

BSPE9944G-11406-3

제주연안 갯녹음 발생해역의 생태대사율 측정을
위한 비파괴 eddy covariance 기법 개발

Development of non-invasive eddy covariance
technique for estimation of net ecosystem metabolism
in barren ground of Jeju Island

2017. 9

한 국 해 양 과 학 기 술 원

제 출 문

한국해양과학기술원장 귀하

본 보고서를 “ 제주연안 갯녹음 발생해역의 생태대사율 측정을 위한 비파괴 eddy covariance 기법 개발” 과제의 최종보고서로 제출합니다.

2017. 09

총괄연구책임자 : 이재성

참 여 연 구 원 : 김경태, 나공태,
박지영, 백현민,
임준혁, 이승용,
이태희

보고서 초록

과제고유 번호	PE9944G	해당단계 연구기간	2016.6.1-201 7.2.28	단계 구분	1단계
연구사업명	중사업명	주요사업			
	세부사업명	국가사회현안대응과제			
연구과제명	대과제명	제주연안 갯녹음 발생해역의 생태대사율 측정을 위한 비파괴 eddy covariance 기법 개발			
	세부과제명				
연구책임자	이재성	해당단계 참여연구원수	총 : 8 명 내부: 8 명 외부: 명	해당단계 연구비	정부: 30,000 천원 기업: 천원 계 : 천원
		총연구기간 참여연구원수	총 : 8 명 내부: 8 명 외부: 명	총 연구비	정부: 천원 기업: 천원 계 : 천원
연구기관명 및 소속부서명	한국해양과학기술원, 환경기반연구센터		참여기업명		
국제공동연구 위탁연구					
요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자 이내)				보고서 면수	
<p>이 연구의 목적은 제주 연안의 주요 환경문제인 갯녹음 발생해역에서 생태대사율 및 유기탄소의 생지화학적 순환의 정량화이다. 연구를 위해 비파괴 현장관측기법인 eddy covariance (KIOST ECI) 기법을 단계별로 개발했으며, 장비를 이용해 측정 대상 주변에 어떤 인위적인 영향을 주지 않은 현장의 환경 특성이 잘 반영된 in-situ 산소 플럭스와 3차원 해수 유동을 측정하였다. 측정된 자료는 고해상도의 시공간적 분해능의 특성을 보여주며 반응이 매우 빠른 역동적인 생지화학적 순환과정을 정량화 할 수 있는 자료 (P-I curve 관계 추정, 순생태대사율 추정 및 3차원 해수 유동과 순산소플럭스간의 관계 규명)를 성공적으로 측정하였다. 제주 연안의 갯녹음 해역에서의 광합성률과 광량은 전형적인 비선형 관계를 나타냈으며, 순생태대사율은 약간의 종속영양성을 보였고, 산소 플럭스는 해수유동량과 선형관계를 갖는 것을 나타냈다. 더불어 장비의 센서 특성 검증에서도 그 유효성이 확인되었다.</p>					
색인어 (각 5개 이상)	한 글	기후변화, 연안 생태계, 갯녹음, 순생태대사율, Eddy covariance 기법, 저서 산소 플럭스			
	영 어	Climate change, costal ecosystems, whitening event, net ecosystem metabolism, Eddy covariance method, benthic O ₂ flux			

요 약 문

I. 제 목

제주연안 갯녹음 발생해역의 생태대사율 측정을 위한 비파괴 eddy covariance 기법 개발

II. 연구개발의 목적 및 필요성

1. 연구개발의 목적

이 연구는 우리원에서 개발중인 eddy covariance (KIOST ECI) 장비를 이용하여 해저경계면 중 생물의 주요 서식지인 갯녹음 해역에서 유기탄소의 생지화학적 순환을 정량화

2. 연구개발의 필요성

- 1) 해양 물질순환에 중요한 역할을 담당하는 연안 저층경계면에서 물질의 생지화학적 순환을 이해하기 위한 정밀한 정량적인 연구 요구
- 2) 신 해양관측장비 개발과 응용연구 확대를 위하여 해양과학기술의 선진화 및 산업화 기반 조성
- 3) 연안 생태계 교란에 따른 사회 간접비용의 저감을 위한 공감대 형성 필요

III. 연구개발의 내용 및 범위

1. 연구개발의 내용

- 1) 갯녹음 연구용 비파괴 eddy correlation technique 개발 및 운영기법 확립
 - 고속 O₂ sensor calibration 기법 개발
 - O₂ flux 계산 소프트웨어 개발
 - 운영기법 확립
- 2) 개발 장비의 유용성 검증

- O₂ flux 조절 요인 파악 및 평가
- 고속 O₂ sensor 특성 검증
- 3) 갯녹음 발생 해역에서 유기탄소의 생지화학적 순환 연구
 - 생태대사율 추정
 - 이화학분석
 - 산소플럭스 조절 요인 정량화

2. 연구개발의 범위

- 1) 갯녹음 연구용 비파괴 eddy correlation technique 개발 및 운영기법 확립
 - in-situ calibration
 - 플럭스 계산 프로그램 개발
- 2) 개발 장비의 유용성 검증
 - 통계학적 처리를 통한 자료의 신뢰성 평가
 - 고속 산소센서의 특성 검증
- 3) 갯녹음 발생 해역에서 유기탄소의 생지화학적 순환 연구
 - 3D 유속장, 고속 산소 및 PAR 측정
 - 48시간 연속관측

IV. 연구개발결과

1. ECI를 이용한 현장 측정

- 1) 고해상도 산소 플럭스 측정
- 2) In-situ P-I curve 관계 추정
 - 낮과 밤의 산소플럭스와 광량
 - In-situ P-I curve 관계
- 3) 3차원 해수 유동과 net O₂ flux 간의 관계
- 4) 순생태대사율 추정 (Ecosystem trophic condition: R, GPP and NEM)

2. KIOST ECI의 유용성 검증

1) High-speed O₂ sensor 특성 검증 (Frequency analysis)

V. 연구개발결과의 활용계획

- 탄소의 생지화학적 순환 연구: 연안 생태계 탄소 순환의 정밀한 정량화
- 연안환경 변화에 의한 생태계의 교란:
 - 빈/무산소 수괴 발생기작 규명,
 - 연안 산성화가 생태계에 미치는 영향 규명,
 - 기후변화에 의한 연안 환경생리 변화 연구

S U M M A R Y 및 KEYWORDS

(영 문 요 약 문)

The net ecosystem metabolism of coastal area was estimated using the eddy covariance method in situ in Jeju Island, Korea. Four eddy covariance instruments were deployed under water on hard bottom surface and measured current 3D velocities and oxygen concentrations. Based on the measurements, the correlations of the dynamic variables (light intensity and mean current) and the productivity were examined and then estimated the ecosystem trophic condition. Substantial variability within a day in metabolic rates was found due to variations in irradiance and mean current. The relationship between photosynthetic rates and light intensity was non-linear (O_2 flux = $66.3 \tanh(-PAR / -54.5) - 31.4$) and did show maximum photosynthetic rate of $66.3 \text{ mmol } O_2 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ with saturation irradiance of $54.5 (\pm SE = 23.7) \mu \text{ mol photons } \text{m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. The daily oxygen flux showed liner relation with mean current and the degree was higher during a day than night. This was likely due to the active photosynthesis of benthic plants. Additionally, different oxygen flux rates were found between the Eddy covariance instruments because of the different DBL thickness by different surface types. At the study site, the net ecosystem metabolism rates indicated that the ecosystem was slightly heterotrophic in end of the summertime ($NEM = -6.23 \pm 3.20 \text{ mmol } \text{m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, Mean \pm SE).

(KEYWORDS : 기후변화 (climate change), 연안 생태계 (coastal ecosystem), 갯녹음, 순생태대사율 (net ecosystem metabolism), eddy covariance method, 저서 산소 플럭스 (benthic O_2 flux))

C O N T E N T S

Submission letter	1
Abstract	2
Summary	6
Contents	7
Figure lists	8
Chapter 1. Introduction	
1. Purpose of the R/D	11
2. Necessary of the R/D	11
3. Range of the R/D	12
Chapter 2. Current domestic and overseas R/D	
1. Current domestic R/D	13
2. Current overseas R/D	13
3. Pre-research analysis and the limitations	14
Chapter 3. Project contents and outcomes	
1. Project contents	16
1.1. Materials and Methods	16
1.1.1. In-situ field measurements	16
1.1.2. Data pre-treatment and analysis	18
2. Project outcomes	19
2.1. High-resolution oxygen flux	19
2.2. Correlation of oxygen flux with the PAR	20
2.2.1. Daily Oxygen Fluxes and PAR	20
2.2.2. In-situ P-I curve	21
2.3. Daily oxygen flux and Mean current	22
2.4. Ecosystem trophic condition: R, GPP and NEM	23
3. KIOST ECI effectiveness	23
4. Conclusion	25

Chapter 4. Achievement and contribution to the research field	26
Chapter 5. Suggestion for the application of the results	26
Chapter 6. References	27

<Figure lists>

Figure 1. The underwater set up and deployment of the Eddy instruments at the study site (Eddy 1)	16
Figure 2. The underwater deployment of the Eddy instruments and the surrounded benthic surface conditions	17
Figure 3. The eddy correlation data from Eddy 1 instrument in Matlab	19
Figure 4. The correlations of Hourly Oxygen Flux (HOF) and Photosynthetically Active Radiation (PAR) at Eddy 2, 3 and 4	20
Figure 5. The relationship of oxygen flux and PAR at Eddy 3	21
Figure 6. Daily oxygen flux changes by Mean current at Eddy 2 and 3	22
Figure 7. Average daily net production of the Eddy 2, 3 and 4. The R, GPP and NEM represent respiration, gross primary production and net ecosystem metabolism (error bars represent SE)	23
Figure 8. Examples of the spectrum of oxygen concentration (a) and power spectrum density of vertical velocity (b) using eddy correlation instruments (Eddy 3) at the study site	24
Figure 9. Normalized cumulative co-spectrum of the oxygen concentration and the vertical velocity for a 15min interval from four eddy correlation instruments at the study site	25

목 차

제출문	1
보고서 초록	2
요약문	3
목차	9
그림목차	10
제 1 장 서론	
1절 연구개발의 목적	11
2절 연구개발의 필요성	11
3절 연구개발의 범위	12
제 2 장 국내외 기술개발 현황	
1절 국내동향	13
2절 국외동향	13
3절 선행연구 분석 및 현기술의 한계 분석	14
제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과	
1절 연구개발 수행내용	16
1. 재료 및 방법	16
가. 현장 측정 (in-situ field measurements)	16
나. 데이터 처리와 분석	18
2절 연구개발 결과	19
1. 고해상도 산소 플럭스 측정 결과	19
2. In-situ P-I curve 관계 추정	20
가. 낮과 밤의 산소플럭스와 광량	20
나. In-situ P-I curve 관계	21
3. 해수 유동과 net O ₂ flux 간의 관계	22
4. 순생태대사율 추정 (Ecosystem trophic condition: R, GPP과 NEM) ...	23
3절 KIOST ECI의 유용성 검증	23
4절 결론	25

제 4장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도	26
제 5 장 연구개발결과의 활용계획	26
제 6 장 참고문헌	27

<그림 목차>

그림 1. Eddy 1의 수중 설치 모습과 세부 구성요소	16
그림 2. KIOST ECI의 제주도 갯녹음 발생 지역 수중 설치 모습과 주변 환경	17
그림 3. KIOST ECI 측정값 (고해상도 산소 플럭스 측정). (A) 3D 유속 (cm s^{-1} ; V_x (검정)와 V_y (파랑)=수평 유속, V_z (빨강)=수직 유속), (B) 산소 농도 ($\mu\text{mol L}^{-1}$, blue)와 수심 (metre, 빨강), (C) 매 15분간 누적 산소 플럭스 (mmol m^{-2}), (D) 일 산소플럭스 ($\text{mmol m}^{-2} \text{d}^{-1}$, 파랑)와 광량 (PAR) ($\mu\text{mol photons m}^{-2}\text{s}^{-1}$, 빨강)	19
그림 4. Eddy 2, 3 과 4에서 하루(24시간) 동안 시간별 산소 플럭스의 평균값과 광량과의 관계	20
그림 5. Eddy 3의 P-I 커브	21
그림 6. Eddy 2와 3에서의 평균 유속의 변화에 따른 일 산소 플럭스의 변화량	22
그림 7. Eddy 2, 3과 4에서의 평균 호흡량 (R), 평균 총 생산량 (GPP)과 평균 하루 순 생태대사율 (NEM)	23
그림 8. Eddy 3의 스펙트럼 분석 (a) 산소 농도 스펙트럼, (b) 수직 유속의 파워 밀도 스펙트럼	24
그림 9. KIOST ECI의 산소 농도와 수직 유속의 Normalized cumulative co-spectrum	25

제 1 장 서론

1절 연구개발의 목적

- 수심이 얇은 연안 유광대의 저층경계면(benthic boundary layer)에서 생산력은 수층에 비해 월등히 높아 이곳에서 유기물의 생지화학적 순환은 연안의 영양상태를 결정할 수 있는 주요한 요인이 된다. 기존의 현장 (benthic chamber incubation) 또는 실험실 배양방법 (intact core incubation)으로 추정된 유기물의 생산과 소비의 측정값은 수층의 유동학적 특성을 배제한 결과로 많은 오차를 내포할 수 있다. 더욱이 암반과 산호초 등이 같이 복잡한 표면을 갖는 시료와 모래퇴적물과 같이 공극이 큰 시료의 경우 기존의 방법을 사용할 수 없다.
- Eddy covariance 기법은 2000년대에 들어 해양 생태 및 유기탄소 순환 연구에 활발히 이용되고 있다. 이 방법의 장점은 완전 비파괴 분석기법으로 측정 대상 주변에 어떤 인위적인 영향을 주지 않아 현장의 환경 특성이 측정결과에 반영이 된다. 그리고 측정할 수 있는 면적이 수 10 ~ 50 m²에 달해 해저면과 같이 비균질한 측정대상을 대표할 수 있는 결과를 제공한다. 아울러 고해상도의 시공간적 분해능으로 반응이 매우 빠른 역동적인 생지화학적 순환과정을 정량화 할 수 있다.
- 이 연구는 우리원에서 개발중인 eddy covariance (KIOST ECI) 장비를 이용하여 해저경계면 중 생물의 주요 서식지인 갯녹음 해역에서 유기탄소의 생지화학적 순환을 정량하는데 목적이 있다. 특히, 갯녹음 원인 생물 군집의 성장에 관련된 환경적 요소들과의 상관관계를 규명하여 갯녹음의 환경적 영향을 평가할 예정이다. 이 연구는 인간활동으로 초래된 기후변화와 환경변화에 의한 연안생태계의 교란 영향에 대한 정량적인 자료를 제시할 것으로 예상된다.

2절 연구개발의 필요성

- 해양 물질 순환에 중요한 역할을 담당하는 연안 저층경계면에서 물질의 생지화학적 순환을 이해하기 위한 정밀한 정량적인 연구가 요구된다. 이러한 자료가 축적되면, 기후변화, 산성화 및 환경변화에 따른 연안 생태계 구조의 장기변화를 이해하고 설명할 수 있다. 이는 시공간적인 고해상도의 분석기법의 개발로 기존의 분석방법 한계를 극복할 수 있다.

- 신 해양관측장비 개발과 응용연구 확대로 해양과학기술의 선진화 및 산업화 기반 조성이 필요하다. 이를 위해서는 고부가가치 해양과학기술산업의 창출 및 육성을 기반으로, 다양한 연구분야에 활용 가능한 다기능 센서 개발 원천 기술의 확보가 필수적이다.
- 연안의 부영양화는 사회적 비용 부담을 가중시킨다. 따라서 저서환경의 중요 요소에 대한 환경학적 기능을 이해하고 그 사회적인 가치를 부여하여, 연안 생태 교란에 따른 사회 간접비용의 저감을 이루어낼 수 있는 공감대 형성이 필요하다.

3절 연구개발의 범위

- 갯녹음 연구용 비파괴 eddy correlation technique 개발 및 운영기법 확립을 위하여 in-situ calibration과 플럭스 계산 프로그램을 개발한다.
- 개발 장비의 유용성 검증을 위해, 통계학적 처리를 통한 자료의 신뢰성을 평가하고, 고속 산소센서의 특성을 검증한다.
- 갯녹음 발생 해역에서 유기탄소의 생지화학적 순환 연구를 위하여, 3D 유속장, 고속 산소 및 PAR를 48시간 연속관측 및 측정한다.

제 2 장 국내외 기술개발 현황

1절 국내동향

1. 갯녹음(백화) 현상 연구

갯녹음 실태조사 및 관련 정책인 바다숲 조성을 위해, 갯녹음 발생 해역의 해조류 군집 조사 및 실태조사, 바다숲 조성 진행 및 환경모니터링 및 갯녹음 발생 원인 규명 연구가 진행되고 있다. 이를 위한 조사 방법으로는 잠수관찰 조사법, 광학적 조사법, 음향학적 조사법 및 생물학적 조사법 등이 시행되고 있다 (강진영과 신우석 2007). 잠수관찰법은 가장 효과적이거나 시간과 인력비용이 많이 들고, 관찰에 의지하는 조사법이기에 과학적인 접근법이 되지 못한다. 광학적 방법은 항공사진이나 위성화상을 이용하는 것으로 정확한 판독을 위해 잠수관찰이 요구되고 기후의 영향을 많이 받아 오차범위가 크다. 음향학적 방법은 광학적법의 단점을 보완한 방법이지만, 갯녹음과 암반의 구분이 불가능해 해조류의 분포를 조사하는 간접적 방법으로 이도 역시 잠수 관찰을 통한 판독이 필요하다. 생물학적 조사는 갯녹음 원인 규명을 위한 방법으로 문제지역의 해조류를 채취하여 현장 및 실내 실험을 통해 그 관계를 규명하는 방법이다.

2. 비파괴 eddy covariance 기법

현재 KIOST는 지난 2년 (2013-2014)에 걸쳐 1차 버전의 eddy covariance 기법 (KIOST ECI)을 개발 완료하였다. 이 기법에 사용되는 장비는 acoustic doppler velocimeter (ADV)와 microelectrode를 이용하여 현장에서 3D 유속과 산소 농도를 측정한다. 이 자료를 바탕으로 해저경계면에서의 산소 플럭스를 계산해 생지화학적 순환 과정을 정량화 할 수 있다. 현재까지 이 장비는 열대 산호초, 하구모래 갯벌, 잘피장 등 연안의 주요 서식지의 저층경계면의 연구에 활용되고 있다.

2절 국외동향

1. 갯녹음 현상

갯녹음 현상은 전세계의 바다에서 나타나고 있다. 주변 해역의 환경이 가장 비슷한 일본의 경우 해황변동과 갯녹음 발생과의 상관관계 규명을 위하여, 갯녹음 진행과정의 평가

기법을 수립하고, 관련 원인 생물종의 생리학적 연구를 통해, 국가적 갯녹음 확대 방지 대책을 수립하고 있다. 특히 다양한 관련분야 단체들의 참여 및 지원으로 대책방안과 그 적용 사례에 관한 시민의 참석을 유도하는 프로그램은 지역주민사회의 지원을 위한 좋은 접근이다 (김대영 2010). 그 외 많은 국가에서도 자원회복을 위한 바다숲 조성 및 관리를 위한 보존활동을 법제화하고, 일본의 경우처럼 정부 및 민간의 적극적 대응으로 해조 숲 저감 피해를 최소화하기 위해 노력하고 있다. 더 나아가 백화 원인생물에서 형성된 석회조를 자원으로 이용하기 위한 연구가 추진되고 있다. 한편으로, 갯녹음 현상을 전지구적 문제인 기후변화의 원인규명을 위한 테스트베드로 연구하고 있다.

2. Eddy covariance 연구

Eddy covariance 기법은 미국 버지니아 대학교의 Peter Berg교수와 막스플랑크 해양미생물 연구소가 공동 개발한 방법으로, 현재 저서 생태대사율 정량화 연구에 가장 적합한 새로운 표준화된 분석기법으로 확립되었다. 이 기법은 해외 유명 연구소 (MPI, AWI, MBARI, IFRMER, GEOMAR, WHOI 등)에서 전지구적 유기탄소 순환, 생태계 영양단계 평가, 물질의 생지화학적 순환 연구 등에 활용하기 위해 연구 개발하고 있다. 여기에 사용되는 microelectrode 등의 고속센서 개발 및 제작에 있어 Unisense와 같은 회사들이 시제품을 내놓고 있고, 이를 해석하기 위한 프로그램은 각 연구소의 장비에 맞춰 역시 다양하게 연구 개발 중이다. 이 기법은 염분, 수온 등의 고속센서를 응용하여 해저 지하수 유출량 및 빙하의 용해 속도 등도 추정할 수 있다. 이 기법은 저서생태계 순 생리 대사 추정(Net ecosystem metabolism)에 탁월한 성능이 입증되어 관련 연구자가 급격히 증가하고 있는 추세이다.

3절 선행연구 분석 및 현기술의 한계 분석

1. 선행연구 분석

- 연안 및 심해 퇴적물에서 기존에 이용되는 분석방법과의 산소 플럭스 비교 검증으로 eddy covariance의 유용성이 확인되었다.
- 다양한 연안환경, 특히, 기존 방법으로 측정이 어려운 저서환경 (투수율이 높은 퇴적층이나 그 표면이 균질하지 못한), 산호초 및 갈피 밭 등에서 순생태 대사율 추정 및 연안환경에 미치는 생태학적 기능 평가가 가능하다.
- 빙하 표면에 서식하는 부착성 플랑크톤의 기초 생산력 추정 및 유기탄소의 생지화학

적 순환 과정을 정량화 할 수 있다.

2. 현 기술의 한계 분석

- 현재 수행하고 있는 방법은 다양한 자연현상의 주요 요소들이 배제된 접근법으로 그 자료 신뢰성에 문제가 제시됨에 따라 비파괴 현장관측의 중요성이 지속적으로 강조되고 있다. 무엇보다 역동적인 저서생태계 구조변화를 직접 관측·측정할 수 있는 현장 측정기술이 부족한 실태이다. 더욱이 갯녹음 현상과 같은 다양한 요소가 복합적으로 얽혀 발생한 문제들은 생물학적 요소들과 물리-화학적 반응을 동시에 측정할 수 있는 현장관측 시스템이 필요로 한다.
- 기존에 측정된 물질 플럭스는 부정확한 추정방법을 통해 전지구적 물질수지(mass balance)에 많은 오류가 내포되어있다. 이를 보완하기 위해 신 관측기법으로 추정된 물질 플럭스의 결과가 지속적으로 업데이트 되고 있다.
- 시·공간적 고해상도 측정기술의 부재로 역동적인 생지화학적 프로세스의 감지가 불가능하다.

제 3 장 연구개발 수행내용 및 결과

1절 연구개발 수행내용

1. 재료 및 방법

가. 현장 측정 (in-situ field measurements)

갯녹음 연구를 위해 적용된 eddy covariance 장비(KIOST ECI)는 acoustic doppler velocimeter (ADV; Nortek AS, 노르웨이)와 산소 광센서 (Pyroscience, 독일)가 그 주요 구성으로, 그 외 산소 optode (Aanderaa)와 신호 증폭기 (Pyroscience)가 함께 장착되었다 (그림 1). 네 대 (Eddy 1, 2, 3, 4) (그림 2)의 KIOST ECI가 48시간 이상 제주의 북동쪽 연안의 갯녹음 발생 해역(33.54° N, 126.85° E)에 설치되었고, 성공적으로 3D 유속과 산소 농도, 수심, 수온을 기록했다. ADV와 산소 광센서는 32 Hz로 고속측정 기록하였으며, 산소 calibration을 위해 산소 optode의 측정값이 사용하였다. 그 밖에도 해당 해역 주변요소들과의 심층적 관계 규명을 위해, PAR 센서와 CTD도 함께 설치했다 (그림 1).

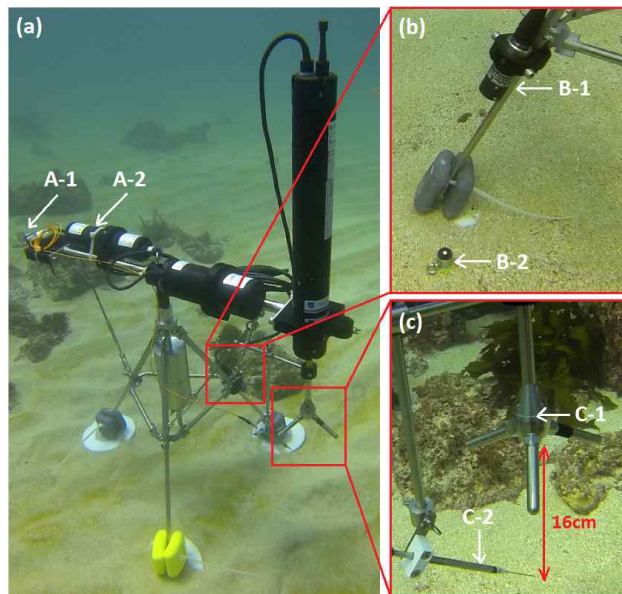


그림 1. The underwater set up and deployment of the Eddy instruments at the study site (Eddy 1). (a) An Eddy correlation instrument on benthic sediment. A PAR-HOBO sensor (A-1) and an amplifier (A-2). (b) Oxygen optode (B-1) and PAR-DEFI (B-2) sensors. (c) An acoustic doppler velocimeter (C-1) and a retractable needle-type sensors.

oxygen microsensors (C-2), the tip of the C-2 is adjusted to the measuring point of the C-1 sensors (approx. 16cm distance).

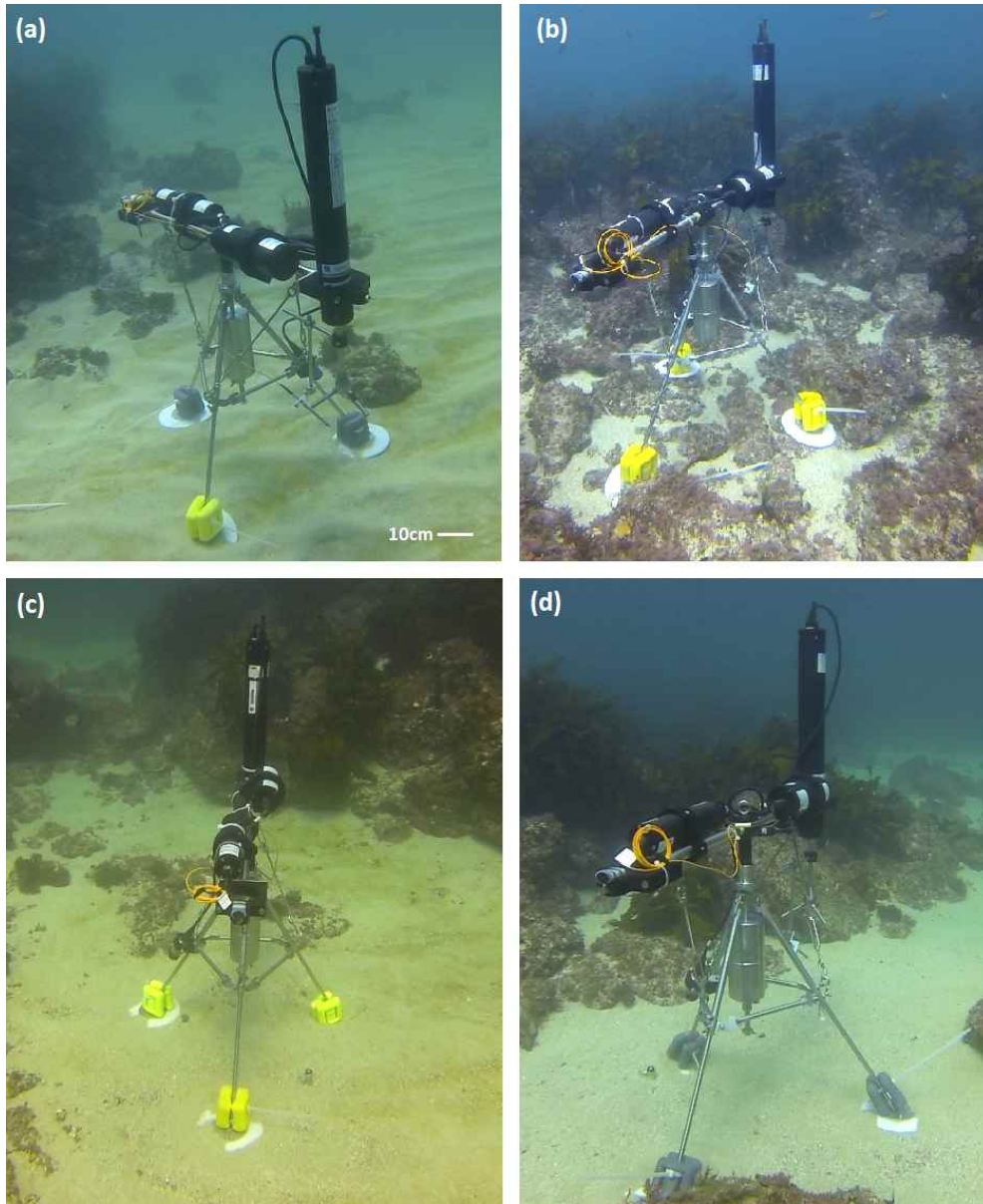


그림 2. The underwater deployment of the Eddy instruments and the surrounded benthic surface conditions. (a) Eddy1, (b) Eddy2, (c) Eddy3 and (d) Eddy4. The Eddy 2 was installed on rocky surface covered by coralline algae and underwater macrophytes. The Eddy 1, 3 and 4 was installed on sandy surface covered with benthic diatoms and surrounded rocks partially.

나. 데이터 처리와 분석

KIOST ECI를 통해 측정된 데이터는 Matlab, Microsoft Excel 2007, Minitab 17과 SigmaPlot 10.0을 사용해, O₂ sensor calibration 및 O₂ flux를 계산하고 각 요인들의 상관관계를 도식화했다. 첫째로 방대한 양의 raw ADV data를 Matlab용 파일형태로 전환시키고 32 Hz의 신호를 8 Hz로 평균하여 signal to noise ratio를 감소시켰다. 이 전환된 데이터는 ‘Acceleration Thresholding Methods (Despiking)’ 를 사용하여 비이상적 결과를 제거하고 (Goring과 Nikora, 2002), 다시 1 Hz로 low pass filter 시켰다. 이렇게 얻어진 3D 유속과 산소농도는 Reynolds의 decomposition 원리 ($\overline{\text{Flux}} = \overline{u'_z C'}$; $\overline{\text{Flux}} =$ 평균 산소 플럭스, $\overline{u'_z} =$ 평균 수직 변동 유속, $\overline{C'}$ = 평균 변동 산소농도, (Reynolds, 1895))에 따라 고해상도 산소 플럭스(Flux)로 계산되었다.

In-situ P-I curve 관계 추정을 위하여, 계산된 산소 플럭스 값은 현장에서 PAR 센서를 이용해 동시 측정된 광량을 이용하여, hyperbolic tangent equation ($P_{\text{net}} = P_{\text{max}} \tanh (-I/I_k) + R_{\text{dark}}$; $P_{\text{net}} =$ 순광합성을, $P_{\text{max}} =$ 최대 광합성을, $I =$ 광량, $I_k =$ 포화 광량, $R_{\text{dark}} =$ 호흡량 (Jassby와 Platt, 1976)을 통해 도식화 되었다.

3D 유속 (V_x, V_y, V_z ; V_x 와 $V_y =$ 수평 유속, $V_z =$ 수직 유속)의 평균값 (mean current, MC)은 3차원 해수 유동과 순산소플럭스간의 관계 규명을 위해 계산되었다 ($MC = \sqrt{(V_x^2 + V_y^2 + V_z^2)}$).

또한 조사지역의 순생태대사율 (net ecosystem metabolism, NEM) 추정을 위하여 낮과 밤으로 구분한 산소플럭스의 총량을 아래의 계산법을 이용하여 계산하였다 (식 1).

$$\begin{aligned}
 \text{GPP} &= \frac{1}{24} \left(\sum \text{Flux}_{\text{day}} + \frac{|\sum \text{Flux}_{\text{night}}|}{H_{\text{night}}} \cdot H_{\text{day}} \right) \\
 \text{R} &= \frac{1}{24} \left(\sum \text{Flux}_{\text{night}} + \frac{\sum \text{Flux}_{\text{night}}}{H_{\text{night}}} \cdot H_{\text{day}} \right) \\
 \text{NEM} &= \frac{1}{24} \left(\sum \text{Flux}_{\text{day}} + \sum \text{Flux}_{\text{night}} \right) \dots\dots\dots(\text{식 1})
 \end{aligned}$$

여기서 GPP (gross primary production)는 총기초생산량, R (respiration)은 호흡량, 그리고 NEM (net ecosystem metabolism)은 순생태대사율을 나타낸다.

2절 연구개발 결과

1. 고해상도 산소 플럭스 측정 결과

KIOST ECI를 통해 수집된 3D 유속 (V_x, V_y, V_z)의 평균은 $-21.36 \sim 22.46$ (-0.21 ± 6.57), $23.46 \sim 19.19$ (-0.34 ± 5.02), 그리고 $-4.63 \sim 4.09$ cm s^{-1} (-0.02 ± 1.21 cm s^{-1}) (mean \pm SD)이었다. 산소 농도는 $189 \sim 257$ $\mu\text{mol L}^{-1}$ (210 ± 9.62 $\mu\text{mol L}^{-1}$, $n = 70,737$) (mean \pm SD)이었으며, 평균 일일 산소플럭스는 19.04 ± 145.8 $\text{mmol m}^{-2}\text{d}^{-1}$ (SD, $n = 791$)이었다 (그림 3).

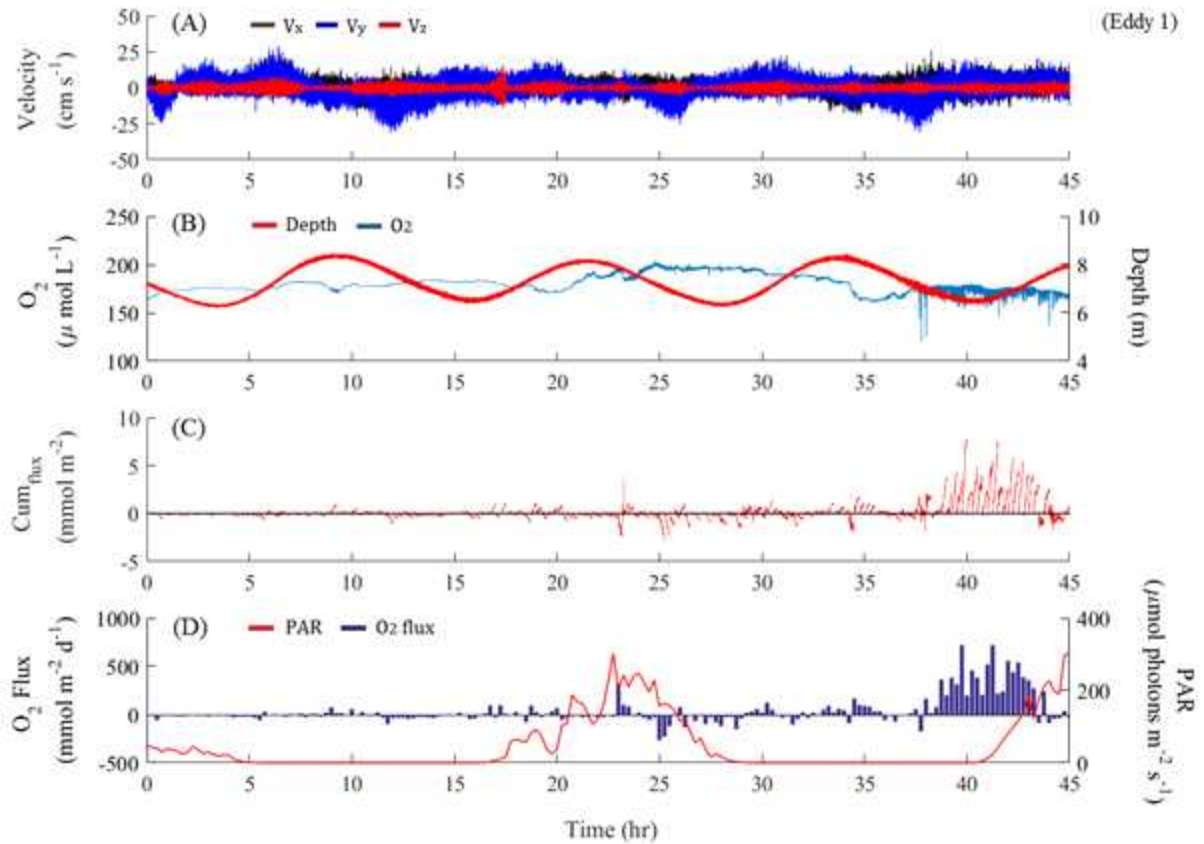


그림 3. The eddy correlation data from Eddy 1 instrument in Matlab. The time starts from 13:30, 02 September 2016 to 10:30, 04 September 2016. (A) 3D current velocities (cm s^{-1} ; horizontal coordinates: V_x (black) and V_y (blue), vertical coordinate: V_z (red)), (B) oxygen concentration ($\mu\text{mol L}^{-1}$, blue) with depth (metre, red), (C) cumulative oxygen flux (every 15 minutes) (mmol m^{-2}), (D) daily oxygen flux ($\text{mmol m}^{-2} \text{d}^{-1}$, blue) with PAR ($\mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$, red).

2. In-situ P-I curve 관계 추정

가. 낮과 밤의 산소플럭스와 광량

조사지역에서의 하루 동안 산소플럭스는 낮과 밤에 통계학적으로 뚜렷하게 다른 것으로 나타났다 ($p < \alpha = 0.05$). 산소플럭스의 양(절댓값)은 밤이 낮보다 약간 높게 나왔으나, Eddy 2의 경우를 제외하고 ($p = 0.03$), 그 다른 정도는 Eddy 1, 3과 4에서는 통계학적으로는 뚜렷하게 다르지 않았다. 낮 동안의 시간당 산소 플럭스는 각 장비 (Eddy 2, 3, 4)에서 $-22.42 \sim 84.43$, $-43.06 \sim 66.28$ 그리고 $-68.77 \sim 45.85$ $\text{mmol m}^{-2}\text{d}^{-1}$ 의 범위를 보였으며, 그 일 평균 산소 플럭스는 각 13.67 ± 6.21 , 19.81 ± 5.68 그리고 4.03 ± 13.0 $\text{mmol m}^{-2}\text{d}^{-1}$ (mean \pm SE)으로 나타났다. 밤 동안의 시간당 산소 플럭스는 각 장비 (Eddy 2, 3, 4)에서 $58.93 \sim (-)10.57$, $-50.39 \sim 17.42$, 그리고 $-52.11 \sim 4.54$ $\text{mmol m}^{-2}\text{d}^{-1}$ 의 범위를 보였으며, 그 일 평균 산소 플럭스는 각 -33.66 ± 3.83 , -26.21 ± 3.16 그리고 -23.28 ± 4.10 $\text{mmol m}^{-2}\text{d}^{-1}$ 으로 나타났다.

그림 4는 Eddy 2, 3 과 4에서, 하루(24시간) 동안의 산소 플럭스를 시간별로 평균화 시킨 값과 광량과의 관계를 나타내고 있다. 시간당 평균 광량 (PAR)은 뚜렷하게 낮과 밤을 구분지어 보여주고 있으며, 시간당 산소플럭스는 광량의 증가에 따라 함께 증가하는 추세를 보이고 있다. 광량과 산소플럭스는 같이 정오경 최대값을 보여주고 있다.

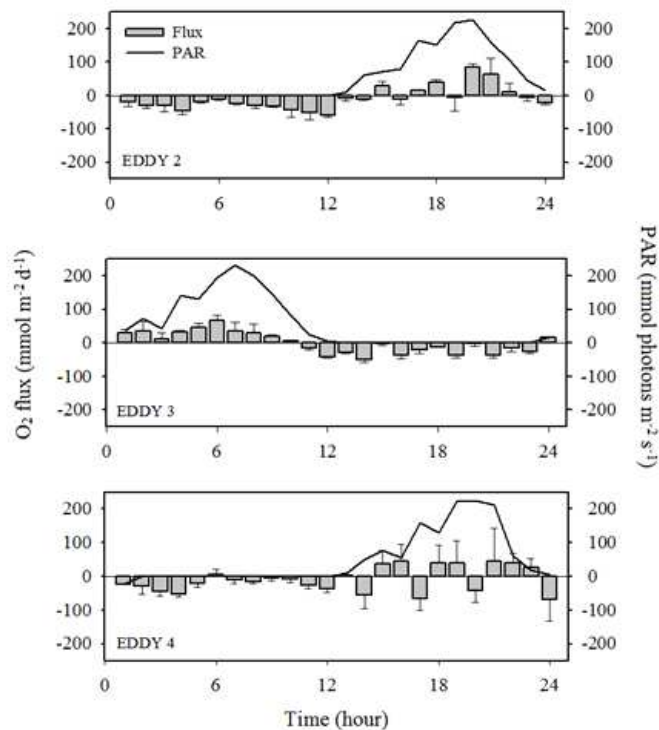


그림 4. The correlations of Hourly Oxygen Flux (HOF) and Photosynthetically Active Radiation (PAR) at Eddy 2, 3 and 4. The starting values of x-axis (time) '0' indicate actual '2016-09-02 18:00' for Eddy 2 and 4, and '2016-09-03 6:45' for Eddy 3. (Error bars for HOFs are standard errors.)

나. In-situ P-I curve 관계

조사지역의 생산량(P)과 광량(I)은 전형적인 P-I curve를 보여주었다 (그림 5). 예로 Eddy 3에서 nonlinear regression equation은 $O_2 \text{ flux} = 66.3 \tanh(-PAR / -54.5) - 31.4$ 으로, P_{\max} 는 $66.3 \text{ mmol } O_2 \text{ m}^{-2}\text{d}^{-1}$, $I_k = 54.5 (\pm 23.7) \mu \text{ mol photons m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 그리고 R_{dark} 은 $-31.4 (\pm 7.1) \text{ mmol m}^{-2}\text{d}^{-1}$ 으로 추정되었다 (estimate \pm SE). 또한 이 공식에 의해 계산된 생산량의 광량에 따른 초기 변화율은 1.22이며, 보상 광량은 $27.9 \mu \text{ mol photons m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 으로 추정되었다.

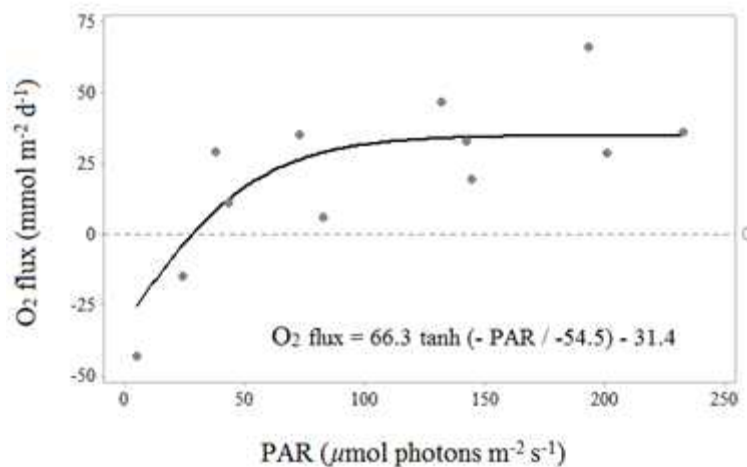


그림 5. The relationship of oxygen flux and PAR at Eddy 3. The grey dots are hourly averaged daily oxygen fluxes by the PAR, and the fitted line is a non-linear regression model of the data. The hyperbolic tangent equation of the fitted line is ' $O_2 \text{ flux} = 66.3 \tanh(-PAR / -54.5) - 31.4$ '. The estimated parameters are $66.3 \text{ mmol } O_2 \text{ m}^{-2}\text{d}^{-1}$ of P_{\max} , $54.5 (\pm 23.7) \mu \text{ mol photons m}^{-2}\text{s}^{-1}$ of I_k , $-31.4 (\pm 7.1) \text{ mmol m}^{-2}\text{d}^{-1}$ of R , and $27.9 \mu \text{ mol photons m}^{-2}\text{s}^{-1}$ of I_c (estimate \pm estimated SE).

3. 해수 유동과 net O₂ flux 간의 관계

그림 6에 일일 산소 플럭스를 나타냈다. 낮 동안에는 양의 값, 밤 동안에는 음의 값을 보여, 뚜렷하게 낮에는 광합성 작용, 밤에는 호흡 작용을 보여준다.

3차원 평균 유속 (MC)은 낮과 밤 사이에 통계적으로 다르지 않음을 보여주었다 ($p = 0.61$, $F = 0.31$). 그 값은 각각 Eddy 2, 3과 4에서 1.76 ± 1.04 , 4.51 ± 2.61 그리고 $2.14 \pm 1.21 \text{ cm s}^{-1}$ (mean \pm SD)으로 나타났다.

낮에 평균 산소 플럭스는 각 Eddy 2, 3과 4에서 19.47 ± 49.61 , 28.35 ± 36.84 그리고 $8.50 \pm 86.20 \text{ mmol m}^{-2}\text{d}^{-1}$ 이었으며, 밤에는 각각 -32.10 ± 25.27 , -26.93 ± 19.64 , $-22.43 \pm 24.94 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$ (mean \pm SD) 이었다 (그림 6, 위).

산소 플럭스는 3차원 평균 유속 (MC)과 낮과 밤 모두 선형적 비례 관계를 가졌다. 예로 Eddy 2에서 낮과 밤 동안의 linear regression equation은 $\text{DOF} = 11.48 \text{ MC} - 2.80$ ($R^2 = 0.29$)과 $\text{DOF} = -0.46 \text{ MC} - 32.21$ ($R^2 = 0.004$)로 나타났다. Eddy 3에서는 낮에 $\text{DOF} = 1.45 \text{ MC} + 21.10$ ($R^2 = 0.10$), 밤에는 $\text{DOF} = -0.70 \text{ MC} - 22.85$ ($R^2 = 0.10$)으로 나타났다 (그림 6, 아래). 이러한 비례관계는 낮 동안이 밤보다 더 급격한 경향을 보였으며, 이는 MC의 변화에 따른 광합성량의 변화가 호흡량의 변화보다 더 민감함을 의미한다.

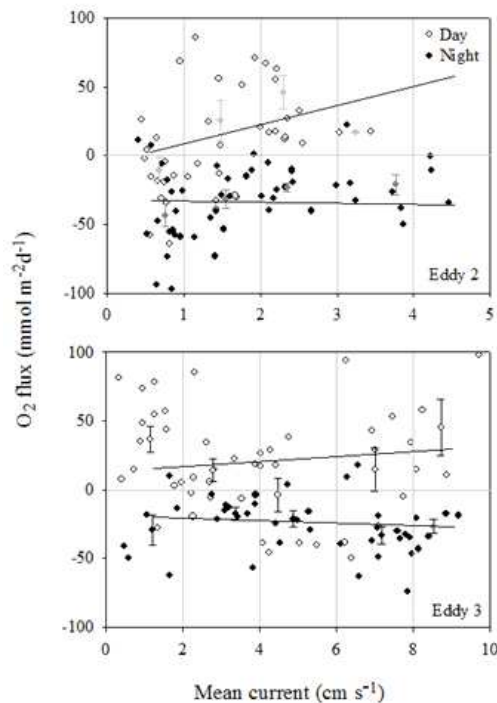


그림 6. Daily oxygen flux changes by Mean current at Eddy 2 and 3. The white and black circles indicate day and night oxygen fluxes. The fitted lines represent binned DOFs and the error bars represent the standard errors.

4. 순생태대사율 추정 (Ecosystem trophic condition: R, GPP and NEM)

조사지역의 저서 생태계 영양 상태는 음의값을 나타냄으로서 중속영양상태를 나타냈다 (그림 7). 평균 총생산량 (GPP)과 호흡량 (R)은 19.27 ± 3.22 과 -25.50 ± 3.72 $\text{mmol m}^{-2}\text{d}^{-1}$ (Mean \pm SE)으로, 순생태대사율 (NEM)은 -6.23 ± 3.20 $\text{mmol m}^{-2}\text{d}^{-1}$ (Mean \pm SE)으로 추정된다.

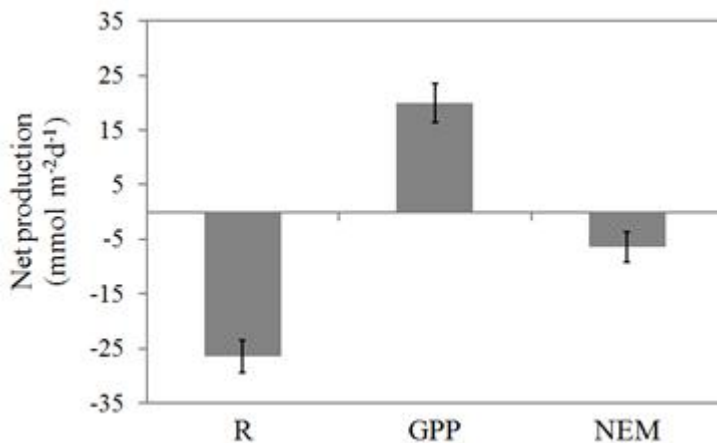


그림 7. Average daily net production of the Eddy 2, 3 and 4. The R, GPP and NEM represent respiration, gross primary production and net ecosystem metabolism (error bars represent SE). The average R is $-25.50 (\pm 3.72)$ $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$, GPP is $19.27(\pm 3.22)$ $\text{mmol m}^{-2}\text{d}^{-1}$ and NEM is $-6.23(\pm 3.20)$ $\text{mmol m}^{-2}\text{d}^{-1}$.

3절. KIOST ECI의 유용성 검증

ECI의 기본 접근법이 되는 3차원 변동유속 (three dimensional characteristics of turbulence)의 측정 유효성 검증을 위한 Reynolds numbers of the turbulence flows 테스트는 필수적이다 (Tennekes와 Lumley 1972; Pope 2000). 현재 가장 적합한 검증법으로는 spectrum (frequency) 분석이 가장 보편적으로 사용되고 있다 (Berg 외 2003, 2013; Chipman 외 2012, 2016; Hume 2008; Long 외 2012; Lorrai 외 2010).

예로 Eddy 3을 보면, 산소농도의 스펙트럼 분석 그래프의 왼쪽 상부에 큰 eddy가 잘

나타나고 있으며, 이는 현장에서의 해류와 조석간만의 차를 나타낸다 (그림 8). 또한 뚜렷하게 보이는 $-5/3$ 의 경사도는 잘 발달된 inertial subrange를 나타내고 있다. 스펙트럼의 오른쪽 아래에 나타나는 경계부는 센서의 측정이 잡음 범위 (noise level)에 들어갔음을 잘 드러내고 있다 (high frequencies, < 2 Hz). Eddy 3의 경우 noise level에 상응하는 산소농도는 $30^{-6} \mu\text{mol L}^{-1} \text{Hz}^{-1}$ 이며, 수직 유속은 $10^{-7} \text{cm}^2 \text{s}^{-2} \text{Hz}^{-1}$ 으로 나타났다.

O_2 센서의 측정 속도 (measuring frequency) (시간)는 32 Hz (0.03초)이고, 산소 농도와 수직유속의 변동속도는 0.01에서 2 Hz (100 ~ 0.5초)이므로, 이는 센서의 측정 속도가 충분히 빠르다는 것을 증명한다.

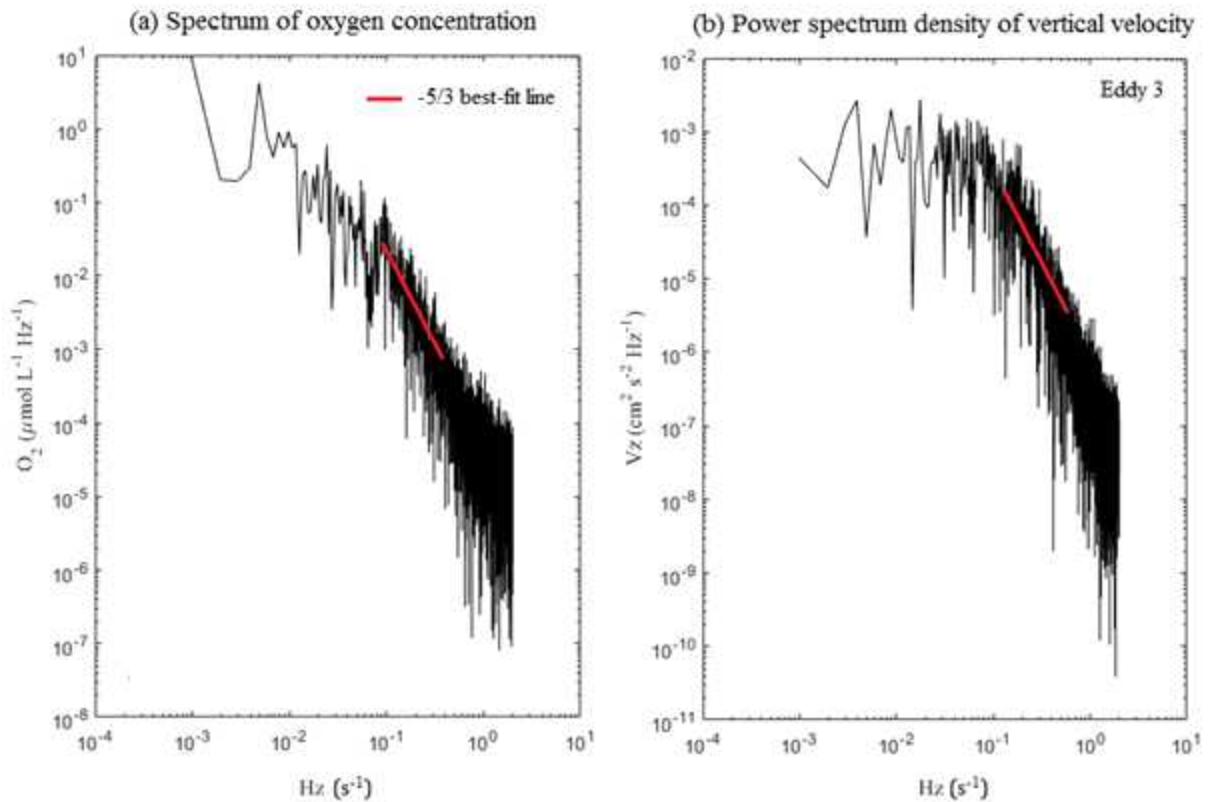


그림 8. Examples of the spectrum of oxygen concentration (a) and power spectrum density of vertical velocity (b) using eddy correlation instruments (Eddy 3) at the study site. The red lines are the $-5/3$ best-fit of Kolmogorov's theory of turbulence which indicate inertial subrange of turbulence energy.

산소 농도와 수직유속의 normalized cumulative co-spectrum은 각각의 spectral density를 나타냄으로 그래프에 나타나는 스펙트럼의 범위는 수직 플럭스의 다양한 eddy frequencies의 기여도를 보여준다 (Lorrai 외 2010; Reidenbach 외 2013). 그림 9에 나타난 네 개의 스펙트럼은 각 ECI의 값으로, 조사지역의 플럭스는 0.001-1 Hz의 범위에서 우세하게 나타나고 있음을 잘 보여주고 있다. 또한 스펙트럼은 0.5 Hz 이상에서 플럭스의 기여도는 없음을 잘 보여주는데, 이는 다시 한번 센서의 적절한 측정 속도 (32 Hz)를 확인시켜주고 있다.

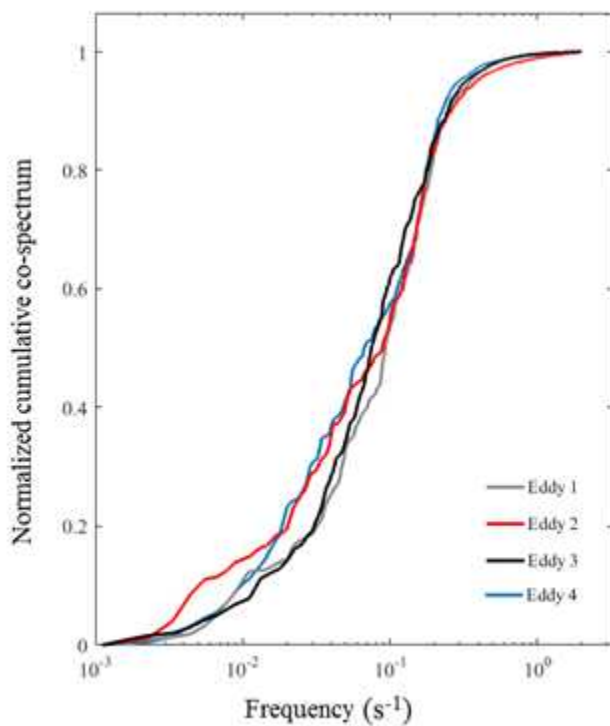


그림 9. Normalized cumulative co-spectrum of the oxygen concentration and the vertical velocity for a 15min interval from four eddy correlation instruments at the study site.

4절. 결론

KIOST ECI가 측정된 자료는 고해상도의 시공간적 분해능으로 반응이 매우 빠른 역동적인 생지화학적 순환과정을 정량화 할 수 있는 자료 (P-I curve 관계 추정, 순생태대사율 추정 및 3차원 해수 유동과 순산소플럭스간의 관계 규명)를 성공적으로 제공하였다. 제주 연

안의 갯녹음 해역에서의 광합성률과 광량은 전형적인 비선형 관계를 나타냈으며, 순생태 대사율은 약간의 중속영양성을 보였고, 산소 플럭스는 해수유동량과 선형관계를 갖는 것을 규명할 수 있었다. 더불어 장비의 센서 특성 검증에서도 그 유효성이 확인되었다.

제 4장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

연구 결과 중 1편은 SCIE급(Ocean Science Journal)에 출판되었으며, 다른 1편은 연구관련 국제 학술지에 출판할 예정이다.

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

- 기후변화에 의한 연안 환경생리 변화 연구
- 제주 연안의 갯녹음해역에서 유기탄소의 생지화학적 순환 결과 제시
- 저서 생태 연구의 새로운 방법론 제시

제 6 장 참고문헌

- 강진영, 신우석 2007, 제주도 연안 갯녹음 현상 및 대책 방안 모색, 제주 발전포럼, 70-81.
- 김대영 2010. 일본의 바다숲 조성사업 동향과 시사점, 월간 KMI수산동향_10월호, 5-13.
- Berg P., Roy H., Janssen F., Meyer V., Jorgensen B.B., Huettel M. and Beer D. 2003, Oxygen uptake by aquatic sediments measured with a novel non-invasive eddy-correlation technique, *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 261: 75-83.
- Berg P., Long M.H., Huettel M., Rheuban J.E., McGlathery K.J., Howarth R.W., Foreman K.H., Giblin A.E. and Marino R. 2013, Eddy correlation measurements of oxygen fluxes in permeable sediments exposed to varying current flow and light, *Limnol. Oceanogr.*, 58(4): 1329-1343.
- Chipman L., Huettel M., Berg P., Meyer V., Klimant I., Clud R. and Wenzhoefer F. 2012, Oxygen optodes as fast sensors for eddy correlation measurements in aquatic systems, *Limnol. Oceanogr.: Methods* 10, 304-316.
- Chipman L., Berg P. and Huettel M. 2016, Benthic Oxygen Fluxes Measured by Eddy Covariance in Permeable Gulf of Mexico Shallow-Water Sands, *Aquat. Geochem.*, 22:529-554.
- Goring D.G. and Nikora V.I. 2002, Despiking Acoustic Doppler Velocimeter Data, *Journal of hydraulic engineering*, 128:117-126.
- Hume A.C. 2008. Dissolved Oxygen Fluxes and Ecosystem Metabolism in an Eelgrass (*Zoster's marina*) Meadow Measured with the Novel Eddy Correlation Technique. Retrieved from <http://libra.virginia.edu/catalog/libra-0a:4808>.
- Jassby A.D. and Platt T. 1976, Mathematical formulation of the relationship between photosynthesis and light for phytoplankton, Photosynthesis-light equation, *Limnology and oceanography*, 21 (4), 540-547.
- Long M.H., Koopmans D., Berg P., Rysgaard S., Glud R.N., and S øgaard D.H. 2012, Oxygen exchange and ice melt measured at the ice-water interface by eddy correlation, *Biogeosciences*, 9: 1957-1967.

Lorrai C., McGinnis D. F., Berg P., Brand A. and West A. 2010. Application of Oxygen Eddy Correlation in Aquatic Systems, *Journal of atmospheric and oceanic technology*, American Meteorological Society, 27: 1533–1546.

Pope S.B. 2000, *Turbulent flows*, Cambridge university press.

Reidenbach M.A., Berg P., Hume A., Hansen J.C.R., and Whitman E.R. 2013. Hydrodynamics of intertidal oyster reefs: The influence of boundary layer flow processes on sediment and oxygen exchange. *Limnology and Oceanography: Fluids and Environments*: 225–239.

Reynolds O. 1895. On the dynamical theory of incompressible viscous fluids and the determination of the criterion. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A. Math. Phys. Sci.*, 186: 123–164.

Tennekes H. and Lumley J.L. 1972, *A first course in turbulence*, The MIT Press. London.

주 의

1. 이 보고서는 한국해양과학기술원에서 수행한 주요사업의 연구결과보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 한국해양과학기술원에서 수행한 주요사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안됩니다.