

미세기포 액화산소가 가두리양식장의 수온 및 산소농도에 미치는 영향

안나 · 이정규 · 이준석¹ · 최근형^{2*}

충남대학교 해양환경과학과 대학원생, ¹충남대학교 해양환경과학과 학생, ²충남대학교 해양환경과학과 교수

Effect of oxygen micro-bubble for the temperature and oxygen concentrations of fish farming facility

Na AN, Jeong Kyu LEE, Jun Seok LEE¹ and Keun-Hyung CHOI^{2*}

MS student, Department of Ocean Environmental Sciences Chung-Nam National University, Daejeon 34134, Korea

¹Student, Department of Ocean Environmental Sciences Chung-Nam National University, Daejeon 34134, Korea

²Professor, Department of Ocean Environmental Sciences Chung-Nam National University, Daejeon 34134, Korea

Mass mortality of mariculture fish due to high summer temperatures is a major issue in the mariculture industry in many coastal waters of Korea, yet measures to mitigate the impact are generally limited. We injected a micro-bubble of liquefied oxygen into the bottom of rockfish cages (about 6-8 m deep) in order to maximize the dispersal of micro-bubbled seawater and reduce fish mortality. The injection of low-temperature oxygen in micro-bubbles lowered the water temperature at the injection area by as much as 1°C and increased dissolved oxygen concentration by 0.5 ppm. In early August, following a week with persistent high water temperature (above 28.5°C), there was an increase in fish mortality despite the micro-bubble system, which resulted in approximately 7% death of the total introduced fish population. However, this mortality appeared to be much lower than mortality reported in a neighboring mariculture facility (approximately 50% mortality). We also estimated the volume that can be recirculated with pumped seawater using a micro-bubble system. We suggest that this approach of injecting liquefied oxygen through a micro-bubble system may reduce fish mortality during high temperature periods.

Keywords: Liquefied oxygen, Micro-bubble, High temperature, Rockfish

서론

적정 수온과 용존산소 농도는 어류의 성장과 생존에 있어 매우 중요하다. 어류의 효소 활성 및 대사율은 온도와 밀접한 관계가 있으며 적정 온도 이하 또는 이상에서는 활동성 저하, 성장률 저하 및 폐사율 증가가 나타난다 (Clarkson and Childs, 2000; Ward and Bonar, 2003).

또 낮은 농도의 용존산소는 어류의 성장, 먹이섭이효율, 사료전환효율 및 어류의 대사율에 영향을 미치게 된다 (Brett, 1979; Jobling, 1994).

수온과 용존산소는 밀접한 관계를 갖고 있으며 용존산소 결핍은 주로 여름철 고수온기 저층에서 빈번히 일어난다. 이는 높은 일사량에 의한 표층부 수온 증가로 용존산소 포화도가 감소하고, 표층수와 저층수간의 밀

*Corresponding author: keunhchoi@cnu.ac.kr, Tel: +82-42-821-6432, Fax: +82-42-822-8173

도차가 발생하여 표층과 저층간의 해수교환이 저해되며 저층에서 유기물의 분해에 의한 산소 소비가 증가하는데 기인한다(Lee et al., 2009; Lee et al., 2012).

최근 기후변화에 따른 여름철 연근해 고수온 현상(28℃ 이상)은 연안양식업에 매우 큰 위협이 되고 있고 이로 인해 최근 특히 가두리 양식장을 중심으로 많은 경제적 피해가 발생하고 있다. 예로, 충남 천수만에서는 2013년과 2016년 대량 폐사가 발생하였고 2016년 한 해에만 그 피해액이 50억 원으로 추정되었다(Chungcheongnam-do, 2016).

이러한 고수온 피해에 대한 저감책으로는 먹이 공급을 제한하여 어류의 대사율을 낮춰 용존산소의 사용을 억제하는 생물학적 방법 외에도 차양막 설치, 액화산소 투입, 저온의 저층수로 표층수를 순환시켜 수온을 낮추고 용존산소를 높여주는 물리적인 방법들이 시행되고 있다(Ju, 2016).

그러나 단순히 압축공기나 액화산소투입의 경우 공기나 산소가 물에 잘 녹지 않는 단점이 있고 기체 입자가 커서 부력에 의해 바로 표층으로 올라오며 따라, 이러한 조치가 실제로 양식어장 그물 하단부에 모여 있는 어류에게 산소공급 효과를 주는지에 대해서는 검증되지 않고 있다.

또한 효과를 기대하더라도 효율적인 측면에서 과도한

양의 산소를 주입하고 있는 실정일 것으로 추정된다. 국내에서는 저층부 빈산소화 방지대책으로, 수중폭기기술을 적용하고 있다. 하지만 몇몇 연구결과에 따르면, 국내에 적용되고 있는 수중폭기에 의한 저층부 빈산소화 방지효과는 거의 없는 것으로 나타나고 있다(Oh et al., 2013b).

최근 미세기포기술은 수처리 등 많은 과학 및 기술 분야에서 광범위하게 적용되어 큰 주목을 받고 있다(Kaushik and Chel, 2014). 이 연구에서는 이러한 미세기포 발생기술을 이용하여 양식장에서 사용하는 액화산소를 보다 효율적으로 녹여줌으로써 액화산소 효율적 방출에 따른 수온 저감과 산소의 용존성을 높이하고자 하였다. 또한 이러한 기술이 여름철 고수온에 의한 양식어류의 피해를 저감할 수 있는 가능성이 있는지를 검증하고자 하였다.

재료 및 방법

실험 해역

본 연구에서는 서해 천수만 지역 안면도 대야리 조피볼락 양식장을 시험대상지로 선정하였다(Fig. 1). 대상 지역인 태안군 안면도 대야리 부근은 천수만 입구에서 가까운 곳에 위치함에도 불구하고 고수온기 해류가 정체되는 현상으로 인해 고수온 피해가 종종 발생한 해역이다. 대상지역은 이러한 물리적 특성을 반영하여 충청



Fig. 1. Location of aquaculture facility for the experiments.

남도 해양수산과의 협조와 해당 가두리 양식 어업인과의 협의를 통해 선정되었다.

실험 방법

해당 가두리는 총 8조(한 수조 크기: 가로 12 m × 세로 14 m × 높이 8 m)의 조피볼락 양식장으로 차양막을 설치하였고 충청남도의 지원을 받아 액화산소를 주입하는 양식장이었다. 7월 24일 가두리양식장 환경개선용 미세기포 발생장치(주요 구성품: 해수펌프, 해수용 주입기, 해수용 미세기포 노즐) 4대를 가두리 양식장 내 중앙부에 설치하였고 해수는 약 10 m에서 흡입하여 펌프로 흡입된 해수에 액화산소를 주입하고 이 해수는 해수펌프에 장착된 미세기포 발생장치를 통해 다시 6~8 m 깊이에 주입하였다. 유입되는 해수 유량은 한 대의 펌프당 약 12.5 ton hr⁻¹이었고 이때 투입된 액화산소량은 약 1,500~2,000 ml min⁻¹이었다.

Table 1. Summary of the experimental design of micro-bubble injection of liquified oxygen

Location	Cheonsu Bay on the west coast of Korea
Dimension of aquaculture facility	about 120 m long × 50 m wide
Experimental duration	July 24 th - August 20 of 2018
Test method	micro-bubble + liquified oxygen (-183℃)
Number of units installed	4
Flow rate of oxygen	about 1,500~2,000 ml min ⁻¹
Injection depth of micro-bubbled oxygen	about 6-8 m

이 시스템 1기에 의한 수온과 용존산소의 변화를 나타내기 위해 다음과 같은 관계식을 만들었으며 그 결과를 모델링하였다.

$$V \frac{dT}{dt} = R - FT(t)$$

위 식은 시간에 따른 양식장내 수온과 용존산소의 변화를 나타내며 V는 양식장 수조의 부피, T는 수온 또는 용존 산소, t는 시간, R은 액화산소 주입량, F는 조석에 의한 수조내 해수의 희석량을 나타낸다. 즉, 액화산소 주입량에서 희석량을 뺀 것이 수온과 용존산소의 변화

를 나타내게 된다. 용존산소는 수온이 증가하면 감소한다. 현장 조사시 고수온이 28℃에서 약 30℃ 정도까지 올라가는 것을 보이는데 이 2℃ 정도의 수온 증가에 의한 용존산소 감소효과는 미미하다(현장 해수의 염분을 30 psu를 가정했을 경우 6.6 ppm에서 6.4 ppm으로 감소). 따라서 수온에 의한 용존산소 효과를 무시하면 위 1-dimensional 모델을 수온과 용존산소 모두 적용할 수 있다.

위 식은 다음과 같이 해를 구할 수 있다.

$$T(t) = \frac{R}{F}(1 - e^{(-F/V)t})$$

액화산소 미세기포 주입의 효과를 검증하기 위해 미세기포 발생장치 설치 전, 그리고 설치 후의 작동 일주일 후부터 약 일주일 간격으로 양식장 환경을 조사하였다. YSI ProDss 센서 (YSI Inc., OH, USA)를 사용하여 양식장내 수온, 염분, 용존산소를 깊이별로 측정하였다.

또한 이와 함께 환경변화를 실시간으로(약 30분 간격) 수직 모니터링 및 자료 저장할 수 있는 AutoProfiling Platform 시스템을 설치하여 실험하였다. 이 시스템은 CTD를 플랫폼위에 올린후 A-프레임 자동도르래를 이용하여 수직으로 약 30분 간격으로 표층에서 저층까지 수직운동을 하면서 환경인자를 측정하게 된다. CTD 전기 케이블은 양식장안 컨테이너안에 설치된 컴퓨터 서버와 연결되어져 있고 따라서 측정된 환경인자는 컴퓨터 서버에 자동으로 저장된다.

처음 일주일엔 시스템이 완벽하게 갖추어지지 못한 이유로 수직이동을 통한 측정을 하지 못하고 수심 6 m에 고정시켜 1분 간격으로 수질을 측정하였고, 이후부터 약 2개월간 천수만 가두리 양식장 내 한 지점에서의 수심에 따른 수온, 염분, 용존산소, pH, 형광, 탁도 변화를 모니터링하였다. 이 연구에서는 초기 일주일간 수온과 용존산소의 연속 관측자료를 분석하였다. 해당 양식장에서 폐사된 어류 개체는 매일 수거하여 각 수조별로 기록하였다.

분석 방법

양식장내 미생물의 변화를 보기위해 *Vibrio*와 중속영양세균을 배양하여 계수하였다. 양식장내 정점들에서

수질을 측정한 후 최소 3개의 멸균된 1 L 채수병에 표층 해수를 담고 아이스박스에 보관하여 실험실로 운반하였다. 미세기포 발생장치를 운영한 양식장(정점 Treatment), 설치하지 않은 다른 양식장(정점 Control), 양식장 밖 약 200~300 m 내의 천수만(정점 Reference)에서 해수를 채집하여 비교하였다. *Vibrio* 배양을 위해 채수한 해수 200 ml 를 47 mm membrane filter로 거른 뒤(최소 3 반복구), 만들어 놓은 TCBs 배지에 필터지를 기포가 생기지 않도록 위에 놓아주었다. 이후 24시간 동안 35℃에서 배양한 후 각 정점에 따른 *Vibrio*를 계수하였다.

중속영양세균 분석을 위해서는 미리 멸균시킨 여과해수 9 ml에 각 정점별 채집된 해수를 1 ml씩 혼합하여 농도를 10^{-1} 로 낮추었다(각 정점별로 4번 반복구). 이후 다시 순차적으로 희석하여 최대 농도를 10^3 로 하였다. 미리 만들어 놓은 marine agar 배지에 각 농도별 해수를 접종한 후 25℃에서 5일 동안 배양 후 계수하여 정점에 따른 중속영양세균을 파악하였다.

폐사 자료를 기초로 경제적 손실에 대한 재무분석을 실시하였다. 실험 가두리 수조에 대한 간이 재무분석은 기존 가두리수조의 폐사대비 미세기포를 적용하여 저감된 피해액과 여기에 미세기포 설비 및 설치 비용과 액화산소 비용을 고려하여 추정하였다. 저감된 피해액은 감소된 폐사개체수에 중량당 위판단가(원 kg^{-1})를 곱하여 얻어졌다.

결과 및 고찰

수온, 용존산소 변화

고수온(>28℃) 기간이면서 가장 수온 관리가 필요한 8월 3일부터 8월 14일까지의 실시간 환경변화를 살펴보면, 먼저 수온의 경우 6 m 깊이에서 1분 간격으로 측정된 값을 보면 평균 28℃에서 시작하여 평균 29℃에 도달하고 최고온도는 30℃에 달하였다. 또한 용존산소의 경우 8월 3일부터 8월 7일까지는 평균 6.5에서 7.5 ppm 정도를 유지하였다(Fig. 2b). 하지만 그 이후부터는 평균 7 ppm에서 약 5 ppm까지 지속적으로 감소하는 경향을 보였다.

본 연구를 통하여 액화 산소 미세기포 주입 후 환경변화에 영향이 있는 것으로 나타났다. 먼저, 액화산소 미세기포 주입 모델 결과를 살펴보면 액화 산소 미세기포 주입에 따라 수온의 감소와 용존산소의 증가를 예상하는 결과를 보여주었다(Fig. 3). 다만, 양식장내 해수의 체류시간이 수온과 용존산소 모두에 매우 큰 영향을 미친다는 것을 알 수 있다. 또한 약 40시간 이후에는 더 이상의 큰 환경변화는 없는 것으로 나타났다(Fig. 3). 이로 보건대 향후 미세기포의 분산속도를 알아내는 것도 필요한 것으로 보여 진다.

액화산소의 미세기포 주입 전과 후의 환경변화를 Fig. 4와 Fig. 5에 나타내었다. 조피볼락의 최적 사육수온은 약 15~20℃이며 25℃ 이상으로 수온이 상승하면 산소 소

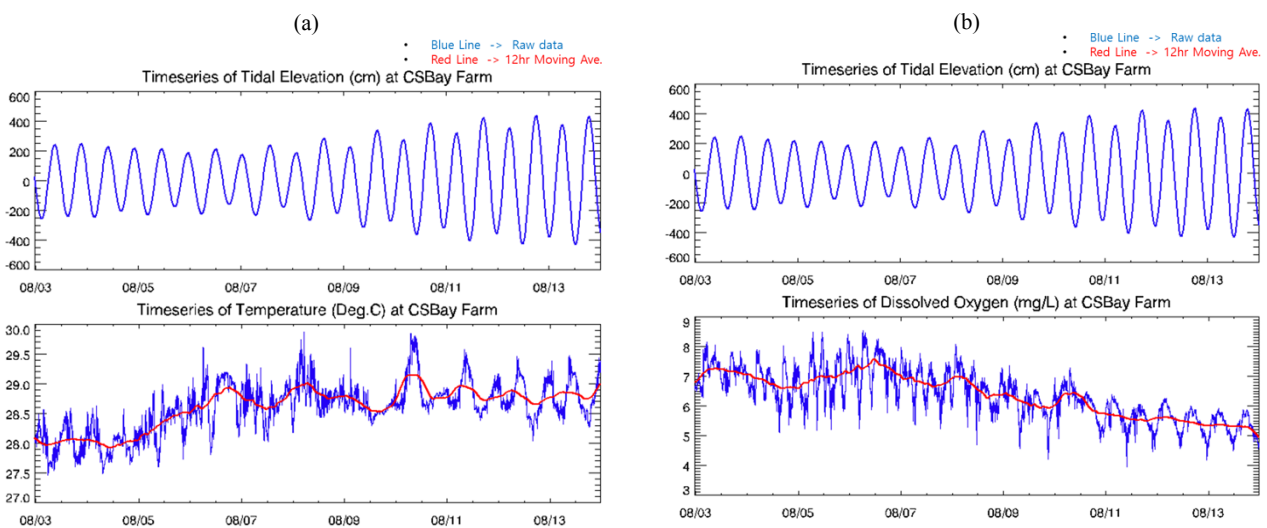


Fig. 2. Realtime monitoring of water temperature (a), and dissolved oxygen (b) from August 03 to August 13 measured at 1 minute-interval, with the sensor moored at 6 m deep. Tidal elevation during the period is also shown.

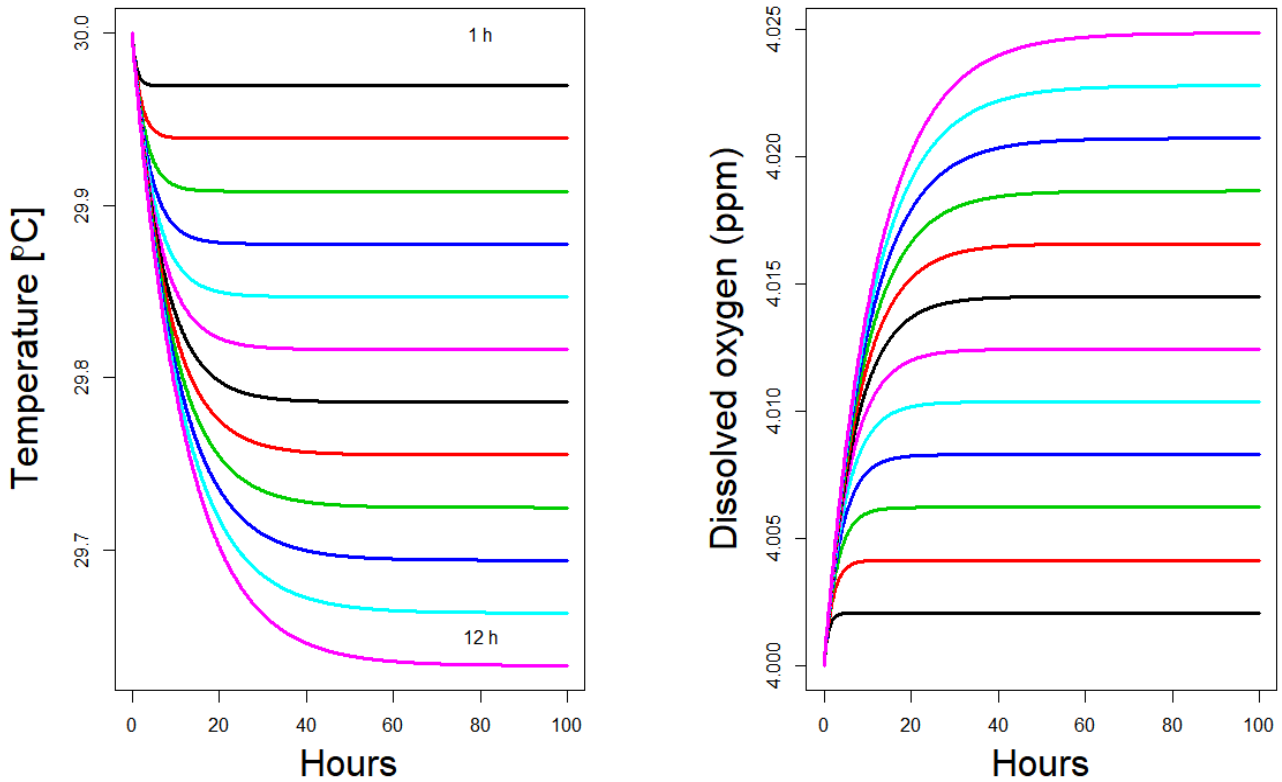


Fig. 3. Simulation of the effects of injected liquified oxygen through micro-bubble system on the sweater in the mariculture cages.

비율이 급격히 증가하고 반면 체중증가는 현저히 떨어진다(Oh et al., 2007). 따라서 이 연구의 조사기간 시점인 7월 25일에 수온이 이미 26°C에 도달하여 이미 조피볼락의 생육에 좋지 않은 환경이 만들어지기 시작하는 시점이었음을 알 수 있다(Fig. 4). 미세기포 중비전의 경우 수심 8 m 깊이 평면분포를 보면 수온과 용존산소 모두 가두리 양식장 시설 왼쪽에서 오른쪽으로, 즉 시설을 기준으로 서쪽에서 동쪽으로, 감소하는 경향을 보였다(Fig. 4a, 4b). 수평분포를 보면 용존산소는 약 6.8에서 8.8 ppm까지 변하고 수온은 25°C에서 28°C까지 변화였다. 수직 분포를 보면 약 25-28°C의 범위를 보였다. 또한 수심에 따른 수직 분포를 보면 표층에서 저층으로 열이 전달되는 것을 알 수 있다(Fig. 4c, 4d).

액화산소를 미세기포 발생장치를 통해 주입 후 일주일 뒤 다시 현장 조사하였을 경우 설치전과는 다른 결과가 나타났다. 수평적으로는 7.5 ppm 이상의 값이 약 6 m에서 보인다. 수직적으로는 약 용존산소 7 ppm의 물이

표층까지 올라오고 27.5°C의 물이 약 2 m까지 올라오는 것을 보인다. 즉, 수온의 경우 양식장 중심부에서 주위보다 낮은 해수층이 발견되었고 이는 수직분포에서도 나타나고 있다. 즉 수온이 미세기포 발생장치를 통한 인위적인 해수유동에 따라 표층으로 올라가고 이에 따라 용존산소도 표층에 비해 다소 낮기는 하지만 여전히 포화된 중층수가 표층으로 이동하는 것으로 나타났다.

액화산소를 미세기포화 하여 주입한 결과 지속적 모니터링결과를 살펴보면 미세기포 발생장치가 설치된 수심에서 8월 9일과 8월 25일 측정된 수온이 최대 0.5~1°C 낮아지는 것과 용존산소가 최대 0.3~0.5 ppm 높아지는 것이 관측되었다.

수온 감소는 수온이 낮은 저층수가 올라오면서 생기는 현상이기도 하나 8월 초에는 표층과 저층의 수온차가 1°C 이상이 되었으나 8월 20일 정도에는 그 차이가 0.5°C 내외로 줄어들었다(Fig. 5d). 따라서 액화산소(-183°C)의 주입에 따른 주변해수의 냉각효과가 다소 있

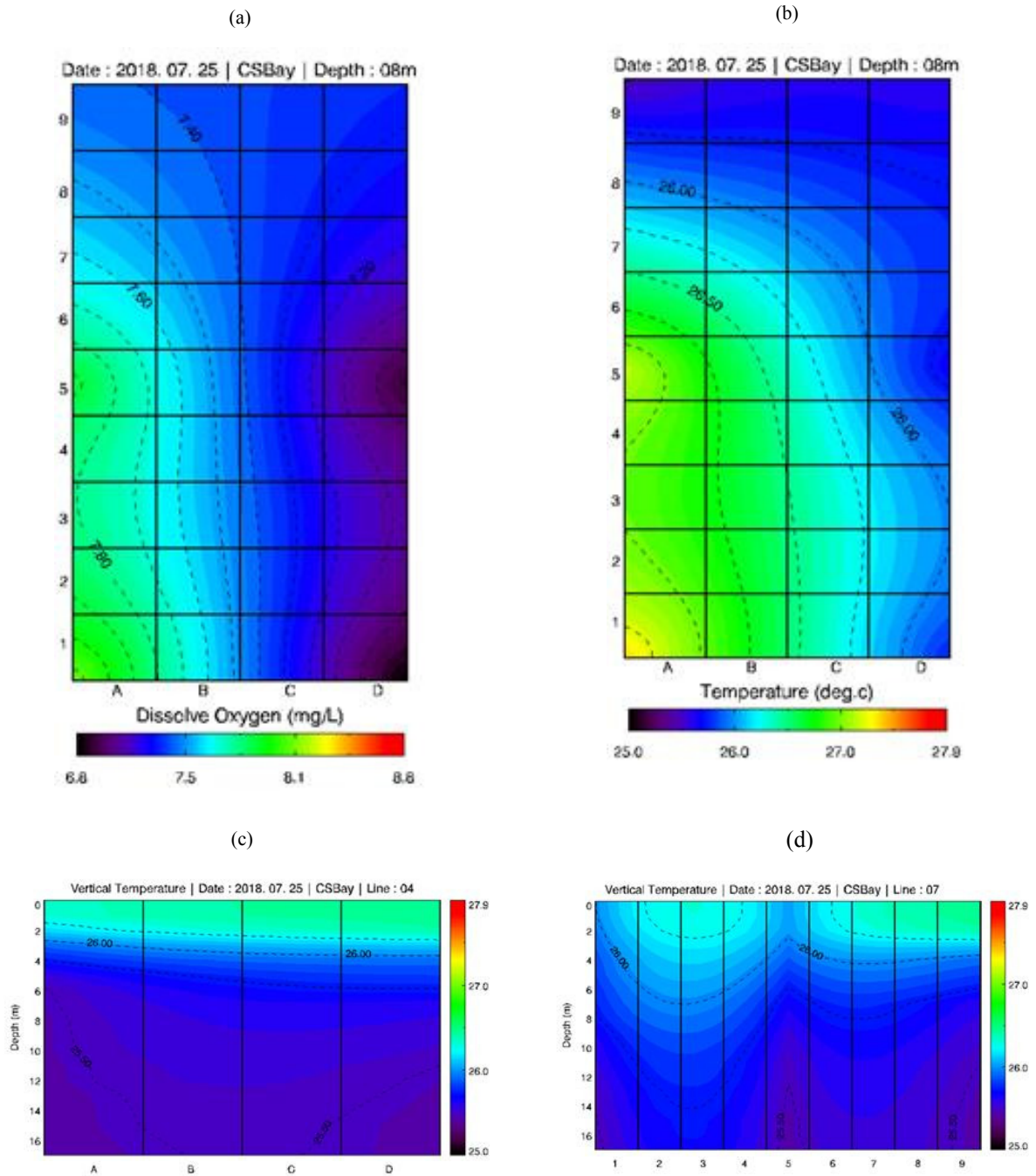


Fig. 4. Distribution of water temperature and dissolved oxygen before micro-bubble injection system was operated. Note that the heat diffuses from the top. a,b - plain view, c,d- cross-sectional view.

는 것으로 보인다. 미세기포는 직경이 μm 수준에 해당하는 기포로 지칭되고 있으며, 미세기포를 활용하는 분야에 따라, 유체물리분야에서는 수백 μm 이하, 생리활성분

야에서는 10~40 μm 의 범위에 해당하는 기포 크기를 미세기포로 정의하고 있다(Tsuge, 2010). 최근 미세기포 발생기술이 급속도로 발전하고 있으며, 직경이 50 μm

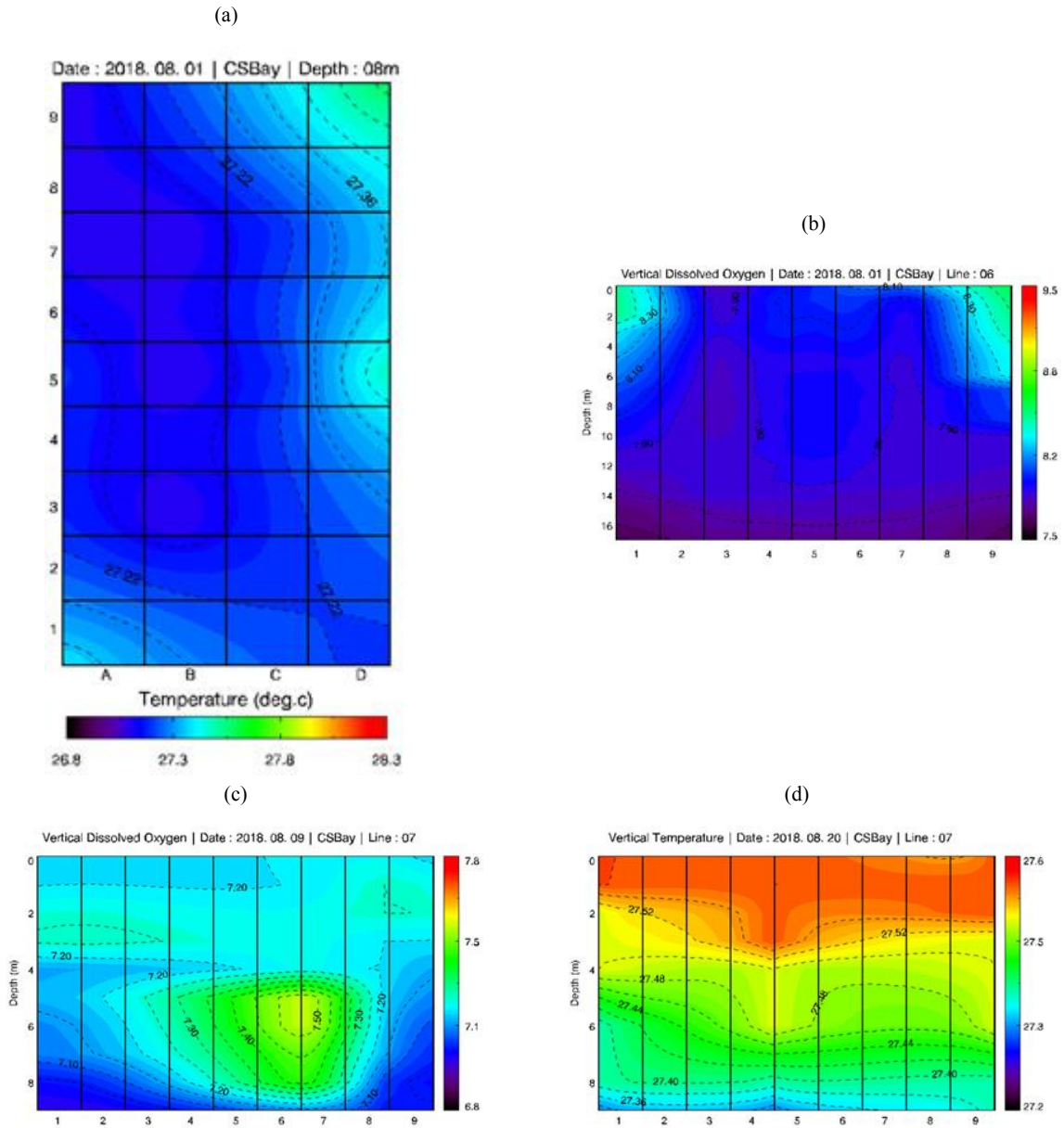


Fig. 5. Distribution of water temperature and dissolved oxygen a week after micro-bubble injection system was operated. Note that the heat diffuses upward to the top. a,b - plain view, c,d- cross-sectional view.

미만인 미세기포의 경우, 부상하면서 기포가 수축하다가 소멸하게 된다. 이 과정에서 기포의 크기는 점점 작아지기 때문에 기포의 표면적이 증가하여, 기체-액체 계면이 넓어지며, 느린 부상속도를 특징으로, 높은 기체전달률 및 긴 접촉시간을 기대할 수 있어, 궁극적으로 높은 산소전달률을 기대할 수 있다(Kim, 2018). 따라서 이러한 수온 감소와 용존산소 증가는 이러한 액화산소 미세

기포 주입에 따른 효과로 생각된다.

물론 이러한 인위적 주입에 의한 효과는 항상 나타나는 것은 아니다. 가령 조류에 의한 해수유동이 많은 사리보다는 해수의 유동이 적은 조류에 주입효과가 더 잘 나타날 수 있다. 비록 조사시기가 이러한 시기를 정확히 고려하여 설정되지는 않았으나 8월 19일의 경우 조금 있었고, 어업인이 우려하는 폐사가 많이 일어나는 이때에

도, 역시 미세기포 액화산소 주입에 따른 효과를 보인 것으로 생각된다(Fig. 4d). 본 실험 장소인 천수만 조피볼락 양식장 주변 천수만 입구 해역에서 같은 시기의 해수 유동 흐름은 국립해양조사원의 자료를 분석한 결과 북동-남서 방향의 흐름을 보이는 것으로 예측되었다(국립해양조사원 바다누리 해양정보서비스, 정보 조사 일 7월 25일). 또한 해수 유속은 약 창조 시 0-1.5 m sec⁻¹, 낙조 시 0-1.0 m sec⁻¹의 범위를 보이며 창조 우세를 보였다. 향후 실험에서는 보다 빈번한 그리고 이러한 해당 해역의 해수유동을 고려한 현장조사가 필요하다고 판단된다.

양식장 박테리아 변화

여름철 양식장 내 미생물의 번식은 양식어류에게 큰 영향을 미칠 수 있다. 특히 가두리 양식장에서 여름철 수온 상승은 가두리 내 해수 유동의 저하에 따라 해수 중 용존산소의 부족을 가속화 시키고 급이에 따른 양식장 내 유기물 증가 및 이에 따른 박테리아 번식 등 어류의 폐사 위험을 더 높일 수 있는 환경이 만들어지게 된다(Seo et al., 2014; Kim et al., 2015). 양식어장의 경우 여름철 표층의 고수온을 피해 어류들이 양식망 바닥에 모여 있게 되고 이로 인해 용존산소 감소 및 스트레스가 증가하게 된다. 따라서 이러한 행동적 반응에 더해, 해수 유동이 상대적으로 많은 사리일 경우에 비해 물이 정체

되는 조금일 경우에 이러한 수온증가에 따른 박테리아의 번식은 양식 어류의 폐사를 증가시킬 가능성이 높다(Lee et al., 2013; Oh et al., 2013a).

이러한 박테리아 번식 미생물의 활성을 살펴보기 위해 종속영양세균과 비브리오균을 접종 배양 후 계수하였다. 천수만 해역(Reference site)과 비교해서 조피볼락 양식장 내의 종속영양세균과 비브리오균 두 세균 모두 약간 높거나 비슷한 농도로 분포함을 알 수 있었다(Fig. 6). 시간에 따른 변화를 살펴보면 미세기포 설치 구역에서는 박테리아는 2.0 log₁₀ CFU ml⁻¹에서 2.3 log₁₀ CFU ml⁻¹으로 증가하나 양식장 밖은 그런 증가하는 변화를 보이지 않았다. 비브리오의 경우도 마찬가지로 3.4 log₁₀ CFU 200ml⁻¹에서 최대 4.4 log₁₀ CFU 200ml⁻¹ 까지 증가하였으나 양식장 밖은 그런 증가하는 변화를 보이지 않았다. 또한 8월 8일의 경우 양식장 내의 세균의 농도가 천수만 해역과 비교해서 훨씬 높았다.

이로 보아 양식장내 환경이 양식장 밖 해양환경에 비해 세균의 번식에 훨씬 더 유리한 환경임을 확인할 수 있다. 미세기포는 다른 처리방법들과 결합할 때 박테리아 사멸효과의 증대를 유발한다(Dong et al., 2012). 미세기포 자체로만의 박테리아 살균효과는 아직 검증되지 않았고 이 연구에서도 그러한 효과는 검증되지 않았다. 이는 해수를 표층에서 채집하였기 때문에 미세기포에 의한 직접적인 효과를 확인하는데 다소 부적절하기도

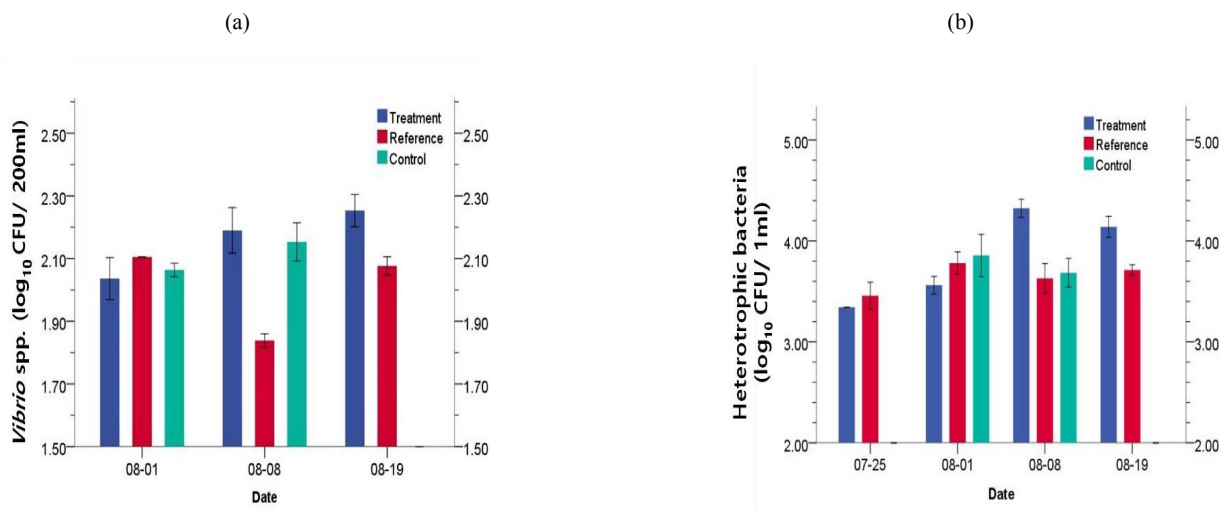


Fig. 6. *Vibrio* spp. and heterotrophic bacteria in the surface at three sites measured at various times during the study period (Treatment: inside the micro-bubble injected culture cage, Control-neighbouring culture cage without micro-bubble injection, Reference- Bay water outside the cage (200-300 m away)). Vertical bars represent standard errors.

하지만, 미세기포에 의한 살균효과가 있더라도 그보다는 사료에 의한 유기물 증가와 수온증가, 더불어 액화산소 주입에 따른 박테리아 활성화가 더 크게 작용한 것으로 보인다.

양식장 어류 폐사개체수 변화

양식장에서 고수온 전후의 폐사개체수를 살펴보면 고수온이 오기 전에도 이미 매일 약 200~300 개체의 조피볼락이 지속적으로 폐사하는 것을 볼 수 있다. 정확히는 고수온 보다 28.5°C 이상 수온이 약 일주일 진행된 후 폐사 개체수가 급격히 증가하는 것으로 보인다. 즉 8월 14일부터 500 개체 이상의 폐사가 일어나고 8월 19일에는 폐사 개체수가 2,300 개체로 최대치를 기록하였다. 이후 고수온이 완화되면서 다시 폐사 개체수가 급격히 감소하는 것을 보였다. 누적폐사개체수의 분포에서도 8월 14일 이후 기울기의 급격한 증가를 보여 이 같은 패턴을 잘 보여준다. 전체적으로 실험기간 동안, 고수온에 의한 직접피해는 전체 양식 개체수의 약 7%로 파악되었다.

이렇게 천수만 조피볼락 양식장의 수온이 27°C로 급감하는 8월 19일에 폐사량이 가장 높은 것으로 볼 때 단순히 수온이 증가했다고 바로 조피볼락이 폐사하는 것은 아님을 의미한다. 고수온 기간 동안 누적된 스트레스로 인한 면역력 감소와, 이후 질병 등 기타 요인들에 의해 폐사가 급증하는 것으로 추측된다(Seo

et al., 2014). 이는 8월 19일에 *Vibrio*의 수치가 가장 높은 값을 보이는 것을 근거로 예측할 수 있다(Fig. 6). 천수만 양식장에서 폐사된 조피볼락으로부터 분리된 병원성 박테리아에는 *Photobacterium damsela*, *Vibrio* spp., 및 *Streptococcus iniae* 등이 보고되어 있고(Seo et al., 2014), 특히 *V. harveyi*는 조피볼락 및 넙치류의 폐사를 유발하는 주요 병원체로 알려져 있다(Won and Park, 2008). 하지만 이러한 박테리아는 직접적 원인이라기보다는 2차적 원인으로 생각된다. 즉, 고수온에 따른 어류들의 스트레스와 저층으로의 밀집에 따른 고밀도로 인해 접촉이 증가하며 이에 따른 표피손상과 그로 인한 감염증가가 따를 수 있다(Seo et al., 2014).

따라서 대상 조피볼락 양식장의 경우 폐사는 수온 급변과 그에 따른 병원균에 영향을 받은 것으로 보이며, 용존산소 감소에 의한 영향은 미미한 것으로 생각된다. 실제로 양식장 내 용존산소는 실험기간동안 그렇게 낮지 않았다(최저 >5 ppm). 과포화산소의 주입은 약 2.3°C의 수온 저감 효과와 맞먹는 것으로 보고되었다(Pörtner et al., 2006). 따라서 용존산소의 증가는 수온증가에 의한 스트레스를 저감하는 효과가 있고 또 액화산소의 주입은 적은 양이지만 주변해수의 수온을 낮추어주는 효과를 발휘하는 것으로 보인다. 이러한 복합적인 효과가 이웃양식장 대비 최대 약 40%의 폐사 저감이 가능했던 것으로 보여 진다.

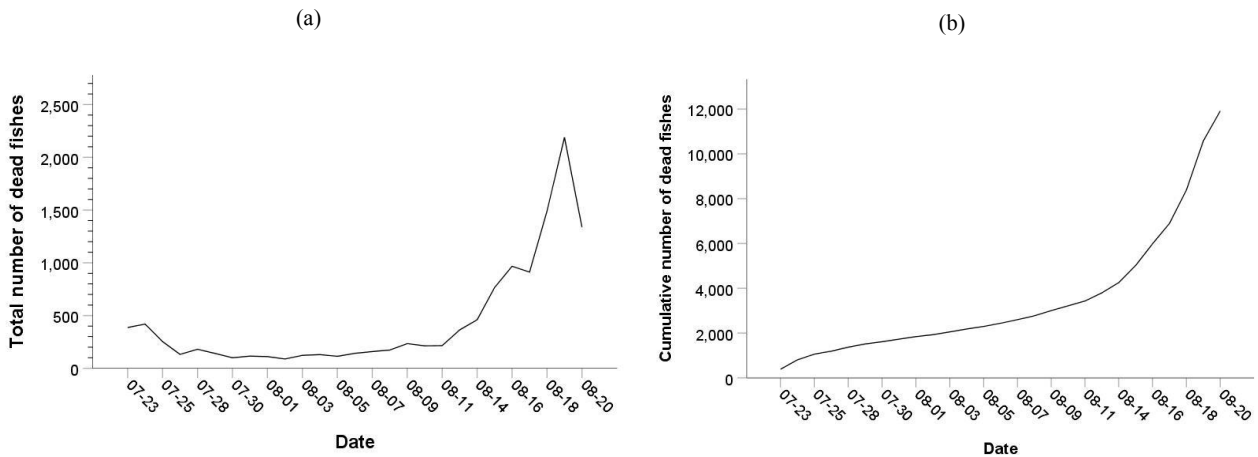


Fig. 6a. Daily counts of total dead fish (a) and cumulative number of the dead fish (b) during the period encompassing high temperature period. Note that dead fishes increase in numbers about a week following the persistent high water temperature (>28.5°C).

경제적 손실에 대한 재무분석

이러한 폐사 자료를 기초로 경제적 손실에 대한 재무 분석을 실시하였다.

대조구로는 이웃한 양식장에서 같은 기간 동안 50% 폐사가 일어난 것을 기초로 하여 비교 분석하였다. 그 결과 미세기포 액화산소 주입을 통해 최대 약 2 억원, 최소 6~7천만 원의 손실 절감이 발생한 것으로 추정되었다. 하지만 이러한 추정치는 액화산소 미세기포 주입의 효과가 최대를 나타내었을 때라고 가정하는 것이 적절할 것이고 실제로는 이보다 손실절감이 적을 가능성이 높을 것이다. 왜냐하면 이러한 실험에 있어서의 가장 큰 어려움은 대조구 선정 및 운용이다. 일단 동일한 대조구를 설치하기 위해서는 많은 비용이 소요되고 또한 양식허가 등 여러 제한 요소가 존재한다. 또한 이미 있는 이웃 양식장을 대조구로 선정하여 직접적 비교를 하기도 쉽지 않다. 이는 때로는 양식 어류의 종이 다르기도 하고 먹이 급이나 절식 등 양식방법이 개인의 노하우로 남아있고 양식장 간에 서로 공유되지 않고 같은 방법으로 양식되고 있지 않기 때문이다. 이러한 문제점들이 있음에도 불구하고 재무분석 결과, 미세기포를 통한 액화산소 주입이 그렇지 않은 양식장에 비해 양식어류 폐사를 낮추는데 있어 의미 있는 효과를 거두는 것으로 나타나고 있다.

가두리 양식장에 필요한 미세기포 발생장치 설치용량은 여러 가지 요건에 의해 결정된다. 먼저 양식장에서

사용할 수 있는 유허 전력을 고려해야 한다. 본 발생장치는 대당 약 1 kw의 전력을 소모하여 본 양식장의 경우 최대 사용가능 전력이 14 kw로 여름철 최대 10대 정도 까지 운용 가능한 것으로 나타났다. 펌프의 용량을 크게 할수록 용존산소와 해수 순환량을 늘려줄 수 있으나 전력량과 현장 양식장에 설치 적합성도 고려되어야 한다. 또한 양식장 면적 및 해류의 흐름 정도를 고려해서 설치 대수를 결정해야한다. 이 실험에 사용된 미세기포 1대의 확산범위는 확산깊이 범위를 4 m(즉, 배출구로부터 위 아래 2 m씩), 양식장내 해류속도를 2 cm sec⁻¹로 가정했을 때 양식장 한 조 크기(14 m × 12 m)를 바탕으로 계산할 수 있다. 이번 실험의 경우 현장에서 해수펌프로 12.5 ton h⁻¹로 흡인하여 이 해수에 미세기포를 주입하고 있었음을 감안하면 가두리 한 수조 용량의 약 최대 10~20%의 해수를 순환시켜주는 효과가 있는 것으로 계산되었다. 향후에는 현장에서 미세기포 발생장치 한 대를 설치 후 미세기포 발생장치에 의한 해수의 확산범위를 조사한 뒤 양식장의 규모에 맞게 설치 대수를 결정하는 것이 보다 타당할 것으로 생각된다.

최근 해양의 고수온으로 인해 남해안과 서해안 양식장의 폐사피해가 점점 증가하고 있다. 장기적으로는 외해로 양식장을 옮기거나 고수온에 강한 대체품종을 개발하는 방향으로 전환이 필요하다. 하지만 단기적으로는 고수온 시기 어류 폐사를 저감하는데 있어 본 연구를 통하여 일부분 확인된 액화산소 미세기포 주입을 통한

Table 2. Financial analysis of micro-bubble injection of liquified oxygen for reducing cultured fish mortality. The costs are in Korean won in thousands

Type	Total dead fish (inds.)	Estimated cost of economic loss	Cost of micro-bubble system (4 units)	Cost of liquified oxygen	Total cost of loss
Culture facility using micro-bubble injection	12,058	32,770	28,000	800	61,570
No use of micro-bubble in neighbouring culture facility (Worst-case)	100,000	271,776	0	3,200	274,976
No use of micro-bubble in neighbouring culture facility (Best-case)	50,000	135,888	0	3,200	139,088

스트레스 저감 방법이 현재로서 가능한 최선의 방법 중 하나라고 판단된다.

결론

여름철의 고수온으로 인한 양식 어류의 대량 폐사를 저감하기 위한 방법으로 양식장에서 사용하는 액화산소를 미세기포 발생장치를 통해 양식장 수조에 주입하는 실험을 천수만 대야리 양식장에서 진행하였다. 미세기포 주입 전, 후 및 약 한 달여에 걸쳐 물리적인 환경변화, 세균의 발생변화 및 양식어류(조피볼락) 폐사 개체수를 모니터링 하였다. 그 결과 수온이 최대 0.5~1℃ 낮아지는 것과 용존산소가 최대 0.3~0.5 ppm 높아지는 것이 관측되었다. 이로 인해 이웃양식장 대비 최대 약 40%의 물고기 폐사 저감 및 6~7천만 원의 손실 절감이 발생한 것으로 추정되었다. 하지만 이러한 추정을 위해서는 대조군에 대한 명확한 설정이 필요한 것으로 보인다. 양식장 내의 종속영양세균과 비브리오균 두 세균 모두 약간 높거나 비슷한 농도로 분포하였는데 이는 사료에 의한 유기물 증가와 수온증가, 더불어 액화산소 주입에 따른 박테리아 활성화가 더 크게 작용한 것으로 보인다. 본 연구를 통하여 일부분 확인된 액화산소 미세기포 주입을 통한 스트레스 저감 방법이 단기적 고수온 시기 어류 폐사를 저감하는데 있어 적용 가능한 최선의 방법 중 하나라고 판단된다. 또한 박테리아 증가를 억제할 수 있는 방법에 대한 추가 연구가 필요할 것으로 보인다.

사사

(주)뉴워터텍의 박영철 박사, 이현영 소장께 감사드립니다. 또한 시료채집 및 분석에 도움을 준 많은 학생들에게 감사드립니다. 세심하게 논문을 검토해주신 세분의 심사위원들께 깊은 감사를 드립니다. 이 연구는 충남대학교의 지원을 받아 수행되었습니다.

References

Chungcheongnam-do. 2016. Data for recuperation plan on fishery damage caused by elevated water temperature, 5.
 Brett, J.R., 1979. Environmental factors and growth. Fish physiology, vol. VIII. Bioenergetics and growth, 599-677. <https://doi.org/10.2307/1308380>.
 Clarkson RW. and Childs MR. 2000. Temperature effects of

hypolimnial-release dams on early life stages of Colorado River Basin big-river fishes. *Copeia* 2, 402-412. [https://doi.org/10.1643/0045-8511\(2000\)000\[0402:TEOHRD\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1643/0045-8511(2000)000[0402:TEOHRD]2.0.CO;2).
 Dong Y, Chen S, Wang Z, Peng N. and Yu J. 2012. Synergy of ultrasound microbubbles and vancomycin against *Staphylococcus epidermidis* biofilm. *J Antimicrobial Chemotherapy* 68, 816-826. <https://doi.org/10.1093/jac/dks490>.
 Jobling M. 1994. *Fish Bioenergetics, Fish & Fisheries Series Vol. 13*. Chapman & Hall, London, 309.
 Ju HH. 2016. International case studies for deep sea water industry-Focusing on the Taiwan case. *J Korea Academia-Industrial cooperation Soc* 17, 537-547. <https://doi.org/10.5762/KAIS.2016.17.10.537>.
 Kaushik G. and Chel A. 2014. Microbubble technology: emerging field for water treatment. *Bubble Sci Eng Technol* 5, 33-38. <https://doi.org/10.1179/1758897914Y.0000000010>.
 Kim EA. 2018. Substantial enhancement of dissolved gas concentration in the presence of ultrafine bubble. MS thesis, Seoul National University, 56.
 Kim SS, Lee JH, Kim KW, Kim KD, Lee BJ, and Lee KJ. 2015. Effects of feed particle size, stocking density, and dissolved oxygen concentration on the growth of Olive Flounder *Paralichthys olivaceus*. *J Korean Fish Aquat Sci* 48, 314-321. <https://doi.org/10.5657/KFAS.2015.0314>.
 Lee DC, Park YC, Jeon CY, Yang JY, Hur YB, Kim JW, and Cho KC. 2013. A report on the 2012 mass summer mortalities of black rockfish, *Sebastes schlegeli* in the Southeast Sea. *J Korea of fish pathol* 26, 173-183. <https://doi.org/10.7847/jfp.2013.26.3.173>.
 Lee J, Kim S, Kim S-S, An S, Kim Y-T and Choi O-I. 2009. Sediment oxygen consumption in semi-closed Korean coastal bays during summer. *J Ocean Science* 44, 161-171. <https://doi.org/10.1007/s12601-009-0014-3>.
 Lee JS, Kim KH, Shim J, Han JH, Choi YH, Khang B-J. 2012. Massive sedimentation of fine sediment with organic matter and enhanced benthic-pelagic coupling by an artificial dyke in semi-enclosed Chonsu Bay, Korea. *Marine Poll. Bull* 64, 153-163. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2011.09.033>.
 Oh DH, Song JW, Kim MG, Lee BJ, Kim KW, Han HS. and Lee KJ. 2013a. Effect of food particle size, stocking density and feeding frequency on the growth performance

- of juvenile Korean rockfish *Sebastes schlegelii*. J Korean Fish Aquat Sci 46, 407-412. <https://doi.org/10.5657/KFAS.2013.0407>.
- Oh KH, Jeong DH, Yang SY, Jeon TW, and Cho YC. 2013b. Effects of submerged aerator on the growth of algae in Daechung Reservoir. J Korean Soc Environ Eng 35, 268-275. <https://doi.org/10.4491/KSEE.2013.35.4.268>.
- Oh SY, Noh CH, Myoung JG. and Jo JY. 2007. Effects of water temperature and body weight on oxygen consumption rate of black rockfish, *Sebastes schlegelii*. Korean J Ichthyol 19, 1-7.
- Pörtner HO, Peck LS. and Hirse T. 2006. Hyperoxia alleviates thermal stress in the Antarctic bivalve, *Laternula elliptica*: evidence for oxygen limited thermal tolerance. Polar Biol 29, 688-693. <https://doi.org/10.1007/s00300-005-0106-1>.
- Seo HG, Seo JS, Ryu MK, Lee EH, Kwon SR, Kang JS, No YS, Choi HS, Jung SH, and Han HJ. 2014. A nematode infection in the epithelial tissue of cultured rockfish *Sebastes schlegelii* in Cheonsu Bay, Western Korea. J Korean Fish Aquat Sci 47, 603-610. <https://doi.org/10.5657/KFAS.2014.0603>.
- Tsuge H. 2010. Fundamental of microbubbles and nanobubbles. Bull Soc, Sea Water Sci Japan 64, 4-10.
- Ward DL. and Bonar SA. 2003. Effects of cold water on susceptibility of age-0 flannelmouth sucker to predation by rainbow trout. Southwest Nat 48, 43-46. [https://doi.org/10.1894/0038-4909\(2003\)048<0043:EOCWOS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1894/0038-4909(2003)048<0043:EOCWOS>2.0.CO;2).
- Won KM. and Park SI. 2008. Pathogenicity of *Vibrio harveyi* to cultured marine fishes in Korea. Aquaculture 285, 8-13. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2008.08.013>.
-
2020. 07. 27 Received
2020. 08. 25 Revised
2020. 09. 29 Accepted