

빈산소 수괴해역 용존산소 환경개선장치 개발과 현장 적용

이용화* · 김영숙** · 심정민*** · 권기영***

*, ** 국립수산과학원 어장환경과, *** 국립수산과학원 동해수산연구소

Development of a Field Oxygenation Device and Its Practice in the Oxygen Depleted Water Mass

Yong-Hwa Lee* · Young-Suk Kim** · Jeong-Min Shim*** · Kee-Young Kwon***

*, ** Marine Environment Research Division, National Fisheries Research and Development Institute

*** East Sea Fisheries Research Institute, National Fisheries Research and Development Institute

요 약 : 빈산소 수괴는 산소 부족뿐만 아니라, 용존산소의 결핍에 따른 혐기 상태에서 생성된 황화수소와 암모니아 등 유독가스가 어·패류를 직접 폐사시키거나, 저서생물 군집의 출현종과 개체 수에도 심각한 영향을 미친다. 본 연구에서는 빈산소 수괴가 발생한 해역의 저층 해수를 펌핑하여, 액체산소를 용해시켜 용존산소 농도를 20 mg/L 이상으로 상승시킨 해수를 다시 저층으로 주입하는 장치를 개발하여 그 효능을 검토하였다. 이 장치를 이용하여 해수를 3.6 m³/min 용량으로 저층에 주입하면서 액체산소를 분당 4.8~26.3 L 범위로 공급할 때, 단시간에 해수 중 용존산소 농도는 7~25 mg/L로 상승하였다. 이때 공급한 액체산소는 해수 중에 90% 이상 용해되는 것으로 나타났다. 본 장치는 산소를 용해시키기 위한 별도의 탱크가 필요 없고, 해수를 수면위로 퍼 올리는 높이가 낮아도 되므로 적은 동력을 이용하여 높은 효율로 고농도의 산소를 저층에 공급할 수 있는 것으로 나타났다. 그러므로 본 장치는 연안 및 호소의 저층 빈산소 수괴 발생을 저감시킬 수 있어 빈산소 수괴 발생으로 인한 양식피해를 저감시킬 수 있을 것으로 기대된다.

핵심어 : 빈산소 수괴, 산소용해장치, 양식생물 폐사, 고농도 산소함유 해수, 어장환경 개선

Abstract : Oxygen depleted water mass can damage aquatic animals not only in direct way but also in indirect way by generating toxic substances including occurrence of hydrogen sulfide and ammonia which are also highly detrimental to animal life in the water mass. An oxygen dissolution device was developed, which makes turnover of the oxygen rich (over 20 mg/L) surface water down to the bottom where hypoxia is evident and tested the device in terms of oxygen recovery in the oxygen depleted bottom water. The device with turnover rates of 3.6 m³/min at the liquid oxygen injection rate of 4.8~26.3 L/min could recover dissolved oxygen level to 7~25 mg/L at depth 7 m to lead to the dissolution level of over 90% by the supply of liquid oxygen. The running advantage of the device is that it does not require any auxiliary tank and higher energy for operation. Therefore, it can be highly useful device to relieve damages to the farmed animals in the oxygen depleted waters.

Key Words : Oxygen depleted water, Oxygen dissolution device, Mass mortality, Seawater of the high concentrated dissolved oxygen, Fishery environmental improvement

1. 서론

빈산소 수괴란 수중의 용존산소가 부족한 물 덩어리를 말한다. 빈산소 수괴를 정의하는 용존산소 농도의 기준을 명확하게 나타내기는 어렵지만, 해수중의 용존산소 농도가 2.5 ml/L(3.6 mg/L) 이하로 떨어지게 되면 저서동물이 폐사하기 시작하므로(Pearson and Rosenberg, 1978), 우리나라에서는 대체로 3 mg/L 이하를 빈산소 수괴로 정의하고 있다.

빈산소 수괴는 해수의 교환이 원활하지 못한 내만에서 하계에

강우유입이나 수온상승 등으로 인한 밀도 약층이 형성될 때, 표층에서 저층으로 산소 공급은 제한되는 반면 유기물 분해 등으로 저층수중의 용존산소 소모가 클 경우 발생한다.

우리나라에서 빈산소 수괴 발생으로 인한 양식생물 폐사에 대한 보고는 1978년 진해만 적조와 양식 굴 대량폐사 원인을 규명하는 과정에서 대규모의 적조에 의한 저층수의 빈산소 혹은 무산소화에 의한 질식사(사)가 주 원인인 것으로 밝혀진 것이 처음이다(조, 1979). 국립수산진흥원에서 1971년부터 1981년까지 조사한 자료를 바탕으로 발간한 사업보고서 58호 '한국 연안 어장 보전을 위한 환경오염조사연구'에도 당시 진해만

* 대표저자 : 정희원, dragon@nfrdi.go.kr, 051-720-2540

하계에 지속적으로 빈산소 수괴가 발생하고 있었음을 보여주고 있다(국립수산진흥원, 1983). 또 1983년 진해만 전체 해역인 497 km²의 54% 해역에서 여름철 저층 용존산소농도 2.0 mg/L 이하인 빈산소 수괴가 발생하였다는 보고(홍, 1987)가 있었으며, 그 이후에도 매년 진해만에서는 여름철에 빈산소 수괴가 발생하는 것으로 보고되고 있다(국립수산과학원, 2009).

빈산소 수괴가 발생하면 어·패류의 호흡이나 생리작용에 직접적으로 영향을 미치고, 저서생물 군집의 출현종과 개체수에도 민감하게 영향을 미치는 것으로 보고되고 있다(Karim et al., 2003; Wu, 2002; Hong, 1987; 최 등, 1994; 윤 등, 2007; 윤 등, 2008). 또한 용존산소의 결핍에 따른 혐기적인 상태에서는 퇴적물의 유기물 분해 시 황화수소와 암모니아가 생성되어 생물의 분포와 이주에 제한 요인으로 작용할 수 있는 것으로 알려져 있다(윤 등, 2007). 연안역에서 나타나는 저층수 빈산소화는 저서생물에 직접적인 영향을 미친다(윤, 1998). 또한 산소가 부족한 저층수가 바람의 영향으로 용승할 경우 직접적인 생물폐사를 초래하며, 수역의 자연정화 기능을 상실시킬 수 있는 것으로 알려져 있다(윤, 1998; 윤, 1999). 빈산소 수괴의 형성은 동물플랑크톤의 개체수를 감소시키고 종 천이를 유발시키기 때문에 동물플랑크톤에 의한 식물플랑크톤 섭취가 감소하여 식물플랑크톤의 대 발생이 장기화 될 수 있다(Hanazato, 1997; 윤, 1998; 문 등, 2006).

빈산소 수괴 발생으로 인한 양식생물 폐사를 막기 위하여 강제 폭기, 준설, 저질피복, 식생정화, 강제순환 등의 방안이 시도 되고 있다. 최근에는 양식장 인근에서 저층수를 흡인, 중층으로 방류하는 강제순환 방식도 도입되고 있다(Mizumukai, 2008). 또한 빈산소 상태의 저층수를 수면위로 펌핑하여 수면위의 산소용해탱크에서 고농도의 산소를 용해시켜 저층으로 주입하는 방법도 시도되고 있다(西日本新聞, 2009). 본 연구에서는 수면위에 산소용해탱크가 없는 고농도 산소 함유 해수를 저층으로 공급하는 산소공급 장치를 개발하여 그 성능을 검토하고자 한다.

2. 재료 및 방법

2.1 산소공급 장치의 기본 원리

산소공급 장치의 기본 원리는 Fig. 1과 같다. 일반적으로 산소 기포(B)는 수중에서 기체의 부력에 의한 상승속도(A)를 가지므로 수중에서의 체류시간이 짧아 수중 용해도가 낮다.

그러나 기체의 상승속도(A) 보다 약간 빠른 하강속도(D)를 가지게 되면 기포는 수체의 하강속도(D)와 기포의 상승속도(A)의 차이(D-A) 만큼 천천히 하강하게 된다. 그러므로 기포는 수중에 체류하는 시간이 길어져 수중에 용해될 충분한 시간을 가지게 된다. 또한 기포가 수체와 같이 하강하여 수심이 깊어지면 그만큼 수압이 높아지기 때문에 헨리의 법칙에 따라 기체는 수중에 빨리 용해된다.

2.2 예비 실험장치

산소용해장치 설계를 위한 기초실험에 사용된 시험 장치는 Fig. 2와 같다. 양식 수조동 옥상(높이 14m)에 2톤 용량의 수조를 설치하고 수조 유출구에 직경(ID) 9cm의 플라스틱 관을 연결하였다. 수조 내 해수는 아황산나트륨(Na₂SO₄)을 이용하여 용존산소 농도를 0.1~0.2 mg/L 수준으로 감소시켰다.

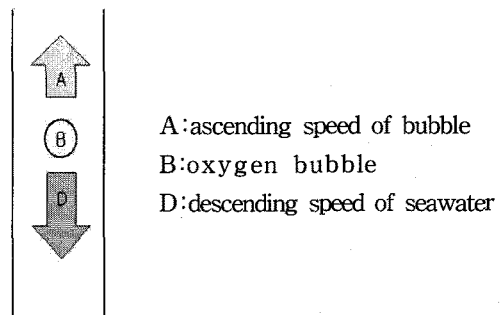


Fig. 1. Fundamental principle of oxygen dissolution equipment.

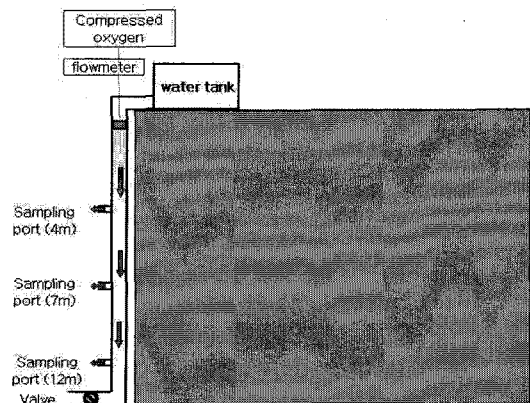


Fig. 2. Experiment equipment of oxygen dissolution efficiency in the roof.

해수 유량은 관의 하단부에 유량 조절밸브를 설치하여 유량을 1.3~12.0 L/sec로 조절하면서 유출시켰다. 산소 공급은 압축산소를 산기석을 통하여 관 상부로 공급하였다. 산소 공급량은 유량계(Thomas Scientific사의 Gilmont 40522, 32518)를 부착하여 각각 26, 80, 186 mg/sec로 조절하였다. 시료는 상부 산소를 공급한 지점으로 부터 각각 4m, 7m 및 12m 지점에서 채취하여 DO meter(YSI 6600)를 이용하여 해수 중 용존산소 농도를 측정하였다.

2.3 빈산소 수괴 개선용 산소공급장치

연안의 빈산소 수괴 발생해역의 저층에 용존산소를 공급하기 위해서는 수면위에 산소용해 탱크를 설치하여 산소를 포화시킨 다음 저층으로 공급하고 있다. 2009년 일본의 바지락 양식장의 빈산소 수괴 발생으로 인한 문제를 해결하기 위한 산소공급 장치가 서일본신문에 소개되었다(西日本新聞, 2009).

이 장치는 저층의 빈산소 해수를 펌핑하여 수면 위 바지선 위에 있는 산소용해탱크에서 산소를 고농도로 포화시켜 다시 저층으로 해수를 보내는 과정을 거친다(Fig. 3).

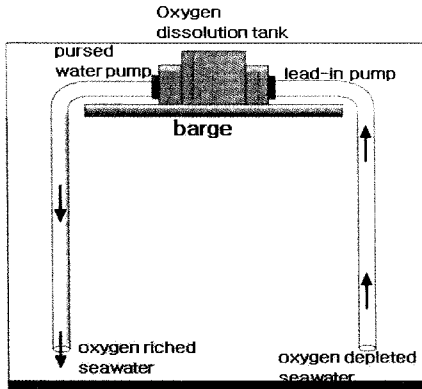


Fig. 3. Detailed figure of bottom oxygen supply equipment in Japan.

본 실험에 사용한 장치는 펌프를 부착한 직경 20 cm의 내부관과 직경 50 cm의 외부관으로 구성되어 있고, 외부관의 길이는 약 8 m 정도이다. 내부관은 상부 끝이 수면 근처에 위치하고, 외부관의 상부 끝은 수면위로 약 50 cm 정도 올라오게 고정시킨다. 내부관의 하단은 빈산소수가 있는 수심에 위치시켜 펌프를 이용하여 저층에 있는 빈산소수를 수면 위 10~30 cm 정도만 양정하면 수면위로 올라온 해수는 수면과의 위치에너지 차로 인하여 외부관을 통하여 다시 저층으로 들어간다. 이때 하강하는 빈산소수에 산소를 공급하면 해수가 저층으로 하강하는 동안 공급한 산소는 해수 중에 용해되도록 설계되어 있다.

이 장치를 기존에 이용되고 있는 산소용해장치와 비교하면 바지선 위에 별도의 산소용해를 위한 탱크가 필요 없으므로 시설비를 줄일 수 있다. 또한, 기존 장치는 산소 용해 시간을 줄이기 위하여 탱크 내 압력을 높여주어야 하는데, 이로 인하여 탱크로 주입하는 펌프의 용량이 커야 하는 데 비하여, 본 장치는 양정이 10~30 cm 정도이므로 기존 시설과 비교하면 동력비를 획기적으로 줄일 수 있도록 고안되었다(Fig. 4).

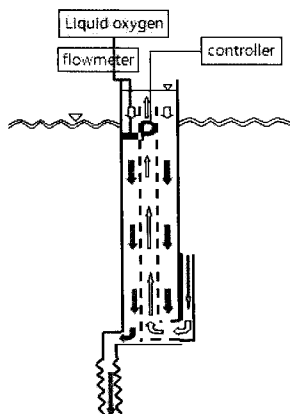


Fig. 4. Bottom oxygen supply equipment.

본 시험은 강원도 강릉시에 위치한 석호 중 하나인 향호에 설치하여 운전하였다. 향호는 수심 2~3m의 얇은 호소이나 과거 준설로 인하여 일부 수역은 최대 수심이 15m에 이른다(Fig. 5).

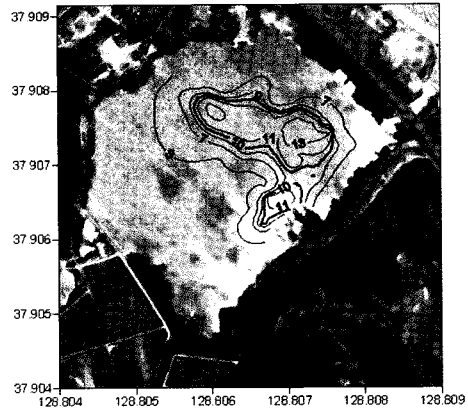


Fig. 5. Map of water depth in Hyang-Ho.

향호는 석호의 특성상 저층은 염분농도가 높아 연중 안정된 수층을 유지한다. 2009년 9월 17일 조사한 향호의 수온, 염분 및 용존산소농도의 수직분포 자료에서도 수심 2m 이심에서는 용존산소 농도가 거의 없는 혐기성 상태를 유지하는 것으로 나타나, 본 장치의 성능을 실험할 수 있는 적합한 장소였다(Fig. 6, Fig. 7).

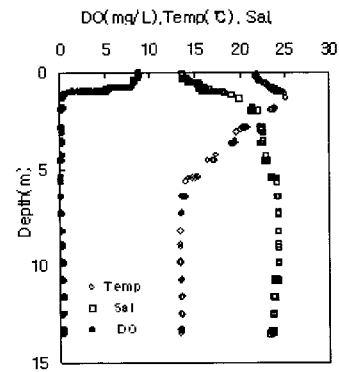


Fig. 6. Water temperature, salinity and oxygen in Hyang-Ho.

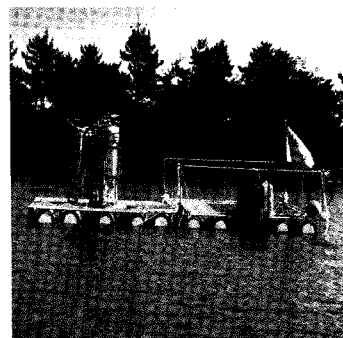


Fig. 7. Oxygen supply equipment in Hyang-Ho.

본 장치의 효능 실험은 펌프의 용량과 산소공급량을 각각 변화시키면서 외부관을 통하여 하강하는 해수중의 용존산소농도를 측정하였다. 용존산소 측정 지점은 외부관 내 산소 공급부를 기점으로 수심별로 DO meter(YSI 6600)를 이용하여 용존산소 농도를 측정하였다.

해수 유량은 펌프에 부착된 제어를 통하여 분당 2.4 m³(일 1,100 m³) 및 3.6 m³(일 1,500 m³)로 조절하면서 Hydro-bios사의 Model 438115 유량계를 이용하여 확인하였다. 산소 공급량은 유량계(Thomas Scientific사의 Gilmont 40522, 32518)를 이용하여 분당 4.8~26.3L 범위로 조절하였다.

또한 2주간에 걸친 장치의 효능 실험이 끝난 다음 장치설치 지역과 설치 지점으로부터 북쪽으로 10m 및 20m 이격된 지점에서 수층별 용존산소 농도를 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3. 1. 예비실험의 결과

산소 공급량 26 mg/L, 80 mg/L 및 186 mg/L일 경우 공급 해수 유량을 1.3~12.0L/sec 변화시켰을 때 수심 4m, 7m 및 12m에서의 용존산소 농도는 Fig. 8과 같다.

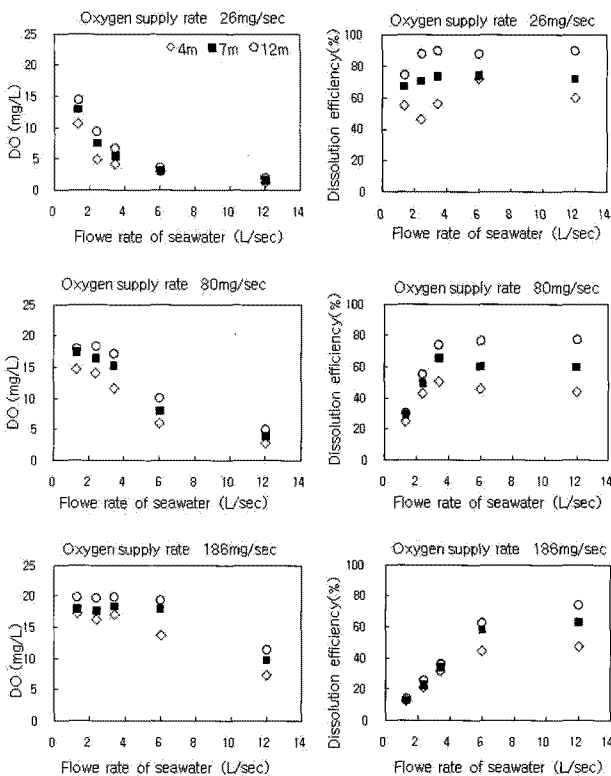


Fig. 8. Dissolved oxygen concentration(left) and oxygen dissolution efficiency(right) with depth according to the oxygen supply and the fluctuation of flux in seawater.

산소 용해율은 단위 시간당 산소 공급량(mg/sec)을 단위 시간당 해수 공급량(L/sec)으로 나눈 값(mg/L)을 공급 산소가 100% 해수 중에 용해된 것으로 보고 실제 산소 농도와 비교하여 구하였다. 초당 26 mg의 산소를 공급하였을 때 수심 7m에서는 70% 이상의 용해효율을 보였고, 수심 12m에서는 유량 1.3L/sec를 제외하면 90% 이상의 용해효율을 보였다. 초당 80 mg의 산소를 공급하였을 때는 해수 유량 4L/sec 이상에서 수심 4m에서는 약 50%, 수심 7m에서는 약 60% 그리고 수심 12m에서는 70% 이상의 용해효율을 보였다. 산소 공급량이 초당 186 mg인 경우 유량 4L/sec 이하의 경우 용존산소 농도는 15 mg/L 이상이었으나 용해효율은 40% 이하였고, 유량 6L/sec 이상인 경우에도 용해효율은 80% 이하로 나타났다.

상기 결과에서 대체로 산소공급량이 높을수록, 그리고 수심이 깊을수록 용존산소 농도는 증가하는 것으로 나타났다. 산소공급량이 많거나 해수의 유하속도가 낮은 경우 산소 기포들이 충돌하여 기포 입자 사이즈가 커지면서 부력이 높아져 해수와 함께 유하하지 못하고 부상함으로 인하여 용해효율이 낮은 것으로 나타났다. 그러나 본 실험은 유량의 조절 등 일부 문제점이 있었음에도 이를 보완하면 단시간에 많은 산소를 용해시킬 수 있었다는 점에서 본 산소공급 장치의 효능을 확인할 수 있었다.

3.2 빈산소 수괴가 형성된 석호 내 현장시험 및 결과

빈산소 수괴가 연중 형성되어 있는 강원도 강릉시에 위치한 석호 중 하나인 향호에 본 장치를 설치하여 운전하였다. 본 장치의 효능 실험은 내부 펌프의 용량을 변화시키고, 동시에 산소공급량을 변화시키면서 장치 내에서 산소 공급부를 기점으로 수심별로 용존산소 농도를 측정하였다. 해수 유량은 분당 2.4 m³(일 1,100 m³) 및 3.6 m³(일 1,500 m³)로 하였고, 산소 공급량은 분당 4.8~26.3 L 범위였다.

해수 유량과 산소 공급량을 변화시킬 때 수심별 용존산소 농도는 Fig. 9와 같다. 하강하는 처리수에 산소를 공급하면 수심이 깊어질수록 용존산소 농도는 높아지다가 수심 약 6m를 지나면 용존산소의 농도는 크게 증가하지 않아 공급된 산소는 수심 6m 이내에서 거의 용해되는 것으로 나타났다.

처리 용량을 1,100 m³/d로 조절하였을 때는 수심 6m에서의 용존산소 농도는 약 5~18 mg/L였으나, 1,500 m³/d로 증가시켰을 때는 수심 6m에서의 용존산소 농도가 약 7~25 mg/L로 오히려 높게 나타나, 수심 6m에서의 용해효율은 Fig. 10과 같이 유량 1,100 m³/d에서는 63~90%였으나, 유량 1,500 m³/d에서는 90~95%로 나타났다. 이것은 산소 기포가 수중에 주입되면 기포끼리 충돌하여 보다 큰 기포가 발생하면서 부력이 커지는데, 기포의 부상속도가 처리수의 하강속도 보다 커져 용해되지 않고 손실되는 산소량이 유량 1,100 m³/d인 경우에 많았기 때문인 것으로 보인다.

그러므로 운전조건을 1,500 m³/d로 하여 산소 용해율을 90% 유지할 경우 용존산소농도 0 mg/L인 빈산소수를 용존산소농도 20 mg/L로 상승시키기 위해서는 약 33 kg의 산소가 필요하

고, 이를 금액으로 환산하면 약 12,000원 정도이다(160 kg 액체산소 한 병에 약 6만원임).

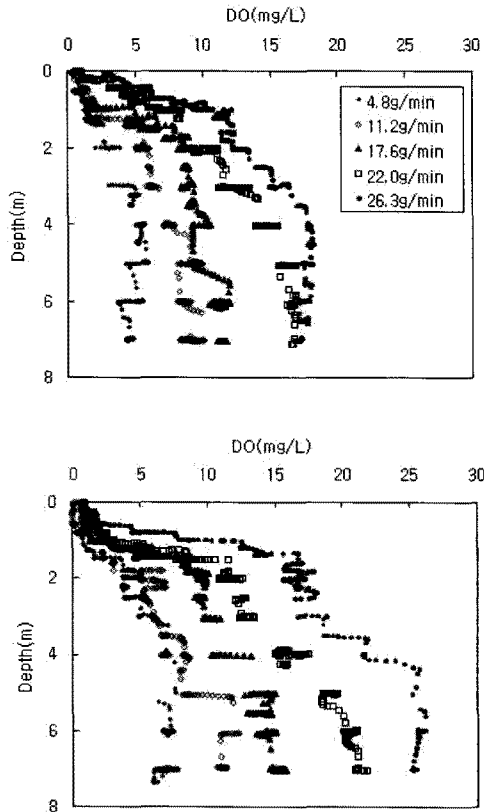


Fig. 9. Depth profile of dissolved oxygen concentration according to the variations in flux and oxygen supply.(up : 1,100 m³/d, bottom : 1,500 m³/d).

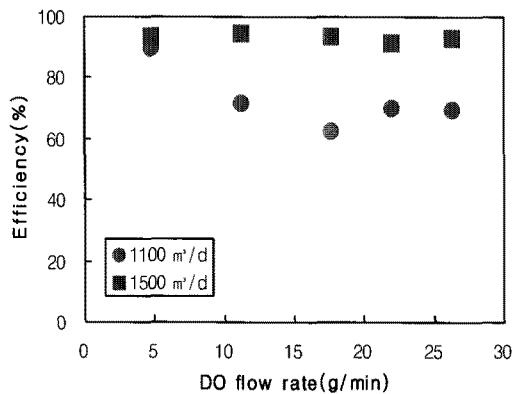


Fig. 10. Variation in oxygen dissolution efficiency at the depth of 6m in the study area.

장치의 효율 실험 후 산소공급 장치가 설치된 지점과 이로 부터 북쪽으로 각각 10m 및 20m 이격된 곳의 층별 용존산

소 농도를 측정 한 결과는 Fig. 11과 같다. 조사 당시 향호는 수심 3m 지점까지는 부영양화로 인한 식물플랑크톤의 광합성으로 인하여 용존산소 농도가 약 13mg/L 정도로 과 포화된 상태를 유지하였다. 그러나 수심 4m부터 용존산소 농도는 급격히 감소하여 수심 4m 이심에서는 1mg/L 이하의 빈산소 상태였다.

산소공급 장치를 통하여 산소가 공급된 수심 10m부터 용존산소 농도는 급격하게 증가하였다. 장치가 설치된 곳의 수심 11m 이심에서는 용존산소 농도 약 14mg/L 정도로 증가하였고, 장치가 설치된 곳으로부터 10m 및 20m 이격된 지점의 수심 12m 이심의 용존산소농도는 각각 5mg/L 및 3mg/L 정도로 나타나 장치를 통한 산소공급 효과가 높은 것으로 나타났다.

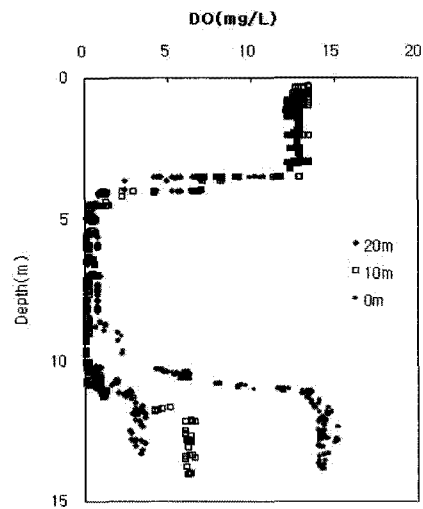


Fig. 11. Concentration of dissolved oxygen with distance of oxygen supply point.

4. 결론

본 연구는 빈산소 수괴 형성 해역의 환경 개선을 목적으로 저층 빈산소수를 펌핑하여 이를 고농도 산소가 함유된 해수로 바꾸어 다시 저층에 주입하는 장치를 개발하여 그 성능을 점검한 것이다.

개발된 장치는 유량 1,500 m³/d 내외의 범위에서 운전할 경우, 공급하는 산소의 90% 이상을 해수 중에 녹일 수 있어 빈산소수를 단시간에 고농도 함유 해수로 바꿀 수 있는 것으로 나타났다.

본 실험에서와 같이 산소 용해율이 약 90%인 경우, 1,500 m³의 용존산소농도 0 mg/L인 빈산소수를 용존산소농도 20 mg/L로 상승시키기 위해서는 약 33 kg의 산소가 필요한데, 이를 금액으로 환산하면 약 12,000원 정도이다.

그러므로 본 장치는 적은 액체산소 비용, 최소의 동력 및 적은 시설비로 고농도 산소를 함유한 해수를 저층에 공급할 수 있어, 향후 폐쇄 연안과 호소의 빈산소 수괴 발생 문제를 해결할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 국립수산과학원(RP-2010-ME-063)의 지원에 의해 수행되었습니다. 본 원고에 대한 익명의 두 분 심사위원의 세심한 심사와 지적들은 논문의 질을 높일 수 있는 좋은 기회가 되었기에 이에 감사드립니다.

참고 문헌

- [1] 국립수산과학원(2009), 한국 연안의 빈산소 수괴, p. 173.
- [2] 국립수산진흥원(1983), 한국 연안어장 보전을 위한 환경 오염 조사 연구, 사업보고 제 58호 부록, p. 252.
- [3] 문성용, 서호영, 최상덕, 정창수, 김숙양, 이영식(2006), 가막만 동물플랑크톤의 수층 분포에 미치는 저산소화의 영향, 한국환경생물학회지, 제24권 제3호, pp. 204-247.
- [4] 윤상필, 정래홍, 김연정, 김성수, 이재성, 박종수, 이원찬, 최우정(2007), 가막만의 저서환경과 다모류 군집 특성, 한국해양학지-바다, 제12권 제4호, pp. 287-304.
- [5] 윤상필, 김연정, 정래홍, 문창호, 홍석진, 이원찬, 박종수(2008), 가막만의 2005년과 2006년 동계 저서환경 및 대형저서다모류 군집구조, 한국해양학지-바다, 제13권 제1호, pp. 62-82.
- [6] 윤종성(1998), 연안역에서의 저층 빈산소수의 용승현장(청조현상)에 관한 연구, 한국환경과학회지, 제7권 제3호, pp. 291-299.
- [7] 윤종성(1999), 성층수역에서 저층의 빈산소수의 혼합 및 용승현상에 관한 연구(II), 대한토목학회, 제19권 제 II-5호, pp. 575-583.
- [8] 조창환(1979), 1978년 진해만 적조와 양식굴의 대량폐사, 한국수산학회지, 제12권 제1호, pp. 27-33.
- [9] 최우정, 박청길, 이석모(1994), 진해만의 빈산소 수괴 형성에 관한 수치실험, 한국수산학회지, 제27권 제4호, pp. 413-433.
- [10] 홍재상(1987), 1983년 하계 진해만 일대해역의 저서생물의 생태학적 연구-저서생물과 저층용존산소량과의 관계를 중심으로, 해양연구보고서, BSPE 00095-149-3, p. 103
- [11] Hanazato, T.(1997), Development of low-oxygen layer in lake and its effect on zooplankton communities., Korean. J. Limnol., Vol. 30, pp. 506-511.
- [12] Hong, J. S.(1987), Summer oxygen deficiency and benthic biomass in the Chinhae bay system, Korea. J. Oceanol. Soc. Kor., 22(4), pp. 246-256.
- [13] 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, pp. 27-42.
- [14] Mizumukai, K., T. Sato, S. Tabeta and D. Kitazawa (2008), Numerical studies on ecological effects of artificial mixing of surface and bottom waters in density stratification in semi-enclosed bay and open sea. Ecological Modelling, 214, pp. 251-270.
- [15] 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, pp. 229-311.
- [16] Wu, R. S. S.(2002), Hypoxia: from molecular responses to ecosystem responses, Marine Pollution Bulletin, 45, pp. 35-45.
- [17] 西日本新聞(2009), 고농도산소 해수 주입, 6.14일자. p. 1.

원고접수일 : 2010년 11월 05일

원고수정일 : 2010년 12월 02일

게재확정일 : 2010년 12월 23일