

진동만 미더덕 양식장의 하계 및 동계 탄소 순환 특성

박 지 혜* / 조 윤 식** / 이 원 찬* / 홍 석 진* / 김 형 철* / 김 정 배* / 박 정 현*

Characteristics of Carbon Circulation for Ascidian Farm in Jindong Bay in Summer and Winter

Jihye Park* / Yoonsik Cho** / Won-Chan Lee* / Sokjin Hong* /
Hyung-Chul Kim* / Jeong-Bae Kim* / Junghyun Park

요약 : 미더덕은 우리나라에서만 식용 및 양식하는 생물종으로, 2001년 본격적인 수하식 양식이 시작되어 15,084 M/T이 생산되었지만 2011년에는 2,655 M/T으로 생산량이 크게 감소하였다. 생산량 저감의 원인분석을 위해서는 어장 환경에 관한 물질수지 산정이 필요하다고 판단된다. 진동만 미더덕 양식장에서 하계와 동계에 현장 관측 장비인 벤딕챔버(Belc)를 이용하여 미더덕 양식장과 대조구 정점에 대한 침강 flux와 용출 flux를 산정하였다. 7월 양식장, 2월 양식장, 2월 대조구에서 유기 탄소 침강 flux는 각각 72 mmol C m⁻² d⁻¹, 93 mmol C m⁻² d⁻¹, 34 mmol C m⁻² d⁻¹로 나타났고, 유기탄소 산화율은 각각 13 mmol C m⁻² d⁻¹, 81 mmol C m⁻² d⁻¹, 31 mmol C m⁻² d⁻¹로 나타났다. 영양염 용출 flux는 일반적인 경향을 띄었다. 결과적으로 유기탄소 퇴적 flux는 20:4:1의 비를 나타내었다. 탄소 순환의 물질수지 산정을 통해, 양식 생물의 생산량 저감에 관한 원인 분석연구에 기초 자료로써 활용될 수 있다.

핵심용어 : 미더덕, 벤딕 챔버, 침강 플럭스, 용출 플럭스, 퇴적 플럭스, 진동만

Abstract : The ascidian *Styela clava* has been one of the favorite seafood in Korea. Suspended culture of *Styela clava* was initiated in 2001 and the annual production reached 15,084 M/T, but declined to 2,655 M/T in 2011. In order to solve this problem, it is necessary to estimate the material balance according to the farm-environment. Vertical particulate fluxes and release fluxes were estimated at 2 stations, an ascidian farm (AF) and a non-cultivated area (control) in Jindong Bay. An *in-situ* benthic chamber(Belc) was used in summer and winter season. The sedimentation fluxes of organic carbon were 72 mmol C m⁻² d⁻¹, 93 mmol C m⁻² d⁻¹, 34 mmol C m⁻² d⁻¹ in Jul. AF, Feb. AF, Feb. control. The organic carbon oxidation rates were 13 mmol C m⁻² d⁻¹, 81 mmol C m⁻² d⁻¹, 31 mmol C m⁻² d⁻¹, in each. The release fluxes of nutrients followed the general pattern, well. Consequently, the ratio of the organic carbon burial fluxes were 20:4:1, in each. By the estimation of the carbon circulation, it could be a scientific basis to analyze the reason of production decline for cultivated organism.

keywords : *Styela clava*, benthic chamber, sedimentation flux, release flux, burial flux, Jindong Bay

1. 서 론

미더덕(*Styela clava*)은 전 세계적으로 우리나라에서만 양식 및 식용되며, 타 양식생물의 피해

를 최소화하기 위하여 미더덕 양식어업권이 경남 진해만 내로 한정되어 있다. 1990년대까지만 해도 패류 양식장 시설물의 해적생물이나 양식 부산물로 취급되었으나, 1990년 후반부터 지속적인

* Corresponding author : ysc@nfrdi.go.kr, 051-720-2527

** 정회원 · 국립수산물과학원 어장환경과 · E-mail : homerunball77@nfrdi.go.kr, 051-720-2529

수요량 증대로 양식필요성이 부각되었다. 본격적으로 양식장이 개발된 2001년 미더덕 생산량은 그 해 15,084 M/T으로 최대생산량을 보인 이후 점차 감소하여 2006년에는 1,519 M/T, 최근 2011년 2,655 M/T으로 다소 증가하였으나 예년의 생산량을 회복하지 못하고 있다(MFAFF 2012). 이에 따라 양식어업권과 양식면적도 점차 감소하여 2003년 556건에 8,034 ha이었으나 2007년에는 159건에 619 ha로 감소하였다.

미더덕에 대한 연구는 주로, 성분분석에 관한 연구(이응호 등 1975, 조용기 1978, 이응호 등 1985, Nacional et al. 2006)와 특정물질 이용을 위한 추출에 관한 연구(안삼환 등 2003, 김종태 등 2005, 서보영 등 2006, Palmos et al. 2008)가 이행되어 왔다. 그러나 국내에서는 미더덕의 생리생태에 관한 연구는 물론, 미더덕 양식장의 생산량 저감 요인에 관한 연구는 수행된 바가 없다. 지금까지 밝혀진 미더덕 폐사 요인은 진동만을 중심으로 한 빈산소 수괴와, 하절기 집중강우에 의한 저염분 등의 영향으로 추측하며, 명확한 해석을 위해서는 과학적 판단 근거가 필요한 실정이다.

진동만 미더덕 양식장의 생산량 감소에 관한 원인분석을 위해서는 양식장의 물질순환을 파악하는 것이 중요하다. 양식생물의 성장에 직접적인 영향을 미치는 탄소순환의 파악은 양식생물의 생산량 저감에 관한 원인규명의 기초자료로 활용할 수 있다(NFRDI 2010). 국내의 연구는 통영 가두리양식장의 침강, 용출 플럭스(심정희 등 1997), 득량만 패류양식장 주변의 퇴적물 영양염 용출(김도희와 박청길 1998), 통영 어류가두리 양식장의 유기탄소 순환(이재성 등 2004), 통영 우렁쟁이 양식장의 해역영향(Lee et al. 2012) 등이 있으나, 미더덕 양식장의 탄소순환에 관한 연구는 전무한 실정이다.

캠버 현장측정 장비인 Belc를 이용하여 진동만 미더덕 양식장의 입자물질 침강량과 퇴적물 용출량 조사를 수행하였다. 미더덕 양식장의 해역 환경 특성 및 현장값에 따른 입자물질 침강량과

퇴적물 용출량을 추정하였으며, 그 결과 어장환경 변동에 따른 탄소순환을 산정하여 최근 생산량 저감의 원인분석을 위한 판단자료로 활용되고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 대상해역

진동만의 미더덕 양식장은 경남 창원시 서남해안 128°26'22"E, 35°2'30"N~128°36'3"E, 35°8'20"N에 위치하며, 진동만 내측의 마을어장과 군사경계선 사이에 자리한다(Fig. 1). 진동만의 어업면허권수는 274건이며 그중 미더덕 양식어업이 30%인 81건, 297 ha를 차지하고 있다(NFRDI 2011). 군사지역 미포함시 해역면적은 46,011,564 m²로서 이때의 미더덕 양식장은 6.5%를 차지하며, 군사지역 포함시 91,795,311 m²로 3.2%를 차지하여 군사지역 포함 여부에 따라 미더덕 양식장의 점유비율은 달라진다. 진동만으로 유입되는 하천 중에서 고성천, 구만천, 마암천, 배둔천, 어신천 등이 모두 당동만 안쪽에 위치하고 있으며, 당동만과 인접한 지역의 어장들은 당동만으로부터 조석류의 수송에 의해 전과되어 나오는 저염분수의 희석영역으로, 양식생물에 영향을 미칠 수 있다. 해수유동 특성을 살펴보면, 유속이 빠른 견내량 및 가덕수로로부터 거리가 멀고 동시에 수심이 얕으므로 주위에 위치하는 원문만 및 가조도 일대보다도 해수교환이 원활하지 못한 지형적 특성을 가진다. 진해만 중앙에서 약 30~40 cm s⁻¹ 범위의 유속으로 서향하던 흐름은 진동만 내측으로 유입되면서 최대유속 약 10 cm s⁻¹ 전후로 유속이 현저하게 감소한다. 좁은 수로인 당항포 입구 부근에서는 약 20~25 cm s⁻¹ 범위로 유속이 비교적 빠르게 나타나지만 진동만은 내측으로 갈수록 3~5 cm s⁻¹ 이하의 정체수역이 분포하는 등 전반적으로 해수 유통이 원활하지 않은 특성을 나타낸다(NFRDI 2011).

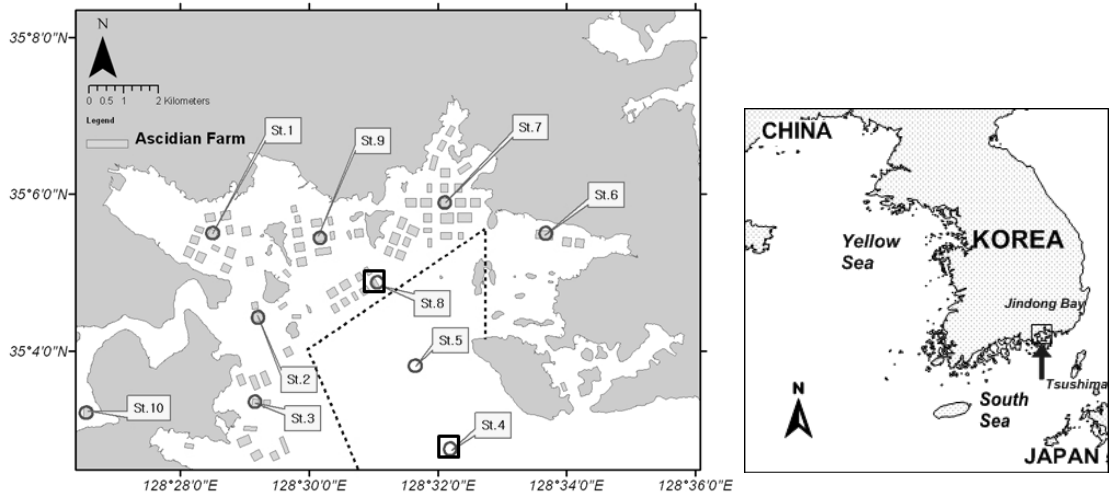


Fig. 1 Study area in Jindong Bay. Open Circles are the survey sites. Open squares are the sites of benthic chamber. Dotted line is the military boundary line.

2.2 진동만의 해양환경특성

진동만의 계절별 해양환경특성을 파악하기 위하여 2011년 4월, 7월, 11월과 2012년 2월 10개 정점에 대하여 수질 및 퇴적물 조사를 수행하였다. 다기능 수질측정기를 이용하여 수층의 수직 구조를 파악한 후, 2개 층(표·저)에서 채수하였으며, 저층수는 해저면 상부 1 m에서 Niskin 채수기를 이용하여 층별 채수 후 분석 항목에 따라 전처리하거나, 항목에 따라 GF/F 필터로 필터링한 후 -20°C로 냉동 보관하여 실험실에서 분석하였고, 각 수질분석항목은 해양환경공정시험법(국토해양부, 2010)에 준하여 분석하였다. 수온, 염분, 용존산소(DO), 수소이온농도(pH)는 다기능 수질측정기(YSI-6000)를 이용하여 현장에서 관측하였고, CTD(Sea bird 19 plus)를 이용하여 수온과 염분의 수직 구조를 관측하였다.

2.3 입자물질 침강량

Belc는 해수-퇴적물 경계면을 지나는 저층 플럭스(benthic flux)를 추정 할 수 있는 현장

(in-situ) 측정 장비이다(Fig. 2, 이재성 등 2010). 입자물질 침강량 조사를 위하여 침강트랩을 벤틱 챔버의 상부에 설치하여 24시간 퇴적물 표층에서 포집하였다. 조사시기는 미더덕의 채묘 시점인 2011년 8월과 성체시기인 2012년 2월에 조사를 수행하였다. 침강입자물질은 시료를 GF/F 필터로 여과한 후 여과지를 105°C 건조기 속에서 2시간 동안 건조하여, 데시케이터에서 실온으로 식힌 다음 무게를 측정하여 여과하기 전·후의 무게차이로 입자물질의 무게를 정량하였다. 입자 유기탄소 및 입자 유기질소는 CHN 원소분석기(Thermo Finnigan, Flash EA 1112 elemental analyzer)로 정량하였다.

2.4 퇴적물 용출량

본 연구에서는 현장에서 일정시간마다 바로 측정 및 채수하는 챔버 현장측정법으로 조사하였다. 퇴적물 산소요구량 측정원리는 부피 및 면적을 알고 있는 용기를 퇴적물 표층에 설치한 후 일정시간 동안 배양시키고, 이 시간동안 chamber내 물질의 농도 변화 기울기를 파악한 후 식(1)에 적용

하여 저층 플럭스를 추정하였다.

$$F_{\text{chamber}} = dC/dt \times V/A \quad (1)$$

식(1)에서 F_{chamber} 는 퇴적물/해수 계면을 통과하는 물질의 순플럭스(net flux)($\text{mmol m}^{-2} \text{d}^{-1}$), dC/dt 는 시간 증가에 따른 물질 농도변화 기울기($\text{mmol l}^{-1} \text{d}^{-1}$), V 는 용기부피(m^3), A 는 해저면에 설치한 용기의 면적(m^2)이다. 퇴적물에서 용출되는 영양염류는 주사기형 자동 채수기를 이용하여 챔버 내부의 해수를 시간별로 채수하였다. 용존 무기 영양염류(Dissolved Inorganic Nutrients)에 대하여 해양환경공정시험법(국토해양부 2010)의 방법에 따라 영양염 자동분석기(QuAAtro Auto Analyzer)를 사용하여 분석하였다.

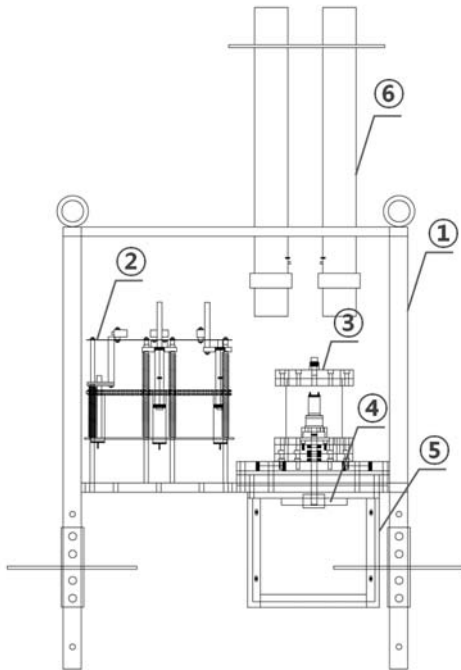


Fig. 2 Belcl benthic chamber instrument ① frame with disk feet, ② automatic water sampler, ③ stirring motor casing on lid, ④ stirring device, ⑤ opaque PVC chamber, and ⑥ sedimentation trap (adapted from Lee et al., 2010).

3. 결과 및 논의

3.1 진동만의 해양환경특성

진동만의 수질 및 퇴적물의 해양환경특성은 다음과 같다(Fig. 3). 해수 염분의 변동은 4월에는 30.9~33.0(평균 31.9), 7월에는 16.9~33.4(평균 27.4), 11월에는 30.2~32.5(평균 32.0) 그리고 이듬해 2월에는 32.8~33.1(평균 33.0)로 하계에 낮은 값을 보였다. 표층 수평분포는 대부분 유사 하였으나 7월에 당동만 내측(St.10)에서 낮았고 북동쪽으로 갈수록 점차 높아졌다. 해수 중 용존 산소(DO)의 변동은 4월에는 8.1~9.4 mg l^{-1} (평균 8.8 mg l^{-1}), 7월에는 1.0~11.9 mg l^{-1} (평균 6.5 mg l^{-1}), 11월에는 6.4~11.0 mg l^{-1} (평균 7.5 mg l^{-1}), 이듬해 2월에는 10.1~10.5 mg l^{-1} (평균 10.4 mg l^{-1})로 나타났으며 하계에 낮은 용존산소 값을 보이며 정점간 큰 차이를 보였다. 저층 수평분포는 7월에 1.0~4.0 mg l^{-1} 의 분포로 전반적으로 낮았으며 특히 만의 북동쪽(St.7)의 경우 1.0 mg l^{-1} 로 빈산소수괴 특성을 보였다. 퇴적물의 강열감량(II)은 4월, 7월, 11월, 이듬해 2월에 각각 8.46~9.39% (평균 8.92%), 10.13~14.37%(평균 11.61%), 8.91~12.49%(평균 10.67%), 7.02~12.85%(평균 9.21%)로 하계에 높게 나타났다. 공간적 분포는 7월에 미더덕 양식장이 밀집된 St.2와 St.8에서 높은 값을 보였다. 퇴적물의 총유기탄소량(TOC)는 4월, 7월, 11월, 이듬해 2월에 각각 19.30~24.30 mg g^{-1} (평균 21.92 mg g^{-1}), 20.90~41.15 mg g^{-1} (평균 30.03 mg g^{-1}), 27.30~50.90 mg g^{-1} (평균 36.45 mg g^{-1}), 27.30~58.55 mg g^{-1} (평균 37.87 mg g^{-1})으로 동계에 높게 나타났으며, 공간적 분포는 7월에 만 중앙부의 양식장이 밀집된 St.2, St.8 그리고 만의 동쪽에 위치한 St.6에서 높은 분포를 보였으며, 이듬해 2월에는 만의 북동쪽인 St.7에서 높게 나타났다. 이와 같은 결과를 바탕으로, 퇴적물의 오염도가 가장 높은 만 중앙부 St.8과 미더덕양식장이 없는 진동만 남측 St.4를 대조구로 지정하여 침강용출 조사를 하였다.

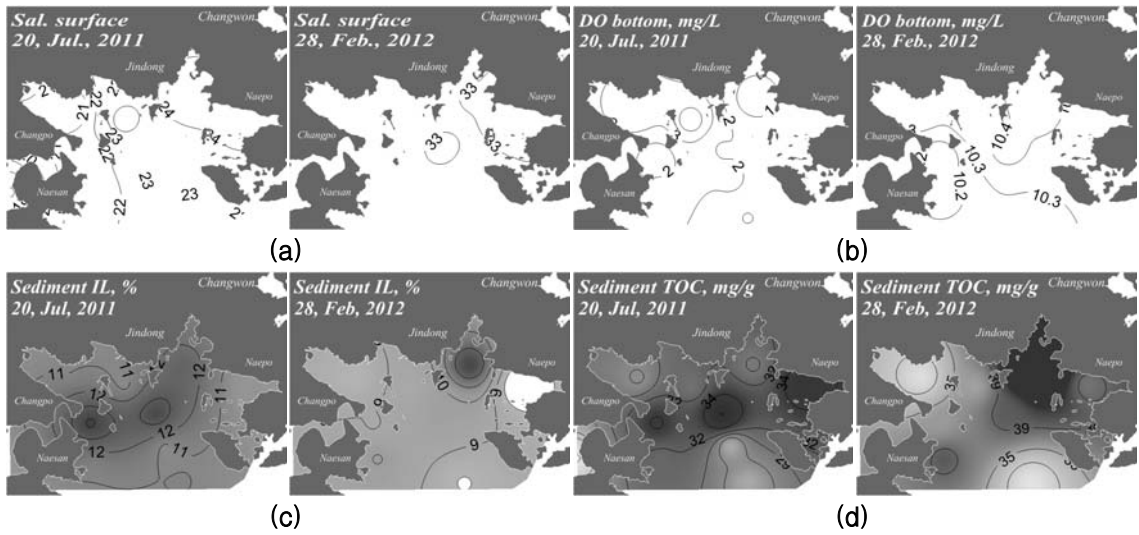


Fig. 3 Environmental characteristics in Jindong Bay (a) Salinity in surface water, (b) Dissolved oxygen in bottom water, (c) Ignition loss in sediment, and (d) Total organic carbon in sediment.

3.2 입자물질 침강량

진동만 미더덕 양식장과 대조구의 표·저층 수 질환경은 Table 1과 같다. 진동만 미더덕 양식장 (St.8)과 대조구(St.4)에서 24시간동안 채집한 침강입자물질, 입자유기탄소, 입자유기질소의 분석 결과는 Table 2와 같다. 침강입자물질(SPM)의 경우 진동만 미더덕양식장은 $9.89 \sim 15.63 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 로서, 통영 가두리양식장의 $220 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (심정희 등 1997), 고성만 굴양식장 $147 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, 자란만 굴양식장 $57 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, 가막만 굴양식장 $325 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, 가막만 담치양식장 $46 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, 여자만 새꼬막양식장 $214 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (NFRDI 2009)보다 낮은 수치였다. 양식장이 존재하지 않을시 각 만의 기초생산력에 크게 좌우될 것이며, 양식장이 시설되면 양식생물의 종류에 따른 호흡물, 배설물 등에도 충분한 상관성을 가질 것으로 판단된다. 입자유기탄소(POC)는 $0.4 \sim 1.1 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 로서, 통영 가두리양식장의 $6.3 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (심정희 등 1997), 고성만 굴양식장 $3.6 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, 자란만 굴양식장 $1.2 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, 가막만 굴양식장 $4.9 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, 가막만 담치양식장 $2.1 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, 여자만 새꼬막양식장 $3.2 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (NFRDI 2009)보다 낮았다. 입자유기탄소 플럭스는 탄소 비로 환산시, 7월 어장, 2월 어장, 2월 대조구가 각각 $72 \text{ mmol C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, $93 \text{ mmol C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, $34 \text{ mmol C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 로 나타났다. 입자유기질소(PON)는 $0.07 \sim 0.20 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 로서, 통영 가두리양식장의 $1.1 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (심정희 등, 1997), 고성만 굴양식장 $0.60 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, 자란만 굴양식장 $0.17 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, 가막만 굴양식장 $0.67 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, 가막만 담치양식장 $0.26 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, 여자만 새꼬막양식장 $0.35 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (NFRDI, 2009)보다 전반적으로 낮은 수치였다. 양식장의 모든 물질 플럭스는 대조구보다 높았으며, 2월 기준으로 입자유입은 약 1.6배, 유기성분의 유입은 약 3배가 높았다. 양식장과 대조구의 C:N비는 $6.62 \sim 6.64$ 로 비슷하게 나타났다. 침강입자물질의 휘발성부 유입자물질(VSS) 비율은 양식장이 17~20%, 대조구가 31%로 나타났다. 이는 미더덕 양식장에서 침강되는 물질들이 양식생물들의 먹이활동 및 배설과정에 의한 영향을 잘 반영하고 있다고 판단된다.

d^{-1} , 여자만 새꼬막양식장 $3.2 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (NFRDI 2009)보다 낮았다. 입자유기탄소 플럭스는 탄소 비로 환산시, 7월 어장, 2월 어장, 2월 대조구가 각각 $72 \text{ mmol C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, $93 \text{ mmol C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, $34 \text{ mmol C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 로 나타났다. 입자유기질소(PON)는 $0.07 \sim 0.20 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 로서, 통영 가두리양식장의 $1.1 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (심정희 등, 1997), 고성만 굴양식장 $0.60 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, 자란만 굴양식장 $0.17 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, 가막만 굴양식장 $0.67 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, 가막만 담치양식장 $0.26 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, 여자만 새꼬막양식장 $0.35 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (NFRDI, 2009)보다 전반적으로 낮은 수치였다. 양식장의 모든 물질 플럭스는 대조구보다 높았으며, 2월 기준으로 입자유입은 약 1.6배, 유기성분의 유입은 약 3배가 높았다. 양식장과 대조구의 C:N비는 $6.62 \sim 6.64$ 로 비슷하게 나타났다. 침강입자물질의 휘발성부 유입자물질(VSS) 비율은 양식장이 17~20%, 대조구가 31%로 나타났다. 이는 미더덕 양식장에서 침강되는 물질들이 양식생물들의 먹이활동 및 배설과정에 의한 영향을 잘 반영하고 있다고 판단된다.

Table 1 Environmental characteristics in the ascidian farm and control. AF is ascidian farm

Item (unit)	Jul.AF		Feb.AF		Feb.Control	
	Surface	Bottom	Surface	Bottom	Surface	Bottom
depth (m)	1.0	13.1	1.1	13.7	1.4	16.1
water temperature (°C)	26.2	16.7	5.2	5.3	4.9	4.8
salinity (psu)	23.2	33.1	32.4	32.5	32.3	32.4
pH	8.62	7.49	8.01	8.00	7.93	7.89
DO (mg l ⁻¹)	11.4	2.1	10.37	10.26	10.46	10.44
NH ₄ ⁺ (mg l ⁻¹)	0.063	0.170	0.006	0.003	0.003	0.002
NO ₂ ⁻ + NO ₃ ⁻ (mg l ⁻¹)	0.101	0.123	0.003	0.002	0.002	0.002
PO ₄ ³⁻ (mg l ⁻¹)	0.003	0.043	0.001	0.002	0.002	0.002

Table 2 Sedimentation flux of particulate materials (unit : g m⁻² d⁻¹)

	Jul.AF	Feb.AF	Feb.Control
SPM	12.07	15.63	9.89
POC	0.87	1.12	0.40
PON	0.15	0.20	0.07

3.3 퇴적물의 용출량

7월 진동만내 미더덕 양식장의 저층수의 용존 산소 농도는 2.1 mg l⁻¹였으며, 빈산소 환경이 조성되어 있었다. 어장의 하계 퇴적물 산소요구량은 16 mmol O₂ m⁻² d⁻¹로 매우 낮은 결과를 나타내었다(Table 3, Fig. 4). 유기물의 산화과정에서 생성되는 이산화탄소와 사용되는 산소의 분자비 (106/138 = 0.78)를 이용하여 유기탄소 산화율로 환산하여 보면, 하계 미더덕양식장은 13 mmol C m⁻² d⁻¹로 나타났다. 이는 빈산소 환경에서 유기탄소 분해 경로의 특성을 잘 보여주고 있다. 산소는 열역학적으로 매우 강력한 유기물 산화제로서, 연안의 경우 높은 유기물의 함량으로 산소에 의한 산화는 제한되는 반면 혐기성 조건에서 유기물 분해가 우세한 것으로 알려져 있다. 퇴적물의 산소요구량은 퇴적물과 수계 경계면의 용존산소 농도에 영향을 받기 때문에, 성층화가 형성된 상태에서 용존산소의 농도가 매우 낮을 경우 퇴적물 산소요구량은 매우 낮게 평가될 수 있다 (Sommaruga 1991). 즉, 진동만과 같이 하계 빈산소수괴가 형성되는 곳에서는 유기물 분해에 의

하여 저층 산소는 급격히 고갈되어 상대적으로 낮은 퇴적물 산소요구량을 나타낸다. 이듬해 2월 미더덕 양식장과 대조구의 저층퇴적물을 대상으로 현장측정장비 Belc/로 배양한 결과를 살펴보면, 퇴적물 산소요구량은 양식장에서 105 mmol O₂ m⁻² d⁻¹로 높게 나타났다. 대조구의 퇴적물 산소요구량 40 mmol O₂ m⁻² d⁻¹에 비하여 약 2.6배 정도 높은 요구량을 나타내었으며, 이는 양식장아래에 퇴적된 유기물질의 높은 산화에 기인한다. 유기탄소 산화율로 환산하여 보면, 미더덕양식장에서 81 mmol C m⁻² d⁻¹, 대조구에서 31 mmol C m⁻² d⁻¹로 나타났다. 양식장과 대조구의 SOD 연구결과들을 살펴보면, 통영 우렁챙이 양식장이 2009년 5월에 225 mmol O₂ m⁻² d⁻¹, 양식장이 없는 진해만이 동일시기에 84 mmol O₂ m⁻² d⁻¹로 측정되었으며(Lee et al. 2012), 통영 가두리 양식장이 1995년 6월에 230 mmol O₂ m⁻² d⁻¹, 대비정점에서 75 mmol O₂ m⁻² d⁻¹로 측정(심정희 등 1997)된 결과보다 낮은 수치였지만, 반폐쇄성 한국연안 퇴적물의 평균 SOD는 16±6 mmol O₂ m⁻² d⁻¹(Lee et al. 2012)로서 진동만 미더덕 양식장 주변의 퇴적물 오염은 상당히 진행

되어 있음을 알 수 있다. 또한, 일반적으로 수온이 증가함에 따라 SOD는 선형적으로 증가하지만(정하영과 조경제 2003), 하계 빈산소수괴가 형성되어 있는 진동만은 오히려 낮은 SOD가 측정되

므로, 조사시기 및 대상해역의 해양환경특성을 함께 고려하는 것이 SOD 비교 및 유기탄소 분해 특성을 파악하는데 도움이 되리라 판단된다.

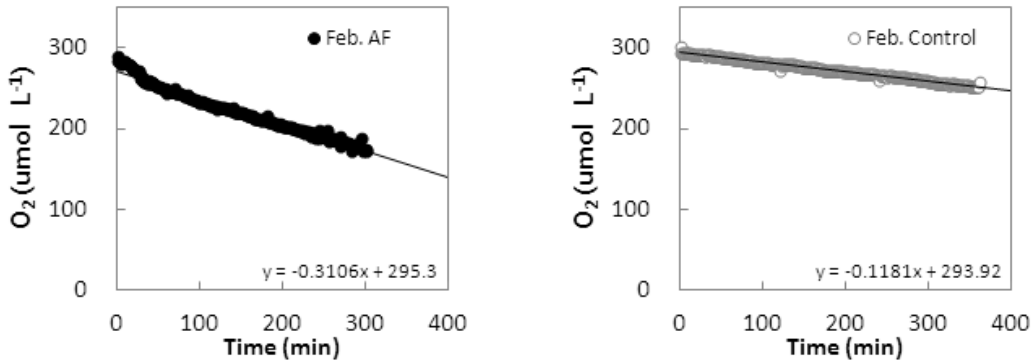


Fig. 4 Sediment oxygen demand flux in the ascidian farm.

Table 3 Estimation of sediment oxygen demand and nutrient flux in the ascidian farm (unit : mmol m⁻² d⁻¹)

	Jul.AF	Feb.AF	Feb.Control
SOD	16	105	40
NH ₄ ⁺	11.13	2.84	1.66
NO ₂ ⁻ + NO ₃ ⁻	-2.50	-0.61	0.03
PO ₄ ³⁻	-0.13	0.21	0.12

NH₄⁺의 7월 용출 플럭스는 11.13 mmol m⁻² d⁻¹(수온 16.7°C)이었으며, 2월은 어장에서 2.84 mmol m⁻² d⁻¹(수온 5.3°C), 대조구 1.66 mmol m⁻² d⁻¹(수온 4.8°C)로(Table 3, Fig. 5), 시간증가에 따라 증가하는 경향을 보여 유기물의 재광물화 현상을 나타내었다. NH₄⁺ 용출량은 수온에 대하여 비례적으로 증가하는 기존의 연구(정하영과 조경제 2003)와 유사하였으며, 하계 용출 플럭스가 가장 높았다. 동계는 어장아래의 NH₄⁺ 용출량이 약 1.7배 높았는데, 이는 양식에 의하여 축적된 표층퇴적물의 유기물 분해(regeneration)가 더욱 활발히 진행됨을 보여준다. 2009년 5월에 통영 우렁챙이 양식장(수온 13.5~14.9°C)이 5.1 mmol m⁻² d⁻¹, 양식장이 없는 진해만이 동일시기에 2.3 mmol m⁻² d⁻¹이었으며(Lee et al. 2012),

1995년 6월에 통영 가두리 양식장(수온 18.1~19.3°C)이 13.9 mmol m⁻² d⁻¹, 대비정점에서 4.5 mmol m⁻² d⁻¹로 측정(심정희 등 1997)되었다. 산화형태의 질소(NO₂⁻ + NO₃⁻)는 점차 감소하는 경향을 나타내어, 7월에 -2.50 mmol m⁻² d⁻¹로 크게 나타났다(Table 3, Fig. 6). 이듬해 2월 어장에서는 -0.61 mmol m⁻² d⁻¹로 감소하였으며, 대조구에서 0.03 mmol m⁻² d⁻¹로 증가하였다. 일반적으로, NO₃⁻는 호기 및 빈산소 조건에서 수온이 증가함에 따라 수층에서 감소하며, 퇴적물에서 용출되는 NH₄⁺ 양이 많을수록 NO₃⁻는 감소하는 경향을 보이는데(정하영과 조경제 2003). 미더덕 양식장의 하계 및 동계에서는 이러한 경향을 잘 나타내고 있다.

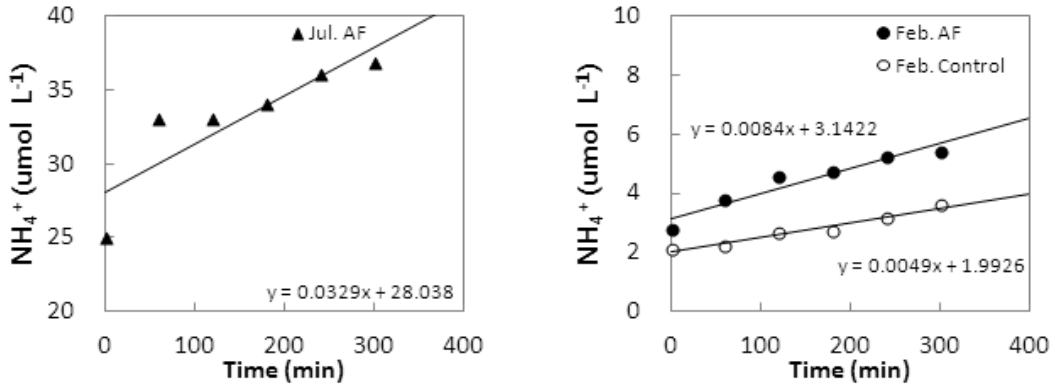


Fig. 5 Ammonium flux in the ascidian farm.

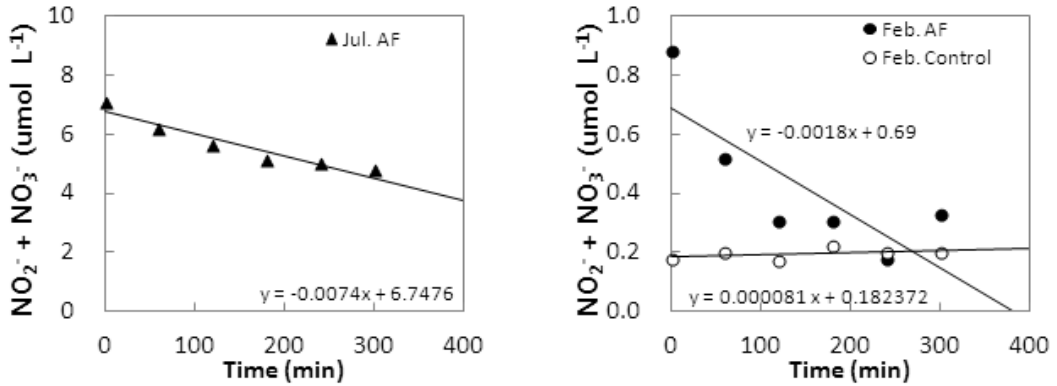


Fig. 6 Nitrite and nitrate flux in the ascidian farm.

PO_4^{3-} 는 7월 미더덕 양식장에서 점차 감소하는 경향을 보였다. 하계 빈산소수피의 영향으로 혐기성조건의 유기물 분해가 우세하며, 이러한 해수 환경에서는 높은 SO_4^{2-} 농도로 인해 대부분이 SO_4^{2-} 환원에 의해 유기물이 분해된다. SO_4^{2-} 환원 과정에서 생성된 황화수소는 강한 독성으로 호기성 및 혐기성 미생물의 생리활동을 저해 할 뿐만 아니라 금속 및 인과 같은 반응성이 높은 성분과 결합하여 퇴적층에서 침전된다. 이러한 이유로 하계 진동만 미더덕 양식장의 인은 제거되는 것으로 보인다. 이듬해 2월의 인 용출량은 어장에서는 $0.21 \text{ mmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, 대조구에서는 0.12

$\text{mmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 로 나타났다(Table 3, Fig. 7). 퇴적물은 수층보다 영양염의 함량이 수천 배 이르는 저장고로서 sink 역할을 하는데, 수층으로 용출되는 영양염을 내부부하라 하며 부영양화 될수록 내부부하는 높아진다 (Jansson et al. 1988). 본 연구결과, 어장이 대조구보다 부영양화 되어 있음을 잘 보여주고 있다. 통영 우렁챙이 양식장과 진해만도 $1.08 \text{ mmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, $0.09 \text{ mmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 로 양식장이 더 높게 나타났고, 통영가두리 양식장과 대조구도 $2 \text{ mmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, $0.4 \text{ mmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 의 값을 보였다.

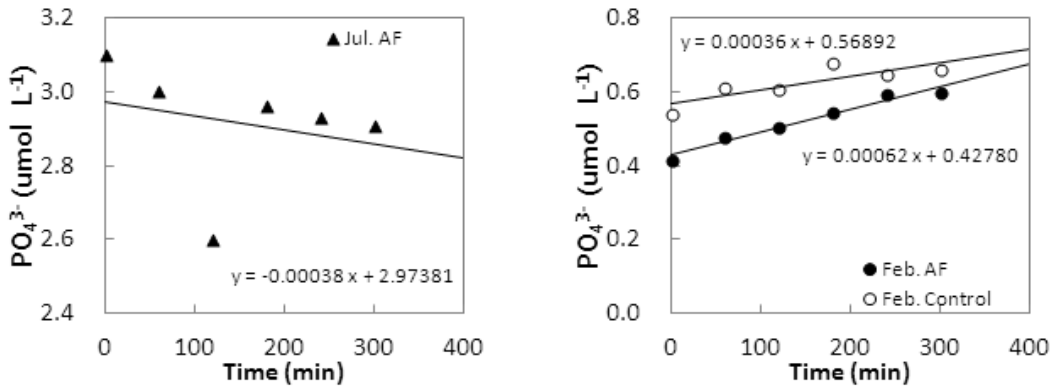


Fig. 7 Phosphate flux in the ascidian farm.

3.4 물질수지

진동만 미더덕양식장의 계절별 유기탄소의 물질수지를 Fig. 8과 같이 산정하였다. 진해만 해역의 식물플랑크톤에 의한 기초생산력(PP)은 7월에 59 mmol C m⁻² d⁻¹이었다(NFRDI 2008). 침강하는 유기탄소의 합(C_{in})은 식물플랑크톤과 기타 입자유기탄소(POC)의 합으로서 72 mmol C m⁻² d⁻¹이었다. 기타 입자유기탄소(POC)는 식물플랑크톤을 제외한 모든 입자유기탄소로서, C_{in}과 PP의 차로 나타낼 수 있다. 퇴적물 산소요구량의 유기탄소 산화율 환산값(C_{ox})은 13 mmol C m⁻² d⁻¹이었다. 저층에 퇴적되는 양(C_{burial})은 C_{in}과 C_{ox}의

차로서 산정되었다. 2월 진해만 해역의 식물플랑크톤에 의한 기초생산력은 27 mmol C m⁻² d⁻¹이었다. 미더덕양식장에서는 기타 입자유기탄소(POC)에 미더덕양식의 영향에 의한 생퇴적(Biodeposit)이 추가된다. 2월 양식장의 기타 입자유기탄소가 66 mmol C m⁻² d⁻¹, 대조구가 7 mmol C m⁻² d⁻¹로서 이는 약 9배 정도의 유기탄소가 수직플럭스에 추가된다. POC/C_{in}은 2월 대조구에서 21%로서 진해만 대조구 33%보다는 낮았고, 7월 양식장에서 18%, 2월 양식장에서 71%로서 통영 우렁쉥이 양식장 76%보다 낮게 나타났다(Lee et al. 2012). 7월 C_{ox}는 13 mmol C m⁻² d⁻¹로서 빈산소수괴의 영향으로 산화분해되는

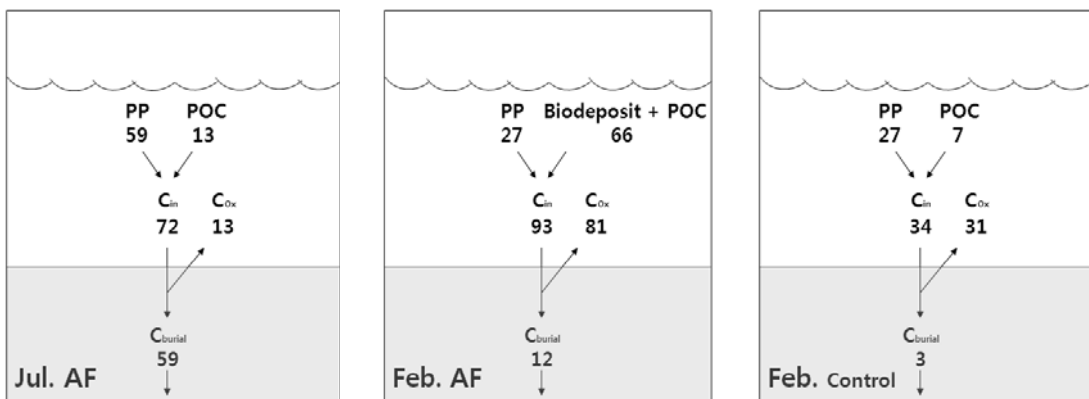


Fig. 8 Organic carbon mass balance in the ascidian farm (unit : g m⁻² d⁻¹).

양이 18%로 많지 않아, 나머지 82%가 퇴적되는 수치를 보였다. 2월 C_{ox} 는 양식장이 87%, 대조구가 91%로서 분해율은 높아졌으나, 퇴적되는 C_{burial} 플럭스가 대조구보다 4배 높아졌다. 결과적으로, 7월 어장, 2월 어장, 2월 대조구에서 유기탄소 침강 플럭스는 2.1:2.7:1이었고, 퇴적 플럭스는 20:4:1로서, 하계와 동계 어장아래의 퇴적물은 퇴적 속도면에서 대조구에 비하여 20배와 4배 가속화된다고 추정할 수 있다. 이러한 퇴적 가속화가 미더덕 생산량 감소의 직접적인 원인으로 볼 수는 없지만, 기존 연구에 따르면 미더덕의 대규모 군집이 식물플랑크톤 소비, 영양염 순환, 생퇴적 등을 통하여 연안생태계에 부정적 영향을 가질 수도 있다(Jiang et al. 2008).

4. 결 론

하계와 동계 진동만 미더덕 양식장 해역의 해양환경특성을 살펴본 후 미더덕 양식장 정점과 대조구를 선정하였으며, 챔버 현장측정 장비인 Belc를 이용하여 입자물질 침강량과 퇴적물 용출량 조사를 수행하였다. 이를 통하여 탄소순환 물질 수치를 산정하였고, 최근 미더덕 생산량 저감 원인 분석을 위한 기초자료로 활용할 수 있다.

감사의 글

이 연구는 국립수산과학원의 사업과제(미더덕 어장적지선정 및 재배치기술개발, RP-2012-ME-031)의 일환으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

국토해양부. 2010. 해양환경공정시험기준, pp 495.
김도희, 박정길. 1998. 득량만 퇴적물로부터 영양염 용출 평가. 한국환경과학회지. 7(4): 425-431.

김종태, 강병철, 지호균, 최애진, 김철진, 조용진, 한호규, 남기달. 2005. 키토산 사료첨가제 급이가 양식넙치의 성장과 품질특성에 미치는 영향. 한국키토산학회지. 10(3): 121-127.
서보영, 정은실, 김주영, 박해룡, 이승철, 박은주. 2006. 미더덕 아세톤 추출물이 산화적 DNA 손상억제 및 암세포 독성에 미치는 영향. 한국응용생물화학회지. 49(3): 227-232.
심정희, 강영철, 최진우. 1997. 남해안 통영지역 가두리양식장 해수-퇴적물 경계면에서의 chemical fluxes. 한국해양학회지. 2(2): 151-159.
안삼환, 정성훈, 강석중, 정태성, 최병대. 2003. 미더덕 껍질로부터 Glycosaminoglycans의 추출. 한국생물공학회지. 18(3): 180-185.
이우호, 오과수, 이태현, 안창범, 정영훈. 1985. 미더덕 및 우렁쉥이 지방성분. 한국수산과학회지. 18(3): 291.
이우호, 정승용, 하진환, 성낙주, 조권욱. 1975. 미더덕, *Styela clava*, extract의 유리아미노산. 한국수산과학회지. 8(3): 177-180.
이재성, 박경수, 강범주, 김영태, 배재현, 김성수, 박정준, 최옥인. 2010. 저층 경계면 연구용 Benthic chamber(Belc)개발. 한국 해양학회지. 15(1): 41-50.
이재성, 정래홍, 김기현, 권정노, 이원찬, 이필용, 구준호, 최우정. 2004. 해상 어류가두리양식장의 환경영향평가: I. 퇴적물 산소소모율 및 저서동물을 이용한 유기물 오염영향권 추정 및 유기탄소 순환. 한국 해양학회지(바다). 9(1): 30-39.
정하영, 조경제. 2003. 낙동강 하류 수계에서 저질퇴적층의 SOD와 영양염 용출. 한국육수학회지. 36(3): 322-335.
조용기. 1978. The Sterol Composition of *Styela clava*. 한국수산과학회지. 11(2): 97-101.
GN Palmos, Bo-Young Yoon, Seok-Joong Kang, Yeung-Jun CHOI and Byeong-Dae

- CHOI. 2008. 미더덕 추출물을 첨가한 조피볼락용 사료의 제조. 한국수산과학회지. 41(6): 458-465.
- Jae Seong Lee, Sung-Han Kim, Yong-Tae Kim, Sok Jin Hong, Jeong Hee Han, Jung-Ho Hyun, Kyung-Hoon Shin. 2012. Influence of sea squirt (*Halocynthia roretzi*) aquaculture on benthic-pelagic coupling in coastal waters: A study of the South Sea in Korea. Estuarine, Coastal and Shelf Science. 99: 10-20.
- Jansson, M., M. Enell, S. Fleischer, R. Gachter, P. Kelderl-mann, S. Lofgen, G. Nurnberg, A. Provini and A. Sinke. 1988. Phosphorus release from sediments. Arch. Hydrobiol. Beih.(Ergebn. Limnol). 30: 90-93.
- Jiang, A., Z. Yu, WG. Cai, and CH. Wang. 2008. Feeding selectivity of the marine ascidian *Styela clava*. Aquaculture Research. 39(11): 1190-1197.
- MIFAFF. 2012. Ministry for Food, Agriculture, Forestry and Fisheries. Fisheries information service. [Online] Available. <http://www.fips.go.kr> (accessed 04.18.12.).
- Nacional, LM., JS. Lee, SJ Kang, and BD. Choi. 2006. Seasonal variation in the nutritional content of mideodeok *Styela clava*. 한국수산과학회지.9(2): 49-56.
- NFRDI. 2008. 어장환경실태조사 1차 보고서. 국립수산과학원. pp 100-101.
- NFRDI. 2009. 어장환경실태조사 2차 보고서. 국립수산과학원. pp 79-80, 148-149, 229-230.
- NFRDI. 2010. 어장환경실태조사 3차 보고서. 국립수산과학원. pp 238-249.
- NFRDI. 2011. 어장적지선정 및 재배치기술 중간 보고서. 국립수산과학원. pp 5-22.
- Sommaruga, R. 1991. Sediment oxygen demand in man-made lake Ton~Ton (Uruguay). Hydrobiologia. 215(3): 215-221.

- 논문접수일 : 2012년 04월 25일
- 심사의뢰일 : 2012년 04월 26일
- 심사완료일 : 2012년 05월 24일