

가막만 빈산소 수괴 소멸기의 물리화학적 특성

김정배* · 박정임*** · 정춘구**** · 최우정** · 이원찬** · 이용화**

*, ** 국립수산물품질관리원 어장환경과, *** 부산대학교 생물학과, **** 남서해수산연구소 해역산업과

Physicochemical Characteristics of Seawater in Gamak Bay for a Period of Hypoxic Water Mass Disappearance

Jeong-Bae Kim* · Jung-Im Park*** · Choon-Goo Jung**** · Woo-Jeung Choi** · Won-Chan Lee** · Yong-Hwa Lee**

*, ** Marine Environment Research Division, National Fisheries Research and Development Institute, Busan, 619-705, Korea

*** Department of Biology, Pusan National University, Busan, 609-735, Korea

**** Aquaculture Industry Division, Southwest Sea Fisheries Research Institute, NFRDI, Yeosu, 556-823, Korea

요 약 : 빈산소 수괴는 전세계적으로 얇은 연안의 바다에서 생태적으로 위협적인 영향을 미치고 있다. 한반도 남해동부연안의 가막만에서도 2007년 6월 말에 빈산소 현상이 나타났으며, 빈산소 수괴 소멸기의 이화학적 특성을 조사하였다. 빈산소 수괴는 선소 인접지역에서 북서부 내만 역의 연안을 따라 형성되어 있었다. 표층수와 저층수의 용존산소 농도는 빈산소 수괴에서 1.3mgL^{-1} 와 2mgL^{-1} 이하, 그 외 지역은 각각 $4.5\sim 6.8\text{mgL}^{-1}$ 와 $3.8\sim 6.0\text{mgL}^{-1}$ 로 양호한 농도를 보였다. 빈산소 지역의 클로로필 *a* 농도는 표층 $4.9\sim 25.3\mu\text{gL}^{-1}$, 중층이 $2.3\sim 23.1\mu\text{gL}^{-1}$, 저층은 $1.9\sim 9.0\mu\text{gL}^{-1}$ 범위였다. 가막만 빈산소 수괴의 발생은 3가지 수직적 형태로 나타났다. 첫 번째는 선소 주변에서 빈산소 수괴가 전 수심 층에서 발생되면서 어·패류의 폐사가 일어났다. 두 번째는 일반적인 빈산소 수괴 발생 형태인 저층에서부터 빈산소가 발생되어 있는 상태였다. 세 번째는 수온 역전 현상이 일어나면서 중층에서만 빈산소 수괴가 발생하였고 저층에는 빈산소 수괴가 발생하지 않았는데, 이러한 현상은 조사정점 9, 14 및 21의 호도마을 인접지역 연안에서만 발생하였다. 빈산소 수괴에서는 해저면에 주로 서식하는 문절망둑 무리들이 수면위로 올라와 산소 결핍에 따른 입 올림을 하였으며 게류 및 고등류 등이 갯가로 올라오는 등 이상행동을 하는 것이 관찰되었다. 폐사된 생물들은 주로 문절망둑으로서 3천 마리 정도였고, 게 및 고등류 일부가 폐사하였다.

핵심용어 : 빈산소 수괴, 용존산소, 가막만, 입올림, 문절망둑

Abstract : Hypoxic(oxygen-deficient) water masses are a key threat to the ecosystem of shallow marine coastal areas worldwide. The phenomena of hypoxia occurred at Gamak Bay, on the southeast coast of Korea, in late June 2007. In this paper, the physicochemical characteristics of seawater were surveyed for a period of hypoxic water mass disappearance. The hypoxic water mass was located between Sunso and the northwestern area of the inner bay. The dissolved oxygen(DO) concentrations of surface and bottom water were 1.3mgL^{-1} and less than 2mgL^{-1} , respectively, in the hypoxic water masses, and $4.5\sim 6.8\text{mgL}^{-1}$ and $3.8\sim 6.0\text{mgL}^{-1}$ at the other oxygen-rich sample sites, respectively. Chlorophyll *a* concentrations were $4.9\sim 25.3\mu\text{gL}^{-1}$ at the surface, $2.3\sim 23.1\mu\text{gL}^{-1}$ in the middle, and $1.9\sim 9.0\mu\text{gL}^{-1}$ at the bottom of the hypoxic water masses. When the hypoxic water mass appeared in Gamak Bay, it formed three different vertical types. The first type occurred throughout the water depth around Sunso. The second type developed from the bottom. The third type of hypoxic water mass was formed in the middle water layer when the inversion of water temperature occurred. The third type of phenomena appeared at only St. 9, St. 14 and St. 21 sites near the Hodo coast. Aquatic surface respiration of bottom-dwelling fishes such as the oriental goby(*Acanthogobius flavimanus*) was observed and many crustaceans were seen along the adjacent shore of the hypoxic water mass area. About 3,000 oriental gobies as well as many crustaceans died due to this event in Gamak Bay. The results of this study could provide fundamental data for the mechanism of hypoxic water masses in Gamak Bay.

Key Words : Hypoxic water mass, Dissolved oxygen, Gamak Bay, Aquatic surface respiration, Oriental goby

1. 서론

빈산소 수괴는 부영양화 된 내만에서 수괴의 성층화와

유기물 분해 및 기타 화학적 요인들에 의해 용존산소의 농도가 2mgL^{-1} 이하로 낮아지는 현상이다. 내만에서 해수의 교환이 원활하지 못하고, 하계 강우유입과 수온상승에 따른 밀도약층이 형성되면 저층으로의 산소 공급이 제한된다. 또한 육상으로부터 유입되거나 퇴적물로부터 용출된 풍부한 영양염

* 대표저자 : 정희원, jbkim@nfrdi.go.kr, 051-720-2521

은 식물플랑크톤 대발생을 야기하고, 대발생한 식물플랑크톤은 침강 후 박테리아의 유기물 분해에 의해 산소 소비를 촉진시킨다.

해양에서 수괴의 용존산소 결핍은 어·패류의 호흡이나 생리작용에 직접적으로 영향을 미치며, 저서동물군집의 출현종과 개체수에도 민감하게 영향을 미치는 것으로 보고되고 있다(윤 등, 2007; 윤 등, 2008; 조 등, 1994; Hong, 1987). 또한 용존산소의 결핍에 따른 혐기적인 상태에서는 퇴적물의 유기물 분해시 황화수소와 암모니아가 생성되며 생물체의 분포와 이주에 제한 요인으로 작용할 수 있는 것으로 알려져 있다(윤 등, 2007). 연안역에서 나타나는 저층수 빈산소화는 저서생물에 직접적인 영향을 미칠 뿐만 아니라, 여러 가지 2차적인 영향으로 연안생태계에 중대한 영향을 미친다(윤, 1998; 임, 1993). 빈산소 수괴의 형성은 동물플랑크톤의 개체수를 감소시키고 종 천이를 유발시키기 때문에 동물플랑크톤에 의한 식물플랑크톤 섭취가 감소하여 식물플랑크톤의 대발생이 장기화될 수 있다(문 등, 2006; 윤, 1998; Hanazato, 1997). 또한 산소가 부족한 저층수가 바람의 영향으로 용승할 경우 직접적인 생물폐사를 초래하며, 수역의 자연정화 기능을 상실시킬 수 있는 것으로 알려져 있다(윤, 1998; 윤, 1999).

가막만은 남해안 중앙에 위치한 내만으로 남북방향의 길이는 약 15km, 동서방향의 길이는 약 9km의 타원형으로 만입구는 크고 작은 섬들로 둘러싸여 있다. 가막만의 조류는 낙조류가 창조류보다 다소 우세하며, 반일주조가 탁월한 왕복류의 조류 형태를 나타낸다(해양수산부, 2001). 만 내부의 해저지형을 보면 북서 내만역은 대형 웅덩이 형태로서 저층해수가 고여 있는 정체 현상을 보이고 있다. 중앙부는 수심 6~7m 내외이며, 북서쪽은 수심이 9~11m로 육지로부터 유입되는 생활하수 등 여러 가지 물질들이 수렴되는 지역이다. 가막만의 북쪽과 중앙해역에는 수하식 패류(진주 담치와 굴) 양식장이 많고, 만 입구에서는 해상 가두리 어류 양식장이 많이 분포되어 있어 과도한 양식, 양식장의 장기사용 및 생활하수의 유입증가로 인한 어장환경 관리에 많은 문제점들이 발생하고 있다. 북서 내만해역은 해수 정체와 하수 및 폐수의 유입으로 부영양화가 진행되고 있으며, 수온이 높은 하계에는 저층 해수에서 빈산소층이 빈번히 형성된다(해양수산부, 2001). 또한, 매우 다양한 생물종에 의해 1984년 이래 매년 적조가 발생하고 있는데, 편모조류에 의한 적조보다 규조류에 의한 적조가 우점하는 특징을 보이는 것으로 알려져 있다(해양수산부, 2001).

현재까지 가막만의 환경에 대한 연구는 수괴의 물리적인 특성(박 등, 1999; 이와 조, 1990; 이, 1992), 수질과 퇴적물환경(조 등, 1994), 표층퇴적물 중 유기물의 시공간적 분포(노 등, 2006), 기초생산성과 적조(윤, 1995; 조 등, 1996), 가막만 식물플랑크톤 군집구성(윤, 2000; 오 등, 2008), 동물플랑크톤 분포와 빈산소(문 등, 2006) 저서생물 군집과 저서환경(임, 1993; 신, 1995; 윤 등, 2007; 윤 등, 2008), 패류양식장의 어장환경(조 등, 1996; 김 등, 2007), 빈산소 수괴의 발생 기작

과 진행과정(김 등, 2006)의 다양한 연구가 수행되어 왔다. 본 연구는 가막만 내측일원의 빈산소 수괴 상습 발생 지역을 대상으로 빈산소 수괴의 소멸 시기에 있어 물리화학적 특성 변화를 규명하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

가막만의 빈산소 수괴가 형성되는 해역을 중심으로 2007년 6월부터 빈산소 모니터링이 수행되었으나, 본 논문의 자료는 빈산소 수괴의 소멸 시기인 2007년 8월말 조사 결과 중 2007년 8월 31일의 조사 자료에 대하여 분석하였다(Fig. 1). 2007년 8월 31일 고조시간은 10시 55분이었고, 조사 시작시간은 14시로 대조기 고조 후 3시간 지난 최강 낙조시에 빈산소 해역을 중심으로 모니터링이 수행되었다. 바람 시계열 자료는 기상청에서 매 시간 별로 측정하여 제공하는 자료를 이용하였다(기상청, 2010). 수온, 염분, 용존산소 농도의 수직적인 분포는 수질측정기(YSI 6920, USA)로 현장에서 측정하였고, 기계 오차를 줄이기 위하여 용존산소 농도는 Winkler 적정 분석 값으로 검정하였다. 해수는 표층, 중층 및 저층에서 채수하여 영양염류, 클로로필 *a*(Chl. *a*)를 분석하였다. 영양염류 분석은 0.45 μ m 막여과지로 여과한 후 암모니아 질소(NH₄⁺-N), 질산 질소(NO₃⁻-N), 인산인(PO₄³⁻-P) 그리고 규산 규소(SiO₂⁻-Si)를 흡광 광도법을 이용하여 측정하였다(해양수산부, 2005). 클로로필 *a*는 채수한 500mL를 0.45 μ m 막여과지로 여과한 후 냉암소에서 90% Acetone으로 색소를 추출하여 분광광도계로 측정하였다(해양수산부, 2005).

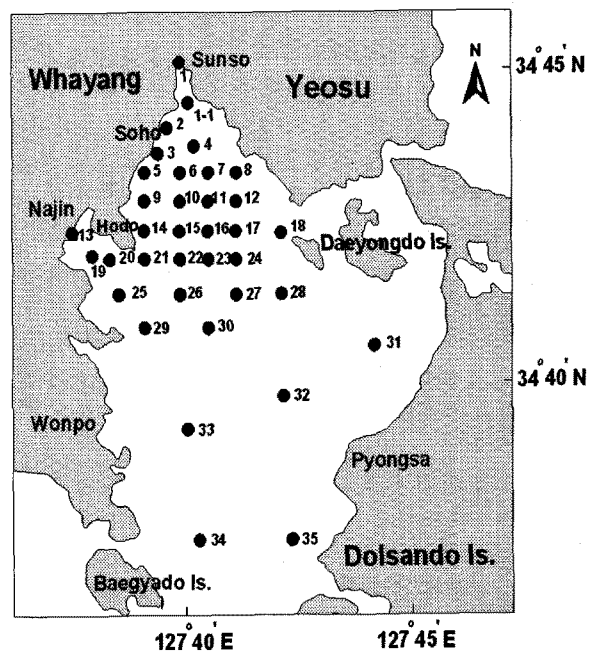


Fig. 1. Map showing sampling stations in Gamak Bay.

3. 결과

3.1 물리·화학적 특성

기상청의 여수지역 바람 시계열을 살펴보면, 바람의 방향은 대체적으로 동북동풍이 연속적으로 불고 있었다. 2007년 8월 30일 밤에는 풍속이 14.1m/sec 로 강하게 불었으나, 2007년 8월 31일에는 4.8m/sec 로 바람이 약하게 불고 있는 것으로 나타났다(Fig. 2).

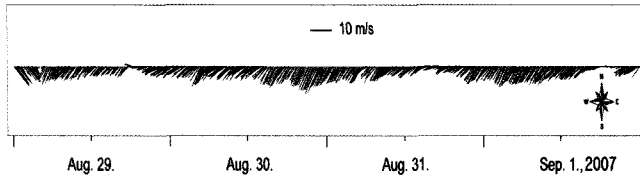


Fig. 2. Stick diagram of wind velocity at Yeosu.

조사된 표층 수온은 25.8~26.8°C 범위였고, 중층 수온은 25.5~26.3°C 범위였으며, 저층 수온은 24.5~25.6°C 범위로 나타났다. 표층과 저층의 수온차이는 약 1.0°C의 차이를 보여 수온약층은 대부분의 지역에서 소멸되었거나 소멸과정에 있었다.

가막만 표층수의 용존산소 농도를 보면 북부 내만역의 선소 인접지역에서는 1.3mgL⁻¹의 빈산소 수괴로서 문질망둑, 게 및 고둥류 등의 어류 및 패류의 폐사가 목격되었으며, 그 외 지역은 4.5~6.8mgL⁻¹로 양호한 농도를 보였다(Fig. 3 A). 저층수의 용존산소 농도는 2mgL⁻¹ 이하의 빈산소 수괴가 북서부 내만역의 연안을 따라 형성되어 있었으며, 그 외의 지역은 3.8~6.0mgL⁻¹로 양호한 농도를 보였다(Fig. 3 B).

가막만에서 조사된 영양염류 농도를 보면 인산인의 농도는 표층 0.11~0.16μM이고, 중층 0.13~0.22μM이며, 저층 0.15~0.23μM이었고, 규산 규소의 농도는 표층 6.2~13.8μM이고, 중층 10.6~12.4μM이며, 저층 11.5~15.2μM이었다. 암모니아 질소의 농도는 표층 0.3~0.6μM이고, 중층 0.5~0.9μM이며, 저층 0.9~1.5μM이었고, 질산 질소의 농도는 표층 1.6~3.7μM이고, 중층 1.1~3.5μM이며, 저층 1.6~2.0μM이었다. 영양염류 농도에 대하여 북서 내만역의 세 정점을 서로 비교하면(Fig. 4), 인산인 농도는 정점 1-1 및 3의 저층에서 상대적으로 높은 농도를 보였으며, 정점 9는 중층에서 상대적으로 높은 농도를 보였고(Fig. 4 A), 규산 규소의 농도는 상대적으로 낮은 농도를 보인 정점 9의 표층을 제외하면 전 정점의 표·중·저층에서 상대적으로 높은 농도를 보였다(Fig. 4 B). 암모니아 질소는 대체적으로 표층, 중층, 저층 순으로 증가하는 경향을 보였고(Fig. 4 C), 질산 질소는 정점 1-1의 표·중층 및 정점 9의 중층에서 상대적으로 높은 농도를 보였다(Fig. 4 D).

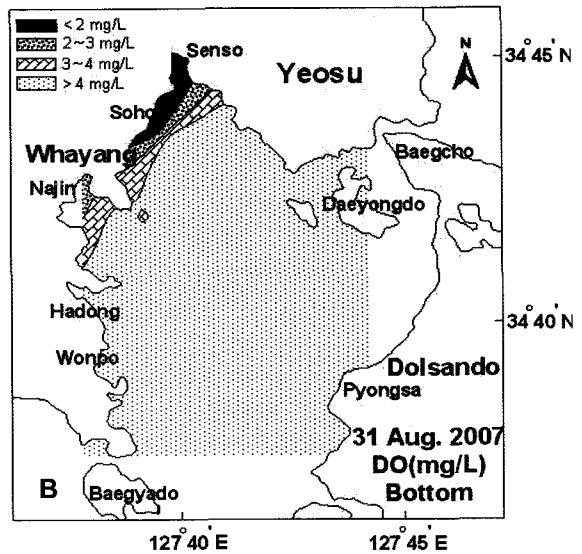
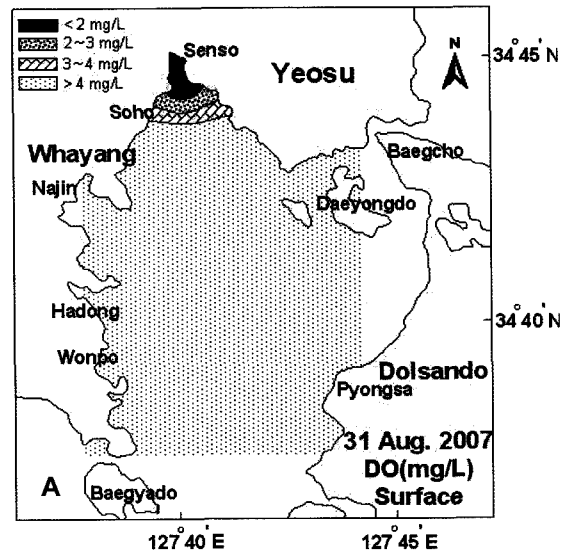


Fig. 3. Horizontal distributions of dissolved oxygen concentration of the surface(A) and bottom water(B) in Gamak Bay.

3.2 클로로필 a 농도 분포특성

조사 수역의 클로로필 a 농도는 표층 4.9~25.3μgL⁻¹이고, 중층 2.3~23.1μgL⁻¹이며, 저층 1.9~9.0μgL⁻¹이었다. 특히, 빈산소 수괴가 발생된 북서 내만역의 세 정점을 서로 비교하면(Fig. 5), 정점 1-1에서 표층의 클로로필 a 농도는 상대적으로 높지만 표층, 중층 및 저층 모두 대체적으로 낮은 농도를 보이고 있었고, 정점 3에서의 클로로필 a 농도는 표층 및 중층이 높고, 저층은 낮은 농도를 보였다. 정점 9에서의 클로로필 a 농도는 표층이 높고, 중층 및 저층은 낮은 농도를 보였다.

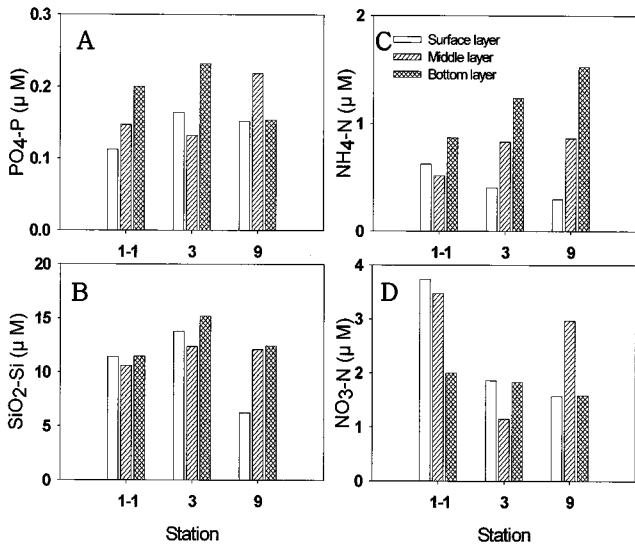


Fig. 4. The variations of phosphate phosphorus(A), silicate silica(B), ammonia nitrogen(C) and nitrate nitrogen concentration(D) in Gamak Bay.

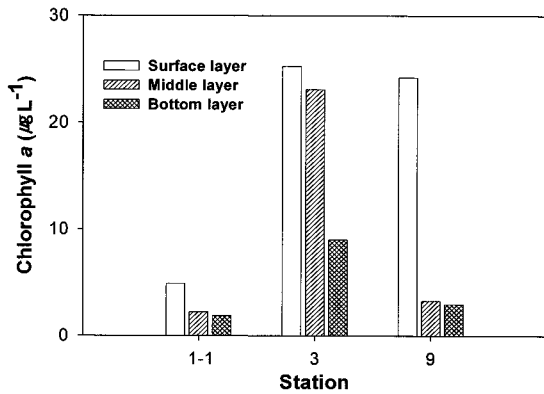


Fig. 5. The variations of chlorophyll a in Gamak Bay.

3.3 빈산소 수괴의 수직적 특성

가막만 빈산소 수괴의 소멸시기에는 수직적 특성이 3가지 형태로 나타났다. 첫 번째는 빈산소 수괴가 전 수심 층에서 발생되면서 어·패류의 폐사가 일어난 경우이고, 두 번째가 일반적인 가막만의 빈산소 수괴발생 형태인 저층에서부터 빈산소가 발생되는 형태이며, 세 번째가 수온 역전 현상이 일어나면서 중층에서 빈산소 수괴가 발생하고, 저층에는 빈산소 수괴가 발생하지 않은 경우 이다.

빈산소 수괴가 전 수심 층에서 발생된 지역은 선소 인접 지역(St. 1-1)으로서 수온의 연직분포는 표층이 상대적으로 높지만 저층까지 비슷한 경향이었고, 염분의 연직 분포는 표층이 상대적으로 낮지만 저층까지 비슷한 경향이였다. 용존 산소 농도는 표층 1.25mgL⁻¹에서 4m까지는 비슷한 경향이었고, 이후 증가하여 저층에는 1.96mgL⁻¹ 수준이었으나, 전 수층 모두 빈산소 수괴가 형성된 지역 이었다(Fig. 6 A).

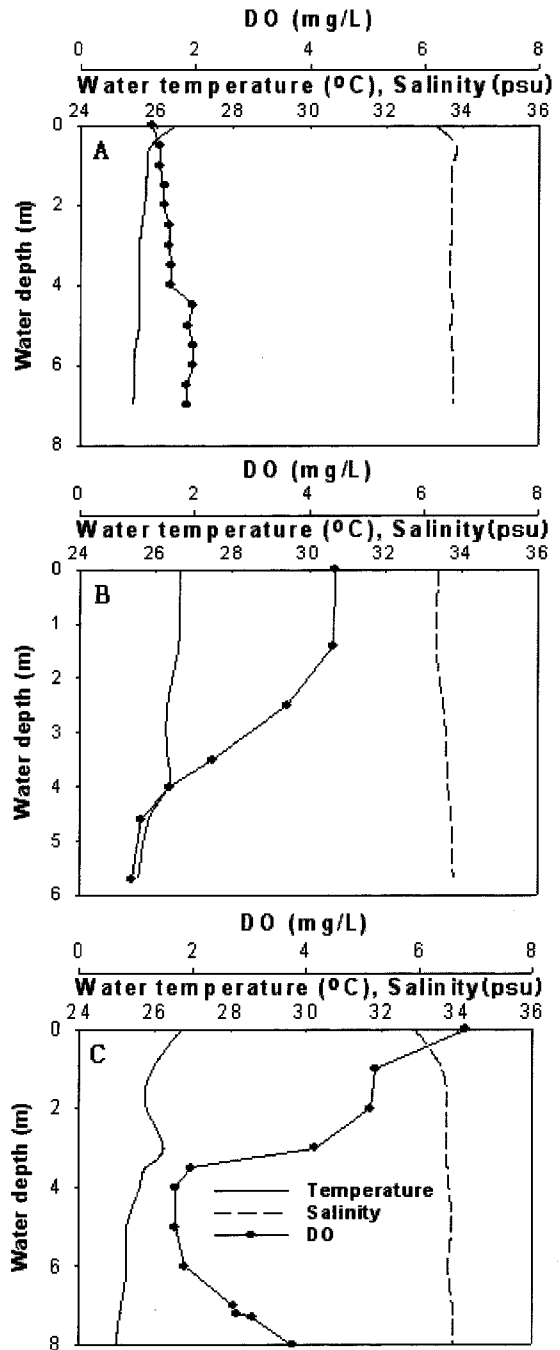


Fig. 6. Vertical distributions of water temperature, salinity, DO on 31st August, 2007 at St. 1-1(A), St. 3(B) and St. 9(C) in Gamak Bay.

일반적인 가막만 빈산소 수괴 발생형태인 저층에서부터 빈산소 수괴가 발생된 지역은 요트 경기장 인접지역(St. 3)이며, 수온의 연직 분포는 표층에서 4m까지 비슷한 경향을 보였고, 이후 감소하여 표층과 저층 수온 차이는 1°C 내외로 수온약층이 소멸하는 과정으로 판단되었다. 염분의 연직분포는 표층에서 저층까지 비슷한 경향이었고, 용존산소 농도는 표층 4.46mgL⁻¹에서 점차적으로 감소되어 4m 수심대에서는 2 mgL⁻¹ 이하의 빈산소 수괴가 형성되어 있었다(Fig. 6 B).

수온의 연직 분포에서 수온 역전 현상이 일어나면서 중층에서 빈산소 수괴가 발생하였고, 저층에는 빈산소 수괴가 발생하지 않았는데, 이러한 현상은 조사정점 9, 14 및 21의 호도마을 인접지역 연안을 따라 발생하였고, 주변의 다른 정점들에 대해서는 이런 현상이 나타나지 않았다. 수온의 연직 분포는 표층에서 2m까지는 감소하는 경향을 보였으나, 이후 증가하여 2~3m까지 수온 역전 현상이 일어났으며, 이후 저층까지 감소하는 경향을 보였다. 염분의 연직 분포는 표층이 상대적으로 낮지만 저층까지 비슷한 경향이었고, 용존산소 농도는 표층 6.81mgL^{-1} 에서 4m까지 점차 감소되었으며, 이후 4~6m까지의 중층에는 빈산소 수괴가 형성되었고, 수심 6m 이후부터 점차 증가하여 저층에서는 3.75mgL^{-1} 로서 빈산소 수괴가 형성되지 않았다(Fig. 6 C).

3.4 자연산 어·패류의 폐사

가막만 북부 상단인 학동 선소 인접지역에서 빈산소 수괴의 영향으로 판단되는 어·패류의 이상행동 현상을 목격하였다. 해저면에 주로 서식하는 문절망둑 무리들이 수면위로 올라와 산소결핍에 따른 입 올림(Aquatic surface respiration)을 하였으며(Photo 1 A; Photo 1 B) 게류 및 고등류 등이 갯가로 올라오는 등 이상행동을 하는 것이 관찰되었다(Photo 1 C). 폐사된 생물들은 주로 문절망둑으로 3천 마리정도였고(과학원 미발표 자료), 게 및 고등류 일부가 폐사하였다(Photo 1 D).

4. 고찰

수심이 얇고 복잡한 해안선을 갖고 있는 가막만은 내륙의 영향을 강하게 받으며, 만 입구의 외해수와 여수향으로부터 유입되는 해수의 유입으로 성질이 다른 3개의 수괴가 출현하는 것으로 알려져 있다(이와 조, 1990; 이, 1992). 각 수괴의 특징은 섬진강 하구수 및 연동천의 영향을 받아 여수향으로부터 유입되는 수괴, 외해수의 영향을 받아 만 입구로부터 유입되는 수괴, 내륙의 영향을 크게 받는 정체성의 해수 특성을 갖는 내만수괴로 구분 된다(이와 조, 1990). 내만 수괴 수온은 연변화의 범위가 크고 최고 및 최저의 수온이 나타나며, 여수향으로부터 유입되는 수괴는 염분의 연변화가 크고 최저 염분이 나타나는 가벼운 물이지만 외해 수괴는 수온의 연변화가 작고 최고의 염분을 보이는 무거운 수괴의 특성을 보였다(이와 조, 1990). 북서 내만역의 흐름은 밀물에는 반시계 방향성 환류가 형성되어 나진쪽으로 수렴하며, 썰물에는 소호와 호도의 중간 수역을 경계로 아주 느리게 시계 방향으로 변화하여 천천히 남하하거나 나진쪽으로 향하는 양상이다(이, 1992). 하계 성층화된 내만의 정체성 저층 수괴는 호흡과 분해량이 증가하는 생물학적 요인과 성층에 따른 용존산소의 연직확산 플럭스가 감소하는 물리적 요인들에 의해 빈산소 수괴가 형성되는 것으로 알려져 있다(윤, 1998; 최 등, 1994; Kimura and Izumi, 1994). 하계의 정체된 수괴에서 성

층의 발달과 플랑크톤의 이상증식이 빈산소 형성과 확장에 깊은 관계가 있는 것으로 보고하였다(Richards, 1965).

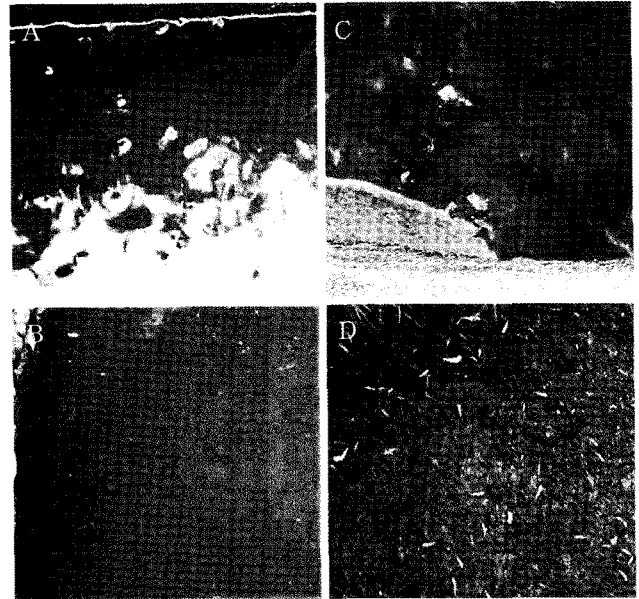


Photo 1. Aquatic surface respiration of the oriental gobies(A), moves to the shoreline of the oriental gobies(B), moves to the shoreline of the oriental gobies and many crustaceans(C), oriental gobies were dead due to this event in Gamak Bay(D).

가막만의 저층 빈산소 수괴는 7월 초 선소 인접지역에서 최초 발생하여 8월 초에 만의 중앙부까지 확장되었다가 8월 중순이후 점차 그 영역이 감소하여 9월 중순에 소멸되는 것으로 시간의 흐름에 따른 빈산소 수괴의 발생과 소멸 과정이 잘 나타나 있다(김 등, 2006).

평균 수심 20m인 진해만에서 발생하는 빈산소 수괴의 경우 부영양화된 표층에서 적조 발생 후 대량의 식물플랑크톤 사체와 배설물들이 저층으로 침강하여 박테리아의 유기물 분해에 의해 용존산소가 소비되고, 성층화된 표층으로부터 용존산소의 공급이 감소되기 때문인 것으로 나타났다(최 등, 1994). 또한 해수유동 및 물질순환 모델을 이용한 결과 진해만에서 발생하는 빈산소 수괴를 방지하기 위해서는 퇴적물 산소요구량(Sediment oxygen demands)과 육상으로부터의 유기물 유입 부하량을 줄이는 것을 대책으로 제시하기도 하였다(최 등, 1994). 그리고, 진해만과 인접한 원문만의 경우 하계 빈산소 또는 무산소화를 방지하고 양호한 수질 상태를 유지하기 위해서 산소를 강제 공급하거나 유기물 유입 부하를 줄이는 방법을 제시하기도 하였다(이, 1993).

본 조사지역인 선소 인접지역은 하계 저층의 빈산소 수괴가 상시 존재하는 지역으로서 2007년 8월 30일 평균 풍속은 5.9m/sec 이며, 최대순간 풍향풍속은 2시 방향의 동북동풍 및 14.1m/sec 이었고, 8월 31일 평균 풍속은 5.7m/sec 이며, 최대순간 풍향풍속은 2시 방향의 동북동풍 및 11.1m/sec 로서

매우 강한 동북동풍의 바람이 계속 불고 있었다(기상청, 2010). 동풍의 경우 만 중앙부의 흐름이 크게 강해지고, 대경도 남단의 와류형태가 사라지면서 만의 서부연안을 따라 남향류가 강해지며, 북서 내만역에는 시계방향의 와류가 형성된다고 하였다(박 등, 1999). 매우 강한 바람 및 시계방향의 와류 등과 같은 물리적인 현상에 의하여 표·중·저층이 혼합되면서 빈산소 수괴가 발생한 것으로 판단되며(윤, 1998; Takahashi et al., 2009), 이때의 투명도는 0.5m로서 불량한 값을 가지고 있었다.

조사된 정점 1-1의 영양염류중 질산 질소의 농도를 보면 표·중층의 값이 3.5 μ M 이상으로 다른 정점들에 비하여 높은 농도 값을 가지고 있는 것으로 보아 표·중·저층이 혼합되면서 유기질소 또는 암모니아가 산화되어 질산염으로 용출된 것으로 판단된다. 산소가 풍부한 혼합기에 저층의 영양염 농도는 표층과 큰 차이가 없지만, 빈산소화가 되는 성층기에는 퇴적물로부터 영양염이 해수로 용출되기 때문에 영양염류 농도가 높게 나타난다. 호기성 환경에서 퇴적물의 유기물들은 이산화탄소와 물로 분해되지만, 혐기성 환경에서 유기물은 분해되어 암모니아 질소형태로 수중에 용출되기 때문이다(Kimura, 2003). 용존산소 농도가 4.5~6mgL⁻¹일 때 저서동물의 성장이 저해되고, 2~4mgL⁻¹에서 체내 대사에 문제가 발생하며, 0.5~2mgL⁻¹ 이하에 도달하게 되면 황화수소와 함께 암모니아 등이 퇴적물로부터 용출됨으로써 생물의 대량 사망을 유발할 수 있다(Gray et al., 2002). 저서성 어류의 반치사 농도(LC₅₀)는 1.54±0.07mgL⁻¹로서 선소 인접지역의 전 수층 산소 농도가 어류의 반치사농도 보다 낮은 용존산소 값을 보였다는 점에서 많은 어류, 게 및 고등류 들의 집단 폐사가 일어난 것으로 판단된다(Vaquero-Sunyer and Duarte, 2008).

최근에는 가막만에 유입되는 생활하수는 하수종말처리를 통해 오염부하량을 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 소호와 선소 주변 해역에서는 가장 먼저 출현하는 경향을 보였다. 이러한 결과에서 반폐쇄성인 가막만의 하계 빈산소 수괴는 북서부 내만의 오목한 지형을 가진 정체성 저층수괴에서 나타나며, 생활하수의 유입과 퇴적물 산소요구량이 높아 빈산소 수괴 발생을 가중시키는 선소지역에서부터 시작되어 확산된다(김 등, 2006; Rabalais and Turner 2001).

이번 조사에서 나타난 자료에 의하면 빈산소 수괴의 시작은 선소에서 시작되어 물리적인 현상에 의해서 빈산소 수괴가 확장된 것으로 판단된다. 8월말에는 일기가 불순하여 바람이 많이 불고 비가 내리고 있었으며, 선소 인접지역의 표·중·저층수의 혼합에 의하여 전 수층에서 빈산소 수괴가 발생한 것으로 판단된다.

빈산소 수괴 발생중 개방형인 북태평양의 20°N과 10°N 사이에 저층수의 용승에 의해 용존산소 함량이 극히 적은 수괴가 넓게 분포하는 경우가 있지만(Severdrup et al., 1972), 반

폐쇄성인 연안의 중층에서 빈산소 수괴가 발생한 경우는 극히 일어나기 어려운 현상이다(Fujiwara et al., 2000). 따라서, 중층에서 빈산소 수괴가 발생된 가능성은 두 가지로 볼 수 있다. 첫 번째는 DO가 풍부한 주변의 저층수가 단순히 저층으로 유입되어 상대적으로 중층에 빈산소가 발생하였을 가능성이 있다. 두 번째는 선소 인접지역의 전 층 및 북서부 연안 저층의 빈산소층은 북서부 연안을 따라 발생하였으므로 물리적인 힘과 지형적인 영향으로 요트경기장 인접지역의 빈산소층이 일시적으로 호도마을까지 밀려 내려왔을 것으로 판단된다. 조사정점의 수심을 먼저 보면 정점 1-1의 경우 8m이고, 정점 3의 경우 6m이며, 정점 9, 14 및 21의 경우 8m로서 정점 간 수심의 차이를 보였다. 빈산소 수괴가 선소 인접지역에서는 전 층에 존재하였으나, 요트경기장 인접지역에서는 4~6m 수심의 저층에 존재하였다. 그런데, 호도마을 인접지역의 조사 정점 9, 14 및 21의 경우 4~6m 층에서 빈산소 수괴가 나타나고 이심에는 빈산소가 발생되지 않았다. 조사 시기에 동북동풍의 매우 강한 바람에 의하여 가막만의 서부연안을 따라 흐르는 남향류가 강해져 빈산소 층이 확대되면서 요트경기장 인접지역의 4~6m 수심의 저층 빈산소 수괴가 해안선을 따라 썰기 형태로 밀려 들어와서 상대적으로 수심이 깊은 호도마을 인접지역의 중층에 빈산소 수괴가 발생되었을 수가 있다.

빈산소 수괴 발생지역 내에서의 클로로필 *a* 농도는 빈산소 발생 수심대에서만 낮은 값을 보였는데, 이는 시간의 흐름에 따른 빈산소 수괴의 발생과 소멸 과정(김 등, 2006)에서 점차 영역이 감소하는 소멸기 시점의 현상으로 판단된다. 또한, 가막만 소호 인근해역에 저층의 빈산소화 현상이 동물플랑크톤 출현 종수와 출현 개체수에 직접적인 영향을 미치고(문 등, 2006), 빈산소 발생시 저서동물군집의 출현종수와 다양도가 낮고 일부 지역은 무생물 구역이 발생되었다(윤 등, 2007).

일반적으로 물고기들이 수면위로 올라와서 호흡을 하는 것을 입 올림 현상이라고 한다. 이러한 현상은 수중의 용존산소 양이 줄어들게 되어 물고기들이 산소 결핍으로 인한 호흡곤란이 오기 때문에 입속에 물을 머금고 대기 중의 산소와의 혼합을 용이하게 하려고 수면으로 접근해 호흡을 하기 때문이다(Domenici, 2007). 하지만 이런 입 올림을 한다고 필요한 산소를 100%충족시키지 못하고 미량의 산소만을 얻게 된다. 입 올림과 함께 부족하지만 물속에 있는 용존산소를 이용하는 호흡을 동시에 하기 때문에 어느 정도의 시간 동안은 부족한 용존산소에서도 살아남을 수 있다.

가막만 북부 상단인 학동 선소 인접지역에는 상습적인 빈산소로 인하여 해저면에 주로 서식하는 문절망둑 무리들이 수면위로 올라와 산소결핍에 따른 입 올림을 하였다. 그러나, 표층에는 용존산소가 거의 없어 입 올림만으로는 생명이 필요한 산소를 충족시키지는 못하여(Kramer, 1987; Takahashi et al., 2009), 지속적으로 입 올림을 하다가 산소 부족에 의해 폐사한 것으로 판단된다.

5. 결론

빈산소 수피는 전세계적으로 얇은 연안의 바다에서 생태적으로 위협적인 영향을 미치고 있다. 한반도 남해동부연안의 가막만의 저층 빈산소 수피는 6월 말 전소 인접지역에서 최초 발생하여 8월 초에 만의 중앙부까지 확장되었다가 8월 중순이후 점차 그 영역이 감소하여 9월 중순에 소멸되는 것으로 알려져 있다. 이러한 일련의 과정중 가막만 전소 인접지역의 북서부 내만역의 연안을 따라 형성되어 있는 빈산소 수피 소멸기의 이화학적 특성은 다음과 같다.

1. 기상청의 여수지역 바람 시계열을 살펴보면, 바람의 방향은 동북동풍이었으며, 2007년 8월 30일 밤에는 풍속이 14.1m/sec 로 강하게 불었다.
2. 표층수와 저층수의 용존산소 농도는 빈산소 수피에서 각각 1.3mgL^{-1} 와 2mgL^{-1} 이하, 그 외 지역은 각각 $4.5\sim 6.8\text{mgL}^{-1}$ 와 $3.8\sim 6.0\text{mgL}^{-1}$ 로 양호한 농도를 보였다.
3. 빈산소 지역의 클로로필 *a* 농도는 표층 $4.9\sim 25.3\mu\text{gL}^{-1}$, 중층이 $2.3\sim 23.1\mu\text{gL}^{-1}$, 저층은 $1.9\sim 9.0\mu\text{gL}^{-1}$ 범위였다.
4. 가막만 빈산소 수피 소멸시기의 수직적 형태는 3가지였다.
 - 1) 전소주변에서 빈산소 수피가 전 수심 층에서 발생되면서 어·패류의 폐사가 일어났다.
 - 2) 일반적인 빈산소 수피 발생 형태인 저층에서부터 빈산소 수피가 발생하였다.
 - 3) 수온 역전 현상이 일어나면서 중층에서만 빈산소 수피가 발생하였고 저층에는 빈산소 수피가 발생하지 않은 형상을 보였다.
5. 전 수심층에서 빈산소 수피가 발생한 전소지역에서는 해저면에 주로 서식하는 문절망둑 무리들이 수면위로 올라와 산소결핍에 따른 입 올림을 하였으며, 폐사된 생물들은 주로 문절망둑으로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 국립수산물연구원(RP-2010-ME-028)의 지원에 의해 수행되었습니다. 자료해석에 많은 도움을 준 박성은 박사에게 심심한 감사를 드립니다. 본 원고에 대한 익명의 두 분 심사위원의 세심한 심사와 지적들은 논문의 질을 높일 수 있는 좋은 기회가 되었기에 이에 감사드립니다.

참고 문헌

- [1] 기상청(2010), 날씨관측자료 <http://www.kma.go.kr/weather/observation/currentweather.jsp> on June 14.
- [2] 김정배, 이상용, 유준, 최양호, 정창수, 이필용(2006), 가막만 빈산소 수피의 특성, 해양환경공학회지, 제9권, 제4호, pp. 216-224.
- [3] 김정배, 이상용, 정춘구, 정창수, 손상규(2007), 피조개 양식시 살포시기와 환경 특성의 연구, 양식학회지, 제20권, 제1호, pp. 31-40.
- [4] 노일현, 윤양호, 김대일, 박종식(2006), 가막만 표층퇴적물중 유기물량의 시공간적 분포 특성, 한국해양환경공학회지, 제9권, 제1호, pp. 1-13.
- [5] 문성용, 서호영, 최상덕, 정창수, 김숙양, 이영식(2006), 가막만 동물플랑크톤의 수층 분포에 미치는 저산소화의 영향, 한국환경생물학회지, 제24권, 제3호, pp. 240-247.
- [6] 박성은, 조규대, 홍철훈, 김동선, 조광우(1999), 가막만의 해수유동에 미치는 바람의 영향, 한국수산학회지, 제32권, 제5호, pp. 674-679.
- [7] 신현출(1995), 가막만의 저서다모류군집, 한국해양학회지, 제30권, 제4호, pp. 250-261
- [8] 이규형(1992), 가막만의 해수유동 패턴, 한국어업기술학회지, 제28권, 제2호, pp. 117-131.
- [9] 이규형, 조규대(1990), 가막만의 수온과 염분의 분포, 한국수산학회지, 제23권, 제1호, pp. 25-39.
- [10] 이필용(1993), 원문만에서 저산소 수피의 출현과 계절적 변동, 한국수산학회지, 제26권, 제4호, pp. 392-400.
- [11] 오현택, 김다정, 이원찬, 정래홍, 홍석진, 강양순, 이용우, Charles Tilburg(2008), 제17권, 제10호, pp. 1155-1167.
- [12] 윤상필, 정래홍, 김연정, 김성수, 이재성, 박종수, 이원찬, 최우정(2007), 가막만의 저서환경과 다모류군집 특성, 한국해양학회지-바다, 제12권, 제4호, pp. 287-304.
- [13] 윤상필, 김연정, 정래홍, 문창호, 홍석진, 이원찬, 박종수(2008), 가막만의 2005년과 2006년 동계 저서환경 및 대형저서다모류군집구조, 한국해양학회지-바다, 제13권, 제1호, pp. 67-82.
- [14] 윤양호(1995), 가막만 북부해역의 해양환경과 식물플랑크톤 군집의 변동특성, 1. 식물플랑크톤 군집의 계절동태와 적조원인생물, 여수대학교 수산과학연구소 연구보고, 제4권, 제4호, pp. 1-15.
- [15] 윤양호(2000), 가막만 북서부해역 식물플랑크톤 군집의 시·공간적 분포 특성, 여수대학교 수산과학연구소 논문집, 제9권, pp. 34-47.
- [16] 윤종성(1998), 연안역에서의 저층 빈산소수의 용승현상(청조현상)에 관한 연구, 한국환경과학회지, 제7권, 제3호, pp. 291-299.
- [17] 윤종성(1999), 성층수역에서 저층의 빈산소수의 혼합 및 용승현상에 관한 연구(II), 대한토목학회, 제19권, 제II-5호, pp. 575-583.
- [18] 임현식(1993), 진해만의 저서동물에 대한 생태학적 연구, 국립수산대학교, 박사학위논문, p. 311.
- [19] 조은일, 박청길, 이석모(1996), 가막만의 환경용량 산정(1)-생태계모델을 이용한 기초생산력 산정, 한국수산학회지, 제29권, pp. 369-385.
- [20] 조현서, 유영석, 이규형(1994), 가막만 수질 및 저질 환

경의 계절별 변동 특성, 여수산대학교 수산과학연구소 연구보고, 제3권, pp. 21-34.

- [21] 최우정, 박청길, 이석모(1994), 진해만의 빈산소 수괴 형성에 관한 수치실험, 한국수산학회지, 제27권, pp. 413-433.
- [22] 해양수산부(2001), 환경관리해역 시범해역관리 시행계획 수립연구, p. 275.
- [23] 해양수산부(2005), 해양환경공정시험방법. p. 400.
- [24] Domenici, P., C. Lefrancois and A. Shingles(2007), Hypoxia and the antipredator behaviours of fishes. *Phil Trans R Soc B* 362, pp. 2105-2121.
- [25] Fujiwara, T., T. Takahashi, Y. Yamada, A. Kaneko(2000), Response of hypoxic water mass in Tokyo Bay to the variation in hydrographic condition outside of the bay. *J. Oceanogr. Soc. Japan*, Vol. 9, pp. 303-313.
- [26] Gray, J.S., R.S. Wu and Y. Y. Or(2002), Effects of hypoxia and organic enrichment on the coastal marine environment. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, Vol. 238, pp. 249-279.
- [27] Hanazato, T.(1997), Development of low-oxygen layer in lake and its effect on zooplankton communities., *Korean. J. Limnol.*, Vol. 30, pp. 506-511.
- [28] Hong, J-S.(1987) Summer oxygen deficiency and benthic biomass in the Chinhae Bay System, Korea. *J. Oceanol. Soc, Korea*, Vol. 22, pp. 246-256.
- [29] Kimura, H.(2003), 湾の物理環境-環境分析への序説, p. 148.
- [30] Kimura, H. and M. Izumi(1994), Effect of Oxygen Deficiency of the Sea Bottom on Environment of Bay, *Fisheries Engineering*, Vol. 31, pp. 41-45.
- [31] Kramer, DL.(1987), Dissolved oxygen and fish behavior. *Env. Biol. Fish.* Vol. 18, pp. 81-92.
- [32] Rabalais, N.N. and R.E. Turner(2001), Hypoxia in the northern Gulf of Mexico: Description, causes and change. p. 1-36. In: Rabalais NN and RE Turner (ed.) *Coastal hypoxia: Consequences for living resources and ecosystems. Coastal Estuarine Studies*, No. 58. Am. Geophys. Union, Washington, DC, p. 463.
- [33] Rrichards, F.A.(1965), Anoxic basins and Fijords. In: *Chemical Oceanography*, Vol. 1, Academic Press, 611-645.
- [34] Severdroup, H. U., M. W. Johnson and R. H. Fleming(1942), *The Oceans*, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N. J., p. 1087.
- [35] Takahashi, T, H. Nakata, K. Hirano, K. Matsumi, M. Iwataki, H. Yamaguchi and T. Kasuya(2009), Upwelling of oxygen-depleted water(Sumishio) in Omura Bay Japan, *J. Oceanogr.*, Vol. 65, pp. 113-120.
- [36] Vaquer-Sunyer, R. and C.M. Duarte(2008), Thresholds of hypoxia of marine biodiversity, *PNAS*, Vol. 105, pp. 15452-15457.

원고접수일 : 2010년 08월 09일

원고수정일 : 2010년 08월 26일 (1차)

: 2010년 09월 16일 (2차)

게재확정일 : 2010년 09월 24일