

가막만 빈산소 수괴의 특성

김정배[†] · 이상용 · 유 준 · 최양호 · 정창수 · 이필용
국립수산과학원 남해수산연구소

The Characteristics of Oxygen Deficient Water Mass in Gamak Bay

Jeong-Bae Kim[†], Sang Yong Lee, Jun Yu, Yang Ho Choi, Chang-Su Jung and Pil-Yong Lee

South Sea Fisheries Research Institute, NFRDI, Yeosu 556-823, Korea

요 약

하계 가막만에서 발생하는 빈산소 수괴의 형성과정과 그 특성을 규명하기 위하여 2005년 6월 17일부터 2005년 9월 12일까지 주 간격으로 조사하였다. 표층 수온은 내만에서 만 입구로 갈수록 낮았으나, 저층 수온은 만 입구와 내만보다 만 중앙에서 높게 나타났다. 수괴의 수직적인 성층은 매우 발달하였으며, 수온약층은 수심 3-5m에서 관측되었다. 저층의 빈산소 수괴는 7월초에 내만 안쪽에서 나타났으며, 8월초에는 만 중앙부까지 확산되었다. 수괴의 평균 투명도와 광소멸 계수(K_d)는 각각 4.0m와 0.47로 나타났다. 저층의 영양염과 클로로필 *a* 농도는 표층보다 유의하게 높았으며, 만 입구보다 내만에서 높게 나타났다. 빈산소 수괴의 저층에서 퇴적물의 산소투과 깊이는 지극히 낮았으며, 산소소모율은 빈산소가 소멸된 수괴에서 보다 낮았다. 빈산소 수괴가 발생하는 기간동안 용존 산소 농도는 저층의 영양염 농도와 유의한 역 상관관계를 보였으나, 표층 영양염 농도와는 유의한 관계를 보이지 않았다. 저층에서 산소 감소의 촉진은 퇴적물에서 산소소모율 증가와 저층 부근에서 미생물에 의한 유기물 분해 때문인 것으로 판단되었다.

Abstract – To clarify the formation process and characteristics of oxygen deficient water mass in Gamak Bay, oxygen deficiency was weekly observed from 17 June to 12 September 2005. Surface water temperature was significantly lower in the outer bay than in the inner bay, whereas the bottom water temperature was higher in the central area of bay than in the outer and inner bay. The vertical stratification of water mass was strongly formed during the period, and thermocline was observed between 3 and 5m deep. The oxygen deficiency in the bottom layer began to appear at early July in the inner bay and gradually spread to the center area of the bay in early August. The mean transparency and light attenuation coefficient(K_d) in water mass was 4.0m and 0.47, respectively. Average concentrations of nutrient and chlorophyll *a* in the bottom layer were significantly higher than those in surface, and those concentrations were significantly higher in the inner bay than in the outer bay. During the formation of oxygen deficiency in the bottom layer, oxygen penetration depth in the bottom sediment were extremely shallow, and oxygen consumption rate in the bottom sediment were lower than that in the area where oxygen deficient water mass disappeared. Dissolved oxygen concentrations in the bottom layer are negatively correlated with nutrient concentrations, whereas those in the surface layer did not show a significant relationship with nutrient concentrations. Elevated loss of oxygen in the bottom water mass was attributed to the increase of the oxygen consumption rates in sediments and the decomposition of organic matter by microorganism.

Keywords: Oxygen deficient(빈산소), Dissolved oxygen(용존산소), Gamak Bay(가막만), Nutrient concentration(영양염 농도), Phytoplankton(식물플랑크톤)

1. 서 론

폐쇄된 연안 수괴에서 부영양화와 계절에 따른 수온 상승은 저

층의 저산소(low-oxygen) 또는 빈산소(oxygen deficient)를 형성하는 주요한 요인으로 알려져 있다(Rosenberg *et al*[1991]). 기온이 증가함에 따라 표층 수온은 상승하지만, 저층 수온은 증가하지 않고 수온약층을 형성하여 성층화 된다. 또한 표층 수온의 증가는

[†]Corresponding author: jbkim@momaf.go.kr

기초생산력을 증진시켜 저층으로의 유기물 공급을 증가 시키며, 미생물에 의한 유기물 분해에 의해 산소 감소를 촉진시킨다(Blumberg & Di Toro[1990]). 따라서 표층수온의 증가와 담수유입에 따른 장기적인 수괴의 성층화는 저층의 산소 공급을 제한하여 저산소층이 지속적으로 존재하게 된다(Robertson & Ragotzkie[1990]).

빈산소 수괴는 이화학적 및 생물학적 요인들에 의해 용존산소의 농도가 2 mg/L 이하로 낮아지는 현상으로 전 세계의 부영양화된 호수, 용승이 발생하는 원양해역과 반폐쇄형의 내만에서 주로 나타난다(Severdrup *et al*[1972]; Hanazato[1997]; Karim *et al*[2002]; Wu[2002]; Turner *et al*[2005]). 특히, 우리나라의 남해안은 해안선이 복잡하고 내만이 발달해 있어 조류 소통과 해수의 교환이 원활하지 못하며, 하계의 강우유입과 표층 수온 증가에 의해 밀도약층이 빈번하게 형성된다. 하계의 성층화된 내만 수괴는 저층의 산소 공급을 제한하며, 표층에서 대발생한 식물플랑크톤이 침강하여 미생물에 의해 분해 되어 산소 소비를 촉진시켜 빈산소층을 형성한다(Hong[1987]; Kang[1991]; 이[1992]; 이[1994]; 김과 김[2003]; Lim *et al*[2006]).

해양에서 수괴의 용존산소 결핍은 어패류의 호흡이나 생리작용에 직접적으로 영향을 미치며, 저서생물군집의 출현종과 개체수에도 민감하게 작용한다(Hong[1987]; 임 등[1994]; 최 등[1994]; Wu[2002]; Karim *et al*[2003]; Lim *et al*[2006]). 또한 용존산소의 결핍에 따른 혐기적인 상태에서 퇴적물의 유기물 분해에 의한 황화수소와 암모니아의 생성은 생물체의 분포와 이주에 제한 요인이 될 수 있는 것으로 알려져 있다. 연안역에서 나타나는 저층수 빈산소화는 저서생물에 직접적인 피해뿐만 아니라 여러 가지 2차적인 영향으로 연안생태계에 중대한 영향을 미친다(윤[1998]). 빈산소 수괴의 형성은 동물플랑크톤의 개체수를 감소시키고, 종 천이를 유발시키기 때문에 식물플랑크톤 섭취가 감소하여 식물플랑크톤의 대발생이 장기화 될 수 있다(Hanazato[1997]; 윤[1998]). 또한 빈산소화 된 저층수가 바람에 의한 취송류의 영향으로 용승할 경우 직접적인 생물폐사를 초래하며, 수역의 자연정화 기능을 상실시킬 수 있는 것으로 알려져 있다(윤[1998]; [1999]).

가막만은 남해안 중앙에 위치한 내만으로 남북방향 길이는 약 15 km, 동서방향 길이는 약 9 km의 타원형으로 만 입구는 크고 작은 섬들로 둘러싸여 있다. 가막만의 해저 지형은 중앙부는 수심 6-7 m내외이며, 북서 내만역은 수심이 9-11 m로 옅고 수심이 깊다. 수심이 얇고 복잡한 해안선을 갖고 있는 가막만은 내륙의 영향을 강하게 받으며, 만 입구의 외해수와 여수항으로부터 유입되는 해수의 유입으로 성질이 다른 수괴가 출현한다(이와 조[1990]). 이러한 수괴들은 섬진강 하구수괴 연등천의 영향을 받아 여수항으로부터 유입되는 수괴, 외해수의 영향을 받아 만 입구로부터 유입되는 수괴와 내륙의 영향을 크게 받는 정체성의 해수 특성을 갖는 내만수괴로 구분된다(이와 조[1990]). 수온의 년 변화는 내만 수괴에서 가장 크게 나타나며, 염분은 여수항 수괴에서 최저염분이 나타난다. 외해수괴는 수온과 염분의 연변화가 작은 특성을 나타낸다(이와 조[1990]). 하계의 내만 수괴는 태양 복사열에 의한

표면의 수온 상승과 담수 유입의 영향으로 성층이 발달하여 창조와 낙조 시에 표층에서만 해수 유동이 나타나며, 옅은 지형인 내만은 정체성이 강한 저층수가 출현하는 것으로 알려져 있다(이와 조[1990]).

가막만의 조류는 낙조류가 창조류보다 다소 우세하며, 반일주조가 탁월한 왕복류의 조류 형태를 나타낸다(해양수산부[2001]). 가막만의 창조류는 돌산 동안과 남해도 사이를 북류한 분류 중 일부는 오동도 부근에서 좌측으로 선회하여 여수항 북쪽 입구를 통과한 후 북서쪽에서 만 내부로 진입하며, 일부는 대경도와 국동항 사이를 통과하여 만 내부로 진입한다. 낙조류는 금죽도 부근에서 시작하여 일부는 돌산도 서안으로 남하하고, 일부는 대경도와 돌산도 사이에서 유입된 해수와 합류하여 남해도와 광양만 사이를 흐르는 남류에 편승하여 외해로 빠져나간다. 창조류와 낙조류의 유속은 약 0.5-3.5 kt의 범위로서 장군도 부근에서 가장 빠르며, 대경도와 돌산도 사이에서는 와류가 나타난다(이와 조[1990]; 이 등[2006]).

가막만의 북쪽과 중앙해역에는 수하식 패류(홍합과 굴) 양식과 만 입구에서는 해상 가두리 어류 양식이 성행하고 있어 과도한 밀식양식, 양식장의 장기사용 및 생활하수의 유입증가로 인한 어장 환경 관리에 많은 문제점들이 발생하고 있다. 북서 내만해역은 해수 정체와 하수 및 폐수의 유입으로 부영양화가 진행되고 있으며, 수온이 높은 하계에는 저층 해수에 저산소층이 빈번히 형성된다(해양수산부[2001]). 또한, 매우 다양한 생물종에 의해 1984년 이래 연안 만성적인 적조 발생이 나타나고 있으며, 편모조류에 의한 적조보다 규조류에 의한 적조가 우점하는 특징을 보이는 것으로 알려져 있다(해양수산부[2001]).

현재까지 가막만의 환경에 대한 연구는 수괴의 물리적인 특성(이와 조[1990]; 이[1992]; 박 등[1999]), 수질과 퇴적물환경(조 등[1994]; [2001]), 기초생산성과 적조(윤[1995]; 조 등[1996]), 부유생물과 저서생물의 군집 특성(신[1995])과 패류양식 어장환경(조 등[1996]; 최 등[1999]; 최 등[2002]) 다양한 연구가 수행되어 왔다. 그러나 가막만에서 하계의 북서 내만 해역에 빈번히 발생하는 빈산소 수괴의 형성과 그 특성에 관한 연구 및 형성 원인에 대한 연구는 미진하였다.

따라서, 본 연구는 하계 가막만 해역의 빈산소 발생과 소멸의 과정을 모니터링하고 빈산소 수괴 형성 원인을 파악하기 위하여 2005년 6월부터 9월까지 주 단위로 조사하였다.

2. 재료 및 방법

본 연구는 가막만의 빈산소 수괴가 빈번히 형성되는 해역을 중심으로 35개 정점에서 2005년 6월 17일부터 2005년 9월 12일까지 주간단위로 조사 하였다(Fig. 1). 해수는 표층과 저층에서 채수하여 영양염, 용존산소(DO)와 엽록소 *a*(Chl. *a*)를 분석하였다. DO는 채수 후 DO병에 고정된 후 Winkler 적정법으로 분석하였으며, Chl. *a*는 채수한 500 mL를 Whatman membrane(0.45 μ m) 여과지

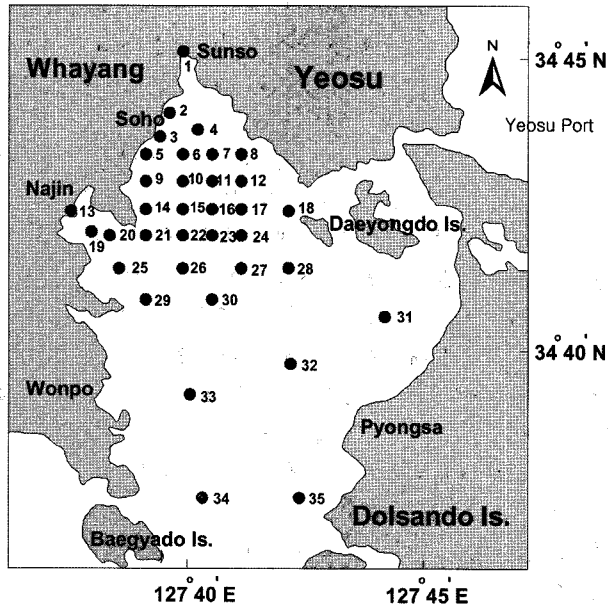


Fig. 1. Location of sampling stations of Gamak Bay on the southern coast of Korea.

로 여과한 후 냉암소에서 90% acetone으로 색소를 추출하여 분광광도계로 측정하였다(해양환경공정시험방법 [2005]). 식물플랑크톤은 1 L 폴리에틸렌 채수병을 이용하여 정점 14의 표층에서 매일 채수하여 포르말린 농도가 약 5% 되게 현장에서 고정시켰다. 고정한 시료는 침전법에 의해 상등액을 제거하여 50-100 ml로 농축한 후 Sedgwick-Rafter counting chamber를 이용하여 계수하고 동정하였다. 영양염은 채수한 해수를 박막여과지(cellulose membrane filter, Millipore)로 여과한 후 암모니아(NH₄⁺-N), 질산염(NO₃⁻-N), 아질산염(NO₂⁻-N), 인산염(PO₄³⁻-P) 그리고 규산염(SiO₂-Si)을 흡광 광도법을 이용하여 측정하였다(해양환경공정시험방법 [2005]). 수온, 염분, DO와 Chl. *a*의 수직적인 분포는 수질측정기(YSI, 600XL)로 현장에서 측정하였다. 투명도는 Secchi disk로 측정하였으며, Secchi 깊이(Z_{sd})를 이용하여 K_d=1.7/Z_{sd} 식으로 광소멸 계수(K_d: Light attenuation coefficient)를 계산하였다.

표층 퇴적물 시료는 상자형 코어 채집기(box core, 면적: 0.04 m²)를 이용하여 채집하였고, 미세 전극 분석용 시료는 회수된 상자형 코어에 원형 투명 아크릴(직경: 8 cm, 길이: 5 cm)을 서서히 삽입하여 채집하였다. 채집된 시료는 현장 온도를 유지시키면서 실험실로 옮겨져 실험실에서 온도 변화가 0.1°C이하인 항온 수조에 시료를 넣어 현장 온도를 재현시키면서 미세전극을 사용해서 공극수의 DO 연직분포를 이 등(2003, 2004)의 방법에 따라 분석하였다. 산소 미세전극은 전극 크기가 약 25 μm인 Clark type의 전극(Unisense, OX 25)을 사용하였다. 전극의 stirring sensitivity는 2% 이하였으며, 90% 반응시간은 1초 이하였다. 전극의 검량은 강한 환원제인 ascorbic 용액과 산소가 포화된 현장 해수를 이용하여 전극에서 검출된 전류와 산소농도 간의 선형관계를 이용하였다. 검량을 마친 미세전극은 수직 이동 해상도가 10 μm인

micromanipulator (Unisense, MM33)에 장착하여 50 μm씩 퇴적물에 직접 삽입하면서 산소농도를 측정하였다. 전극에서 검출된 pA 범위의 전류는 picoammeter(Unisense, PA2000)와 아날로그 디지털 변환기(A/D converter: Unisense, ADC-216)를 거친 다음 휴대용 컴퓨터에 저장하였다. 퇴적물과 해수 경계면에서의 산소소모율은 공극수 수직분포 1차 확산반응 모델을 이용하여 추정하였고, 공극수 내 산소농도를 수직으로 50 μm 간격으로 측정하여 농도기울기를 계산하였다(Bouldin[1968]; Cai and Sayles[1996]; Epping and Helder[1997]; 이 등[2003]).

표·저층과 조사 시기에 따른 이화학적 요인들의 차이는 ANOVA 분석을 실시하였으며, 수심에 따른 해수의 규산염, 암모니아, 인산염 농도와 용존 산소 농도 분포와의 관계는 선형회귀분석을 수행하였다. 본 연구의 모든 통계분석은 SPSS(ver.10) 프로그램을 이용하였다.

3. 결 과

3.1 빈산소 수괴의 이화학적 특성

조사기간 동안 가막만 표·저층 수온의 수평분포는 Fig. 2와 같다. 표층 수온은 24.2-29.1°C 범위였으며, 저층 수온은 21.1-26.5°C 범위로 나타났다. 표층과 저층의 수온은 2.0-3.0°C 차이를 보였으며, 수온약층이 강하게 발달하였다. 표층 수온은 만 입구에서 내만으로 갈수록 높게 분포하였으며, 대경도 주변은 수온이 낮게 나타났다. 저층 수온의 분포는 만 입구에서 수심이 얇은 만 중앙으로 갈수록 수온이 증가하지만, 내만의 깊은 수심에서는 수온이 낮은 저층수괴가 존재하였다. 내만의 저온 저층수괴는 8월 중순까지 존재하였으나, 8월말에는 내만의 수온이 증가하여 만입구로 갈수록 낮은 수온 분포를 보였다(Fig. 2). 조사기간 동안 수온의 수평분포를 보면 만 입구는 외해수의 영향을 받는 것으로 나타났으며, 내만의 경우 표층수는 만 입구의 외해수와 여수향으로부터 유입되는 해수의 영향을 받지만, 저층수는 낮은 수온의 정체성 해수가 존재하는 것으로 나타났다.

가막만에서 빈산소가 진행되는 하계의 평균 용존 산소 분포 형태를 파악하기 위하여 6-9월에 각 지점에서 조사한 저층 용존 산소 농도 수평분포는 Fig. 3과 같다. 조사기간 동안 가막만 표층수의 용존 산소는 조사 정점에 따라 차이를 보였으나, 7.54(6월말)-9.21 mg/L(7월초)의 범위로 높은 포화도를 보였다. 6월 중순의 저층수에서 용존 산소 농도는 4.0 mg/L이상 분포하였으나, 내만 안쪽에서는 7월 초부터 용존 산소 농도가 2 mg/L이하의 빈산소 수괴가 나타났다. 내만에 형성된 빈산소 수괴는 점차 증가하여 8월 초에는 만 중앙부까지 확장되었으나, 8월 중순부터 점차 감소하는 경향을 보였다. 내만 저층의 빈산소 수괴는 8월 말까지 지속되었으나, 9월 6일부터 7일까지 태풍 14호 나비(Typhoon 14th NABI)가 통과한 후 9월 중순에는 저층 빈산소 수괴가 나타나지 않았다.

영양염의 농도에 대해 표층과 저층 및 조사 시기에 따른 two-way ANOVA 결과 조사 장소(p<0.01)와 시기(p<0.01)에 따라 유

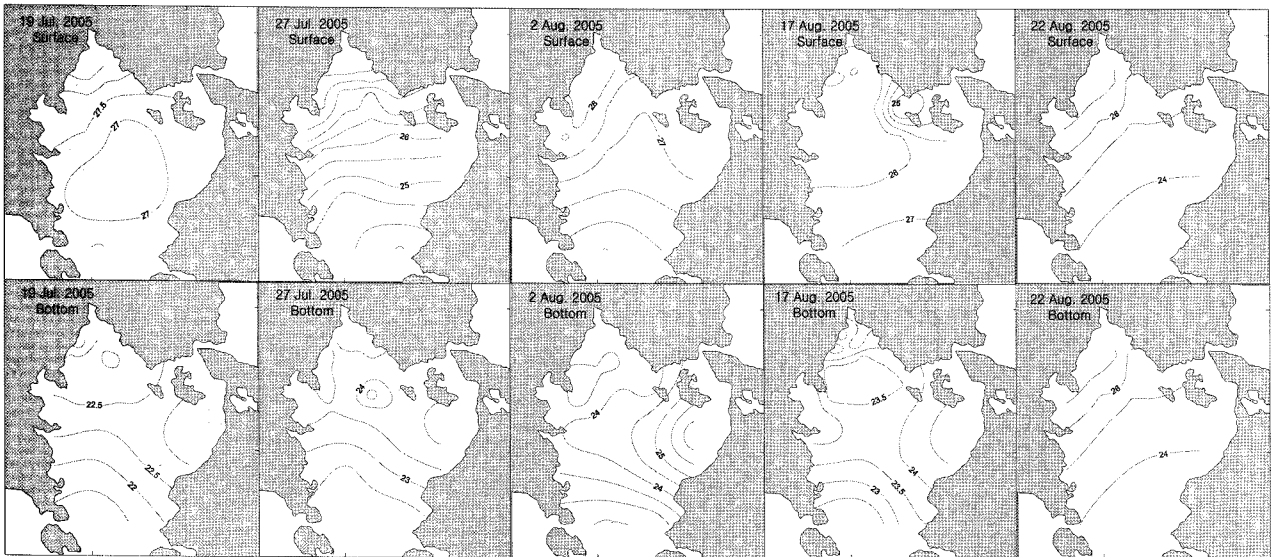


Fig. 2. Horizontal distributions of the surface and bottom water temperature in Gamak Bay from 17 July to 22 August, 2005.

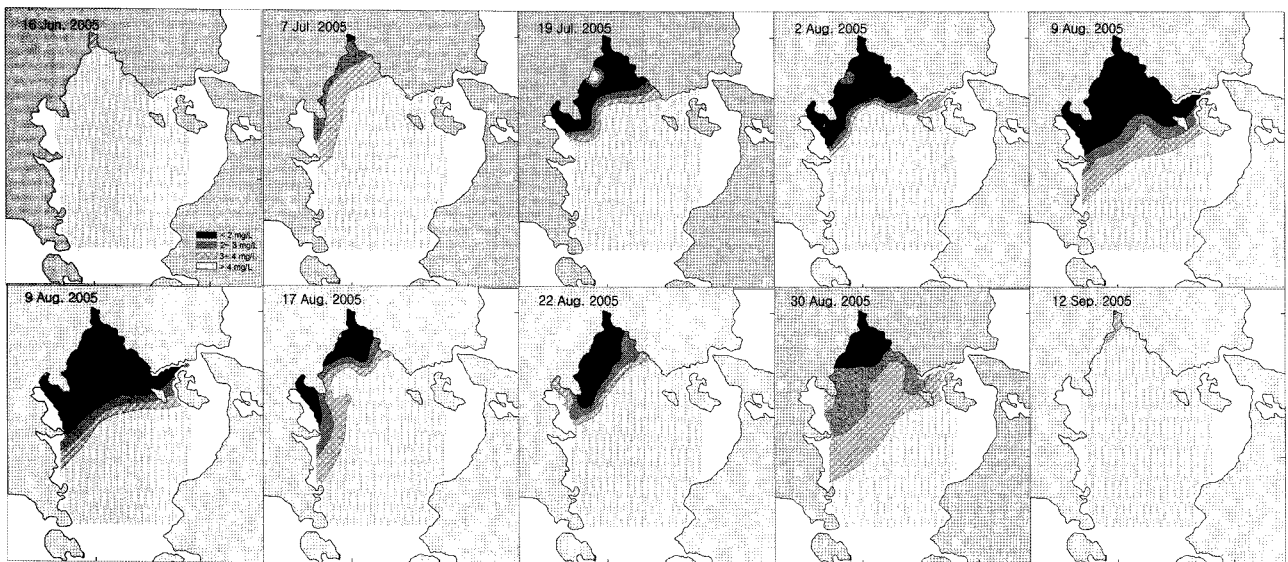


Fig. 3. Horizontal distributions of bottom dissolved oxygen in Gamak Bay from 16 June to 12 September 2005.

의한 차이를 보였다. 저층의 영양염 농도는 표층보다 유의하게 높게 나타났다($p < 0.01$). 표층에서 인산염($p < 0.01$)과 암모니아($p = 0.021$) 농도는 조사 시기에 따라 유의한 차이를 보였으며, 규산염 농도는 8월 22일까지 증가하다가 급격히 감소하였다(Fig. 4A). 저층에서 암모니아 농도는 조사 시기에 따라 유의한 차이($p < 0.01$)를 보였으며, 인산염의 농도는 8월 9일과 8월 30일에 최대값을 보였다(Fig. 4B). 규산염 농도는 8월 22일까지 증가한 후 급격히 감소하였다(Fig. 4B). 조사기간 동안 표층의 영양염 중 규산염 농도는 암모니아 농도와 유의한 상관관계($r = 0.809, p < 0.001$)를 보였으나, 인산염과는 유의한 상관관계를 보이지 않았다. 저층의 경우 규산염 농도는 인산염($r = 0.641, p < 0.001$)과 암모니아($r = 0.810, p < 0.001$) 농도와 유의한 상관관계를 보였다.

투명도와 광소멸계수(K_d)는 조사 시기와 수심에 따라 유의한 차이를 보였으며($p < 0.01$), 투명도와 K_d 의 평균값은 각각 4.0 ± 0.15 와 0.47 ± 0.02 로 나타났다. K_d 에 의한 입사광의 10% 투과 깊이는 2.5 (8월 30일) - 4.9 m(9월 12일)범위로 계산되었으며, 평균 3.4 m까지 입사광의 10%가 존재하는 것으로 나타났다.

3.2 Chlorophyll *a*의 분포와 식물플랑크톤 군집 특성

조사기간 동안 표층과 저층에서 Chlorophyll *a*(Chl. *a*)의 수평 분포는 Fig. 5와 같다. Chl. *a*의 농도는 표층보다 저층이 유의하게 높게 나타났다($p < 0.001$). 표층 Chl. *a*의 농도는 7월부터 8월초까지 만 입구에서 내만으로 갈수록 감소하였으며, 내만의 서부와 만 중앙부에서는 다소 높게 나타났다. 반면에 8월 중순부터는 만의

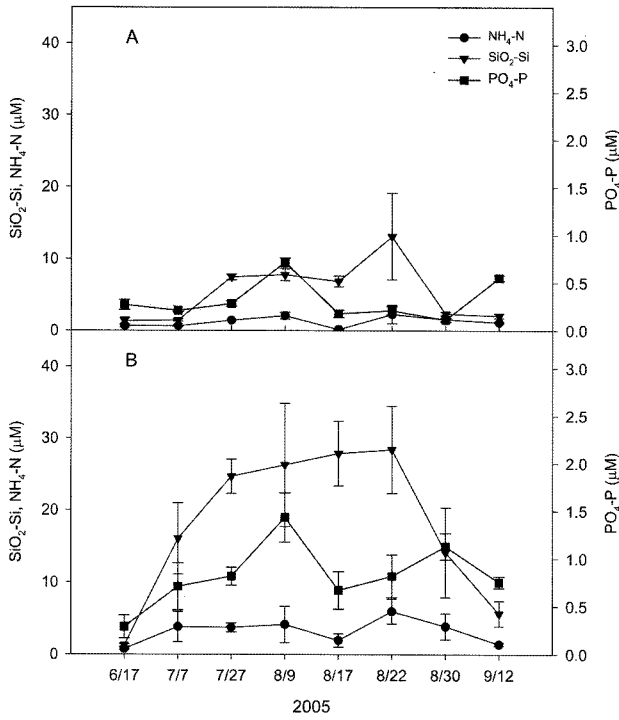


Fig. 4. Temporal variations of ammonia, phosphate and silicate concentration at surface (A) and bottom (B) waters in Gamak bay from 17 June to 12 September 2005.

입구에서부터 내만으로 갈수록 Chl. *a*의 농도가 점차 증가하였다 (Fig. 5). 저층에서 Chl. *a* 농도는 만입구보다 내만에서 높게 나타났다. 특히, 빈산소가 발생하는 동안 내만 서부 정점들에서 지속적으로 높게 나타났다(Fig. 5). 저층에서 Chl. *a*의 농도는 7월 중순과 8월 중순에는 높았다가 7월 말과 8월 말에는 낮게 나타나는

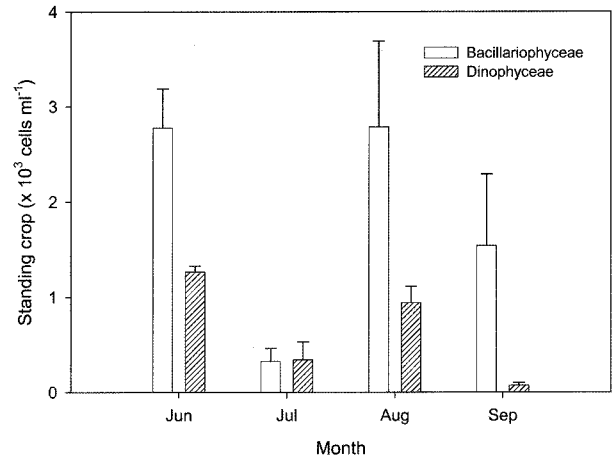


Fig. 6. Temporal changes in the standing crops of phytoplankton at surface water from June to September 2005.

경향을 보였다.

조사기간 동안 정점 14에서 표층 식물플랑크톤의 월별 현존량은 0.7×10^3 (7월) - 4.0×10^3 cells ml⁻¹ (6월) 범위로 나타났다(Fig. 6). 식물플랑크톤의 현존량은 6월과 8월에는 높게 나타났으나, 7월과 9월에는 낮게 나타났다. 분류군별로는 와편모조류가 7월에 우세하였으나, 9월에는 규조류가 95 % 이상 높게 나타났다.

3.3. 퇴적물의 미세산소 변화

퇴적물 공극수에서 빈산소 수괴의 발생 시기와 소멸에 따른 미세산소 농도의 수직 분포는 Fig. 7과 같다. 또한 해수 경계면과 저층 퇴적물의 깊이에 따른 산소소모율 결과는 Table 1과 같다. 빈산소 수괴가 출현한 시기에 퇴적물의 산소소모율은 $13.66 - 13.71$ mmol O₂ m² day⁻¹ 범위로 나타났으며, 빈산소 수괴가 소멸 된 시

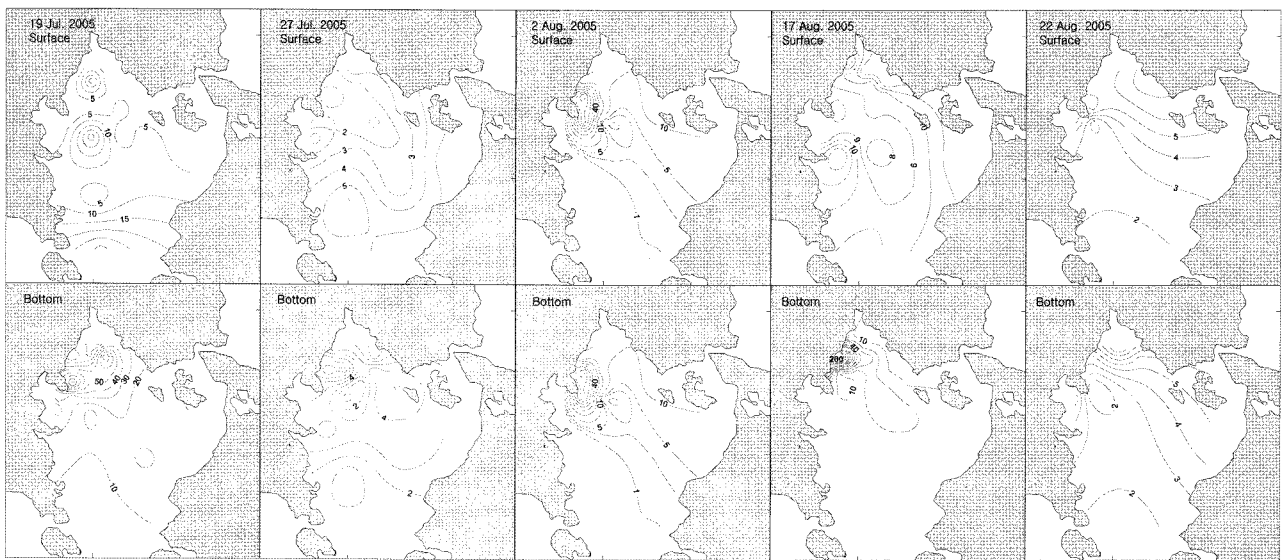


Fig. 5. Horizontal distributions of the chlorophyll *a* concentration in the surface and bottom waters from 19 July to 22 August 2005.

Table 1. The measured oxygen penetration depths in the coastal sediments of Gamak Bay. The oxygen consumption rates(F_{O_2}) and net reaction rates(R) were estimated from the vertical oxygen concentration profiles using the one-dimension diffusion-reaction model. The benthic organic carbon oxidation rates were calculated from the adapted oxygen to carbon ratio, modified Redfield ratio of oxygen to carbon (170/117) and, to measured oxygen consumption at the in sediment/water interface

Classification	OPD(Z_{max}) mm	F_{O_2} mmol $O_2 m^{-2} day^{-1}$	$F_{C_{org}}$ mg C $m^{-2} day^{-1}$	R M day^{-1}
Occurrence of hypoxic water	0.48	13.69	113.06	1.18
Extinctive of hypoxic water	1.03	26.68	220.37	5.09

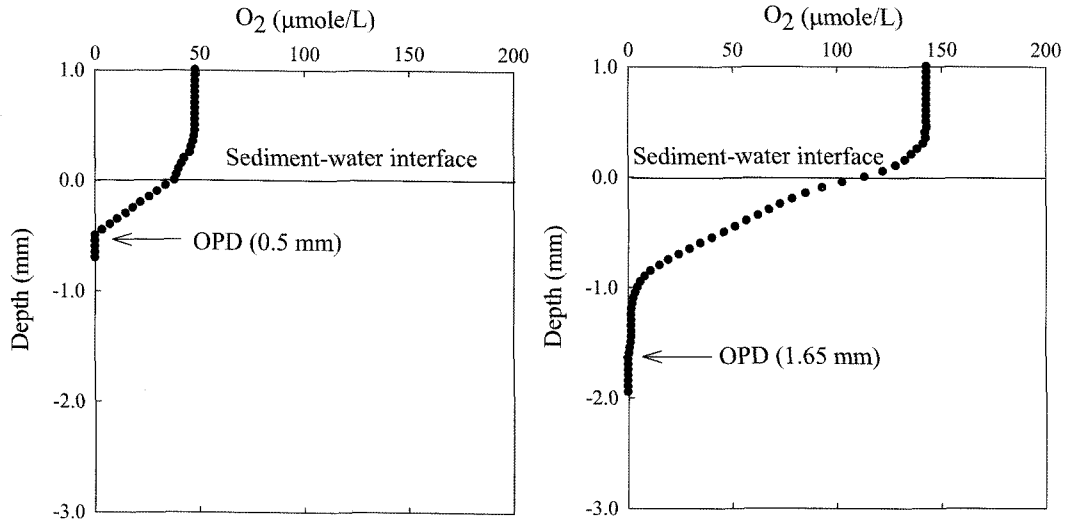


Fig. 7. Vertical profiles of DO in the sediment porewater at hypoxic (left) and non-hypoxic (right) waters of inner bay (OPD; oxygen penetration depth).

기에는 27.6-34.7 mmol $O_2 m^{-2} day^{-1}$ 범위로 나타났다. 빈산소 수괴가 형성된 시기에 Redfield 비율($O_2/C_{org}=170/117$)에 따른 퇴적물의 유기탄소 산화율은 112.8-113.2 mgC $m^{-2} day^{-1}$ 범위에 있었으며, 빈산소 수괴가 소멸 된 시기에는 228.07-286.70 mgC $m^{-2} day^{-1}$ 범위로 추산되었다(Table 1). 빈산소 수괴가 출현하는 동안 퇴적물의 산소투과깊이는 0.45-0.50 mm 범위에 있었으며, 빈산소 수괴의 소멸 된 시기에는 0.65-1.65 mm 범위로 나타났다.

3.4 빈산소 수괴의 수직적 특성

빈산소 수괴가 발생한 7월 27일의 수심 약 10 m인 정점 14에서 수온, 염분, Chl. *a*와 DO 농도의 수직분포는 Fig. 8과 같다. 수온은 표층에서 3.5 m까지 일정한 분포를 보였으나, 3.5-5.0 m에서 강한 수온 약층을 형성하였다. 염분은 3.0-4.0 m 사이에서 낮은 염분 분포를 보였으며, 저층으로 갈수록 염분이 다소 증가하였다. Chl. *a* 농도는 7.0 m까지 3.0 $\mu g l^{-1}$ 이하로 나타났으나, 8.0 m 이하에서는 급격히 증가하여 9.5 m 이하에서는 약 100 $\mu g l^{-1}$ 까지 나타났다. DO농도는 9.0 m까지 5.3-10.1 $\mu g l^{-1}$ 의 범위로 나타났으나, 9.0 m 이하에서는 0.6-1.7 mg l^{-1} 의 범위로 빈산소 수괴의 특성을 보였다. 조사 지점에 따라 수온약층 수심과 DO의 절대 값은 다소 차이를 보였으나, 대부분 유사한 경향으로 나타났다.

내만 북부해역에서 빈산소 수괴가 발생한 시기의 용존 산소와 영양염 농도의 수직분포는 Fig. 9와 같다. 용존 산소와 영양염의

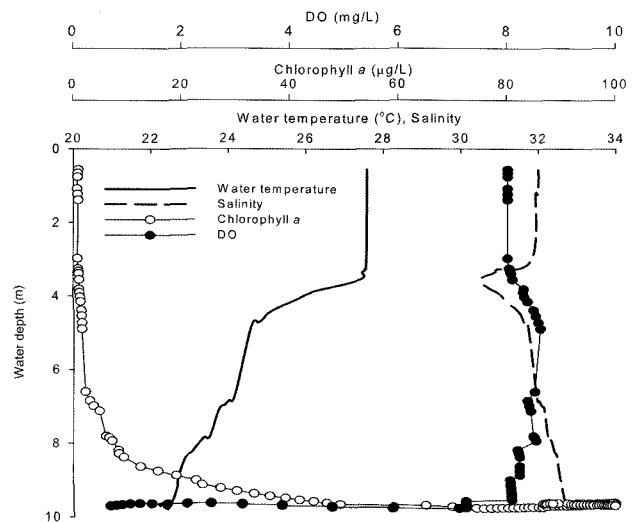


Fig. 8. Vertical profile of water temperature, salinity, chlorophyll *a* and DO at station 14 on the 27th July 2005.

농도는 역 상관관계로 나타났다. 용존 산소 농도와 표층 및 중층의 규산염 농도는 유의한 관계를 보이지 않았으나, 저층의 규산염 농도와는 유의한 상관관계($r^2=0.785, p=0.003$)를 나타내었다(Fig. 9A). 용존 산소 농도와 표층의 암모니아 농도는 유의한 상관관계를 보이지 않았으나, 중층($r^2=0.588, p=0.027$) 및 저층($r^2=0.498,$

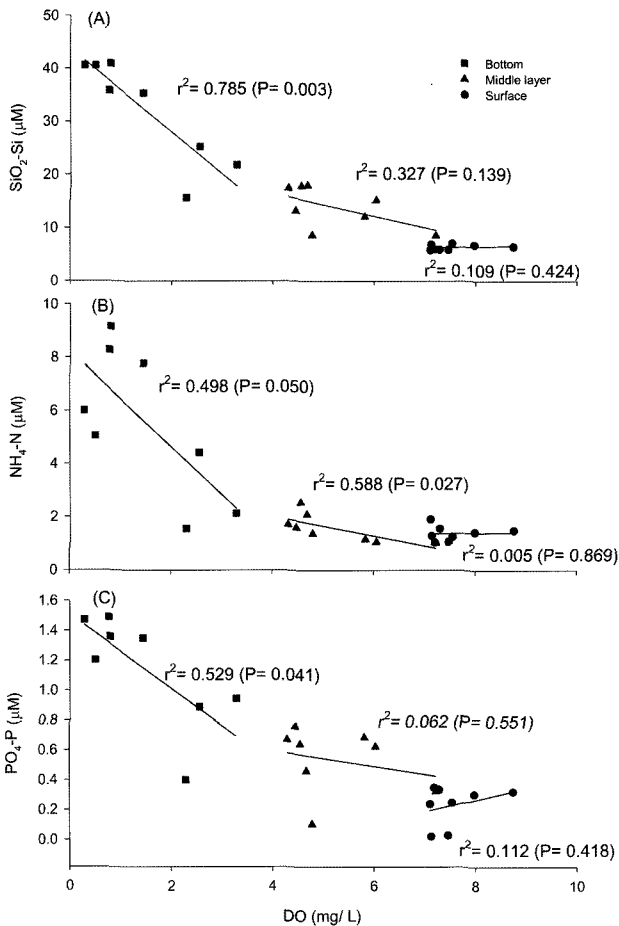


Fig. 9. Relations of $\text{SiO}_2\text{-Si}$, $\text{NH}_4\text{-N}$ and $\text{PO}_4\text{-P}$ concentrations with vertical DO distribution at hypoxic sampling stations on the 27 July 2005.

$p=0.050$)의 암모니아 농도와는 유의한 역 상관관계를 보였다(Fig. 9B). 용존 산소 농도와 인산염 농도는 표층 및 중층은 유의한 상관관계를 보이지 않았으나, 저층($r^2=0.529$, $p=0.041$)에서는 유의한 역 상관관계를 보였다(Fig. 9C).

토 의

조사기간 동안 가막만의 북서부 내만은 강한 수온약층이 형성되었으며, 저온의 정체성 저층수는 빈산소 수괴의 특성을 보였다. 하계 성층화된 내만의 정체성 저층수괴는 호흡과 분해량이 증가하는 생물학적 요인과 성층에 따른 DO의 연직확산 플럭스가 감소하는 물리적 요인들에 의해 빈산소 수괴가 형성되는 것으로 알려져 있다(최 등[1994]; Kimura and Izumi[1994]; 윤[1998]). 또한 하계의 정체된 수괴에서 성층화와 식물플랑크톤의 이상증식은 빈산소 형성과 확장에 중요한 영향을 미치는 것으로 나타났다(Richards[1965]).

진해만은 대부분 수심이 10-20 m 정도의 폐쇄성 내만이며, 흐름이 미약한 정체수역으로서 성층화가 진행되면서 저층의 고립냉

수괴가 빈산소화되는 것으로 나타났다(이[1994]; 최 등[1994]). 진해만 빈산소수괴의 시·공간적 변동은 기온, 일조시간, 강수량 및 바람 등에 의한 수직성층의 변동에 밀접하게 관계하며, 적조 발생은 빈산소수괴 형성을 촉진시키는 것으로 알려져 있다(이[1993]). 저층의 빈산소 수괴는 성층화 된 표층으로부터 DO 공급의 감소와 부영양화 된 표층에서 적조 발생 후 대량의 식물플랑크톤 사체와 배설물들이 저층으로 침강하면서 박테리아에 의한 유기물 분해가 DO의 소비를 촉진시키는 것으로 나타났다(최 등[1994]). 또한 해수유동 및 물질순환 모델에서 진해만의 적조는 바람에 의한 용승이 영향을 미치는 것으로 나타났으며(이[1994]), 하계에 발생하는 빈산소 수괴를 방지하기 위해서는 퇴적물 산소요구량(sediment oxygen demands)과 수괴의 유기물 유입 부하량을 감소시키는 것이 대책으로 제시되었다(이[1993]; 최 등[1994]).

가막만에서 빈산소수괴는 내만이 중앙부 보다 수심이 깊고 옅은 지형적인 조건에 의해 성층화된 저층 고립냉수괴가 존재하는 것이 가장 큰 요인으로 나타났다. 하계 저층의 빈산소 수괴는 수온약층 아래의 풍부한 영양염과 광합성에 필요한 충분한 일사량의 유입에 의해 식물플랑크톤이 대발생하고, 저층으로 침강하면서 수괴의 유기물 분해와 퇴적물 산소 요구량이 증가하여 DO가 감소하는 것으로 나타났다. 표층에서 식물플랑크톤의 현존량은 6월에 4.0×10^3 cells ml^{-1} 로 높게 나타났으나, 7월에는 0.7×10^3 cells ml^{-1} 로 낮게 나타났다. 조사기간 동안 표층 수괴의 영양염농도는 6월부터 감소하여 7월초에 가장 낮았으며(Fig. 4), 7월의 중순에는 수괴의 성층화가 강하게 나타났다(Fig. 2). 이러한 결과에서 7월의 식물플랑크톤 현존량 감소는 수온 증가에 따른 수괴의 성층화와 지속적인 식물플랑크톤 대발생에 의한 표층 수괴의 영양염 부족에 따른 것으로 나타났다. 6월의 영양염 농도는 표·저층에서 유의한 차이를 보이지 않았으나, 7월의 평균 저층 영양염 농도는 표층보다 3(인산염) - 10(규산염)배 이상 높게 나타났다(Fig. 4). 또한, 진해만과 원문만에서도 빈산소수괴가 출현하는 6월부터 9월까지 성층시기에는 퇴적물로부터 영양염이 해수로 용출되어 저층의 영양염 농도가 높은 것으로 나타났지만, 수괴가 혼합된 시기에 DO와 영양염의 농도는 수층별로 큰 차이가 나타나지 않았다(이[1993]; 최 등[1994]). 이러한 결과는 호기성 환경에서 퇴적물의 유기물들은 이산화탄소와 물로 분해되지만, 혐기성 환경에서는 유기물이 분해되어 암모니아로 수중에 용출되기 때문에 저층의 영양염 농도가 높은 것으로 알려져 있다(Kimura[2003]).

가막만의 저층 수괴에서 식물플랑크톤 대발생이 지속되는 것은 광합성에 필요한 충분한 광량, DO와 영양염 농도가 높기 때문인 것으로 나타났다. 조사기간 동안 광소멸 계수(K_d)로 계산된 투광대의 수심(입사광의 1%)은 평균 33.5 m까지로 식물플랑크톤 광합성을 제한하지 않는 것으로 나타났다(윤[2000]; [2003]). 빈산소가 형성된 시기(7월 27일)의 수온, DO와 Chl. *a* 농도의 수직 분포에서 DO 농도는 수온약층에 관계없이 수심 9.0 m까지 8.1 mg/L의 높은 농도를 보였으며(Fig. 8), 9.0 m 이하에서 급격히 감소하였다. Chl. *a* 농도도 수심 7.0 m 이하에서 증가하기 시작하여

8.5 m부터는 저층바닥까지 급격히 증가하는 것으로 나타났다. 가막만의 적조 발생은 규조류에 의해 지배되었으며, 제한된 고수와 낮은 염분 시기에 와편모조류에 의한 적조가 발생하는 것으로 나타났다(윤[1995]; [2000]). 그러나, 가막만의 표층수괴에서 식물플랑크톤의 현존량과 종조성은 수행되었으나, 저층의 식물플랑크톤 군집특성에 대해서는 잘 알려져 있지 않다. 윤([2000])에 의하면 가막만 북서부해역에서 Chl. *a* 농도의 시공간적인 분포는 하계 내만 북서부의 저층에서 다른 계절에 비해 높았으며, 생활하수의 유입과 지속적인 영양염류의 공급과 저층까지 광합성을 할 수 있는 충분한 빛 조건에 영향을 받는 것으로 보고하였다. 이러한 결과로 볼 때 수온약층에 의해 표층과 물리적인 혼합이 없고 정체된 내만의 수심 9.0 m까지 DO가 높은 것은 식물플랑크톤의 지속적인 광합성에 영향을 받는 것으로 나타났다.

그러나, 저층 바닥부근에서 급격한 DO의 감소는 수괴와 퇴적물 내 유기물 분해 작용과 대량의 식물플랑크톤 호흡에 의한 산소소비가 증가의 원인인 것으로 나타났다. 저층 퇴적물에서 산소투과 깊이는 빈산소 수괴가 형성된 시기의 평균 0.48 mm보다 빈산소가 소멸된 후에 평균 1.03 mm로 더 깊게 나타났다. 5월에 정점 31 주변에서 조사된 산소 투과 깊이는 1.3 mm로 빈산소 소멸 후와 유사하게 나타났다(이 등[2003]). 해수와 퇴적물경계면의 산소 소모율은 빈산소 수괴 및 무산소(혐기성) 상태가 진행된 시기에는 평균 $13.7 \text{ mmol O}_2 \text{ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 이었으나, 빈산소 수괴가 소멸한 후에는 $26.7 \text{ mmol O}_2 \text{ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 로 증가하는 경향을 보였다. 유기탄소 산화율은 빈산소 발생시 평균 $113.06 \text{ mg C m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 였고, 소멸 시에는 평균 $220.37 \text{ mg C m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 로 추산되었다. 이러한 결과는 우리나라 남해연안에서 추산된 유기탄소 산화율의 범위(89.5 - $228.1 \text{ mg C m}^{-2} \text{ day}^{-1}$)에 속하였으며, 빈산소 수괴가 형성된 시기에는 유기물의 분해가 높아 유기탄소 산화율이 낮게 나타나는 경향을 보였다(이 등[2003]). 수직 성층이 강하고 해수교환이 이루어지지 않을 때 퇴적물의 산소 소모율이 $15 \text{ mmol O}_2 \text{ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 이상이면 저층수괴에서는 무산소 수괴가 형성되고 산소 소모가 가속화 될 수 있는 것으로 알려져 있다(DeGobbis *et al*[1986]). 따라서 가막만의 저층수는 식물플랑크톤의 대발생에 따른 호흡과 유기물 분해에 의한 DO의 감소와 퇴적물의 산소 소모율 증가는 빈산소 수괴를 확장 시키는 것으로 나타났다(이[1993]). 최근에는 가막만에 유입되는 생활하수는 하수종말처리를 통해 수괴의 오염 부하량을 줄였으며, 내만의 오염된 퇴적물을 준설하여 퇴적물의 산소요구량을 저감시키고 있다(해양수산부[2001]). 그러나 이러한 노력에도 불구하고 정체성이 강한 오목한 내만의 지형적인 특성 때문에 빈산소 수괴는 가막만 북서부 내만의 호호와 선소 주변 해역에서는 가장 먼저 출현하여 만 중앙부까지 빠르게 확산되는 경향을 보였다(Fig. 3).

이러한 결과에서 하계 가막만의 빈산소 수괴는 북서부 내만의 오목한 지형의 정체성 저층수괴에서 나타나며, 생활하수의 유입과 퇴적물 산소요구량이 높은 선소와 호호지역에서부터 시작 되어 확산되는 것으로 나타났다(Fig. 3). 하계 가막만의 빈산소 수괴는 진

해만의 빈산소 형성과는 달리 수온약층 아래의 저층에서 식물플랑크톤 대발생 후 유기물 분해에 의한 산소 소비증가와 저층 퇴적물의 산소 소모율 증가에 영향을 받는 것으로 판단되었다. 가막만의 빈산소 수괴는 저층바닥에서 50 cm내외의 얇은 수층에서만 형성되었으며, 수온약층에서부터 빈산소 수괴의 상부까지 DO와 염류소 *a*가 높게 나타나는 특징을 보였다.

감사의 글

이 연구는 국립수산과학원(남해해양환경연구, RP-06-ME-016)의 지원에 의해 운영되었습니다. 조사과정과 시료 분석에 많은 도움을 주신 남해수산연구소의 탐구 11호 선원들과 해양환경팀 직원 여러분께 감사의 뜻을 표합니다. 또한, 논문을 면밀하고 세심하게 검토해 주신 익명의 심사위원님께 진심으로 감사드립니다.

참고문헌

- [1] Blumberg, A.F. and D.M. Di Toro, 1990. Effects of climate warming on dissolved oxygen concentrations in Lake Erie. *Trans. Am. Fish. Soc.* 119, 210-223.
- [2] Bouladin, D.R., 1968. Models describing the diffusion of oxygen and other mobile constituents across mud-water interface. *J. Ecol.*, 56, 77-87.
- [3] Cai, W.J. and F.L. Sayles, 1996. Oxygen penetration depths and fluxes in marine sediments. *Mar. Chem.*, 52, 123-131.
- [4] DeGobbis, D., M. Gilmartin and N. Revelante, 1986. An annotated nitrogen budget calculation for the Northern Adriatic Sea. *Mar. Chem.*, 20, 159-177.
- [5] Epping E.H.G. and W. Helder, 1997. Oxygen Budgets calculated from in situ oxygen microprofiles for Northern Adriatic sediments. *Con. Shelf Res.*, 17, 1737-1764.
- [6] Hanazato, T., 1997. Development of low-oxygen layer in lake and its effect on zooplankton communities. *Korean. J. Limnol.* 30, 506-511.
- [7] Hong, J.S. 1987. Summer oxygen deficiency and benthic biomass in the Chinhae bay System, Korea. *J. Oceanol. Soc. Korea*, 22, 246-256.
- [8] Kang, S.W. 1991. Circulation and pollutant dispersion in Masan-Jinhae Bay of Korea. *Marine Pollution Bulletin*, 23, 37-40.
- [9] Karim, M. R., Sekine, M., Higuchi, T., Imai, T., & Ukita, M. (2003), Simulation of fish behavior and mortality in hypoxic water in an enclosed bay. *Ecological Modelling*, 159, 27-42.
- [10] Kimura H. 2003. *의 물리환경- 환경분석への 序說* 148p
- [11] Kimura H. and M. Izumi. 1994. Effect of Oxygen Deficiency of the Sea Bottom on Environment of Bay. *Fisheries engineering*, 31, 41-45.
- [12] Lim, H.S., R.J. Diaz, J.S. Hong and L.C. Schaffner. 2006. Hypoxia and benthic community recovery in Korean coastal

- waters. *Marine Pollution Bulletin*. in press
- [13] Rhichards, F.A. 1965. Anoxic basins and Fijords. In: *Chemical Oceanography*. Vol. 1., Academic Press. pp.611-645.
- [14] Rosenberg, R., B. Hellman and B. Johansson. 1991. Hypoxic tolerance of marine benthic fauna. *Marine Ecology Progress Series*, 79, 127-131.
- [15] Robertson, D.M. and R.M. Ragotzkie, 1990. Changes in the thermal structure of moderate to large sized lakes in response to changes in air temperature. *Aquat. Sci.*, 52, 360-380.
- [16] Severdroup, H.U., M.W. Johnson and R. H. Fleming. 1972. *The Oceans*. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N. J.
- [17] Turner, R.E., N.N. Rabalais, E.M.Swenson, M. Kasprzak and T. Romaine. 2005. Summer hypoxia, northern Gulf of Mexico: 1978-1995. *Marine Environmental Research*, 59, 65-77.
- [18] Wu, R.S.S. 2002. Hypoxia: from molecular responses to ecosystem responses. *Marine Pollution Bulletin*, 45:35-45.
- [19] 김동선, 김상우. 2003. 진동만의 빈산소수괴 형성기구. *한국해양학회지-바다*, 8, 177-186.
- [20] 박성은, 조규대, 호연훈, 김동선, 조광우. 1999. 가막만의 해수유동에 미치는 바람의 영향. *한국수산학회지*, 32, 674-679.
- [21] 신현출. 1995. 가막만의 저서다모류 군집. *한국해양학회*, 30, 250-261.
- [22] 윤양호, 1995. 가막만 북부해역의 해양환경과 식물플랑크톤 군집의 변동 특성. 1. 식물플랑크톤 군집의 계절동태와 적조 원인생물. *여수대학교 수산과학연구소 논문집*, 4, 1-15.
- [23] 윤양호, 2000. 가막만 북서부해역 식물플랑크톤 군집의 시공간적 분포 특성. *여수대학교 수산과학연구소 논문집*, 9, 34-47.
- [24] 윤양호. 2003. 한국 남서해역의 식물플랑크톤 군집 출현 및 분포 특성. *여수대학교 수산과학연구소 논문집*, 12, 1-17.
- [25] 윤종성. 1998. 연안역에서의 저층 빈산소수의 용승현상(정조현상)에 관한 연구. *한국환경과학회지*, 7, 291-299.
- [26] 윤종성. 1999. 성층수역에서 저층의 빈산소수의 혼합 및 용승현상에 관한 연구. *대한토목학회논문집*, 19, 565-573.
- [27] 이규형, 조규대. 1990. 가막만의 수온과 염분의 분포. *한국수산학회지*, 23, 25-39.
- [28] 이규형, 최규정. 1985. 6월중 가막만의 수온, 염분 및 투명도 분포. *한국수산학회지*, 18, 157-1656.
- [29] 이문옥. 1994. 진해만 적조발생의 물리적 기구 I. *여수대학교 수산과학연구소 논문집*, 3, 45-57.
- [30] 이규형. 1992. 가막만의 해수유동 패턴. *한국어업기술학회지*, 28, 117-131.
- [31] 이연규, 윤양호, 김종규, 한경호, 이규형, 신현출, 조현서, 최상덕, 이문옥. 2006. 가막만 자연환경과 산업. 도서출판 구덕. pp.247.
- [32] 이재성, 김기현, 유 준, 이필용, 정래홍, 이원찬, 한정희, 이용화. 2004. 해상 어류가두리 양식장의 환경영향평가:II가두리 양식장 퇴적물의 산소-황화수소 경계면에서 황화수소의 산화율 및 무산소 퇴적층에서 황산염 환원을 추정. *한국해양학회지-바다*, 9, 64-72.
- [33] 이재성, 김기현, 유 준, 정래홍, 고태승. 2003. 산소 미세전극을 이용한 남해연안 퇴적물/해수 계면에서 산소소모율 및 유기탄소 산화율 추정. *한국해양학회지-바다*, 8, 392-400.
- [34] 이필용. 1993. 원문만에서 저산소 수괴의 출현과 계절적 변동. *한국수산학회지*, 26, 392-400.
- [35] 임현식, 최진우, 제종길, 이재학. 1992. 진해만 양식장 밀집해역의 저서동물 분포. *한국수산학회지*, 25, 115-132.
- [36] 조은일, 박청길, 이석모. 1996. 가막만의 환경용량 산정(1)-생태계모델을 이용한 기초생산력 산정. *한국수산학회지*, 29, 369-385.
- [37] 조현서, 유영석, 이규형. 1994. 가막만 수질 및 저질 환경의 계절별 변동 특성. *여수대학교 수산과학연구소 연구보고*, 3, 21-34.
- [38] 조현서, 팽우현, 박순현, 신현출. 2001. 가막만 양식장 주변해역 수질 및 저질환경. *한국환경공학회 2001년도 추계학술대회 논문집*, pp.67-70.
- [39] 최상덕, 김성연, 양문호, 박종수, 라성주, 우찬열, 김두용, 정대신. 1999. 가막만 양식굴의 대량폐사에 관한 연구. I. 굴 양식장 환경요인. *여수대학교 환경문제연구소 논문집*, 8, 259-266.
- [40] 최철용, 문성룡, 윤호섭, 라설주, 한중석, 최상덕, 이우범. 2002. 가막만 패류양식장의 수질 및 저질 특성. *여수 대학교 환경 연구논문집*, 5, 21-32.
- [41] 최우정, 박청길, 이석모. 1994. 진해만의 빈산소 수괴 형성에 관한 수치실험. *한국수산학회지*, 27, 413-433.
- [42] 해양수산부, 2005. 해양환경공정시험방법. pp.400.
- [43] 해양수산부. 2001. 환경관리해역 시범해역관리 시행계획 수립 연구. pp.275.

2006년 7월 6일 원고접수

2006년 10월 12일 수정본 채택