

참굴(*Crassostrea gigas*)의 폐각운동을 이용한 생물모니터링 시스템 연구 (빈산소에서 홀 소자를 이용한 폐각운동 측정)

전진영 · 문수연 · 오석진*

부경대학교 해양학과

Bio-monitoring System using Shell Valve Movements of Pacific Oyster (*Crassostrea gigas*) (Detecting Abnormal Shell Valve Movements Under Hypoxia Water using Hall Element Sensor)

Jin-Young Jeon, Su-Yeon Moon, Seok Jin Oh*

Department of Oceanography, Pukyong National University, 45 Yongso-ro, Nam-Gu, Busan 48513, Korea

Corresponding Author

Seok Jin Oh

Department of Oceanography, Pukyong
 National University, 45 Yongso-ro, Nam-
 Gu, Busan 48513, Korea

E-mail : sjoh1972@pknu.ac.kr

Received : April 18, 2016

Revised : April 19, 2016

Accepted : April 22, 2016

본 연구는 소형화된 홀 소자를 이용하여 국내 패류 양식 생물 중 가장 많은 생산량을 보이는 참굴(*Crassostrea gigas*)의 폐각운동을 기초로, 연안역에서 빈산소에 대한 생물모니터링 시스템의 적용 가능성을 조사하였다. 정상상태 폐각운동의 측정을 위해서 여과해수에서 측정된 결과, 참굴 개체는 평균 5~12 mm 정도의 개각상태를 유지하였으며, 폐각운동 시 비교적 빠른 폐각상태를 보였다가 느린 속도의 개각상태의 운동이 관찰되었다. 하지만, 주·야간 사이에는 큰 차이가 없었다 ($p < 0.05$). 용존산소 농도를 7 mg l⁻¹에서 3 mg l⁻¹까지 감소시키면, 폐각운동의 횟수는 증가를 나타내었으며, 파형도 정상상태와 다르게 불안정한 파형을 보였다. 또한 용존산소가 2 mg l⁻¹로 감소된 후에는 폐각운동의 크기가 점차 작아지거나, 폐각상태를 지시하는 파형이 관찰되었다. 이와 같은 생물모니터링 시스템을 패류 양식에 활용하여 빈산소와 같은 해양환경의 이상변동을 신속히 감지할 수 있다면, 어업피해를 감소시킬 수 있을 것으로 기대된다.

We investigated the possibility of a bio-monitoring system for detecting hypoxic water in coastal area using shell valve movements of Pacific oyster (*Crassostrea gigas*), which showed most aquaculture production in Korea, with Hall element sensor. In filtrating water to confirm shell valve movement (SVM) under normal condition, it showed spikes which mean a relatively fast closing condition after opened condition of average 5~12 mm, and then the SVM showed back to opening condition slower than closing speed SVM numbers during light period were similar to that of dark period ($p < 0.05$). When dissolved oxygen (DO) concentration was reduced from 7 mg l⁻¹ to 3 mg l⁻¹, SVM numbers were increasing with decreasing of DO, and showed abnormality SVMs as compare with normal condition. Moreover, in the condition of 2 mg l⁻¹, Distance between light and left shell showed gradually decreased, and then we could not detected SVMs due to closed condition. Thus, if we quickly detect abnormal environmental variations as hypoxia water using bio-monitoring of SVM, it may be contribute to increased productivity by dramatically reducing damages in aquaculture.

Keywords: Bio-monitoring system(생물모니터링 시스템), Pacific oyster (*Crassostrea gigas*) (참굴), Shell valve movements(폐각운동), Hall element sensor(홀소자), Dissolved oxygen(용존산소), Hypoxia water(빈산소)

서론

연안역은 부영양화와 함께 하계의 성층이 형성되면 저층에 용존 산소가 낮아지며, 이에 따라 저산소수괴 또는 빈산소수괴가 발생하고, 저층에 서식하는 생물에게 악영향을 미친다(Marumo and Yokota, 2012). 이러한 현상은 우리나라 남해안의 진해만, 가막만 그리고 서해안의 천수만 및 영산강 하구역 등 폐쇄성 연안역에서 다수 보고되어 있다(NFRDI, 2009). 한편 저층의 빈산소수괴는 일정한 값을 유지하지 않고, 물리, 화학 및 생물학적 조건에 따라 빈산소수괴의 강도가 변화되며, 특히 이류(advection) 등과 같은 물리적 과정을 통하여 저층 빈산소수괴가 중층 또는 표층까지 도달한다(Yanagi, 2004). Tokyo 만에서 만 외부로부터 유입되는 외양수의 영향으로 저층의 빈산소수괴가 중층으로 상승하고, 다시 외양수의 세력이 미약해짐에 따라 빈산소수괴 저층으로 침강하는 현상이 보고되어 있다(Fujiwara and Yamada, 2002). 실제 우리나라에서도 표층 가두리 양식장 및 굴양식장의 수하역 하단 부의 양식생물이 빈산소수괴의 확장 및 이동에 따라 피해가 발생되고 있다. 이러한 양식생물의 피해를 예방하기 위해 2015년부터 국립수산과학원을 중심으로 남해안 양식어장 해역 빈산소 모니터링을 확대를 추진하고 있으며(<http://www.newswire.co.kr/newsRead.php?no=786186>), 빈산소수괴 측정 모니터링을 위한 수질자동측정소 등이 설치되어 운영 중에 있다(<http://www.newswire.co.kr/newsRead.php?no=630822&ected=>).

화학검지소자를 활용한 해양환경 모니터링 시스템은 많은 비용과 기술의 투자가 요구되고 있으며, 이상적인 모니터링 시스템은 다음 3가지 사항을 충족시켜야 할 것으로 보인다. "이상 해양환경에 대한 높은 감도", "설치 및 유지에 위한 낮은 비용 및 간편성"과 "데이터 연속성"을 들 수 있다(Oh et al., 2013). 생물모니터링 시스템(bio-monitoring system)은 화학물질에 대하여 정확하고, 민감하게 반응하는 생물을 검지소자로 활용하여 환경을 모니터링하는 시스템으로(Untersteiner et al., 2005; Oh et al., 2013), 어류, 갑각류, 미세조류 및 박테리아 등 다양한 생물을 활용한 시스템이 개발되었다(Baldwin and Kramer, 1994; Sluyts et al., 1996; van Der Schalie et al., 2001; Gerhardt et al., 2006). 우리나라에서도 전국 4대강(한강, 낙동강, 금강, 영산강)을 중심으로 유해화학물질 등의 유입에 의한 수생생물 뿐만 아니라 인체에 미치는 유해성을 조기에 감지하기 위하여, 생물 모니터링 시스템을 구축하여 운영 중에 있다.

본 연구에서 이용할 생물모니터링 대상생물은 이매패류이다. 이매패류는 이동성이 비교적 미약하며 체내에 오염물질의 축적이 가능하기 때문에 수권에서 중금속 및 유기오염물질의 생물학적 지시자로 널리 사용되고 있다(Kramer and Botteweg, 1991; Jeng et al., 2000; Moroishi et al., 2009). 이 중 이매패류의 패각운동은 호흡과 섭식 그리고 배출과 같은 생리활성과 조석 및 일주기와 관련된 내인성 리듬(circadian rhythms)에 의해 영향을 받는다(Fujii and Toda, 1991; Jorgensen, 1996). 일본에서는 양식생물의 생산성 향상을 위해서 이매패류의 패각운동을 측정하여 건강지표로 사용하여 왔으며, 최근

에는 Ago 만에서 이매패류를 대상으로 생물모니터링을 활용하여 유해적조생물인 *Heterocapsa circularisquama* 감지에 활용하고 있다(Nagai et al., 2006). 또한 우리나라에서는 담수유입에 따른 저염화 현상으로 발생하는 양식피해를 줄이기 위해, 참굴을 활용하여 생물 모니터링 개발을 시험하였다(Oh et al., 2013). 지금까지 패각운동은 키모그래프(kymography)와 스트링게이지(strain-gauge)를 이용하였다(Fujii, 1979; Higgins, 1980). 본 연구에서는 상기와 비교하여 보다 소형화된 홀 소자(hall element sensor)를 이용하여 국내 패류 양식 중 가장 많은 생산량을 보이는(MIFAFF, 2011) 참굴의 패각운동을 기초로, 연안역에서 문제가 되고 있는 빈산소에 대한 생물모니터링 시스템 구축 가능성을 검토하였다.

재료 및 방법

1. 홀 소자를 이용한 굴의 패각운동 측정

본 실험에 이용한 참굴은 2년생이며(각고: 29.7 ± 7.11 mm, 각장: 107 ± 10.2 mm, 각폭: 53.9 ± 5.89 mm, 습중량: 89.5 ± 28.5 g), 패각운동의 측정은 홀 소자를 이용하였다. 계측원리는 홀 소자와 자석 간의 거리에 따라 변화하는 자기력 값을 홀 소자의 출력전압으로 변환하여 패각운동을 측정하였다(Fig. 1; Nagai et al., 2006; Oh et al., 2013). 여기서 홀 소자는 자기장의 세기에 따라 전압이 변화하는 소자로, 제어전류가 발생할 때 자속밀도의 변화에 따라 출력전압이 발생하고, 출력전압은 제어전류와 외부자계의 합에 비례한다. 따라서 제어전류를 일정하게 하면, 출력전압은 외부자계에 비례하며, 외부자계는 자석과 홀 소자의 거리의 제곱에 반비례하기 때문에 출력전압으로부터 두 패각의 거리를 계산할 수 있다(Nagai et al., 2006; Oh et al., 2013). 현재 준비된 홀소자를 이용한 패각운동 장치는 참굴 4개체를 측정하도록 4개 채널(channel)로 구성하였다.

패각운동에 따른 거리와 홀 소자의 출력 값의 상호비교를 위해서 먼저 참굴 내부기관을 모두 제거한 후, 좌우 패각의 선단에 각각 홀 소자 및 자석을 부착하고, 버니어캘리퍼스(vernier calipers)를 이용하여 거리를 측정하였으며, 이를 통해 센서의 출력 값과 패각거리의 관계를 구하였다. 홀 소자와 자석간의 거리(L)는 패각 시의 홀 소자 센서와 자석 간의 거리(La), 홀 소자 센서 내의 홀 소자 감지부의 거리(Lb) 또는 굴 패각 선단부의 개각거리(Lc)의 합이다(Oh et al., 2013). 본 연구에서 패각 시 La는 채널 1에서 7.54 mm, 채널 2에서 8.97 mm, 채널 3에서 6.41 mm, 채널 4에서 5.27 mm로 나왔으며, Lb는 전 채널 3.5 mm로, L과 홀소자센서 출력값(Vh)의 관계식은 Fig. 2와 같이 도출되었다. Vh는 L²에 반비례하는 높은 상관관계가 보였다. 이를 이용하여 Vh로부터 정확한 L 값의 계산이 가능하였다. 따라서 실험에서 도출된 Vh는 상기 관계식에 대입하여 계산함으로써 정확한 개각거리(Lc)를 생산할 수 있었으며, 이를 패각운동의 파형의 형태로 나타내었다. 또한 패각 시에는 패각거리를 0 mm로 하였으나, 패각거리가 0 mm이라 할지라도 패각 정도에 따라 Vh가

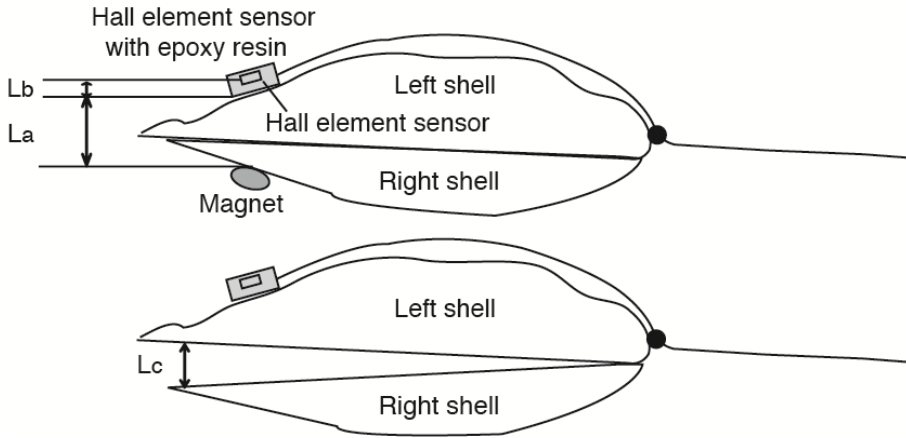


Fig. 1. Scheme of a Pacific Oyster (*Crassostrea gigas*) with a Hall element sensor bonded onto the left valve and a small magnet on the right valve. L_a : the distance between the Hall element sensor and the magnet at the closed state; L_b : the distance between the Hall element sensing point inside the sensor; L_c : the distance of the gap between the valve.

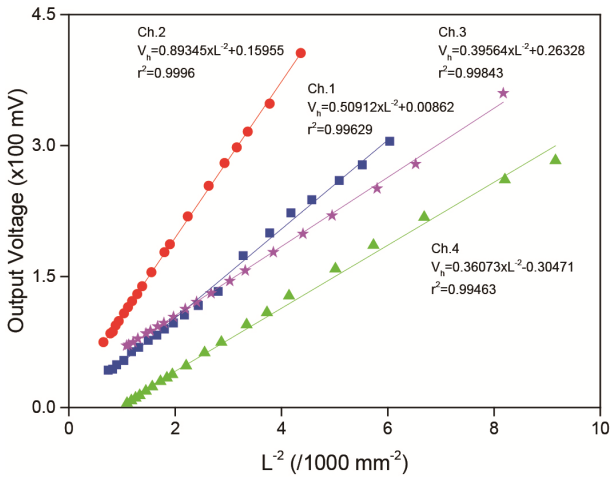


Fig. 2. Relationship between the output voltage of the Hall element sensor and the distance from the Hall element sensor on the left valve to the magnet on the right valve.

10,200~19,058 mV까지 변화하였기에, 10,200 mV 이상의 값이라도 모두 폐각상태인 0 mm로 가정하였다.

2. 주·야간에 따른 참굴 패각운동의 변화 측정

먹이생물 개체 수 변화에 따른 패각운동의 실험은 GF/C (1.2 μm pore size) 필터로 여과한 해수에 먹이공급 없이 3일 이상 굴 4개체를 순치시켰으며, 20 l 수조에서 수온, 염분 및 pH 환경은 채취한 굴 양식장의 환경(수온: $15 \pm 1^\circ\text{C}$, 염분 33 ± 2 psu 그리고 pH 8.1)과 유사하게 조절하였다. 명암주기 조건은 24시간 중 9시부터 18시까지 명조조건(광량 약 $150 \mu\text{mol m}^{-2} \text{sec}^{-1}$; fluorescent lamp)으로, 암

조건은 암막을 활용하여 광을 차단하였다.

3. 저산소에 따른 참굴 패각운동의 측정

저산소에 따른 참굴의 패각운동 변화 측정을 위해 수조의 수온, 염분 및 pH 환경은 "주·야간에 따른 참굴 패각운동 변화 측정"과 동일한 조건으로 실시하였다. 빈산소 조건은 해수에 질소(N_2)가스를 투입하여 용존산소 농도를 조절하였다. 또한, 실험 시 질소기포에 따른 패각운동에 영향을 주지 않기 위해, 질소가스 투입기는 실험수조 (20 l)의 중층에 설치하여 기포의 영향을 최소화 하였다. 용존산소 농도는 최초 7 mg l^{-1} 에서 150분 동안 단계적으로 2 mg l^{-1} 까지 감소시켰으며, 이 후 180분 동안 2 mg l^{-1} 농도로 유지시켰다. 용존산소 측정은 격막전극법(YSI 58, YSI Inc. Ohio)을 활용하여 측정하였다.

결과 및 고찰

1. 주·야간에 따른 패각운동 측정

해양생물의 생리활성은 주야 및 조석 변화의 주기적인 환경요인과 관련되어 있다고 알려져 왔으며, 이매패류인 바지락(*Venerupis philippinarum*), 진주담치(*Mytilus edulis*) 및 진주조개(*Pinctada fucata martensii*) 등에서도 이러한 내인성 리듬이 보고되어 있다(Kuwatani, 1963). 따라서 본 연구의 재료인 참굴도 일주 변화에 대한 주기성을 확인하기 위해서 실험을 수행하였다(Fig. 3). 여과해수에서 정상상태의 패각운동을 측정한 결과, 평균 5~12 mm 정도의 개각상태를 유지하였다. 패각운동 시 비교적 빠른 폐각상태를 보였다가 다시 느린 속도의 개각상태의 운동을 나타내었고, 주·야간에 관계없이 2시간에 평균 13~21회 정도의 패각운동이 관찰되었다(Fig. 3). 이러한 참굴 패각운동의 형태는 Nagai (2006)와 Oh et al. (2013)의 보고와 일치하였다. 일반적인 참굴의 패각운동의 횟수는 다른 이매패류보다

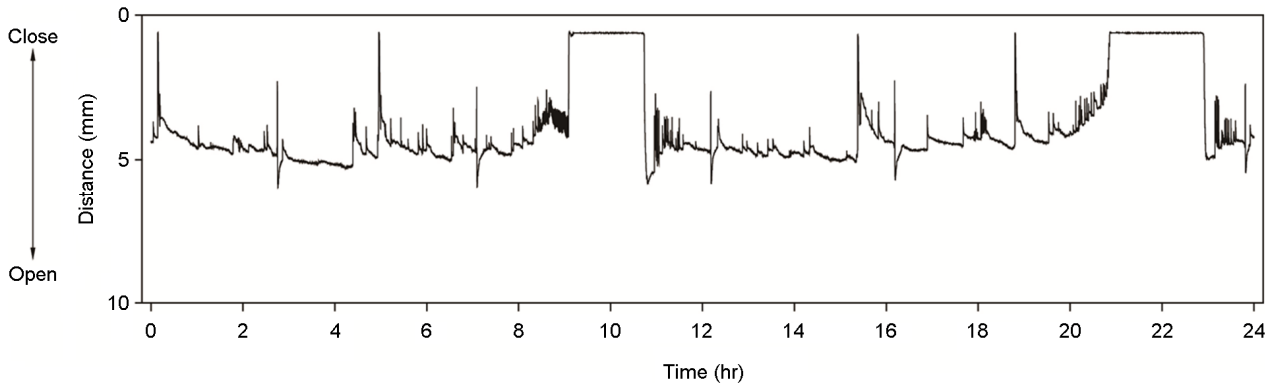


Fig. 3. Valve movements recorded for Pacific oyster (*Crassostrea gigas*) during light and dark period (light period: 9~18 hours, dark period: 19~8 hours).

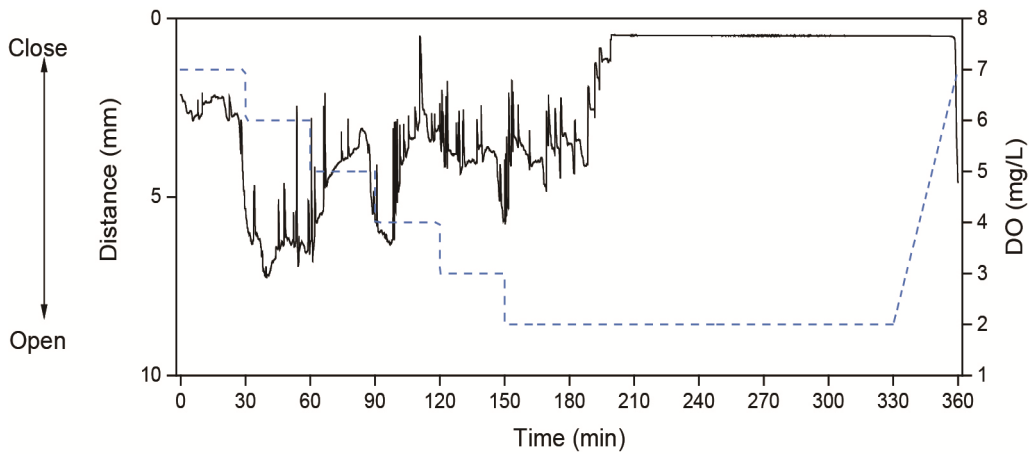


Fig. 4. Valve movements recorded for Pacific oyster (*Crassostrea gigas*) in various dissolved oxygen (DO) concentrations.

비교적 활발한 패각운동을 보인다 그러나 진주조개는 60분 동안의 패각운동이 0~2회였으며, 통상 6회 미만으로 느리게 나타났다. 또한 개각과 폐각의 속도가 일정하여 침과 같은 패각운동 파형을 보여 (Nagai et al., 2006), 패각운동은 이매패류 종류에 따라 다르게 나타나는 것으로 생각된다. 또한 짧게는 약 1시간에서 길게는 약 2시간 30분 동안 폐각상태가 지속되는 휴지기 상태를 나타내었다. 휴지기는 바지락, 진주담치 및 피조개(*Scapharca broughtonii*)에서는 관찰되었다(Fujii, 1979; 1981), Beentjes and Williams (1986)는 실험실에서 뉴질랜드 새조개(*Chione stutchburyi*)의 패각운동을 관찰한 결과, 새조개가 개각하여 수관(siphon)을 돌출시키는 비율이 채집장소의 만조시기에 많았으며, 간조시기에는 반대의 경향이였다. 따라서 이러한 휴지기와 같은 이상 패각운동은 조석 주기와 밀접한 관련 있는 것으로 보인다(Fujii, 1981).

한편 굴의 주·야간 패각운동의 상관관계는 t-검정의 95% 신뢰도를 통해 확인하였고, 그 결과 t통계량 -0.35151 값이 t기각치 ($t_{0.05(2),5}=2.571$)보다 작았기 때문에 정상상태의 주·야간 패각운동의 파형횟수는 서로 유의한 차이가 없었다. Tran et al. (2011)은 1년 동안 현장에서 16개체에 대한 참굴의 패각운동을 측정하였다. 그 결과 지구, 달 그리고 태양의 상호작용으로 발생하는 대조기와 소조기와 같은 조석주기에 대하여 패각운동이 크게 변화를 하고, 빛도 패각운동에 영향을 주지는 하지만, 조석주기보다는 낮은 요인으로 작용한다고 보고하였다. 또한, Mat et al. (2014)는 빛의 주기에 따른 내인성 일주기성을 보인다는 증거는 제시할 수 없었다. 따라서 조석 주기가 없는 실내실험의 경우 야간과 주간에 대한 패각운동의 통계적인 유의한 차이가 없었기 때문에 빈산소 조건에 따른 참굴 패각운동의 측정은 명 조건하에서 수행하였다.

2. 빈산소에 따른 참굴 폐각운동의 측정

참굴의 산소 변화에 따른 이상 폐각운동을 관찰하기 위해, 질소가스를 투입하여 용존산소 농도를 7 mg l^{-1} 에서 2 mg l^{-1} 까지 감소시켰다(Fig. 4). 용존산소 농도가 7 mg l^{-1} 에서 3 mg l^{-1} 까지 감소할수록 폐각운동의 횟수는 증가를 하였고, 파형도 Fig. 2와 다르게 불안정한 형태의 파형을 나타내었다. 더욱이 용존산소가 2 mg l^{-1} 로 감소된 후 폐각운동의 크기가 점차 작아지고, 1시간 이후부터 폐각상태를 유지하였다(Fig. 4). Kawai et al. (2006)은 진주조개에서 6 mg l^{-1} 에서 0.5 mg l^{-1} 으로 감소시켰을 때 폐각운동의 횟수는 증가하였다고 보고하여, 본 연구결과와 일치하였다. 일반적으로 이매패류는 저산소하에 산소이용을 유지하기 위해서 여수량을 증가시키거나, 산소이용률을 증가시키는 경우가 있다(Herleid, 1980). 여수량의 증가는 폐각운동의 증가와 관련 있으며, 여수율 감소는 폐각과 연결된다(Riisgard et al., 2014). 따라서 참굴의 경우 산소가 낮아질수록 여수율을 증가시키기 위해서 폐각운동의 횟수가 증가되는 것으로 보이며, 2 mg l^{-1} 이하에서 폐각상태의 유지는 산소 소비율이 현저한 감소하기 때문에 활력이 저하되어, 폐각운동이 정지된 것으로 보인다(Yamamoto and Handa, 2011).

한편, 진주조개는 호흡을 위해서 수류를 유도하는 폐각운동을 하며, 아가미 표면에 있는 섬모운동에 따라 체강 내에 수류를 일으켜, 아가미의 조직에 신선한 해수를 공급한다. 또한, 20°C 에서 진주조개의 편모운동은 산소포화도가 5% 미만으로 감소하기까지 저산소의 영향을 받지 않으며, 아가미의 섬모운동과 함께 호기적 호흡을 한다(Yamamoto and Handa, 2011). 이러한 생리적인 현상을 바탕으로 Go et al. (2009)는 진주조개를 활용한 저산소 조기감지를 위해 폐각운동을 측정된 결과, 1.5 mg l^{-1} 까지 용존산소를 감소시켰을 때는 파형의 변화가 없었지만, 0.5 mg l^{-1} 에서는 고빈도의 파형이 관찰되어 진주조개를 빈산소 감시를 위한 생물모니터링 구축 가능성을 제안하였다. Yamamoto and Handa (2011)에 따르면, 참굴의 산소요구량이 $0.25 \text{ ml min}^{-1} \text{ kg}^{-1}$ 으로 다른 이매패류(진주조개 및 굽은줄격판담치; *Septifer virgatus*)에 비하여 낮은 요구량을 보였고, 또한 상대적으로 대사량도 낮아서 키조개(*Atrina pectinata*)와 같이 비산소의존형 이매패류로 분류하였다. 그러나 본 연구에서 기 보고된 용존산소 농도보다 높은 산소 농도에서도 폐각운동의 빈도가 높아졌으며, 2 mg l^{-1} 의 농도에서 폐각상태를 보였다. 따라서 비산소의존형으로 분류하였던 참굴이 본 연구에서 진주조개보다 높은 용존산소에서도 저산소감소를 감지하여, 생물모니터링을 위한 유용한 검지생물로 활용 가능성을 제시할 수 있다. 그럼에도 불구하고 지금까지 참굴의 산소 이용능력에 대한 보고와 본 결과가 상반되어 보다 심도 있는 산소에 대한 생리적인 현황 조사가 필요할 것으로 보인다.

최근 양식어장을 운영하는 어민들 역시 해양환경 변화로 인한 양식어장 피해를 최소화하기 위해 많은 노력을 하고 있으며, 정부에 환경보전 및 감시 방안을 요구하고 있는 실정이다. 본 연구는 부영양화 및 빈산소수괴 등의 문제가 되는 해역에서 원래 서식하고 있는

생물들을 이용한 모니터링 시스템으로 기존의 모니터링 시스템보다 더욱 친환경적인 방법으로 생각되며, 만약 이러한 모니터링 시스템이 성공적으로 활용이 된다면 어업생산력 향상 및 어업민의 소득향상에 크게 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

사 사

이 논문은 2015년 해양수산부 재원으로 해양과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구입니다(이매패류 바이오센서를 활용한 연안 환경모니터링 시스템 개발).

참고문헌

- Baldwin IG, Kramer KJM. 1994. Biological early warning systems (BEWS). Biomonitoring of coastal waters and estuaries, CRC Press, Boca Raton, FL, 1-25.
- Beentjes MP, Williams BG. 1986. Endogenous circatidal rhythmicity in the New Zealand cockle *Chione stutchburyi* (Bivalvia, Veneridae). Marine & Freshwater Behaviour & Phy 12: 171-180.
- Fujii T. 1979. The study for periodic behavior of bivalves: I. Periodicity observed in short-necked clam *Tapes japonica* Deshayes put in natural environment. Bull Tohoku Reg Fish Res Lab 40: 37-46.
- Fujii T. 1981. The study for periodic behaviour of bivalves, 2: Shell movement of ark shell [*Scapharca broughtonii*] and Pacific oyster [*Crassostrea gigas*]. Bulletin of Tohoku Regional Fisheries Research Laboratory 65-69.
- Fujii T, Toda S. 1991. Open and close shell-movement of the mussel, *Mytilus edulis* L. under natural conditions. Bulletin of National Research Institute of Aquaculture. Bull Natl Res Inst Aquaculture 20: 33-40.
- Fujiwara T, Yamada Y. 2002. Inflow of oceanic water into Tokyo Bay and generation of a subsurface hypoxic water mass. Journal of Geophysical Research: Oceans 107: 1-9.
- Gerhardt A, Ingram MK, Kang IJ, Ulitzur S. 2006. In situ on line toxicity biomonitoring in water: Recent developments. Environmental Toxicology and Chemistry 25: 2263-2271.
- Go J, Nagai K, Honjo T. 2009. A technique for detecting hypoxic seawater and hypoxic seawater containing hydrogen sulfide by monitoring pearl oyster [*Pinctada fucata*] valve movement patterns with a hall element sensor. Aquaculture Science 57: 449-453.
- Herleid CF. 1980. Hypoxia in invertebrates. Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Physiology 67: 311-320.

- Higgins PJ. 1980. Effects of food availability on the valve movements and feeding behavior of juvenile *Crassostrea virginica* (Gmelin). I. Valve movements and periodic activity. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 45: 229-244.
- Jeng MS, Jeng WL, Hung TC, Yeh CY, Tseng RJ, Meng PJ, Han BC. 2000. Mussel watch: a review of Cu and other metals in various marine organisms in Taiwan, 1991-98. *Environmental Pollution* 110: 207-215.
- Jorgensen CB. 1996. Bivalve filter feeding revisited. *Marine Ecology Progress Series* 142: 287-302.
- Kawai H, Uchida H, Kasuya T, Yamaguchi H. 2006. Study on environmental restoration in enclosed water using the pearl oyster, *Pinctada fucata martensii*. Laboratory study of the oyster's feeding and shell activities. *Annual Report of Nagasaki Prefectural Institute of Public Health and Environmental Sciences* 52: 19-23.
- Kramer KJ, Botterweg J. 1991. Aquatic biological early warning systems: an overview. *Bioindicators and Environmental Management* 95-126.
- Kuwatani Y. 1963. Effect of photo-illumination on rhythmical shell movement of pearl oyster, *Pinctada martensii* (Dunker). *Bull Jpn Soc Fish* 29: 1064-1070.
- Marumo K, Yokota M. 2012. Review on aoshio and biological effects of hydrogen sulfide. *Rep Mar Ecol Res Inst* 15: 23-40.
- Mat AM, Massabuau JC, Ciret P, Tran D. 2014. Looking for the clock mechanism responsible for circatidal behavior in the oyster *Crassostrea gigas*. *Marine Biology* 161: 89-99.
- MIFAFF (Ministry for food, agriculture, forestry and fisheries). 2011. Food, agriculture, forestry and fisheries statistical yearbook. Director-General Planning & Coordination Bureau. Gwacheon, pp 324.
- Moroishi J, Kang IJ, Nagafuchi K, Honjo T, Shimasaki Y, Oshima Y. 2009. Biological monitoring to detect both water pollution and water quality recovery based on valve movements of freshwater bivalves (*Corbicula japonica*). *Journal of the Faculty of Agriculture, Kyushu University*, 54: 413-420.
- Nagai K. 2006. Research on means of alleviating damage by *Heterocapsa circularisquama* red tides and reddening adductor disease, causes of the mass mortalities of Japanese pearl oysters (*Pinctada fucata martensii*) Diss. PhD Dissertation, Kyushu University, Kyushu.
- Nagai K, Honjo T, Go J, Yamashita H, Oh SJ. 2006. Detecting the shellfish killer *Heterocapsa circularisquama* (Dinophyceae) by measuring bivalve valve activity with a Hall element sensor. *Aquaculture* 255: 395-401.
- NFRDI 2009. Hypoxia in the coast of Korea. NFRDI, Pusan, pp 1-173.
- Oh SJ, Lee JH, Kim SY. 2013. Bio-Monitoring System Using Shell Valve Movements of Pacific Oyster (*Crassostrea gigas*)-I. Detecting Abnormal Shell Valve Movements Under Low Salinity Using a Hall Element Sensor. *Journal of the Korean Society for Marine Environment & Energy* 16: 138-142.
- Riisgård HU, Larsen PS, Pleissner D. 2014. Allometric equations for maximum filtration rate in blue mussels *Mytilus edulis* and importance of condition index. *Helgoland Marine Research* 68: 193-198.
- Sluyts H, Van Hoof F, Cornet A, Paulussen J. 1996. A dynamic new alarm system for use in biological early warning systems. *Environmental Toxicology and Chemistry* 15: 1317-1323.
- Tran D, Nadau A, Durrieu G, Ciret P, Parisot JP, Massabuau JC. 2011. Field chronobiology of a molluscan bivalve: how the moon and sun cycles interact to drive oyster activity rhythms. *Chronobiology International* 28: 307-317.
- Untersteiner H, Gretschel G, Puchner T, Napetschnig S, Kaiser H. 2005. Monitoring Behavioral Responses to the Heavy Metal Cadmium in the Marine Shrimp *Hippolyte inermis* Leach (Crustacea: Decapoda) with Video Imaging. *Zoological Studies* 44: 71-80.
- van der Schalie WH, Shedd TR, Knechtges PL, Widder MW. 2001. Using higher organisms in biological early warning systems for real-time toxicity detection. *Biosensors and Bioelectronics* 16: 457-465.
- Yamamoto K, Handa T. 2011. Effect of Hypoxia on Oxygen Uptake in the Pacific Oyster *Crassostrea gigas*. *Aquaculture Sci* 59: 199-202.
- Yanagi T. 2004. Hypoxia - the chemical and biological consequences of the mechanisms of its generation, maintenance, variability and disappearance. *Oceanography in Japan* 13: 451-460.