

UST Young Scientist 양성 사업 최종보고서

UST Young Scientist Research Program Final Report

과제번호 Grant Number		2020YS28					
과제명 Project Title	국문 Korean	해수 중 용존산소의 안정동위원소를 이용한 연안역의 총 일차생산력 추정에 관한 연구					
	영문 English	Estimation of gross primary production in the coastal area using triple oxygen isotopes of dissolved oxygen in seawater					
스쿨/캠퍼스 School · Campus		한국해양과학기술원		전공 Major	해양과학		
UST 학생 UST Student	성명 Name	김예슬	학위과정 Course	박사	연락처 Contact	[REDACTED]	
지도교수 Advisor	성명 Name	강동진	직급/직위 Position	책임연구원	연락처 Contact	[REDACTED]	
연구기간 Period	2020.12.01.~2021.11.30.			총연구비 Grants	10,000,000	원 KRW	

2020년도 UST Young Scientist 양성 사업 최종보고서를 붙임과 같이 제출합니다. 보고서에는 사실과 다른 내용이 포함되지 아니하였으며, 만약 허위사실이나 중대한 오류가 발견될 경우에는 그에 상응하는 불이익을 감수할 것임을 서약합니다.

I hereby submit the Final Report of UST Young Scientist Research Program 2020 as attached. To the best of my knowledge, all of the information included in my report is true and I will take any penalty if false information or serious error is found in my report.


첨부 : 최종보고서 1부.


Attachment: Final Report

2021. 12. 5.

UST 학생 : 김 예 슬

지도교수 : 강 동 진

(서명)
Signature


(서명)
Signature


과학기술연합대학원대학교 총장 귀하
To the President of University of Science and Technology

요 약 문

- 해양에서 ‘블루카본’의 저장고로 알려진 연안생태계는 면적이 2%에 불과하지만 면적대비 해양 생산의 50%를 담당하는 것으로 알려지면서 그 중요성이 강조되면서 연안생태계의 정확한 일차생산 추정이 요구되어짐. 이러한 연안생태계에서는 해초류, 해조류, 맹그로브, 염습지 식물, 저서성 미세조류 등의 저서성 생산자가 주요한 일차생산자로 알려져 있음.
- 인위적인 환경에서의 배양을 통해 일차생산을 추정하는 전통적인 방법은 연안생태계의 저서성 일차생산자에 의한 생산성이 무시할 수 있으므로 정확한 추정이 어려움.
- 용존산소 동위원소를 이용한 추정법은 연안생태계의 총 일차생산을 고려한 추정이 가능하기 때문에 정확한 일차생산 평가가 가능함.
- 2021년 5월 18~19일, 저서성 생산자가 분포하는 부산 영도 연안에서 연속관측을 실시하였고 수온, 염분, 바람, 조석, 일사량, 용존산소 농도 등 기본적인 환경인자의 일 변동성을 고려하여 용존산소 동위원소를 이용해 일차생산을 계산하였음.
- 부산 영도 연안의 5월 중 총 일차생산력은 $2095 \text{ mg O}_2 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 였으며, 저서성 생산자가 총 일차생산에 약 64%($1352 \text{ mg O}_2 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$)기여하는 것으로 나타났음.
- 저서성 생산자의 기여가 큰 연안생태계에서 정확한 일차생산성의 추정을 위해서는 용존산소 동위원소를 이용한 추정법이 적합한 것으로 판단됨.

I. 연구개요

1. 연구목표

- 해수 중 용존산소의 산소 안정동위원소를 이용한 연안역의 총 일차생산력(Gross Primary Production, GPP) 추정 및 저서생태계 일차생산력 기여도 정량화
 - 1) 동위원소 비 질량분석기(Isotope Ratio Mass Spectrometer, IRMS)를 활용한 해수 중 용존산소 안정동위원소의 분석 체계 확립
 - 2) 해수 중 용존산소의 안정동위원소 구성을 이용한 일차생산 분석법 평가
 - 해양의 일차생산력을 계산하는 기존의 방법과의 결과 비교를 통해 용존산소 안정동위원소(Triple Oxygen Isotopes, TOI)를 이용한 일차생산력 측정법 평가
 - 3) 연안역에서 용존산소 안정동위원소를 이용하여 유영계(pelagic)와 저서계(benthic)의 일차생산(primary production) 기여도 정량화

2. 연구의 필요성

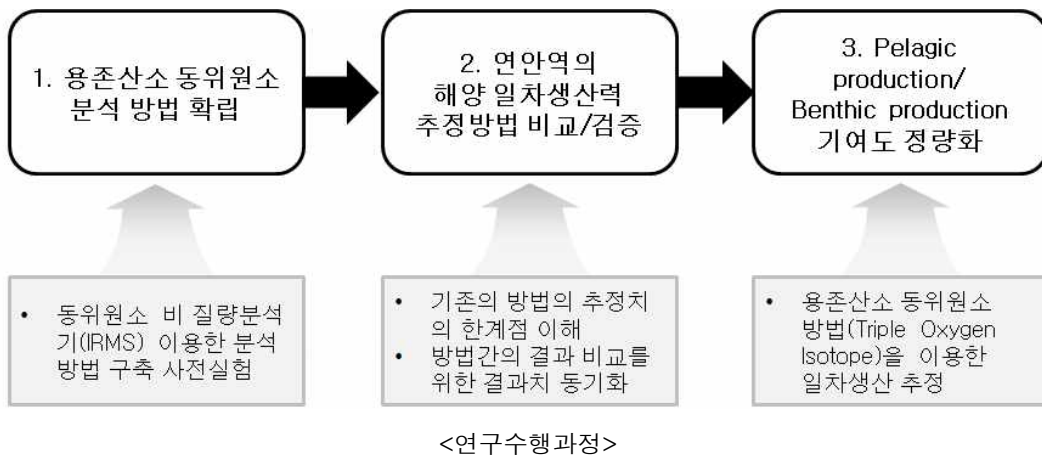
- 해양생태계가 전 지구적 일차생산의 50%이상을 설명하며 특히, 해양에서 ‘블루카본’의 저장고로 알려진 연안생태계는 차지하는 면적이 2%에 불과하지만 면적대비 해양 생산의 50%를 담당하는 것으로 알려지면서 그 중요성이 강조되고 있음.
- 해양수산부 산하 연구기관에서는 해양공간·해양생태계의 효율적인 관리 및 보전을 위해 지속적으로 상시 모니터링을 실시하고 있으며 정확한 상태 측정이 중요함. 우리나라 연안역의 일차생산(primary production)은 저서생태계(benthic ecosystem)의 해조류, 해초류, 맹그로브, 저서성 미세조류 등의 저서성 식물군에 의한 일차생산력이 상당한 비중을 차지하고 있으나 유영 생태계(pelagic ecosystem)의 식물플랑크톤의 일차생산 연구에 집중되어 있어 연안생태계의 정확한 총 일차생산력 추정을 위해서는 저서환경의 일차생산 연구가 필요함.
- 국내연구
 - 2007년 시화호에서 시간에 따른 광합성, 호흡, 기체교환에 의한 용존산소 농도변화를 알아보고자 용존산소의 안정동위원소의 일주기 변동 연구가 시도되었음(김, 2009).
 - 국내에서 안정동위원소 기법(SIA: Stable Isotope Analysis)은 생태와 환경 학문의 다양한 분야에서 생태학적·환경학적 과정을 설명함에 있어 강력한 분석 기법으로 활용되고 있으나(김 등, 2013), 산소 안정동위원소를 활용한 해양의 일차생산 추정에 관한 국내연구는 현재까지 전무함.
- 국외연구
 - 산소 안정동위원소를 이용한 해양 생산성 추정 연구는 1990년대 말 최초 제안된 비교적 새로운 방법임(Luz *et al.*, 1999; Luz&Barkan, 2000).
 - 해양 생산성 추정 연구에 활용되어온 기존의 방법들의 한계점을 극복할 수 있는 산소 안정동위원소를 이용한 추정법의 강점 강조 (Gloël, 2012; Juranek & Quay, 2013)
 - 이전의 해양 생산성 추정 연구에서는 benthic production 기여도가 간과되어왔으며 실제로 저서 환경의 생산성이 총 생산성의 상당 부분을 차지하고 있음(Krause-Jensen *et al.*, 2012; Stanley & Howard, 2013).
 - 산소 안정동위원소를 이용한 aquatic metabolic state를 연구한 사례 중 해양환경에서의 연구사례가 미비함.
 - 산소 안정동위원소를 활용한 일차생산력 추정에 관한 연구의 부족으로 여전히 획득한 자료가 제한적이며 자료의 정확한 평가 및 해석을 위해서는 다양한 환경에서의 분석 결과가 뒷받침

되어야 함(Juranek & Quay, 2013).

○ 학문적·사회적 중요성

- 산소 동위원소를 통해 정확한 해양 생산성 추정을 통해 연안역의 생지화학 순환 모델과의 결합 및 연안역의 건강성 평가에 활용할 수 있는 자료 도출 가능
- 인간 활동과 밀접하게 연관된 연안생태계 건강성의 정확한 평가를 통한 연안 관리 효율성 증대
- 연안 자원의 잠재성 평가를 통한 해양 자원의 활용 촉진

II. 연구 수행내용 및 과정



<연구수행일정>

구 분	12월	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월
1. TOI 분석체계 확립												
2. 연안 관측조사												
3. 일차생산 추정 방법간 비교												
4. 유영 및 저서생태계 일차생산력 정량화												

○ 용존산소 안정동위원소를 이용한 일차생산력 추정을 위해 사전실험을 통해 분석법을 개발 및 구축하였음.

- 해수 중 용존산소의 농도는 광합성, 호흡, 기체교환에 의해 달라지며, 산소 동위원소의 비는 세 가지 과정을 거치며 동위원소 분별 및 평형의 특성으로 결정됨. 용존산소 농도 변화에 기여한 과정에 대한 정보가 동위원소에 내재되고 이를 이용해 광합성을 통해 생산된 용존산소의 양을 정량화 하여 일차생산을 추정하고자 함.
- 한국해양과학기술원에 2018년 도입하여 운용중인 동위원소 비 질량분석기(Isotope Ratio Mass Spectrometer, IRMS)의 dual inlet 시스템을 이용해 산소 안정동위원소를 분석하였음.
- 한국해양과학기술원 주변 연안역에서 분석법 개발 및 개선/보완을 위한 실험 실시: IRMS를 이용해 시료 분석 시, 용존산소의 농도가 <~60 μmol/kg로 낮은 시료의 경우 분석 감도가 낮아 분석한계에 도달하지 못하는 문제가 발생하였고 시료 채취병 부피를 약 2배 확대함으로써 개선하였음.

- 용존산소 동위원소를 이용한 일차생산 추정 방법의 유효성 검증
 - 연안역 일차생산을 추정하는 기존의 방법($GPP = GPP_p$; GPP_p : pelagic primary production)과 산소 안정동위원소를 이용한 방법($GPP = \tau$; GPP_b : benthic primary production) 간의 결과 비교를 통해 총 일차생산력(GPP)에 기여하는 저서계 일차생산력 파악(그림 2)
 - 일차생산 비교실험을 위해 5월 해조류의 번성이 일어나는 제주연안과 생산성이 뚜렷하게 증가를 보이는 5~8월 부산연안을 대상해역으로 선정

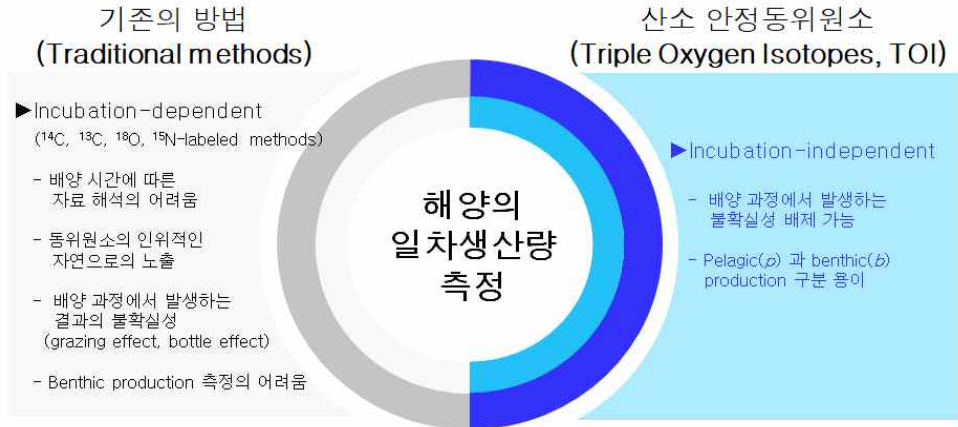


그림 2. 기존의 일차생산력 측정 방법과 산소 안정동위원소를 이용한 방법의 비교

- 연안역에서 용존산소 안정동위원소를 이용하여 총 일차생산력 추정하고 저서계의 일차생산자(microphytobenthos)에 의한 생산성 정량화
- 한국해양과학기술원은 ‘생지화학순환 및 해양환경변동 연구’의 일환으로 해양환경 및 생태계 장기모니터링 시스템 구축을 위한 연안환경 모니터링을 실시하고 있으므로 상호보완적인 연구가 가능

III. 연구 수행결과 및 목표달성 수준

- Triple Oxygen Isotopes(TOI) 분석 체계 및 방법 확립
 - 약 40 mTorr 수준으로 진공처리 된 유리병을 이용하여 해수 중에 용존 상태의 기체를 추출
 - 채취한 용존 기체 중에는 H_2O 및 N_2 , O_2 , Ar , CO_2 가 함께 존재하며 분석에 방해가 되는 H_2O 는 수분흡착제(molecular seive)를 이용해 제거(water trap)하여 동위원소 비 질량분석기(Isotope Ratio Mass Spectrometry, IRMS)로 주입해 분석하며, 산소 동위원소 분석에 사용되는 reference material은 대기 중 air를 활용하였음(그림 3).
 - 실험 과정의 간소화: 기존의 다른 연구들에서 수행된 분석 전에 추출한 용존 기체에서 순수 O_2 또는 O_2 - Ar mixture를 분리해내는 전처리 과정(Keedakkadan and Abe, 2015)을 거친 후 용존산소 동위원소 분석을 실시하였음. 이 연구에서는 이러한 전처리 과정 없이 혼합 용존 기체 중 수분만 제거한 후 분석을 실시하였음에도 안정적인 결과 값(Standard deviation: $\delta^{18}O-O_2: \pm 0.04\%$, $\delta^{17}O-O_2: \pm 0.08\%$)을 획득할 수 있음을 확인하였음.

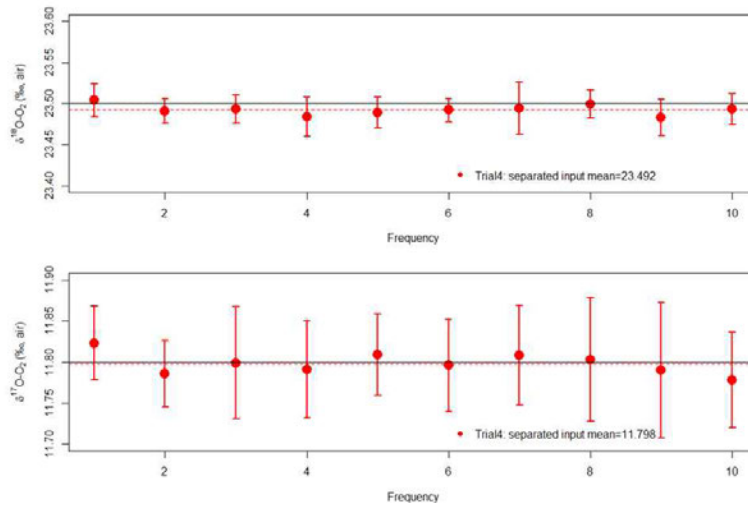


그림 3. 대기 중 air(reference material)의 산소동위원소 구성비($\delta^{18}\text{O}-\text{O}_2$: $23.5 \pm 0.04\%$, $\delta^{17}\text{O}-\text{O}_2$: $11.8 \pm 0.08\%$)의 재현성

○ 연안 환경의 일차생산성 추정을 위한 관측조사

- 조사지 선정

- 1) 연안환경은 해저면까지 유광층이 형성되는 수심이 얇은 환경이며 이러한 환경에서는 부착성 생산자들에 의한 생산성이 총 일차생산에서 큰 비중을 차지하며 중요하게 고려되어야 함.
- 2) 부산 영도 연안(그림 4)과 제주 북동부 연안(구좌읍 하도리; 그림 5)에서 실시한 사전답사를 통해 간조, 만조시기 수심 1.0 m 이내의 조하대에서 저서성, 부착성 일차생산자(갈조류, 녹조류, 홍조류 등)가 분포하는 해역을 선정하였음.



그림 4. 부산 영도 동삼 하리항 조사지



그림 5. 제주시 구좌읍 하도리 연안 조사지

- 연속 관측 실시

- 1) 24시간 연속관측을 실시한 5월 18일 18:00~19일 18:00 당시, 부산 영도 연안 조사지는 그림 6처럼 *Ulva* sp.가 우점하여 분포하였고 조석 차에 의해 수심은 0.5~1.0 m로 시간에 따른 변화를 보였으며 일정 간격으로 chamber 내부와 외부에서 획득한 시료와 환경자료의 정보는 각각 표 1, 2와 같음.
- 2) 용존산소 동위원소 비를 이용해 계산한 일차생산 추정치의 적절성을 판단하기 위해 용존산소 일변화(Diel O₂ curve)를 통한 추정법과 상호비교를 실시하였음.
- 2) 투명 아크릴(투과율, >92%)로 제작한 chamber를 조사지에 설치하여 chamber 내부(GPP_B; 저서성 일차생산)와 외부(GPP_P + GPP_B; 저서성 + 부유성 일차생산)에서 추정된 일차생산 값을 통해 조사지의 저서성 식물군이 총 일차생산에 기여하는 정도를 계산하고자 하였음.



그림 6. 부산 연안(동삼 하리항) 연속관측을 위한 closed chamber 설치 모습

표 1. 24시간 연속관측 시 채취한 시료 정보

시 간	회 차	Chamber 내부 (Close system)				Chamber 외부 (Open system)			
		영양염	$\delta^{18}\text{O}-\text{H}_2\text{O}$	용존산소	TOI	영양염	$\delta^{18}\text{O}-\text{H}_2\text{O}$	용존산소	TOI
18일 6PM	1	0	0	0	0	0	0	0	0
8PM	2	0	0		0	0	0	0	0
10PM	3	0	0		0	0	0	0	0
19일 12AM	4	0	0		0	0	0	0	0
2AM	5	0	0	0	0	0	0	0	0
4AM	6	0	0		0	0	0	0	0
6AM	7	0	0		0	0	0	0	0
8AM	8	0	0		0	0	0	0	0
10AM	9	0	0	0	0	0	0	0	0
12PM	10	0	0		0	0	0	0	0
2PM	11	0	0		0	0	0	0	0
4PM	12	0	0		0	0	0	0	0
6PM	13	0	0	0	0	0	0	0	0

표 2. 연속관측 및 채취항목

항 목		활용센서(자료출처) 및 시료채취량
연속관측	기압, 풍향/풍속	부산항 조위관측소
	광량	2연구동 옥상 AWS 또는 부산 중구 옥지 일시량
	수온, 염분, 조위	부산항 조위관측소
	예측조위	국립해양조사원 자료(부산항 기준)
	용존산소, 수온	ARO-USB
해수분석	용존산소 동위원소($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^{17}\text{O}$)	350 ml
	용존산소 적정	250 ml
	해수(H ₂ O) 산소동위원소($\delta^{18}\text{O}$)	20 ml
	영양염	40 ml -> 여과 후 초저온냉동 보관
	Chlorophyll <i>a</i>	500 ml -> 여과 후 초저온냉동 보관

- 관측 결과

1) 환경 인자의 일주기 변동성(그림 7)

연속 관측을 실시하는 동안 조석 차에 의해 수심은 0.5 m 정도 변동성을 보였고 바람의 세기는 밤에는 약하게 불다 낮에 3 m/s로 비교적 증가하였으며 일사량은 낮에 최고 880 Watt/m²로 나타났음. 이는 5월 평균 일사량 대비 낮은 수준이었음. 수온은 밤에는 15.6℃로 일정한 값을 보이다 낮이 되면서 최고 17.3℃까지 상승하였고 염분은 시간에 따른 변화를 보이지 않았음. 용존산소 농도는 밤에는 소모만 일어나 낮은 값(최소 5 mg/l)을 보였고 낮이 되면서 지속적으로 증가하는 양상(최대 ~14.8 mg/l)을 보였음.

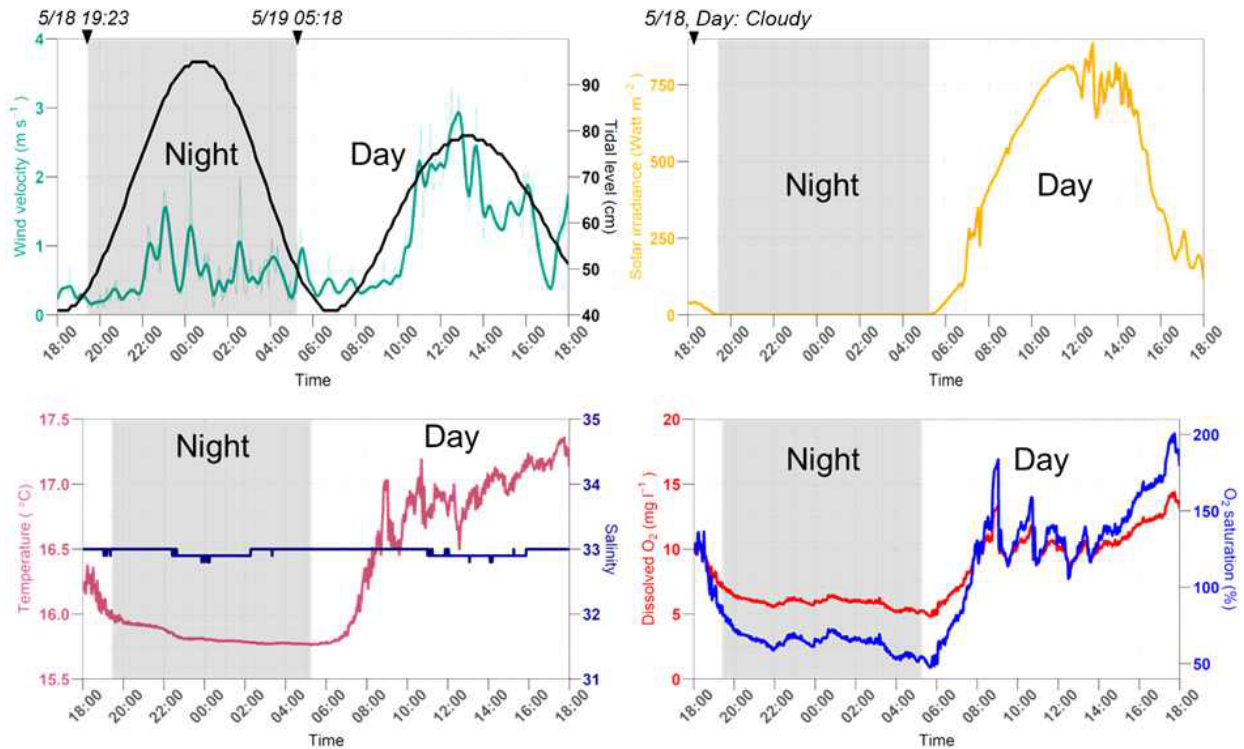


그림 7. 바람, 조석, 일사량, 수온, 염분, 용존산소(chamber 외부) 농도 및 포화도의 일주기 변동

2) 일차생산 추정(chamber 외부)

해수 중 용존산소 농도는 대기와의 기체교환(Gas exchange; G), 광합성을 통한 산소의 생성(Photosynthesis; P), 호흡을 통한 소모(Respiration; R)에 의해서 결정되는 것을 기본 원리로 용존산소를 이용해 일차생산을 추정할 수 있음.

가) 용존산소를 이용한 추정 방법 간의 비교(그림 8)

용존산소를 이용한 일차생산 추정 방법에는 용존산소 일변화를 이용한 가장 일반적인 추정 방법과 비교적 새로운 방법인 용존산소 동위원소를 이용한 방법이 있으며 이 두 방법으로 계산한 일차생산력을 비교하여 용존산소 동위원소를 이용한 일차생산 추정법의 적용 가능여부를 확인하고자 함.

① 용존산소 일변화를 이용한 추정

Odum (1956)에 의해 제안된 용존산소 일변화를 이용한 일차생산력 계산법을 이용하여 추정한 시간에 따른 일차생산력은 그림 8과 같이 나타났으며, 이를 하루 동안의 생산력으로 계산했을 때 2172 mg O₂ m⁻² d⁻¹로 나타났음.

② 용존산소 동위원소 비를 이용한 추정

Prokopenko *et al* (2011)에 의해 제안된 계산식을 이용하여 추정된 일차생산력은 그림 8과 같이 나타났으며, 이를 하루 동안의 생산력으로 계산했을 때 $2095 \text{ mg O}_2 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 로 나타났음. 용존산소 일변화를 이용한 추정치와 비슷한 값을 보였음.

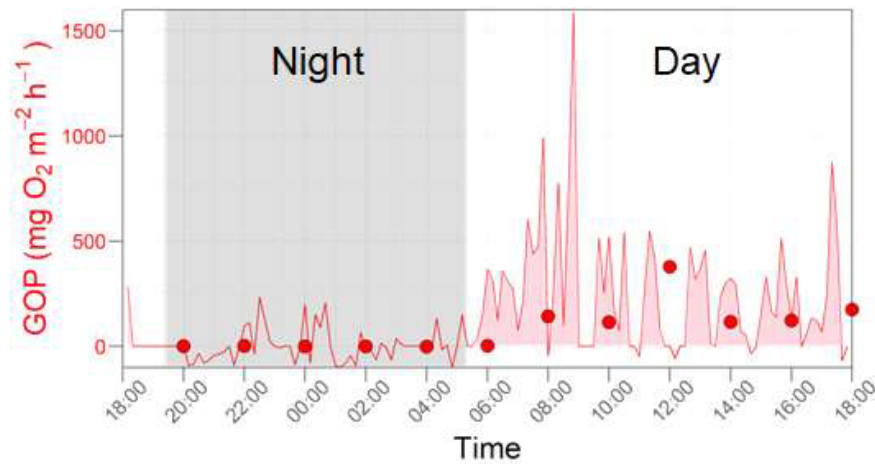


그림 8. 시간에 따른 일차생산력(빨간 실선: 용존산소 일변화 추정법, 빨간 점: 용존산소 동위원소 추정법)

나) 기존의 배양 방법을 통한 추정

부산 영도 연안 실험지 인근에서 비슷한 시기에 배양법을 통해 추정된 총 일차생산력은 $743 \text{ mg O}_2 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 로 나타났으며 이 연구에서 추정된 생산력보다 낮은 값을 보였음. 이는 부유성 생산자인 주로 식물플랑크톤에 의한 생산성만 고려된 추정치이기 때문에 실제 연안 환경의 총 일차생산보다 낮게 나타났을 것이라 판단됨.

3) Chamber 내부의 무산소(밤)-산소과포화(낮) 환경 형성(그림 9)

Chamber 내부의 환경은 저서성 생산자가 분포하는 해저 바닥면으로부터 20 cm의 환경으로 구성하여 부유성 생산자에 의한 영향이 거의 없는 저서계 일차생산 실험 대표군으로 고려하였으나 chamber 내부는 해수의 교환이 일어나지 않기 때문에 밤에는 지속적인 호흡작용으로 무산소 환경(~0%)이 형성되었고 낮에는 아크릴의 온실효과로 수온이 급격히 상승(최고 20.6°C)하였음. 수온 상승과 충분한 광조건에 의해 chamber 내부는 단 6시간 만에 해수의 부유성 생산자인 식물플랑크톤의 개체 수(chamber 외부보다 6배 높은 엽록소 농도를 보임)가 급격하게 증가했고 활발한 광합성 작용으로 산소과포화가 관찰되었음. 예상치 못한 현상이 발생하여 자료 해석에서 제외하였음. 추후 연구 수행 시 이 결과를 고려해 chamber 구조를 보완하여 추가 실험을 실시할 계획임.

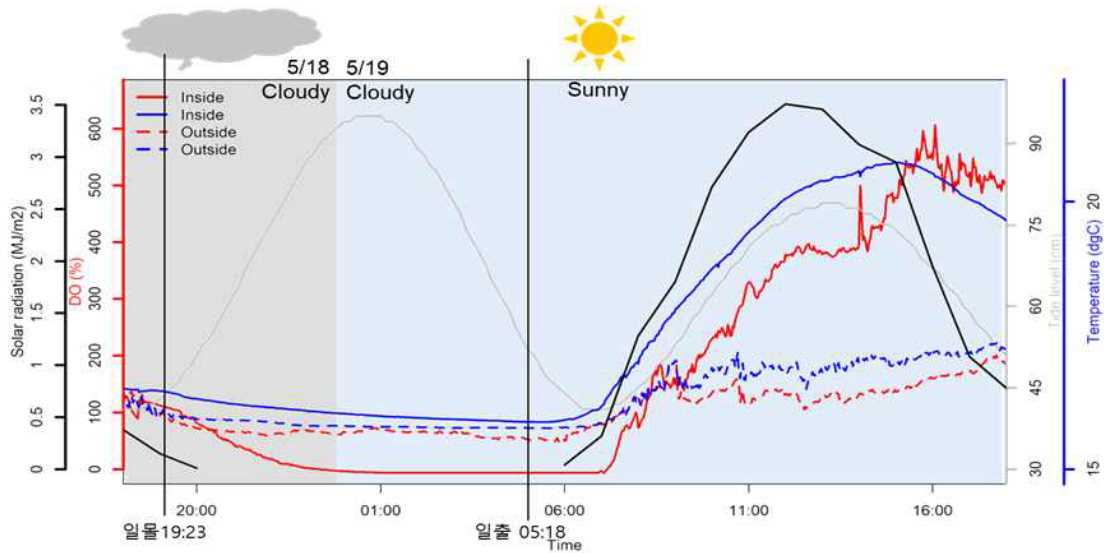


그림 9. Chamber 내부의 용존산소(빨간 실선), 수온의 일주기 변동(파란 실선)

- 추가적인 관측조사의 무산

연안 관측조사는 24시간 이상 2시간 간격으로 실험지에 접근하여 시료 채취를 실시해야함. 따라서 소조기 기간에 접근이 용이하므로 일정을 계획하기에 제한적이었음. 또한 실험 진행 시 안전을 고려하여 기상상태도 고려해야 했기에 적합한 조사시기 선정에 어려움이 있었음. 6월 17~19일 계획했던 제주 북동부 연안 관측조사와 7월 3~4일 계획했던 부산 영도 연안 2차 실험도 이러한 이유로 조사가 무산되었음. 환경 조건의 간섭으로 실험에 제한점이 있지만 *in situ* 일차생산을 추정이 필요하며 이 추정법을 통해 인위적인 환경에서 추정한 일차생산의 불확실성을 배제할 수 있다는 장점이 있음.

○ 연안 환경에서의 저서성 일차생산의 기여도 정량화

부유성 생산자에 의한 일차생산성만 고려한 배양방법으로 계산한 일차생산 추정치(GPP_p)와 이 연구에서 용존산소 동위원소로 추정한 총 일차생산 추정치($GPP_p + GPP_b$)를 이용해 저서성 일차생산의 기여도를 정량화 하고자 하였음. 부산 영도 연안에서 실시한 앞선 실험 결과 값을 바탕으로 정량화 했을 때 5월 경 부산 영도 연안에서는 저서성 생산자가 총 일차생산에 64%를 기여하는 것으로 나타났음.

IV. 연구 성과 및 관련 분야 기여도

- 이 연구를 통해 용존산소 동위원소를 이용한 일차생산 추정법이 저서성 일차생산자의 기여도가 큰 연안생태계 환경의 일차생산 추정에 적합한 방법으로 판단되었으며, 이 추정법을 활용하여 연안생태계의 일차생산 장기 모니터링을 실시하여 자료를 획득함으로써 보다 정확한 환경평가 자료를 바탕으로 해양 환경의 효율적인 관리 및 보전이 가능할 것으로 사료됨.
- 이 연구의 성과를 한국해양학회 추계학술대회에서 구두발표를 실시하였고 기존의 일차생산 추정법의 한계에 대해 설명하고 저서계 식물군(Benthic flora)의 생산성의 기여가 큰 연안생태계에서의 정확한 일차생산 연구를 위해서 용존산소 동위원소를 이용한 일차생산 추정법의 필요성에 대해 강조하였음.

V. 연구결과의 활용방안

- 제주연안 관측조사의 무산됨에 따라 다양한 환경조건 및 저서계 식생이 분포하는 연안 환경의 일차생산력 자료의 확보를 목적으로 추후에 추가적인 연구 수행이 필요함.

- 이 연구의 결과물은 연구를 수행한 학생의 박사학위논문에서 핵심 부분에 해당하며 실험 결과를 바탕으로 학술지 논문 투고를 준비 중에 있고 추가적인 실험을 실시하여 연구내용을 보완할 예정임.
- 용존산소 동위원소를 이용한 일차생산 추정법은 다른 일차생산 추정법과 비교했을 때, 비교적 다양한 수생태계 환경에서 일차생산 추정이 가능하기 때문에 활용성이 높을 것으로 기대되며 추후 연구에서 적용 범위를 확장할 계획임.
- 용존산소 동위원소를 이용한 일차생산 추정의 장점으로 생산력이 낮은 대양에서도 효과적으로 추정이 가능하기 때문에 이 연구를 통해 구축한 분석 방법을 이용하여 현재 참여 중인 대양사업과 연계하여 연구해역을 확장할 예정임.

VI. 참고문헌

- 김미주, 2009. 시화호와 동해에서의 용존산소와 용존산소의 산소안정동위원소에 관한 연구. 이학석사학위논문, 서울대학교.
- 김민섭, 황종연, 권오상, 이원석, 2013. 안정동위원소비 분석 기법의 이해: 시료의 전처리, 분석 및 자료의 해석과 적용. *The Korean Society of Limnology* 46(4): 471-487.
- Gloël, Johanna, 2012. Triple oxygen isotopes and oxygen/argon ratio measurements to enhance coastal and open ocean production/respiration comparisons. Ph.D. Thesis, University of East Anglia.
- Juranek, L. W., & P. D. Quay 2013. Using triple isotopes of dissolved oxygen to evaluate global marine productivity, *Annu. Rev. Mar. Sci.*, 5(1), 503-524, doi:10.1146/annurev-marine-121211-172430.
- Keedakkadan, H. R., & Abe, O. 2015. Cryogenic separation of an oxygen-argon mixture in natural air samples for the determination of isotope and molecular ratios. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, 29(8), 775-781.
- Krause-Jensen, D., S. Markager & T. Dalsgaard, 2011. Benthic and pelagic primary production in different nutrient regimes. *Estuaries and Coasts*. doi: 10.1007/s12237-011-9443-1.
- Luz, B., Barkan, E., Bender, M.L., Thiemens, M.H., Boering, K.A., 1999. Triple-isotope composition of atmospheric oxygen as a tracer of biosphere productivity. *Nature*, 400, pp. 547-551.
- Luz, B., & E. Barkan. 2000. Assessment of oceanic productivity with the triple-isotope composition of dissolved oxygen. *Science* 288: 2028-2031, doi:10.1126/science.288.5473.2028.
- Odum, H. T. 1956. Primary production in flowing waters 1. *Limnology and oceanography*, 1(2), 102-117.
- Prokopenko, M. G., Pauluis, O. M., Granger, J., & Yeung, L. Y. 2011. Exact evaluation of gross photosynthetic production from the oxygen triple-isotope composition of O₂: Implications for the net-to-gross primary production ratios. *Geophysical research letters*, 38(14).
- Stanley, R. H. R., & E. Howard, 2013. Quantifying photosynthetic rates of microphytobenthos using the triple isotope composition of dissolved oxygen, *Limnol. Oceanogr. Methods*, 11, 360-373.

VII. 주요 연구실적

1. 연구실적 요약

학술지 논문	학회논문	특허 출원	특허 등록	대내외 수상
건	1 건	건	건	건

2. 학술지 논문

No.	논문제목	학술지명	저자순	게재연월	국내/국외	SCI 여부

3. 학회 논문

No.	논문제목	학회명	저자순	게재연월	국내/국외	발표 유형
1	용존산소와 산소 안정동위원소를 이용한 총 일차생산 추정	한국해양학회 추계 학술대회	1	2021.11.4.	국내	Oral

4. 특허출원·등록

No.	특허명	출원일	등록일	국가명	등록번호	비고

5. 대내·외 수상

No.	수상명	수상등급	수여기관	수여일자

VIII. 국외출장 현황

No.	출장기간	출장자	국가	지역	출장목적	학회/행사명	발표제목	연구비 사용여부	
								참가비	여비
1									

IX. 전문가 교류내역

No.	전문가 정보			교류내용	교류일자	비고
	성명	소속	직위			
1	김정현	제주대학교	교수	부산 연안 연속관측 조사 실시	2021.05.19.	
				제주 하도 연속관측 조사 관련 논의	2021.06.14.	
				제주 연안 동위원소 일변화 실험 일정 논의	2021.09.24.	

X. 연구비 집행 현황

세 목	책정금액(A)	집행금액(B)	집행률(B/A)
학생인건비	1,000,000	1,000,000	1
연구시설·장비비	-	-	-
연구재료비	6,100,000	6,089,600	0.998
연구활동비	2,900,000	2,866,937	0.992
합 계	10,000,000	9,956,537	0.995

XI. 지도교수 의견

- 연구 주제의 선정, 실험의 설계와 진행, 자료의 획득, 과제의 운영 과정 모든 것이 학생 스스로 주도하여 수행되어 미래 연구자로서의 역량을 갖추는 데에 진일보함.
- 짧은 연구 기간이었음에도 불구하고 매우 핵심적인 분석 방법을 확립하였으며, 현장 조사를 통한 중요한 자료를 획득하여 학술대회에 그 결과를 발표하였음. 현재 본 연구의 결과를 바탕으로 학술지에 논문 투고를 준비 중임.
- 본 연구를 통하여 본인의 연구 영역을 확장할 수 있는 기반을 마련하여 학위 취득 후 독립된 연구자로서의 자질이 한층 향상됨.
- 결론적으로 본 연구는 매우 성공적으로 수행되었다고 판단됨.