심으로 하절기에는 빈산소 현상이 나타난다. 빈산소수괴는 수온약층이 형성되면서 발달하게 되며 수온약층이 발달하면 불연속층이 형성되기 때문에 표층과 저층간의 해수 혼합이 차단된다. 따라서 불연속층 하부에는 용존산소 공급이 차단되며, 또한 유기물의 분해에 용존산소는 소비되기 때문에 하계에 북서내만역에서는 용존산소의 부족 또는 고갈을 초래한다.

가막만 유역의 BOD 발생부하량은 36,573 kg/일, 배출부하량은 27,640 kg/일로 나타나 발생량 대비 배출량 부하가 약 76%를 차지하고, 양식은 전체 발생부하량의 60%, 배출부하량의 80%를 차지하는 등 양식에 의한 오염부하가 큰 것으로 나타났으며 비점 오염원에 의한 배출부하는 1,652 kg/일로 전체 배출부하량의 5%를 차지하였다.(2006, 해양수산부, 가막만 환경보전해역 기본계획)¹⁾ 가막만의 중앙부에는 굴과 진주담치와 같은 패류양식장이 산재하고 있으며 굴 양식은 전국 굴 생산량의 10% 내외의 활발한 생산이 활발하게 이루어지고 있다. 2007년 기준 굴 939 ha/13,702 톤, 진주담치 320 ha/20,880 톤, 어류양식 198 ha/4,250 톤 이 양식 생산되었다(2010, 전라남도 수산기술사업소 여수지소). 그러나 최근 양식굴의 폐사 및 생산실적이 저조한 현상을 보이고 있음에 따라 이러한 피해를 예방하기 위하여 가막만에 대한 총체적인 연안관리가 요구되고 있는 실정이다.

연안해역을 효과적으로 관리하고 이용하기 위해서는 해당 해역의 수질변동 특성에 대하여 정확한 진단과 충분한 이해가 필요하다. 가막만에 대한 연구는 만 전체의 계절적 수질변동, 조석 및 해류, 퇴적물 유기물

분포특성, 생태계모델링 등에 대한 광역조사 연구 또는 계절변동에 대한 연구는 많지만(박 등, 1999; 이 등, 1995; 노 등, 2006; 이 등, 1995; 김, 2005) 이상 해황이 발생한 경우의 수질변동 특성에 대한 연구는 많지 않고, 그 변동 특성에 대해서도 잘 알지 못하고 있다. 따라서 이 연구에서는 매년 하계에 발생하고 있는 빈산소수괴 형성에 따른 해양환경 변동 특히 빈산소수괴 형성시에 저층의 DIP 증가 등 해양환경 변화 특성에 대하여 파악하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 해수

2006년 6월 19일, 7월 28일, 8월 29일 까지 3회에 걸쳐 39개 조사 지점(Fig. 1)을 정하여 집중적인 조사를 하였다. 해수는 표층과 저층에서 해수 분석용 채수기로 해수를 채수하였으며, 분석은 각각의 분석 방법에 따랐다. CTD(Sea Bird, SBE-25)와 YSI 6600EDS를 이용하여 수온, 염분, DO 등의 일반 해양환경을 파악하였으며, 용존태 영양염 분석을 위한 시료는 현장에서 여과하여 실험실로 운반 후 분석 시 까지 냉동 보존하였다. 채집된 시료는 해양환경공정시험법(해수부, 2005)에 준하여 분석하였다. 즉, 암모니아질소(NH₄-N)은 Indophenol 청색법, 아질산질소(NO₂-N)은 α-NED 법, 질산질소(NO₃-N)는 Cu-Cd 칼럼을 이용한 아질산환원법으로 측정하였다.

2.2. 퇴적물

퇴적물 채집은 7개 지점(st.1~7)에서 Grab sampler를 이용하였으며 채집된 시료는 폴리에틸렌 통에 담아 바로 아이스박스에 보관하여 실험실로 옮긴 다음 분석 시 까지 냉동 보관한 후 퇴적물에서의 인의 존재형태를 분석하였다. 분석은 Hieltjes와 Lieklema (1980)의 방법에 준하여 Nonapatite-P(NAI-P), Apatite-P, adsorbed-P, Residual-P 로 구분하였다. 처음에 퇴적물에 1M NH₄Cl를 가하여 2시간 진탕시켜 Adsorbed-P를 추출하였고, 다시 NaOH를 가하여 NAI-P를 추출, 마지막으로 HCl을 가하여 Apatite-P를 추출하였다. Residual-P는 총인에서 Adsorbed-P, NAI-P, Apatite-P를 감하여 산출하였다.

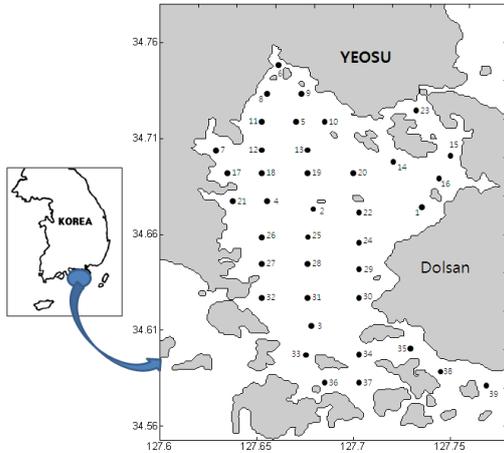


Fig 1. A map sampling stations in Gamak Bay.

3. 결과 및 고찰

3.1. 하계 해양환경과 빈산소수괴 형성

조사기간 동안 수온은 표층 18.80 °C~28.89 °C(평균 24.77 °C), 저층 17.88 °C~27.21 °C(평균 22.25 °C)의 분포를 보였으며, 수평적 분포를 보면 가막만 북서측 내만 연안에서 다소 높았고 만의 남측으로 향할수록 점차 낮은 분포를 보여 만의 북측이 남측인 만의 입구에 비하여 5 °C이상의 상대적 고수온을 보였다. 염분은 표층 27.07~33.22(평균 30.95), 저층 28.08~33.27(평균 31.48)의 분포를 보였으며, 평균 표·저층간의 염분차이는 6월과 8월에 각각 0.25의 농도 차이를 보였으나, 7월 장마시기에는 저층에서 1.08 고염상을 보였다. 수평적 분포를 보면 전반적으로 북측 및 광양만과 여수해만을 통하여 섬진강 담수 유입의 영향을 받는 북동측 연안에서 다소 낮은 분포를 보였고, 만 중앙부와 입구를 향하면서 점차 높아지는 분포를 보이고 있다. 6월과 8월조사시에는 만내에서 북측과 남측의 만입구에서의 염분 차이는 평균 1.5 정도를 보였으나, 특히 7월 조사에서는 장마로 인하여 이러한 특징이 두드러져 3.5 이상의 차이를 보였다. 용존산소는 6월, 7월, 8월 각각 표층이 7.25 mg/L~10.14 mg/L(8.37 mg/L), 6.82 mg/L~10.23 mg/L(8.24 mg/L), 8.01 mg/L~8.32 mg/L(8.18 mg/L)이었으며, 저층에서는 3.79 mg/L~8.53 mg/L(6.85 mg/L), 0.50 mg/L~9.67 mg/L(5.34 mg/L), 7.59 mg/L~8.15 mg/L

(7.98 mg/L)로 만의 북측해역에서 2 mg/L 이하의 빈산소수괴가 나타났다(Fig. 2). 6월 19일 조사에서는 빈산소수괴가 발생하지 않았으나 7월 28일 조사에서는 Fig. 3과 같이 수온 및 염분 성층이 형성된 해역의 저층에서 빈산소수괴가 존재하였다. 9월 13일 조사에서는 평균수온이 표층 22.6 °C, 저층 22.4 °C로서 표층과 저층간의 수온차이가 0.2 °C로서 수온약층이 소멸되었으며, 저층의 용존산소 농도 또한 빈산소 현상이 나타났던 북부 수역에서도 6.8 mg/L로서 90% 이상의 포화도를 보여 빈산소 수괴가 완전 소멸되었다.

우리나라에서 “빈산소수괴 혹은 무산소”라는 표현을 사용한 것은 조(1979)가 진해만에서 1978년 양식굴의 대량폐사가 발생하였는데 이의 원인을 밝히는 과정에서 대규모 적조 발생에 의한 저층수의 빈산소 혹은 무산소화에 의한 질식사자가 주 원인인 것으로 밝히면서 처음으로 사용하였다. 홍(1987)은 1983년도 진해만의 여름철 저층 용존산소의 결핍과 저서생물량과의 관계를 규명하면서 용존산소 포화도가 40% 이하인 해역이 진해만 전체의 54%를 차지하고 있으며, 또한 홍 등(1991)은 1987년부터 약 2개년 연속조사 결과에서는 10월경에 성층이 파괴되면서 정상화 된다고 보고하였다. 이(1993)는 1989년부터 1991년 사이에 진해만의 저산소수괴의 계절변동을 조사한 결과, 저산소수괴의 출현 시기가 매년 다르며, 대체적으로 봄부터 용존산소가 감소하기 시작하여 여름에 빈산소 혹은 무산소수괴가 형성된 후 가을에 회복되는 경향을 보였다고 보고하였다.

진해만에서 빈산소수괴의 형성원인은 진해만 해저 퇴적물 중 고농도의 유기물에 의한 산소소비 및 대기로부터 저층으로의 산소공급을 차단시키는 성층형성과 밀접한 관련이 있다. 빈산소수괴의 시·공간적 변동은 기온, 일조시간, 강수량 등 기상조건에 따라 변동한다고 한다. 저산소수괴의 형성이 지속되는 시기에는 저층수 중 인산인 농도가 급격히 증가하였고, 저층수 중의 용존산소 농도가 회복됨에 따라 점차 감소되는 경향을 보였다.

빈산소수괴가 형성되는 조건에는 수온 또는 밀도 성층이 강하게 형성되는 지역, 지형적인 원인으로 해수교환이 충분하지 못한 폐쇄적인 만 및 부영양화가 심한 해역 등에서 여름철에 주로 발생한다.(국립수산

과학원, 2009) 가막만 경우에는 부영양의 진행보다는 우선적으로 해저 지형과 밀접한 관련이 있는 것으로 보인다. Fig. 4와 같이 가막만 중앙부인 안포-금죽도와 소경도를 연결하는 해역의 수심은 4 m 정도 밖에 되지 않으나, 가막만 북부해역에서의 수심은 약 7~9 m로서 해저가 커다란 오목한 웅덩이 모양을 하고 있어 지형적으로 해수교환이 불충분하게 되므로 여름철 빈산소수괴가 형성된다고 판단된다. 이 등(2006)의 조사 결과에서도 북부 지역에서는 수심이 웅덩이와 같이 깊은 모양을 하고 있어 해수교환이 불충분함을 보고한 바가 있다. 또한 빈산소수괴 발생 지역의 범위를 파악하기 위하여 북부수역 23개 지점으로 구분하여 세밀한 관측을 하였다. 그 결과 Fig. 5와 같이 빈산소수괴가 형성은 앞에서 언급하였듯이 지형과 깊은 관계가 있음을 확인하였다.

수소이온농도(pH)는 6월, 7월, 8월 각각 표층이 8.04~8.39(8.21), 8.0~8.45(8.24), 8.01~8.32(8.18) 저층에서는 7.70~8.17(7.96), 7.23~8.23(7.90), 7.59~8.15(7.98)로서 저층에서는 Fig. 6과 같이 빈산소수괴가 형성된 지역에서 낮은 pH 분포를 보였다.

용존무기질소는 6월, 7월, 8월 각각 표층이 3.41~18.92 μM (7.28 μM), 2.48~19.18 μM (7.47 μM), 0.80~11.61 μM (3.39 μM) 로 집중 강우 후인 7월에 가장 높았으며, 저층에서는 5.28~12.65 μM (8.53 μM), 3.72~60.83 μM (16.79 μM), 1.13~22.35 μM (6.63 μM) 로 7월에 가장 높았으며, 저층의 빈산소수괴가 형성된 수역에서 월등히 높은 분포를 보였다(Fig. 7).

용존무기인은 6월, 7월, 8월 각각 표층이 0.06~0.63 μM (0.24 μM), 0.03~0.95 μM (0.25 μM), 0.01~

Table 1. Range and mean value of environmental factors on summer season in the Gamak Bay

		Water temperature	Salinity	pH	DO	COD	DIP	DIN	SiO ₂ -Si	Chl-a	
		°C									mg/L
Surface layer	19. June	18.80	31.80	8.04	7.25	0.37	0.06	3.41	22.58	0.03	
		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		25.40	33.22	8.39	10.14	1.90	0.63	18.94	84.37	22.43	
	28. July	22.80	32.69	8.21	8.37	0.95	0.24	7.28	49.46	5.04	
		(±1.97)	(±0.30)	(±0.08)	(±0.72)	(±0.33)	(±0.12)	(±2.76)	(±17.93)	(±4.54)	
		20.56	27.07	8.00	6.82	0.97	0.01	2.48	4.81	1.58	
	29. Aug.	27.28	30.49	8.45	10.23	3.14	0.92	19.18	56.50	16.26	
		24.06	28.75	8.24	8.24	1.73	0.25	7.47	18.16	5.77	
		(±1.83)	(±0.95)	(±0.10)	(±0.90)	(±0.49)	(±0.21)	(±3.96)	(±14.74)	(±3.68)	
	19. June	25.58	30.34	8.01	5.84	0.54	0.01	0.80	13.37	1.13	
		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		28.89	31.82	8.32	9.84	2.15	0.51	11.61	116.39	13.35	
28. July	27.40	31.45	8.18	7.00	1.14	0.24	3.39	44.69	5.08		
	(±0.95)	(±0.30)	(±0.09)	(±0.93)	(±0.33)	(±0.11)	(±2.42)	(±31.07)	(±2.81)		
	17.88	32.23	7.70	3.79	0.23	0.03	5.28	18.30	1.02		
Lower layer	19. June	22.20	33.27	8.17	8.53	2.15	0.95	12.65	92.53	15.25	
		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		19.68	32.94	7.96	6.85	0.84	0.30	8.53	55.21	4.89	
	28. July	(±1.01)	(±0.22)	(±0.13)	(±1.21)	(±0.44)	(±0.17)	(±1.79)	(±20.40)	(±3.94)	
		18.42	28.05	7.23	0.50	0.81	0.02	3.72	8.09	0.97	
		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	29. Aug.	24.78	31.92	8.23	9.67	2.31	3.57	60.83	79.857	15.95	
		21.45	29.83	7.90	5.34	1.39	0.67	16.79	28.70	4.29	
		(±1.15)	(±0.68)	(±0.31)	(±2.89)	(±0.43)	(±0.82)	(±11.69)	(±16.65)	(±3.98)	
	29. Aug.	23.11	30.72	7.59	1.43	0.54	0.01	1.13	24.57	0.84	
		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		27.21	32.32	8.15	7.27	1.36	2.39	22.35	143.92	13.94	
	25.58	31.70	7.98	5.22	0.94	0.51	6.63	55.04	4.37		
	(±1.05)	(±0.32)	(±0.18)	(±1.74)	(±0.20)	(±0.50)	(±4.51)	(±31.07)	(±3.50)		

0.51 μM (0.24 μM), 저층에서는 0.03~0.95 μM (0.30 μM), 0.02~3.57 μM (0.67 μM), 0.01~2.39 μM (0.51 μM)로 6월 조사에서는 섬진강 담수의 영향을 받는 북동측인 우측 수역에서 상대적으로 높은 분포를 보였고 7, 8월에는 빈산소수괴가 형성된 수역의 저층과 가

막섬 주변에서 상대적으로 월등히 높은 분포를 보였다. 그 외의 해역에서는 0.3~0.5 μM 정도를 유지하였다(Fig. 8).

빈산소 수괴 발생 지역과 정상적 DO 농도를 유지하는 지역에서 저층의 DIP 및 DIN의 농도를 분석한

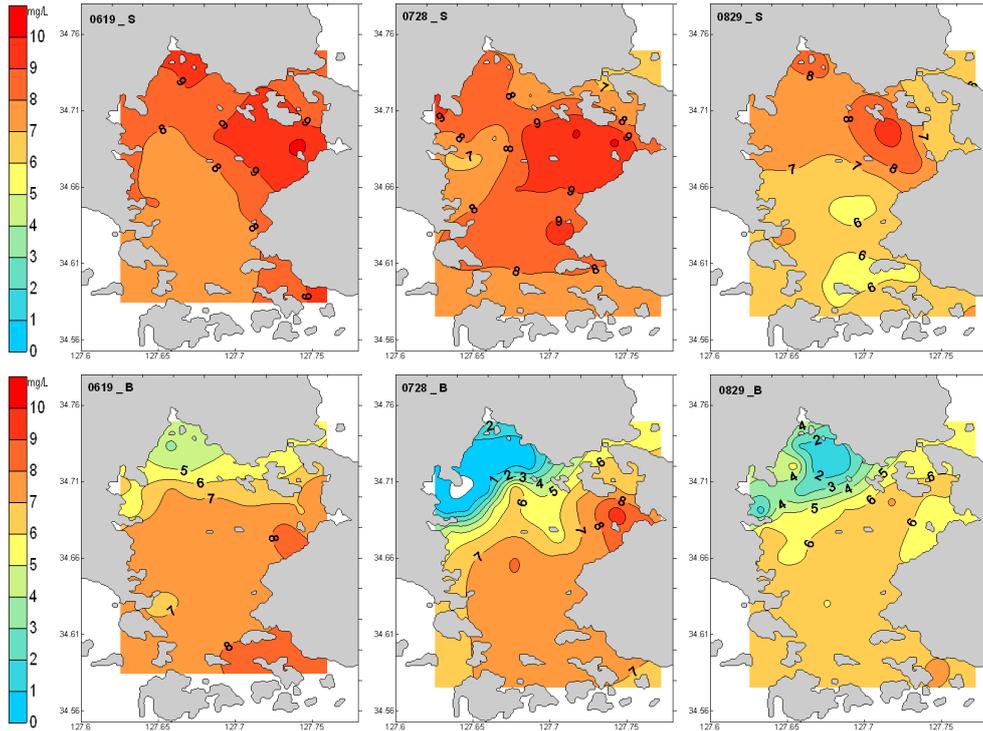


Fig. 2. Horizontal distributions of DO(mg/L) in the summer in Gamak Bay, 2006.

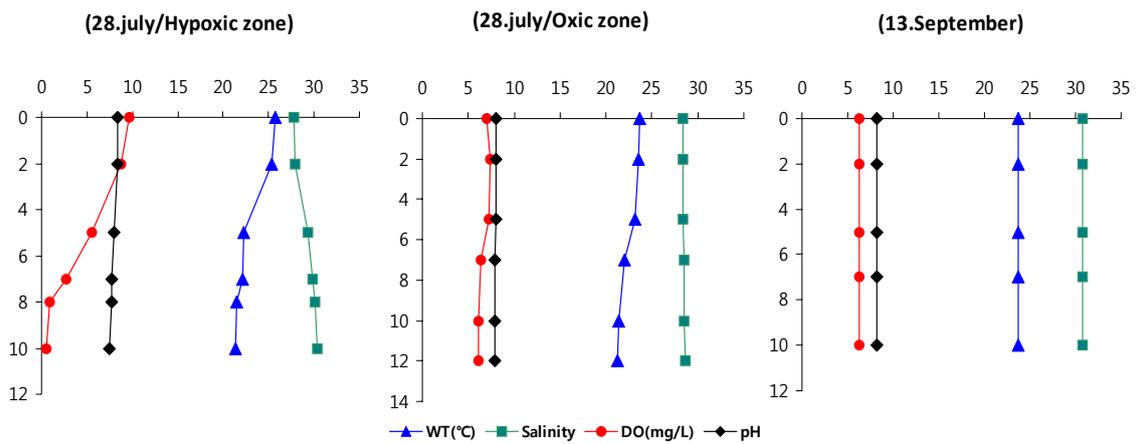


Fig. 3. A variations of water temperature, Salinity, DO and pH when the hypoxia appeared and disappeared in the Gamak Bay, 2006.

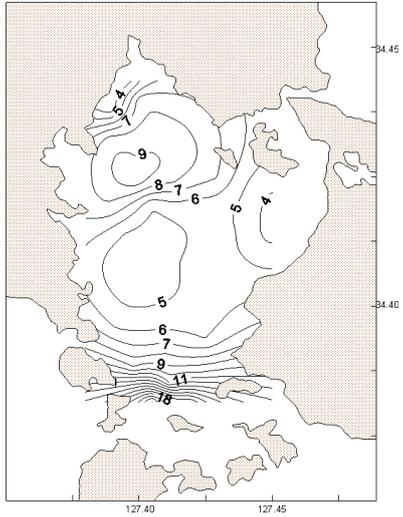


Fig. 4. Water depth(m) contour in Gamak Bay, 2006.

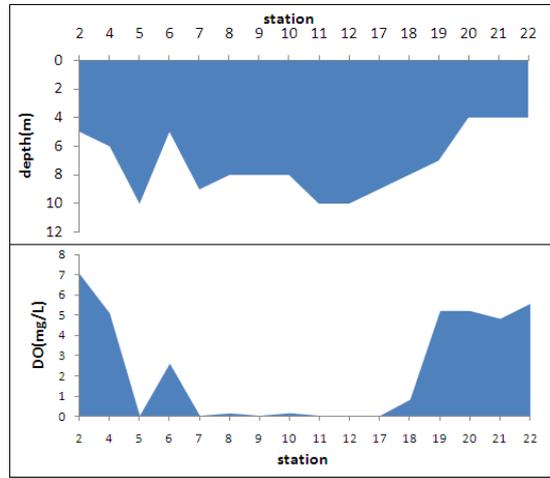


Fig. 5. Water depth(m) and concentration of DO(mg/L) at each sites in Gamak Bay, 2006.

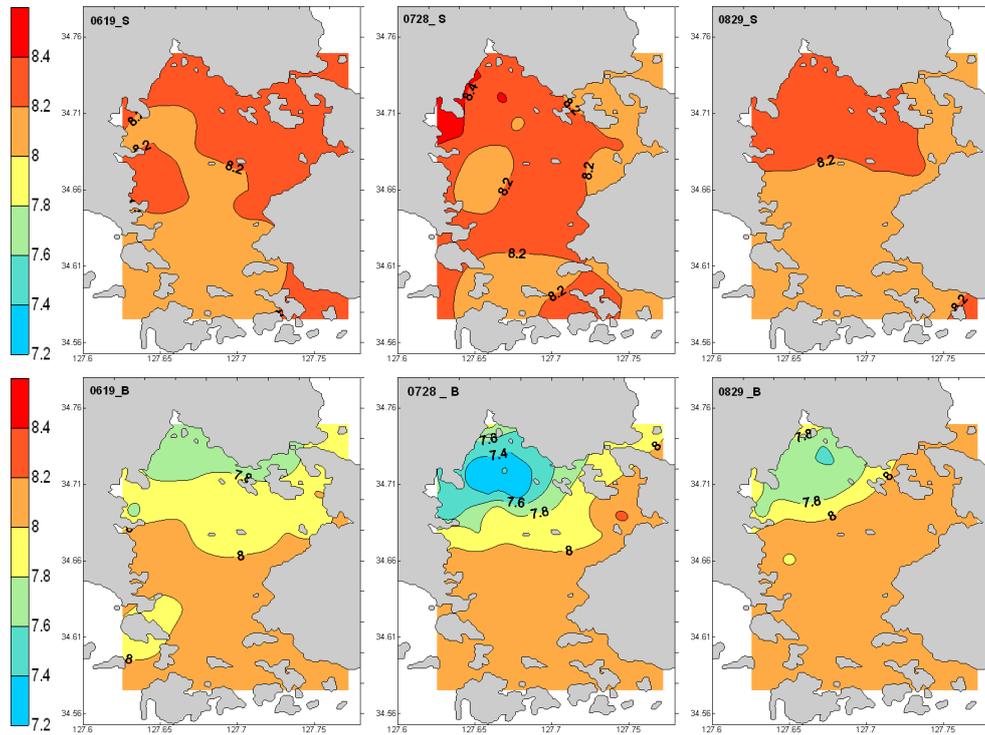


Fig. 6. Horizontal distributions of pH in summer in the Gamak Bay, 2006.

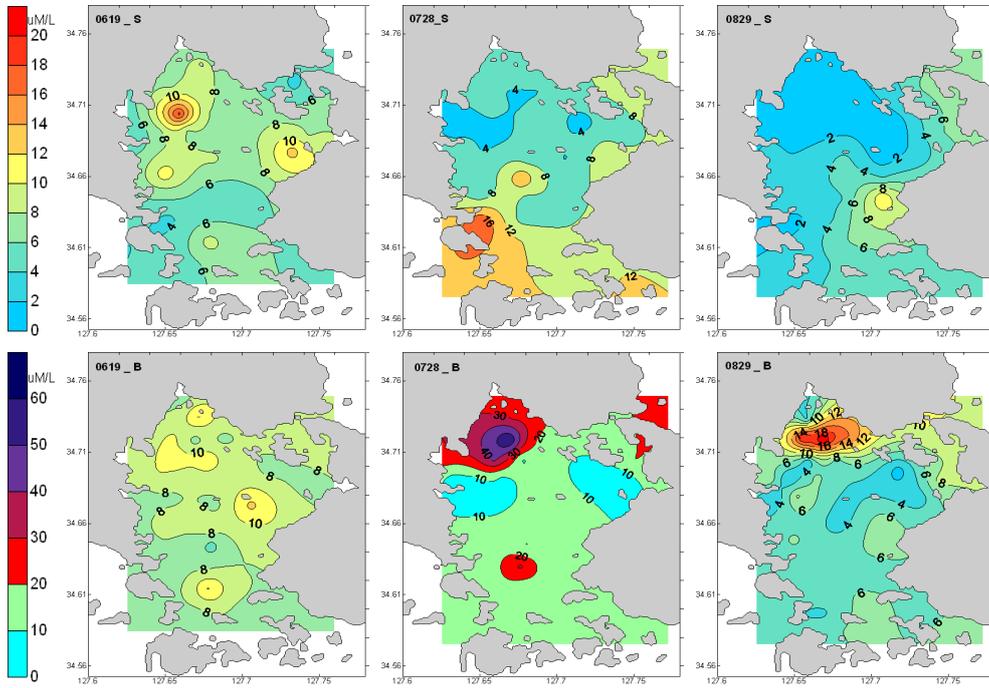


Fig. 7. Horizontal distributions of DIN($\mu\text{M/L}$) in summer in the Gamak Bay, 2006.

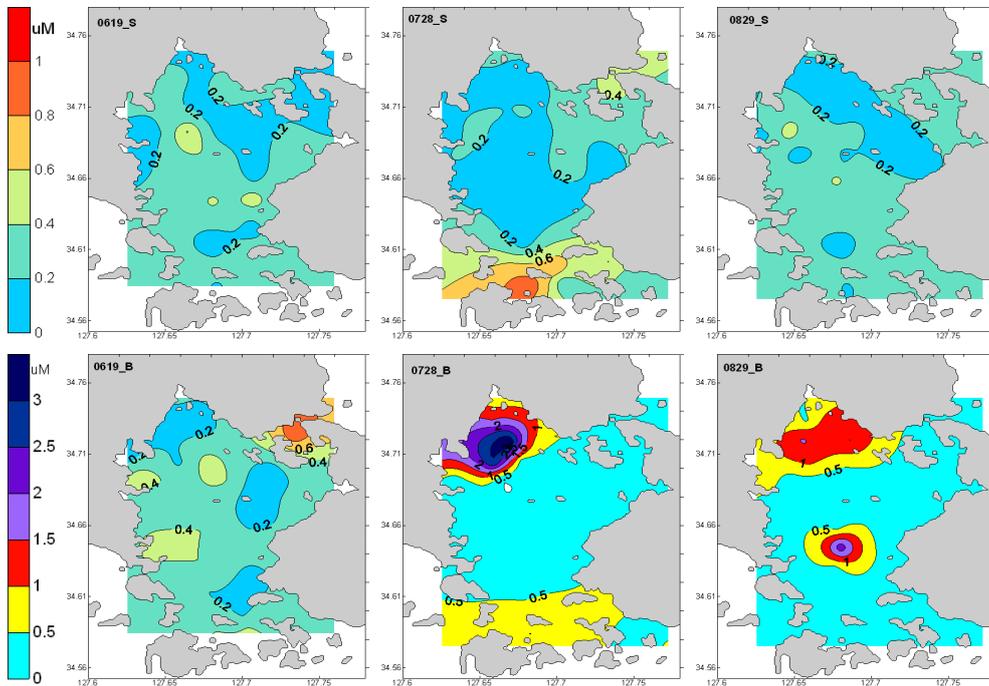


Fig. 8. Horizontal distributions of DIP($\mu\text{M/L}$) in summer in the Gamak Bay, 2006.

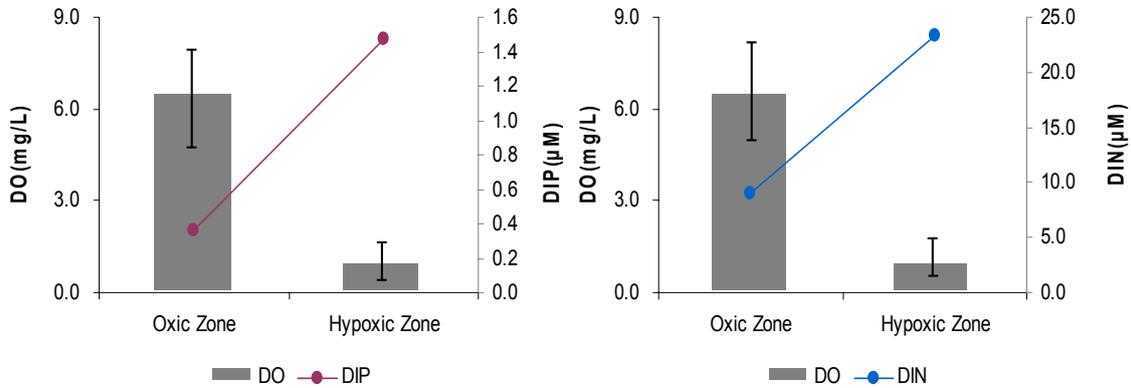


Fig. 9. DIP and DIN released from sediment in hypoxia and normoxic zone in Gamak Bay, 2006.

결과 Fig.9와 같이 뚜렷한 차이를 볼 수 있다. Fig. 9와 같이 정상적인 DO 농도를 유지하는 지역에서의 평균 DO, DIP, DIN 농도는 각각 6.48 mg/L, 0.36 µM, 8.92 µM 이었으나, 빈산소발생지역에서는 각각 0.89 mg/L, 1.47 µM, 23.34 µM로서 빈산소발생 지역에서 DIP 및 DIN이 월등히 높게 분포하였다. 이는 빈산소 수괴 발생시에 퇴적물에서 수중으로 영양염류가 재용출 되기 때문인 것으로 보인다.

3.2. 퇴적물 인의 존재형태

퇴적물내에 존재하는 인은 그 형태에 따라 수중으로 용출 되는 정도가 다르기 때문에 가막만에서 표층 퇴적물을 이용하여 존재형태를 분석한 결과 Adsorbed P는 0.03~0.13 mg/g.d(평균 0.07 mg/g.d ±0.01 mg/g.d), NAI-P는 0.44~0.72 mg/g.d(평균 0.58 mg/g.d ±0.10 mg/g.d), Apatite P는 0.03~0.06 mg/g.d(평균 0.03 mg/g.d ±0.01 mg/g.d), Residual P 는 0.08~0.35 mg/g.d(평균 0.22 mg/g.d ±0.08 mg/g.d)의 분포를 보였다. 총인에 대한 각 형태별 함량 비를 평균하여 본 결과 Adsorbed P 24%, NAI-P 64%, Residual P 24%, Apatite P 4%의 구성비를 보여 Fig. 10과 같이 NAI-P> residual P> adsorbed P> apatite P, 순으로 나타났다. 따라서 수중으로 쉽게 이동하는 형태인 Labile P(NAI-P, Adsorbed P) 의 형태가 72%를 차지하고 있다. 조사지점에 대한 결과를 보명 Fig. 11 처럼 지점 간 큰 차이는 없지만 조사지점 5와 6 즉 빈산소 수괴 발생지역에서 상대적으로 높았다.

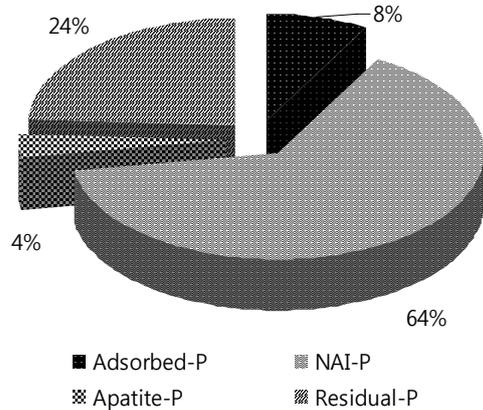


Fig. 10. Phosphorus fractions in the surface sediment in the summer in Gamak Bay, 2006.

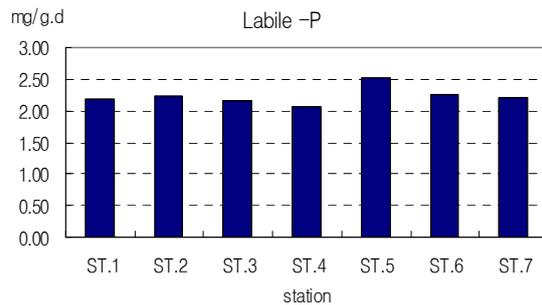


Fig. 11. Distributions of Labile-P at each sampling sites.

인은 존재형태에 따라 생물에 이용되는 정도나 이동 가능성이 다르며 해저 퇴적물에 함유되어 있는 인

의 형태나 농도는 수중 생태계에의 인의 농도를 결정하는데 매우 중요한 요인으로 작용한다(Williams 등, 1976). 인은 해수의 부영양 단계, pH, 화학적 조성, 산화환원전위, 온도와 같은 요인들의 영향을 받게 되므로(Hakanson, 1983) 퇴적물 내의 인의 존재형태를 파악함으로써 퇴적물의 인이 해양 내 순환에 얼마나 중요한 역할을 할 것인가를 평가할 수 있다. (Williams 등, 1980; 전, 1988). 퇴적물에서 상부 수층으로 이동하는 오염물질의 양은 퇴적물의 조성, 저서생물의 활동, 오염물질의 존재형태 등에 따라 달라진다. 여러 가지 요인 중에서도 특히 오염물질의 형태가 용존상태의 형태이면 쉽게 이동될 수 있다(전, 1990). 따라서 본 연구에서는 가막만 빈산소수괴 형성시의 퇴적물에 함유되어 있는 인의 존재형태를 파악하여 해저퇴적물로부터 수중의 인의 농도에 미치는 영향 등에 관한 정보를 파악하고자 하였다. 퇴적물 내에 존재하는 인의 형태는 여러 가지로 분류되지만 일반적으로 미립자에 흡착되어 있는 인(adsorbed P), 철이나 알루미늄등과 착물을 이룬 인(NAI-P : nonapatite inorganic phosphorus), 인회석과 같은 광물에 포함된 인(apatite P), 유기물과 관련이 있는 잔류인(residual P)으로 분류된다(전, 1990). 가막만 퇴적물에 존재하는 인의 형태별 농도를 보면 Adsorbed P 가 0.03~0.13 mg/g.d (평균 0.07 mg/g.d \pm 0.03 mg/g.d) 이었으며 adsorbed p는 미립자의 표면에 흡착되어 있는 형태로서 물속에 녹아있던 인이 점토 등의 표면에 전기적으로 흡착된 것으로 그 결합력이 약하여 물리적인 충격, 염분도 변화, 퇴적물 입자의 교란, 수층의 pH, 인 농도의 변화 등에 의해 쉽게 수층으로 이동될 수 있는 부분이기 때문일 것으로 생각되며 따라서 이 형태는 수질관리상 중요한 부분으로 간주된다. 기 발표된 우리나라 남해 연안의 표층 퇴적물에서의 인의 존재형태별 구성을 보면 마산만의 경우 각각 2.2%, 34.4%, 10.6%, 52.9%, 진해만에서는 각각 5.6%, 21.8%, 15.5%, 57.0%, 충무만에서는 각각 4.8%, 11.8%, 20.2%, 65.3%, 광양만에서는 3.9%, 7.6%, 24.8%, 63.7%로 구성되어 있다고 보고되었다(이 등, 1995). 본 조사에서는 빈산소시기에 조사한 결과로서 빈산소수괴 발생 시 가막만의 표층 퇴적물의 인의 존재형태별 구성을 보면 asdorbed P 8%, NAI-P 64%, apatite P 4%,

residual P 24%를 보였다.

가막만의 경우 퇴적물의 교란이나 산화환원전위와 같은 환경 변화에 따라 쉽게 수층으로 이동 가능한 이동성 인(Labile-Phosphorus)은 70% 이상을 상회하고 있어 가막만 퇴적물은 수중 용존인의 큰 원인이 될 수 있으며, 심층의 무산소 층 형성 시에 많은 양의 용존 무기인이 수층으로 용출될 가능성이 높은 것으로 판단된다. 이것으로 보아 가막만 북부해역의 여름철 DIP의 주요기원은 유역에서 들어오는 것보다는 빈산소 발생해역의 저층으로부터 soluble P가 용출되는 부분이 더 큰 영향으로 판단된다. 그러나 평상시에는 어떤 구성비로 존재하는지에 대해서 추후 계속적인 조사가 요구되며 보완되어야 한다.

4. 결론

본 연구는 하계에 빈산소수괴 발생과 관련한 환경을 파악하고자 하여 2006년 6월, 7월, 8월에 각 39개 정점에서 해양환경을 조사한 결과 표층과 저층에서 각각 수온은 18.80 $^{\circ}$ C~28.89 $^{\circ}$ C(평균 24.77 $^{\circ}$ C), 17.88 $^{\circ}$ C~27.21 $^{\circ}$ C(평균 22.25 $^{\circ}$ C), 염분은 27.07~33.22(평균 30.95), 28.08~33.27(평균 31.48), DO는 5.84 mg/L~10.23 mg/L(7.86 mg/L), 0.50~9.67 mg/L(6.80 mg/L)로 만의 북측해역에서 2 mg/L 이하의 빈산소수괴가 형성되었으며, 빈산소수괴가 형성된 해역의 저층에서는 낮은 pH를 보였다. 빈산소수괴는 8월말까지 빈산소층이 유지되다가 9월 13일 조사에서 완전 소멸된 것으로 나타났다. 가막만의 경우 빈산소수괴 형성은 지형과 관계가 깊은 것으로 나타났다. DIN은 0.80 μ M~19.18 μ M(6.03 μ M), 1.13 μ M~60.83 μ M(10.66 μ M), DIP는 0.01 μ M~0.92 μ M(0.24 μ M), 0.01 μ M~3.57 μ M(0.49 μ M)의 분포로서 저층의 빈산소수괴가 형성된 수역에서 DIP 및 DIN이 상대적으로 월등히 높은 분포를 보였다. 이처럼 저층의 DIP가 높은 것에 대하여 퇴적물로부터의 용출 가능성을 알아보기 위하여 퇴적물 인의 존재형태를 분석한 결과 쉽게 용출 가능한 형태를 갖는 NAI-P, Adsorbed-P 즉 Labile P가 70% 이상을 차지하고 있어 저층에 DO가 부족할 때 퇴적물에서 쉽게 수층으로 인이 용출가능성이 높은 것으로 나타났다.

참 고 문 헌

- 국립수산과학원, 2009, 한국연안의 빈산소수괴.
- 김동명, 2005, 가막만의 COD 거동 및 분포특성평가를 위한 생태계 모델링, 한국환경과학회지, 14(9), 835-842.
- 노일현, 윤양호, 김대일, 박종식, 2006, 가막만 표층 퇴적물중 유기물량의 시·공간적 분포 특성, 한국해양환경공학회지, 9(1), 1-13.
- 박성은, 조규대, 홍철훈, 김동선, 조광우, 1999, 가막만의 해수유동에 미치는 바람의 영향, 한수지, 32(5) 674-679.
- 이규형, 조규대, 1990, 가막만의 수온과 염분의 분포, 한수지, 23(1), 25-39.
- 이연규, 김종규 등, 2006, 가막만 자연환경과 산업. 국립여수대학교 수산과학연구소.
- 이연규, 황진연, 정규귀, 1995, 가막만 표층 퇴적물 특성 및 점토광물, Korean Earth Science Society, 16(6), 477-488.
- 이재철, 추효상, 이규형, 조규대, 1995, 1994년 7~8월 가막만의 조석 및 해류, 한수지, 28(5), 624-634.
- 이찬원, 권영택, 박동규, 김봉진, 1995, 남해안 퇴적물내 인과 중금속의 존재형태, 대한환경공학회지, 17(7) 661-674.
- 이필용, 1993, 원문남에서 저산소수괴의 출현과 계절적 변동, 한국수산학회지, 25(4), 392-400.
- 이필용, 박주석, 강정미, 최희구, 박종수, 1993, 진해만 저산소수괴 현상에 관한 연구, 진해만에서의 영양염류와 용존산소의 연변화, 한국해양학회지, 26(3), 204-222.
- 전라남도수산기술사업소 여수지소, 2010, 여수 가막만 해역에 적합한 패·해조류 복합양식 실용화, 8.
- 전상호, 1988, 춘천지역의 인공퇴적지에 함유된 인의 존재형태에 따른 수질오염의 가능성에 대하여, J. KSWPRC. Dec., 49-57.
- 전상호, 한강 퇴적물에 함유된 오염물질의 존재형태와 이동성에 관한 연구, 한국육학회지, 23(1), 31-42. 1990.
- 조창완, 1979, 1978년 진해만 적조와 양식굴의 대량폐사, 한국수산학회지, 12(1), 27-33.
- 해양수산부, 2002, 해양환경공정시험법, 330.
- 해양수산부, 2006, 가막만 환경보전해역 관리 기본계획, 49.
- 홍기훈, 김정태, 배세진, 김석현, 이수형, 1991, 영양염류가 풍부한 온대해역 내만(한국, 진해만)에서의 영양염류와 용존산소의 연변화, 한국해양학회지, 26(3), 204-222.
- 홍재상, 1987, 1983년 하계 진해만 일대 해역의 저서생물의 생태학적 연구(저서생물과 저층 용존산소량과의 관계를 중심으로), 해양연구보고서, BSPE 00095-159-3, 103.
- Hakanson, L., Jansson, M., 1983, Principles of lake sedimentology. Springer-Verlag, Berlin, 316.
- Hieltjes, A. H. M., Lojklema, L., 1980, Fractionation of inorganic phosphorus in calcareous sediments, J. Environ Qual, 9(3), 405-407.
- Williams, J. D. H., Sher, H., Thomas, R. L., 1980, Availability to *Senedesmus quadricauda* of different forms of phosphorus in sedimentary materials from the Great Lakes. Limnol. Oceanogr., 25, 1-11.
- Williams, J. D. H., Jaquet, M., Thomas, R. L., 1976, Forms of phosphorus in the surficial sediments of lake Erie, J. Fisg. Res. Board Can., 33, 413-429.