

학술정보 ②

연안역 빈산소 수괴의 형성과 양식장 환경

목포대학교 해양자원학과 임 현 식

1. 머리말

인구가 늘어감에 따라 우리는 보다 많은 식량 자원을 요구하고 있으며, 바다에서 이러한 식량 자원을 확보하려는 노력이 계속되고 있다. 따라서 바다에서의 수산물 생산은 그만큼 더욱 중요하게 되어가고 있으며, 그 일환으로 각 나라들은 자신들의 어장을 지키기 위해 여러 가지 어업협정을 통하여 자국내 어장에서 타국의 어선이 조업하는 것을 규제하고 있다. 우리나라도 예외는 아니어서 우리가 필요로 하는 수산물을 어떻게 조달할 수 있을까 하는 것이 중요한 관심사로 떠오르고 있다. 수산물 가운데 어패류는 우리나라 사람들의 동물성 단백질 소비량 가운데 약 40%를 차지하고 있어, 식생활에서도 수산물의 역할은 매우 크다고 할 수 있다. 따라서 수산물의 지속적인 생산과 공급의 문제는 경제적인 관점에서뿐만 아니라 국민 건강을 위해서도 중요하며, 이를 위해 많은 노력이 기울여져 왔다.

우리나라의 1998년도 수산업 총 생산량은 283만 4천톤이었으며, 이 가운데 양식어업 생산량은 약 27%인 77만 7천톤이었다. 이러한 생산량은 해에 따라 약간씩 증감은 있으나 대체로 일정한 수준을 유지하고 있다. 그러나 연근해 수산자원의 감소와 어장 축소로 인해 어획을 통한 수산물 생산량이 감소되면서 연안에서의 양식 생산에 대한 관심도

지속적으로 높아지고 있다. 최근 타결된 한일어업 협정 이후 예견되는 부족한 수산물은 결국 우리가 우리 연안에서 스스로 생산하여 해결하지 않으면 안되기 때문에 양식의 중요성은 점점 더 커져가고 있다고 할 수 있다.

지금까지 우리나라에서의 양식생산은 주로 파도의 영향이 적은 내만역이나 그 주변에서 이루어져 왔다. 이러한 연안역은 조류의 소통이 원활하지 못한 곳이 대부분이며, 진해만과 가막만 등은 그 좋은 예라고 할 수 있다. 또한 양식장으로 활용되는 연안역에는 주변으로부터 도시하수를 포함한 각종 육상기원 유기물이 유입되고 있는 실정이다. 아울러 연안양식장에서의 밀식과 연속적인 양식으로 인한 양식생물의 노폐물, 그리고 가두리 양식장에서의 어류 배설물과 잔류 먹이 등도 많이 유입되고 있다. 그 결과 연안역은 부영양화되어 적조 및 빈산소 수괴 형성과 같은 여러 가지 오염의 징후들이 나타나고 있는 실정이다.

특히, 적조는 물론이거니와 연안 양식장에서 최근 문제로 대두되는 저층 빈산소 수괴는 바닥 양식을 하는 종류나 바닥 가까이 설치된 양성 시설에서 양성하는 생물들에게는 치명적인 영향을 주게 되어 양식장의 생산력을 떨어뜨리고 있는 실정이다.

따라서 본 원고에서는 빈산소수괴 발생과 이들이 해양저서동물과 양식생물에게 미치는 영향에 대해 알아봄으로써, 양식 생산성 향상 측면에서 이

들에 대한 대책을 세우는 기본 자료로 활용하도록 한다.

2. 빈산소수피란

바다에서 살고 있는 동물은 호흡을 위해 해수에 녹아 있는 산소를 이용한다. 이러한 산소는 대기로부터 공급되거나 식물플랑크톤의 광합성 산물로 생산된다. 물 속에 녹아 있는 용존산소의 양이 적을 경우 생물은 신진대사에 필요한 충분한 양의 산소를 얻을 수 없게 되고, 이 때 산소가 풍부한 다른 곳으로 도피하지 못하면 결국 폐사하게 된다. 이동력이 있는 어류는 다른 곳으로 도피하기가 쉽지만 이동력이 부족한 저서동물 등은 산소부족으로 폐사할 가능성이 더 높게 된다. 수중생물이 필요로 하는 최저산소농도는 생물의 종류와 발육단계에 따라 차이가 있다. 운동력이 활발한 어류들은 보다 많은 산소량을 필요로 하지만, 운동력이 거의 없이 바닥의 펄 속에서 사는 갯지렁이 등은 보다 낮은 용존산소 농도에서도 견딜 수 있다.

이와 같이 생물에 따라 최저 용존산소 농도는 약간씩 다르지만 해양에 서식하는 거의 모든 종류의 생물들이 산소 결핍으로 인해 폐사하기 시작하는 용존산소 농도는 2.0mg/l (2ppm)으로 알려져 있다 (Pearson and Rosenberg, 1978). 즉, 이 농도 이하가 되면 해양에 서식하는 거의 모든 생물들이 영향을 받아 폐사하기 시작한다. 이와 같이 어떤 수피가 2ppm 이하의 용존산소 농도가 되면 그 수피는 빈산소 상태 혹은 산소결핍 상태에 있다고 하며, 영어로는 Hypoxia (hypoxic condition, oxygen deficiency)라는 용어를 사용한다. 용존산소의 양이 더욱 감소하여 0.2ppm 이하가 되면 이 때는 무산소 상태라고 하며 영어로는 anoxia (anoxic condition) 라고 한다. 이에 반해 빈산소 상태에서 정상적인 상태로 회복되거나, 정상적인 용존산소 상태일 경우를 normoxia라고 한다.

3. 빈산소 수피의 발생 메커니즘

빈산소 수피 형성에 영향을 미치는 환경 요인들로서 여름철 표층수온과 저층수온의 차이에 의해 형성되는 수온약층을 들 수 있다. 여름철에 주로 형성되는 강한 수온 약층은 표·저층 수피 사이에 하나의 장벽 역할을 하여, 산소가 풍부한 표층수가 저층수와 혼합되는 것을 차단하게 된다. 이 때 저층에서는 생물들의 호흡에 의해 용존산소가 계속 소모되고, 호기성 박테리아에 의한 유기물 분해과정에서 산소가 소모됨으로서, 산소 공급량에 비해 소비량이 클 경우 결국 저층수의 산소는 점차 고갈되게 된다.

따라서 수온 약층에 의해 형성되는 빈산소 수피는 저층으로부터 형성되기 시작하여 점차 표층으로 그 범위가 확대되는 특성이 있으며, 표층 수온이 상승하는 이른 여름부터 늦여름까지 사이에 주로 나타난다. 또한 해수 유동이 적은 만 안쪽에서부터 형성되어 점차 만 중앙부와 입구역으로 확대되는 특성이 있다. 우리나라 진해만에서 알려지고 있는 여름철 저층 빈산소 수피는 주로 수온에 의한 성층으로 인해 형성되는 것으로 알려지고 있는데, 5월부터 마산만 안쪽에서부터 형성되기 시작하여 9월에는 진해만 중앙부에 이르기까지 광범위한 해역에 걸쳐 형성되고 있다 (Lim, 1993).

수온에 의한 성층 현상 이외에도 담수가 유입되는 장소에서 해수와 담수의 염분 차이에 의해 밀도 약층이 형성될 경우 수온 약층에 의해 저층 산소가 결핍되는 것과 동일한 산소 결핍 현상이 나타난다. 그러나 염분차이에 의한 빈산소 수피의 형성은 담수가 많이 유입되는 시기와 장소에서는 언제라도 발생할 가능성이 있어 주로 여름철에 수온 약층에 의해 형성되는 빈산소 수피와는 차이가 있다. 또한 염분차이에 의한 빈산소수피 형성은 광범위한 해역에 걸쳐 발생하며 이 경우 저서성 수산자원

생물들이 대량 폐사하는 경우도 발생한다. 최근 멕시코 만에서 보고된 바에 의하면 염분 차이에 의해 형성된 빈산소 수괴로 인해 광범위한 해역에 걸쳐 저서 수산자원생물이 대량 폐사하였고 이 해역의 어업생산량이 크게 감소하였다 (Beardsley, 1997).

특히, 주변에 도시가 발달되어 있고 만 내에 양식장이 발달해 있는 내만인 경우에는 생태계내로 유입되는 유기물량도 많을 뿐 아니라, 해수 유동이 원활하지 못하여 유기물이 외해로 확산되지 못하고 만 내에 축적될 가능성이 많다. 이 때 저층으로 운반되는 입자성 유기물과 부유성 및 저서성 유기물, 그리고 퇴적물내의 유기물이 호기성 박테리아에 의해 분해됨으로서 저층수의 산소가 소모되고, 성층으로 인해 표·저층 수괴의 혼합이 제한되면 빈산소 혹은 무산소 수괴가 형성되며, 저서생태계는 치명적인 영향을 받는 것으로 알려져 있다 (Llanso, 1991).

그 구체적인 예로서, Kawabe (1975)는 일본의 Ago Bay 내만에서 여름철에 0~0.2mg/l의 빈산소 수괴를 관찰하고, 발생원인은 여름철 성층 때문이라고 지적하였다. 반면, Harper et al.(1981)은 Texas연안에서 빈산소 수괴를 관찰하고, 대량의 육수 유입으로 인한 성층이 그 원인이라고 지적하였다. 또한 Pihl et al.(1991)은 Chesapeake Bay의 York River하구에서도 6월 중순에서 9월초까지 빈산소 상태를 관찰하고, 대량의 담수유입으로 인한 표층염분의 저하와 높은 표층 수온으로 인한 성층 형성 때문이라고 하였다. 그러나 여름철이라도 태풍 등에 의해 상·하층 수괴가 교란되는 경우에는, 일시적으로 성층이 파괴되고 빈산소 수괴가 소멸되기도 하지만, 다시 성층이 형성되면 빈산소 수괴가 발달된다고 지적하고 있다.

4. 우리나라의 예

우리나라의 경우 지금까지 보고된 자료에 의하

면 빈산소수괴는 1970년대 중반부터 진해만에서 발견되기 시작하였다. 즉, 진해만에서 1975년 9월에 저층 산소농도를 측정한 결과 1.7~5.0mg/l이었으며, 마산만 해역에서는 2.0mg/l 이하의 농도를 나타내었다 (Kweon, 1979). 한편 1977년 7월 진해만 서부해역 일대에서 *Gonyaulax*에 의한 적조가 발생하여 약 1주일간 지속되었는데, 이 때 당동만에서 어의도 서북까지 5~10m층에서 용존산소 포화도는 30~80%였고, 10m 이심에서는 빈산소 혹은 무산소 상태로 포화도는 5% 이하인 것으로 보고되었다 (Cho, 1991). 또한 1974년 9월 (Kim et al., 1976) 및 1982년 5월 (Yang and Lee, 1983)에 마산만의 소모도 주변에서도 빈산소수괴가 관찰되었는데, Kim (1990)은 1985년 이후부터 매년 6월에 진해만에서 빈산소수괴가 출현한다고 지적하였다.

그러나 이와 같은 빈산소 수괴 형성이 서식 생물의 생존과 분포에 큰 영향을 미치고 있다고 정량적으로 보고된 것은, 1983년 9월 진해만 전역에서 수행되었던 Hong (1987)의 조사가 처음이라고 할 수 있다. 이 때의 저층 용존산소량은 0.11~4.49mg/l 범위로서 마산만 해역이 가장 낮았으며, 1.0mg/l 이하의 용존산소량 분포역은 고현성만 서부, 행암만 등지에서도 관찰되었다. 특히, 2.0mg/l 이하의 빈산소 수괴는 진해만 전체 면적의 약 50% 이상되는 해역에 걸쳐 형성되었으며, 저층 용존 산소량 감소에 따른 저서동물의 생체량은 감소는 뚜렷한 경향을 보였다.

그 후 Lim (1993)은 1987년부터 1990년까지 진해만에서 저서동물 군집연구를 수행하면서, 5월부터 9월까지 빈산소수괴가 형성됨을 보고하고 저서동물의 밀도 변동이 저층 용존산소량 변동과 밀접한 관계가 있음을 보고하였다. 특히, 진해-마산만에서의 빈산소수괴는 봄철인 5월에 가장 내만인 마산만에서부터 형성되기 시작하여 표층수온의

상승과 더불어 9월에는 진해만 중앙부까지 확대되고 있다 (그림 1). 또한 가조도 서측의 원문만에서도 여름철에는 빈산소수괴가 형성되는 것으로 조사되었다 (Lim et al., 1992).

지금까지 진해만에서 저층 용존산소량의 분포 양상을 서로 비교해 보면, 1983년의 빈산소수괴는 과거에 비해 더 넓은 해역에서 형성되었음을 알 수 있으며, 그 후 1989년 9월의 용존산소 분포 결과 (Lim, 1993)는 1983년 9월의 분포와 거의 유사한 양상을 나타냄으로서, 빈산소 수괴의 범위가 더 이

상 확장되지 않고 있음을 알 수 있다. 그리고 진해만의 해수 유동이나 수온 및 염분과 같은 해황을 고려할 때, 현재의 빈산소 수괴의 형성 범위는 더 확산되지 않을 것으로 생각되지만, 유기물에 의한 오염이 증가될 경우 빈산소수괴 발생 시기가 앞당겨질 가능성이 있으며, 저층으로부터 표층 가까이로 그 범위가 확산될 가능성도 있을 것으로 생각된다.

한편 진해만 이외의 장소에서도 최근 빈산소 수괴가 보고되고 있다. Lim and Park (1998)은 하구둑 건설로 인해 해수유동이 차단된 영산강 하구역에서, 규모는 작지만 빈산소 수괴 형성으로 인해 여기에 서식하는 저서동물이 영향을 받고 있음을 보고하였다. 이 경우 담수가 유입되는 하구역이라 하더라도 하구둑 건설로 인해 담수 유입량이 적을 경우에는 주로 수온 약층에 의해 빈산소수괴가 형성되는 것으로 지적되었다.

또한, 우리나라의 간척 사업 가운데 많은 문제점을 안고 있는 시화호의 경우 방조제를 건설하고 난 이후, 호수 내로 담수가 유입되면서 해수가 저층에 정체되어 염분 차이로 인해 성층이 형성되고, 주변으로부터 유입된 대량의 유기 오염물이 분해되면서 방조제 주변의 수심이 깊은 장소에서는 빈산소 혹은 무산소 수괴가 형성되었다. 그 결과 저서생물이 모두 폐사함으로써 무생물대 (azoic zone)가 존재하는 것이 보고되었다 (Hong et al., 1997).

5. 빈산소수괴 형성이 저서생물에게 미치는 영향

빈산소수괴 형성은 저서동물을 포함하여 양식 생물에게도 많은 영향을 미치고 있다. 먼저, 저층 용존산소의 결핍은 저서동물의 일시적인 대량 폐사를 초래시켜, 저서동물의 계절적, 연간 변동을 조

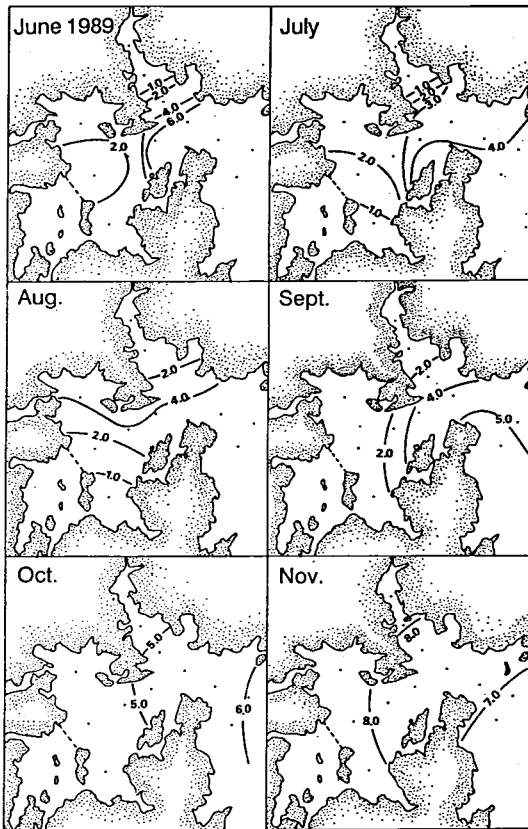


그림 1. 진해만 저층수의 용존산소 농도의 월별 공간 분포.
5월부터 마산만 안쪽에서 빈산소수괴가 발달하기 시작하여 9월의 경우 진해만의 약 절반에 해당되는 해역이 저층 산소 결핍 상태가 된다.

절하는 주된 요인 중의 하나로서 작용한다고 지적되고 있다 (Frigos and Zenetos, 1988; Holland, 1985). Harper et al.(1981)은 Texas 연안에서 봄철 대량의 육수유입 결과 형성된 빈산소 수괴로 인해 저서동물은 3,000~4,000개체/m²의 밀도에서 300~600개체/m²의 밀도로 감소하고, 다양도도 감소하였다고 보고하였다. 특히, 다모류는 빈산소수괴의 영향을 크게 받지 않으나, 옆새우류 (Amphipoda), 극피동물은 크게 영향을 받는다고 지적하였다. 또한 Zarkanellas (1979)는 지중해의 Elefsis만에서, 산소결핍이 저서동물의 종 풍부도와 밀도를 조절하는 요인이라고 지적하였다. Armtz (1981)는 Western Baltic에서의 저서동물군집은 산소결핍으로 인해 주기적으로 종 수가 감소하는데, 8월~10월 사이에 주로 발생한다고 보고하였다. 또한 Westernhagen et al.(1986)은 여름철에 빈산소 수괴로 인해 저서동물 군집의 출현종수가 30~50%까지 감소한다고 보고하였다. 특히, 극피동물, 이매패류, 갑각류는 저산소농도에 매우 민감하게 반응하여, 산소 결핍 기간동안 뿐 아니라 산소농도가 회복된 후에도 출현하지 않았다고 하였다.

외국에서 보고된 이와 같은 현상은 우리나라의 진해만에서도 유사하게 나타나고 있다. 특히, 내만 해역인 마산만, 고현성만의 경우 저층 용존산소량의 감소로 인해 저서동물의 종 수, 밀도, 다양도가 감소되며, 시간이 경과함에 따라 생물이 대량 폐사하여 일시적인 무생물 해역이 형성되는 것으로 나타났다 (그림 2). Lim (1993)은 1987년부터 1990년까지 진해만에서 저서동물 군집연구를 수행하면서, 5월부터 9월까지 빈산소수괴가 형성됨을 보고하고 저서동물의 밀도 변동이 저층 용존산소량 변동과 밀접한 관계가 있음을 보고하였다. 특히, 용존산소 농도가 1ppm 이하로 감소할 경우 저서동물은 완전히 폐사하여 일종의 무생물대(azoic zone)가

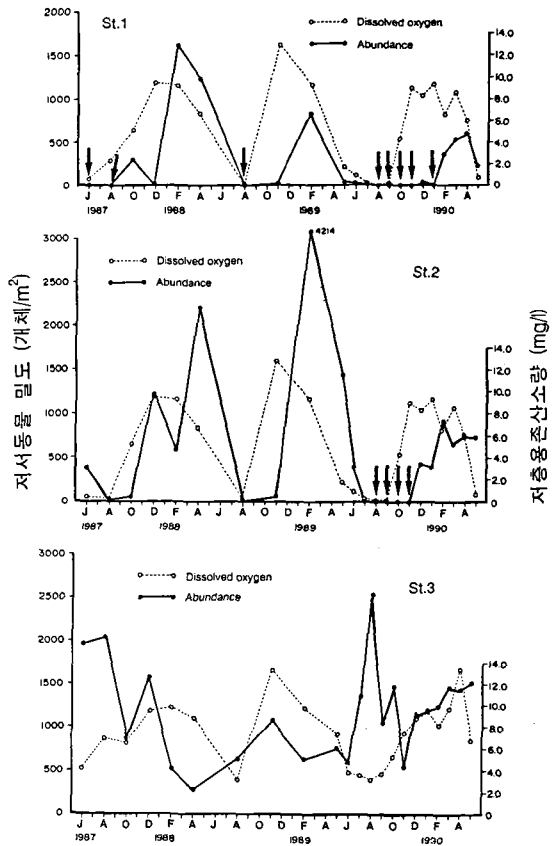


그림 2. 마산만에 위치한 정점에서 저층수의 용존 산소농도와 저서동물 밀도의 월별 변동. 저층 용존산소농도의 감소에 따라 저서동물의 밀도 감소가 뚜렷하게 나타나고 있으며, 여름철에는 일시적으로 저서동물이 모두 폐사하는 무생물 상태(화살표)가 되기도 한다.

형성되는 것으로 나타났다. 이러한 무생물대는 가을철이 되어 표·저층수괴의 혼합으로 저층 용존 산소량이 증가하여도 생물이 즉시 회복되지 않고 1개월에서 4개월이 지난 이후에 생물의 서식이 관찰됨으로서 시간 지체(time lag) 현상이 나타났다. 이와 같이 저층의 빈산소수괴의 출현은 서식생물에게 치명적인 영향을 미칠 뿐 아니라 그 해역의 생태계를 완전히 파괴하게 된다.

6. 빈산소 수괴가 양식생물에게 미치는 영향

빈산소 수괴가 양식장 주변에 형성될 경우 바다의 표층을 이용하는 양식업은 큰 영향을 받지 않는다. 왜냐하면 빈산소 수괴가 표층까지 확대되는 경우는 그리 흔하지 않기 때문이다. 그러나 저층의 바닥을 이용하여 양성을 하거나, 표층에서부터 저층까지 수하연을 수하하여 양성하는 경우에는 그 영향을 받게 된다.

진해만의 경우, 굴양식은 대체로 7m 정도 길이의 수하연을 이용하여 로프수하식 방법으로 이루어지고 있다. 이 경우 저층 빈산소수괴가 발생하여 점차 표층으로 확대될 경우 수하연 하부에 있는 참굴은 그 영향을 받게 되고 이러한 굴은 모두 폐사하게 된다. 필자는 2000년 2월에 진해만내에서 굴 양식장 조사를 하던 중 빈산소수괴 형성으로 폐사한 굴들을 관찰할 수 있었다 (사진 1).

굴 양식장의 빈산소 수괴 형성은 굴 수하연이 커튼과 같은 역할을 하여 조류소통을 방해할 뿐

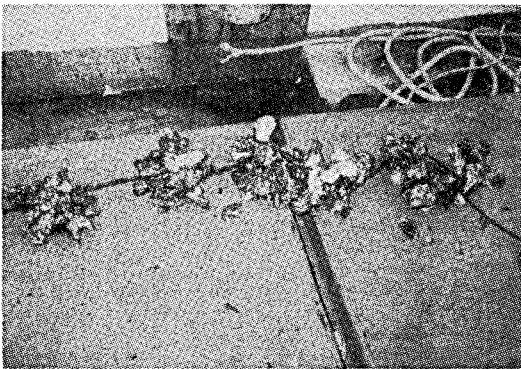


사진 1. 진해만에서 양식중인 참굴 수하연의 아랫부분에 부착된 참굴이 빈산소수괴의 영향을 받아 폐사된 모습.

이러한 장소에서는 빈산소 수괴 발생 시기에 수하연을 절반으로 접어 수하함으로서 산소결핍에 의한 영향을 피하기도 한다.

아니라, 내만이기 때문에 여름철 수온 약층이 형성되기 쉽고, 장기적인 양식으로 인해 참굴 및 각종 부착생물로부터 유래된 배설물과 육상기원 유기물이 퇴적되어 호기성 박테리아에 의한 유기물 분해시 용존산소가 많이 소모되는 등의 이유가 복합적으로 작용하기 때문이다.

또한 연안 어류 가두리 양식장의 경우, 비교적 외해에 면해 있어 조류소통이 좋은 장소에서는 잔류 먹이나 어류의 배설물이 확산되어 저층에 퇴적되지 않기 때문에 문제가 되지 않지만, 조류소통이 원활하지 못한 장소에서는 수온약층의 형성과 유기물 분해에 따른 저층 산소 고갈로 빈산소 수괴가 형성될 수 있다. 특히, 저층에서부터 형성된 빈산소 수괴가 점차 세력을 확장하여 어류 가두리가 설치된 중층 이상으로 세력이 확대될 경우 가두리내에 사육 중인 어류는 치명적인 영향을 받게 된다. 특히, 어류는 다른 생물들에 비해 산소 요구량이 크기 때문에 그 영향이 더욱 클 수도 있다.

한편, 바닥양성을 하는 양식생물에게는 빈산소 수괴가 더욱 치명적인 영향을 미치게 된다. 특히, 참굴 양식 및 피조개 채묘 등이 대대적으로 이루어지고 있는 진해만에서는 빈산소 수괴가 형성될 경우 그 피해는 보다 크게 나타날 수 있다. 진해만에서는 중앙부로부터 가조도 서부해역에 이르기까지 광범위한 해역에는 피조개 종묘 생산용 채묘시설이 매년 시설되고 있다. 진해만에서 피조개 유생은 9월경에 부착기에 달하는 것으로 보고되어 있는데 (Yoo et al., 1988), 이 시기는 진해만에서의 빈산소 수괴의 규모가 최대가 되는 시기와 대체로 일치하고 있다. 아직까지 빈산소 수괴가 채묘에 미치는 영향이 대해서는 조사가 된 적이 없으나, 부착기에 달한 피조개 유생이 저층 분포형인 것을 감안하면 산소결핍에 의한 영향을 배제할 수 없다. 특히, 그 해 여름에 태풍이 없어 수괴가 교란되지 않고 평온한 날, 특히 더운 날씨가 계속된다면 빈산소

수괴의 형성이 촉진되고 그 해의 피조개 채묘는 영향을 받을 가능성도 있다. 이 점에 대해서는 보다 세밀한 연구를 통해 그 상관성을 밝히고 연관성이 있다면 피해 저감방안을 찾아야 할 것이다.

7. 맺음말

이제 우리 연안역에서 여름철 빈산소 수괴의 형성은 희귀한 일이 아니다. 따라서 빈산소수괴의 형성으로 인한 양식장의 피해를 최소화하기 위해서는 연안어장에 대한 정화와 함께 빈산소수괴 형성을 정확히 예측하고 예보할 필요가 있다. 연안역에서의 빈산소 수괴의 형성은 주로 물리적인 해황에 따라 영향을 받기 때문에 보다 정밀한 연구를 수행한다면 충분히 예측 시스템을 구축할 수 있을 것으로 판단된다. 특히, 어루 가두리 양식장의 경우 적조 예보와 마찬가지로 빈산소 수괴에 대한 예보도 동시에 이루어져야 할 것이다. 빈산소수괴의 형성이 예상되거나 형성되었을 경우, 이를 양식업 경영자에게 예보하여 조치를 취하게 하고 또한 산소발생기를 가동시키는 등의 대응을 통해서 그 피해를 최소화 할 수도 있을 것이다. 아울러 연안역의 유기 오염이 결국 빈산소수괴 형성을 촉진시키기 때문에 육상에서 유입되는 유기오염물의 연안어장으로의 유입도 가능한 줄이도록 대책을 강구해야 할 것이다. 결국 바다로 유입되는 유기물량을 줄이도록 노력해야 할 것이다.

최근 적조 발생시 황토를 살포하여 제거하는 경우가 많은데, 황토가 적조생물을 응집시켜 바닥으로 침강시키기 때문에, 표층의 해수로부터는 적조생물이 제거되지만 결국 저층으로는 대량의 유기물이 공급되는 결과를 초래하게 된다. 따라서 연안에서 황토 살포로 인한 저층으로의 유기물 공급이 저서생태계에 미치는 영향도 동시에 검토해야 할 것이다.

지금까지 우리나라 연안에서 최근 점차 문제점으로 대두되는 빈산소 문제에 대해 설명하였다. 결론적으로, 빈산소 수괴는 연안역의 저서생태계를 파괴할 뿐 아니라 양식생물에게도 심각한 영향을 미치기 때문에 보다 적극적인 방법으로 그 형성시기에 대한 예보 시스템과, 발생하였을 경우 그 피해를 최소화할 수 있는 대책을 강구해야 할 것이다. 이를 위해 관련분야의 유기적인 연구가 필요하며 예산도 뒷받침되어야 할 것이다.

8. 참고문헌

- Arntz, W. E. 1981. Biomass zonation and dynamics of macrobenthos in an area stressed by oxygen deficiency. In *Stress effects on natural ecosystems*. G. Barret and R. Rosenberg, ed. John and Wiley and Sons, N.Y. pp.215-225.
- Beardsley, T. 1997. Death in the deep: "Dead zone" in the Gulf of Mexico challenges regulators. *Scientific American*, November, 11-12.
- Cho, C. H. 1991. Mariculture and eutrophication in Jinhae Bay, Korea. *Mar. Pollut. Bull.* 23, 275-279.
- Friligos, N. and A. Zenetos, 1988. Elefsis Bay anoxia: nutrient conditions and benthic community structure. *P.S.Z.N.I. Mar. Ecol.* 9(4), 273-290.
- Harper, D. E., L. D. McKinney, R. R. Salzer and R. J. Case. 1981. The occurrence of hypoxic bottom water off the upper Texas coast and its effects on the benthic biota. *Contributions in Mar. Sci.* 24, 53-79.
- Holland, A. F. 1985. Long-term variation of macrobenthos in a mesohaline region of Chesapeake Bay, *Estuaries* 8(2A), 93-113.
- Hong, J. S. 1987. Summer oxygen deficiency and benthic biomass in the Chinhae Bay System, Korea. *J. Oceanol. Soc. Korea* 22(4), 246-256.
- Hong, J. S., R. H. Jung, I. S. Seo, K. T. Yoon, B. M. Choi and J. W. Yoo. 1997. How are the spatio-temporal distribution patterns of benthic macrofaunal communities affected by the con-

- struction of Shihwa dike in the west coast of Korea?. J. Korean Fish Soc. 30(5), 882-895.
- Kawabe, R. 1975. Benthic animals of Ago Bay. Science Rep. Shima Marineland (3), 30p.
- Kim, H. G. 1990. Characteristics of flagellate red tide and environmental conditions in Masan Bay. Bull. Nat'l Fish. Res. Dec. Agency 43, 1-40.
- Kim, J. M., S. D. Chang and H. R. Kim. 1976. Environmental studies on Masan Bay. Bull. Korean Fish. Tech. 22(3), 29-35.
- Kweon, S. W. 1979. Studies on the distribution of dissolved oxygen on Jinhae Bay in Summer. Bull. Nat'l Fish. Res. Dec. Agency 22, 7-20.
- Lim, H. S. 1993. The study on the macrozoobenthic ecology in Chinhae Bay, Korea. Ph. D thesis Nat'l. Fish. Univ. of Pusan, 311pp.
- Lim, H. S. and K. Y. Park. 1998. Community structure of the macrobenthos in the soft bottom of Yongsan River estuary, Korea. J. Korean Fish. Soc. 31(3), 343-352.
- Lim, H. S., J. W. Choi, J. G. Je and J. H. Lee. 1992. Distribution pattern of macrozoobenthos at the farming ground in the western part of Chinhae Bay, Korea. Bull. Korean Fish. Soc. 25(2), 115-132.
- Llanso, J. R. 1991. Tolerance of low dissolved oxygen and hydrogen sulfide by the polychaete *Streblospio benedicti*. J. Exp. Mar. Biol. Ecol. 153, 165-178.
- Pearson, T. H. and R. Rosenberg. 1978. Macrobenthic succession in relation to organic enrichment and pollution of the marine environment. Oceanogr. Mar. Biol. Ann. Rev. 16, 229-311.
- Pihl, L., S. P. Baden and R. J. Diaz. 1991. Effects of periodic hypoxia on distribution of demersal fish and crustaceans. Mar. Biol. 108, 349-360.
- Westernhagen, H. von, W. Hickel, E. Bauerfeind, U. Niermann and I. Kroncke. 1986. Sources and effects of oxygen deficiencies in the south-eastern North Sea. Ophelia 26, 457-473.
- Yang, D. B. and K. W. Lee. 1983. Vertical distributions and diurnal variations of dissolved nutrients and chlorophyll a in Masan Bay. Bull. KORDI 5, 9-13.
- Yoo, S. K., H. S. Lim and H. Y. Ryu. 1988. Occurrence and survival rate of the larvae of arkshell *Anadara broughtonii* in Chinhae Bay. J. Oceanol. Soc. Korea 23(2), 70-75.
- Zarkanelas, A. J. 1979. The effects of pollution induced oxygen deficiency on the benthos in Elefsis Bay, Greece. Mar. Environ. Res. 2, 191-207.