

TSPM16060-067-6

남극해 수층 미생물 호흡에 의한
유기물 분해 및 조절요인

Microbial ecology associated with CO₂ reduction
in water column of the Southern Ocean

극지연구소

한양대학교

제 출 문

극지연구소장 귀하

본 보고서를 “남극해 탄소저감 최적기능 환경특성 연구”에 관한 연구(본과제명) 과제의 위탁연구 “남극해 수층 미생물 호흡에 의한 유기물 분해 및 조절요인”에 관한 연구(위탁과제명) 과제의 보고서로 제출합니다.



(본과제) 총괄연구책임자	:	유 규 철
위탁연구기관명	:	한양대학교
위탁연구책임자	:	현 정 호
위탁참여연구원	:	김 성 한
“	:	조 혜 연
“	:	김보미나
“	:	안 성 욱
“	:	최 아 연
“	:	박 지 수

요 약 문

I. 제 목

남극해 수층 미생물 호흡에 의한 유기물 분해 및 조절요인

II. 연구개발의 목적 및 필요성

중속영양박테리아는 해양생태계 내에서 순환되는 유기물을 분해하는 과정에서 1)미생물 먹이망(microbial loop)을 통해 용존유기탄소를 상위영양단계로 전달하거나, 2)호흡을 통해 해수 내 CO_2 를 생성함으로써 생물펌프(biological carbon pump)를 통한 해양의 탄소제거 기능 약화를 야기하거나, 3)미생물 탄소펌프(microbial carbon pump)를 통해 난분해성 용존유기탄소(RDOC)를 생성하여 해양의 잠재적 탄소저장기능을 강화시키는 등 해양의 탄소순환을 조절하는 중요한 생물이다.

남극해는 대기 중 CO_2 의 15%를 흡수하고 있는 것으로 알려져 있으며, 온난화로 인한 극지의 수온상승이 수층의 미생물 호흡을 통한 유기물 분해 및 CO_2 의 생성을 더욱 증가시킬 것으로 인식되고 있다(탄소제거기능의 약화). 따라서, 미생물-유기탄소간의 상호작용 연구는 남극 수층 환경 내 탄소순환경로를 이해하고, 기후변화(수온상승)에 따른 해양의 탄소저장기능 변화를 평가하기 위해 필수적이다.

III. 연구개발의 내용 및 범위

- Optode sensor를 이용한 남극해 미생물 호흡에 의한 산소소모율(유기탄소 분해율) 측정

- 미생물 호흡에 의한 유기탄소분해가 남극해의 탄소저장기능에 미치는 영향 규명
- 미생물-유기탄소 상호작용 연구를 통한 남극해의 생지화학적 물질순환 이해

IV. 연구개발결과

- 미생물 호흡률 측정시 기존 Winkler 방법과 Optode센서 사용 분석 결과 비교
- 배양을 통한 미생물 호흡률 측정

V. 연구개발결과의 활용계획

- 남극해 수층의 미생물 호흡률 정보를 남극해 탄소저장기능 평가에 활용
- 미생물 호흡에 대한 연구를 통한 탄소순환 이해에 활용



S U M M A R Y

I. Title

Microbial ecology associated with CO₂ reduction in water column of the Southern Ocean

II. Purpose and Necessity of R&D

Heterotrophic bacteria are important role regulating the carbon cycle in the ocean. Heterotrophic bacteria (1) transfer dissolved organic carbon into the high trophic level in the microbial loop, (2) attenuate biological carbon pump with respiring organic carbon to CO₂ and (3) enhance potential ability of carbon capture and storage through the production of refractory dissolved organic carbon via microbial carbon pump.

Increase of water temperature by global warming would accelerate the emissions of CO₂ from microbial respiration. Thus, the study of interaction between microorganisms and organic carbon is essential to understand carbon cycle in the water column of the Southern Ocean, and evaluate the ocean carbon storage capacity due to climate change.

III. Contents and Extent of R&D

- Measurement of oxygen consumption rates by microorganisms in the Southern Ocean, using optode sensor
- Investigation of organic carbon oxidation by microbial respiration on carbon

storage capacity of the Southern Ocean

- The study of interaction between microorganisms and organic carbon to understand the biogeochemical cycle in the Southern Ocean

IV. R&D Results

- Comparison of the methods of microbial respiration measurement between Winkler method and optode sensor
- Measurement of microbial respiration rate through culture in the Lab.

V. Application Plans of R&D Results

Microbial respiration investigated in this study will provide an information on the role of the Southern Ocean in controlling the carbon cycle and climatic change associated with the global warming in the Southern Ocean. The investigation of microbial respiration in the Southern Ocean provides new insights into the roles of prokaryotes in carbon cycles.

목 차

요 약 문	3
목 차	7
그림목차	8
제 1 장 서 론	9
제 1절 연구개발의 개요	9
제 2절 연구개발 대상 기술의 경제적, 산업적 중요성 및 연구개발의 필요성 ...	11
제 2 장 국내의 기술개발 현황	13
제 1절 국외 기술, 산업동향	13
제 2절 국내 기술, 산업동향	14
제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과	15
제 1절 미생물 호흡률의 기존 연구방법 및 남극해의 미생물 호흡률 조사	15
제 2 절 Winker 방법과 optical sensor를 이용한 미생물 호흡률 측정 방법 비교	15
제 3절 Optical sensor를 이용한 미생물 호흡률 측정 장비 테스트	18
제 4장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도	22
제 5 장 연구개발결과의 활용계획	23
제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보	24
제 7 장 참고문헌	25

그림 목차

그림 1 남극해 수층과 저층의 미세생물 먹이망내의 탄소순환 모식도	9
그림 2 Winkler 방법(titration)과 optical sensor를 사용하여 측정한 호흡률 결과	16
그림 3 Winkler 방법과 optical sensor를 사용하여 시간에 따른 DO농도 변화 비교	16
그림 4 Optical sensor를 이용한 미생물 호흡을 측정 장비	17
그림 5 광학센서를 이용한 산소측정 원리	18
그림 6 1초 간격으로 DO농도 측정 테스트	19
그림 7 10초 간격으로 DO농도 측정 테스트	20
그림 8 침강입자의 미생물 호흡률을 측정할 수 있는 RESPIRE 장치 모식도 (McDonnell et al., 2015)	23

제 1 장 서 론

제 1절 연구개발의 개요

대기 중 이산화탄소는 가장 대표적인 온실가스로서, 빠른 속도의 산업화는 대기 중의 이산화탄소의 농도를 빠른 속도로 증가시켜 산업화 이전보다 (280 ppm) 약 1.4배 이상 높아져 (400 ppm), 지구 온난화가 가속화되고 있다. 이러한 시점에 남극해 수층을 통해 전체의 약 15%의 이산화탄소가 흡수되어 “남극해 이산화탄소 흡수 기작”에 대한 관심도가 증대되고 있다.

대기 중 이산화탄소는 해양 수층 내 일차생산자에 의해 유기탄소로 전환 된 후, 입자성 유기탄소의 형태로 저층으로 침강하는 동안 수층에서 분해되거나, 퇴적물 내에서 박테리아에 의한 분해를 통해 상당부분 무기탄소로 전환되어 다시 수층으로 재순환되기도 한다(그림1). 이러한 호흡과정을 통한 무기탄소의 재순환은 생물펌프를 통한 대기로부터의 탄소 격리(carbon sequestration)을 약화시키는 역할을 한다.

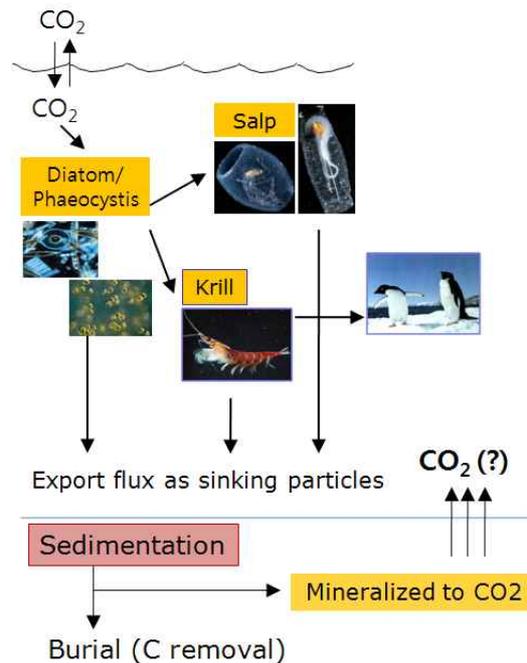


그림 1 남극해 수층과 저층의 미세생물 먹이망내의 탄소순환 모식도.

한편, 수층에서 미생물 호흡을 통한 유기물 분해 및 이산화탄소의 되먹임(feed back)은 온난화로 인한 극지의 수온상승 시 더욱 증가되는 것으로 인식된다. 예로서, Kirchman et al. (2009)은 수온이 -1.8°C 에서 4°C 로 증가하면 박테리아 생산력(BP)과 일차생산력(PP)의 비율(BP/PP)이 증가하여, 수층으로의 CO_2 재순환이 증가할 수 있음을 보였다. 결국, 남극 수층 내 탄소 저감 기능을 평가하기 위해서는 수층 미세생물 먹이망 내 탄소 순환을 이해하는 것은 필수적이다.

따라서 남극해 수층 내 호흡에 의한 유기물 분해 및 이에 따른 무기탄소의 재순환, 그리고 이에 관여하는 박테리아의 생태 연구는 남극 해역의 수층 내 탄소 순환을 이해하고, 탄소저감 기능을 평가하기 위해 필수적으로 수행되어야 할 연구 분야로 인식된다.

본 연구는 남극해 수층 내 미생물 호흡률을 측정하여 획득된 기초자료의 축적을 통해 남극해 해양환경 및 생태계 상호작용을 이해하고, 남극해의 환경변화 양상 이해를 위한 기초 자료를 제공할 것이다. 또한 본 연구 과제 결과 정립된 수층 내 미생물 호흡을 측정 기술은 장기적 모니터링을 위한 유용한 기술로 활용될 것으로 기대된다.



제 2절 연구개발 대상 기술의 경제적, 산업적 중요성 및 연구개발의 필요성

(1) 기술적 측면에서의 기술 개발의 필요성

대기 중의 이산화탄소의 15%는 남극해 수층 내에서 일차 생산자에 의해 소비되어 유기물로 전환되어 먹이사슬을 통해 생태계로 전달된다. 생성된 유기물의 최종적 분해는 미생물 호흡에 의존적이며 결국, 남극 수층 환경 내 탄소 순환을 이해하기 위해서는 박테리아의 생태적 역할을 규명하는 것이 필수적이다. 이를 위하여, 본 연구를 통해 광학 센서(optical sensor)를 이용한 박테리아 호흡율을 측정하는 연구기법을 정립하고자 한다. 광학 센서를 통한 호흡율 측정 방법은 전통적으로 이용하여 왔던 Winkler 방법(1896년)에 의한 박테리아 호흡율 측정 방법보다 측정이 상대적으로 용이하며, 시간에 따른 산소변화를 감지하는 해상도가 뛰어나고, 또한 시간과 노력이 절약되는 장점을 가지고 있다.

(2) 경제적 측면에서의 기술 개발의 필요성

남극 생태계 내 탄소순환 및 향후 모델링 구축을 통한 종합 해양과정 연구 수행 경쟁력 확보하고, 남극 환경에 대한 지속적인 생태/환경 연구수행을 통해, 지구적 규모의 환경 변화 및 물질순환에서 남극의 역할을 이해하기 위한 자료획득 외에도 향후 예상되는 남극의 부존자원에 대한 기득권 확보 근거자료로 활용될 것이다.

(3) 사회문화적 측면에서의 기술 개발의 필요성

제안된 연구를 통한 남극 환경에 대한 지속적인 연구수행은 지구기후 및 해양환경 변화와 생지화학적 물질순환에 대한 해양학적 이해 증진에 활용될 것이다. 본 연구 과제를 통해 축적된 연구 결과들을 국/내외 학술대회에

서 발표하고, 국제저명 학술논문 게재함으로써 한국의 극지 연구에 대한 국제적 인지도 제고하고, 해양 환경변화가 가장 급격히 발생하는 남극 해역에서 지속적인 연구는 향후 기후변화 및 생태계 영향관련 국제프로그램에서 능동적으로 대처할 수 있는 과학적 기반 구축할 것이다.



제 2 장 국내외 기술개발 현황

제 1절 국외 기술, 산업동향

- 최근 급속한 기후변화에 있어 극지의 역할 규명이 큰 이슈로 부각되는 가운데, 기후변화 연구, 장기적 환경 모니터링 등에 보다 중점을 둔 연구 활동을 추진
 - 미국, 일본 공동의 알래스카 횡단형 정밀 자동기상관측 장비 디자인 및 인프라 구축을 통한 알래스카 기후변화 모니터링 시스템 개발, 적용
 - 독일해양극지연구소(AWI)는 극지연구, 극지 인근해와 대양을 포함한 해양연구를 병행하며, 매 5년 단위로 중기연구전략을 구성하여 운영
- 지구 온난화에 따른 수층 내 생물 반응에 대한 관심이 증대되었고, Kirchman 등(2008)은 북극 수층 환경 내에서 해빙에 따른 식물 플랑크톤에 의한 일차 생산력과 중속 영양미생물의 호흡률을 측정하여 북극 해양 내 탄소 순환에 대해 보고함
- 탄소 저감 기능에 관련하여 이산화탄소의 거동을 이해하기 위한 탄소 순환에 관여하는 미생물 생태 연구가 다수 보고됨
 - Widdicombe and Needham (2007)는 메소코즘 실험을 통하여 pH 변화에 따른 해양 산성화 가정 실험을 통하여 박테리아 호흡을 통한 물질 순환의 변화를 연구하여 탄소저감기작에 미치는 영향에 대하여 고찰함 (Marine Ecology Progress Series 341: 111-122)
 - McDonnell et al. (2015) 등은 oligotrophic 및 mesotrophic한 두 해역에

서 입자성 유기물에 의존하는 미생물 군집의 호흡과 침강율을 서로 비교하여 탄소 저감에 있어 미생물 호흡이 중요함을 보고함(Global Biogeochemical Cycles 29: 175-193)

- Lechtenfeld et al. (2014) 등은 carbon sequestration에 관련하여 남극해 수층 환경에서 용존 유기물의 거동을 이해하고자 함(Geochimica et Cosmochimica Acta 126: 321-337)

제 2절 국내 기술, 산업동향

- 최근 우리나라 동해 퇴적층을 대상으로 이산화탄소 지중저장기술 연구가 진행됨에 따라 환경 내 서식하는 미생물 군집 다양성에 대한 연구가 보고됨 (Choi et al. 2014. Journal of the Korean Society of Oceanography 19:147-154)
- 하지만, 국내에서 이루어진 해양 수층환경에서 탄소 저감 기능에 관련된 탄소순환에 연관된 미생물 생태 연구는 전무함

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

제 1절 미생물 호흡률의 기존 연구방법 및 남극해의 미생물 호흡률 조사

- Ducklow et al (2000)은 남극 Ross Sea에서 배양시간동안 감소하는 산소농도 측정법을 이용하여 미생물 호흡률을 측정하였다. Ross Sea에서 1-2월 동안에는 박테리아 호흡률이 전체 군집 호흡률의 11%에 해당했으나, 엽록소 농도가 낮은 경우에는 박테리아 호흡률이 전체 군집 호흡률의 50%까지 차지하는 것으로 나타났다.
- Ducklow et al (2015)는 남극 Amundsen Sea Polynya에서 배양시간동안 증가하는 이산화탄소 농도를 측정하는 방법을 이용하여 군집 호흡률을 측정했으며, 표층에서 유광층 밑으로 export되는 입자의 대부분(약 76%)이 박테리아에 의해 분해되는 것으로 보고하였다.
- McDonnell et al. (2015)은 남극해의 Bermuda Atlantic Time-series Study (BATS)정점과 Antarctic Peninsula (WAP)에서 침강입자에 붙어있는 미생물의 호흡률을 측정하였다. Optode를 이용하여 배양시간동안 감소하는 산소농도를 측정하는 방법을 사용했으며, 미생물 호흡률이 유광층 아래에서 기하급수적으로 감소하여 150-500 m 깊이에서 75% 감소하는 것으로 나타났다.

제 2 절 Winker 방법과 optical sensor를 이용한 미생물 호흡률 측정 방법 비교

- 미생물 호흡률 측정은 배양시간 동안 감소하는 용존산소의 농도차를 이용하여 계산하는데, 기존에 사용하는 Winkler 방법과 optical sensor(optode)를 사용한 분석결과를 비교했을 때, 전반적으로 일치하는 결과를 보였다($r^2 = 0.981$, P

<0.001, 그림 2).

- 그러나, Winkler 방법 사용 시, 도출되는 데이터가 전체 배양시간 동안의 DO 농도 변화를 다루기는 어렵다. 그림 3에서와 같이 Winkler 방법을 사용한 경우(titration), 전체 24시간 동안 배양실험을 진행하였지만, 데이터 수는 3개이다. 반면, optical sensor를 사용한 측정법은 10시간동안 배양실험을 진행하며, 10초 간격으로 연속적인 측정이 가능하고, 데이터의 오차범위도 상대적으로 줄어들어 자료의 신뢰성이 더해질 수 있다(그림 3).

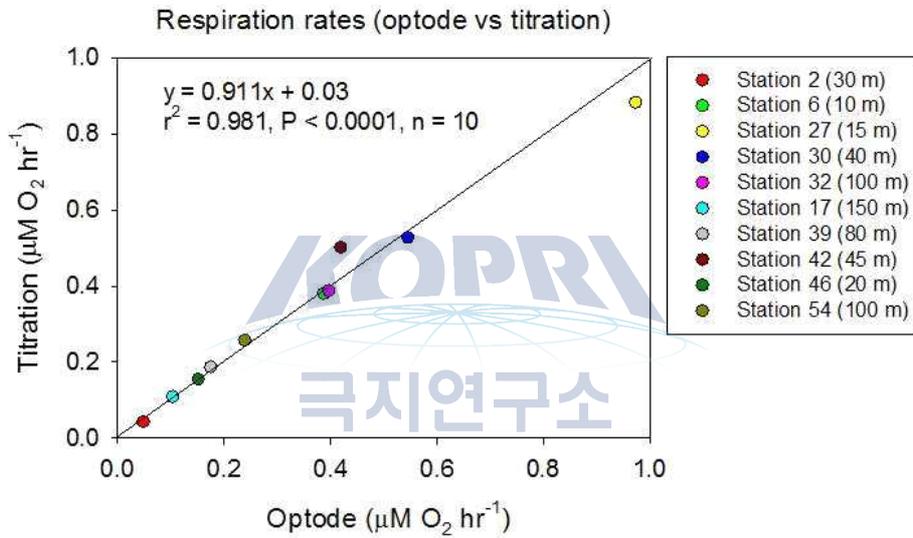


그림 2 Winkler 방법(titration)과 optical sensor를 사용하여 측정된 호흡률 결과 비교

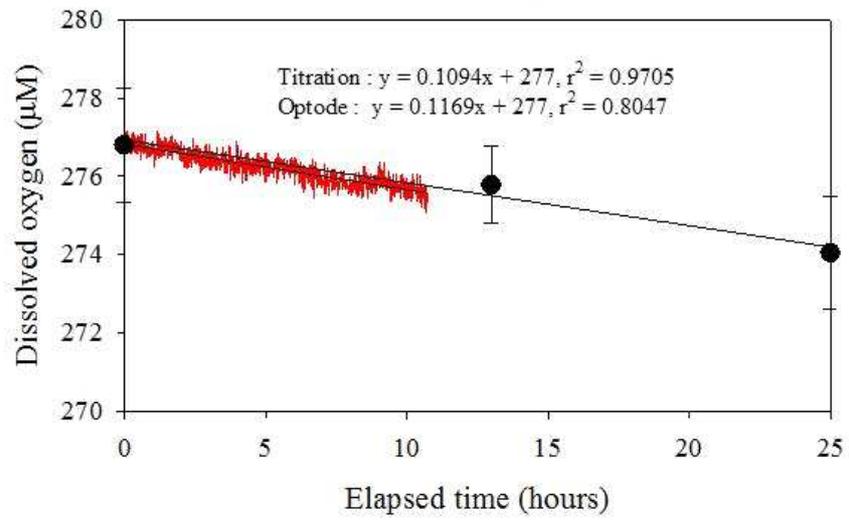


그림 3 Winkler 방법과 optical sensor를 사용하여 시간에 따른 DO농도 변화 비교



제 3절 Optical sensor를 이용한 미생물 호흡률 측정 장비 테스트

- 미생물 호흡률 측정 시 배양시간동안의 현장수온 유지가 중요하여, 이에 필요한 저온항온수조를 구입하였다. 구입한 장비는 아래와 같다(그림 4).



그림 4 Optical sensor를 이용한 미생물 호흡률 측정 장비

- 광학센서는 REDFLASH sensor를 사용하여 sensor에서 조사된 빛의 반응특성을 이용하여 산소값을 측정한다. Sensor에서 특정 파장의 빛(610-630 nm)을 조사할 경우 본래의 파장과 다른 빛을 특정시간 동안 다시 방출하는데, 빛을 방출하는 시간의 길이는 매질 내의 용존산소량과 반비례(형광소멸, fluorescence quenching)하는 관계를 가지고 있고 이에 따라 산소 농도를 연속적으로 측정 할 수 있다(그림 5).

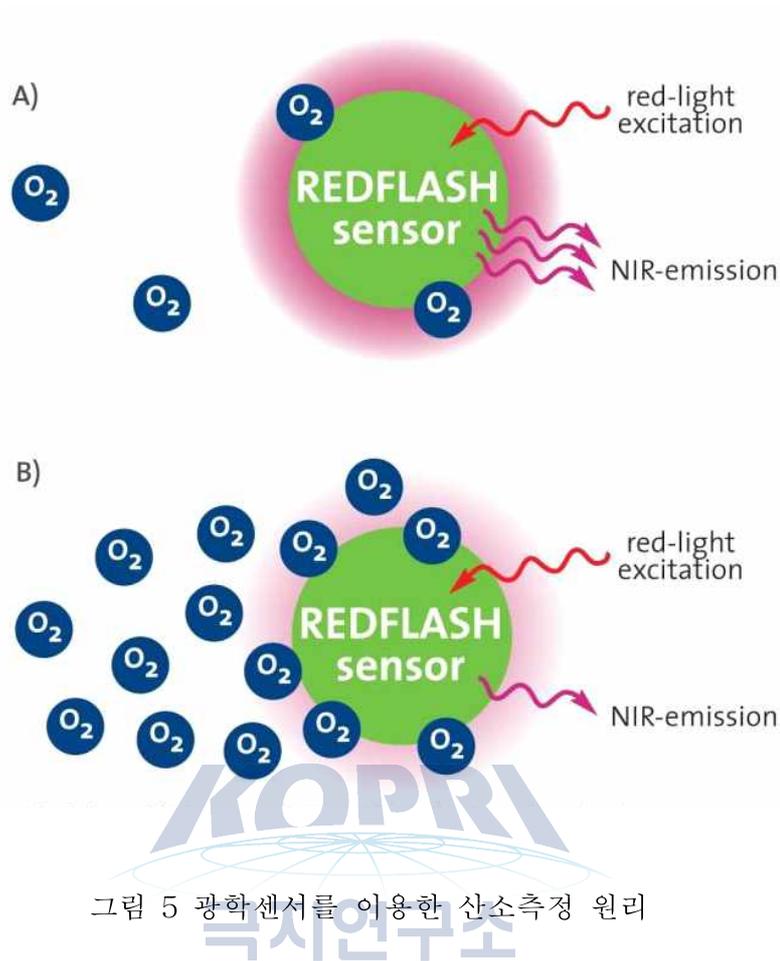


그림 5 광학센서를 이용한 산소측정 원리

- 구입한 항온수조 및 광학센서를 승선연구 전에 테스트하였다.: 1초 간격으로 측정하였을 때, B와 C의 DO농도 변화폭이 A에 비해 비교적 넓게 나타났다 (그림 6). 광학센서의 측정 시간간격을 10초로 재설정 후 앞선 실험에서 DO 농도 변화폭이 넓었던 BOD병의 광학센서 스팟을 재부착하여 다시 측정 한 결과 아래와 같이 변화폭 적게 나타났다(그림 7).

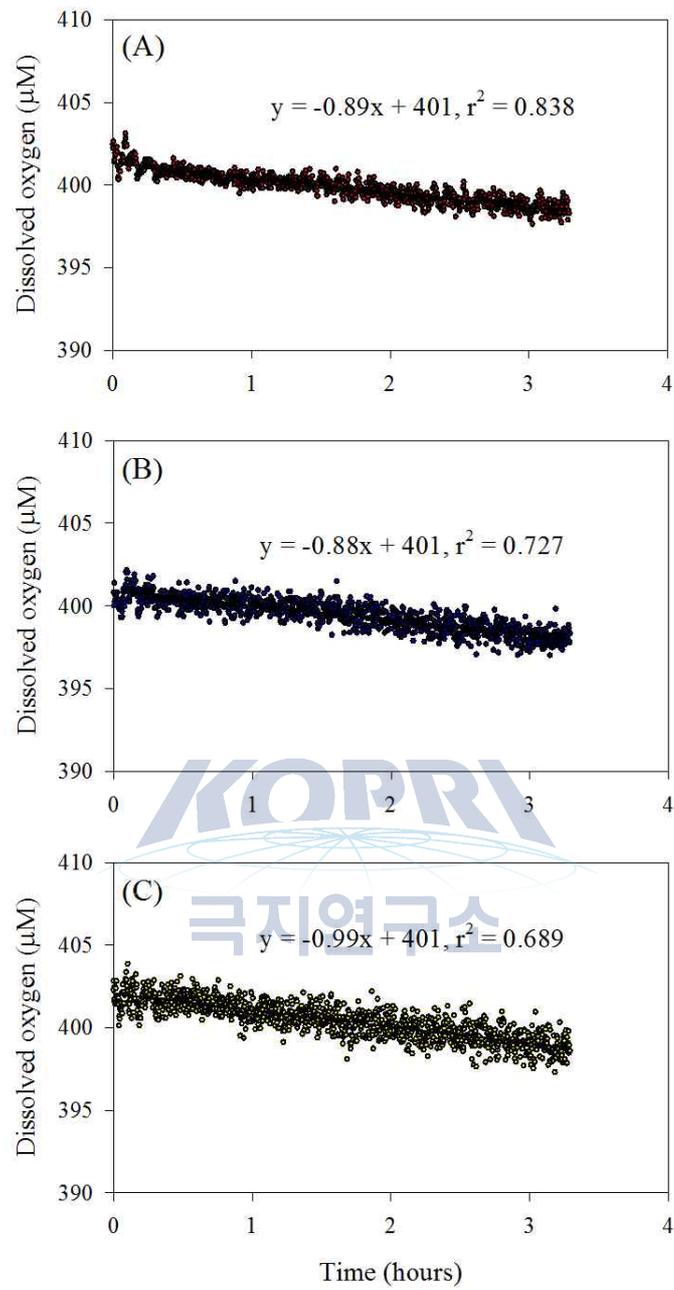


그림 6 1초 간격으로 DO농도 측정 테스트

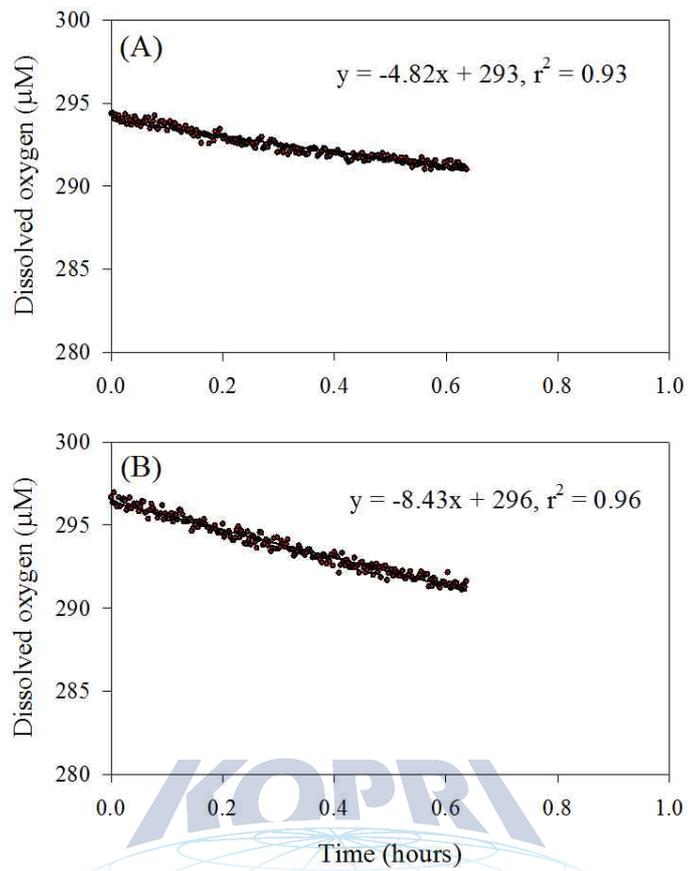


그림 7 10초 간격으로 DO농도 측정 테스트

제 4장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

- 제안 된 연구를 통한 남극해 환경에 대한 지속적인 연구수행은 지구기후 및 해양환경 변화와 생지화학적 물질순환에 대한 해양학적 이해 증진에 활용될 것이다.
- 본 연구 과제를 통해 축적된 연구 결과들을 국/내외 학술대회에서 발표하고, 국제저명 학술논문 게재함으로써 한국의 극지 연구에 대한 국제적 인지도를 제고하고자 한다.
- 온난화 및 해빙 감소 등 해양 환경변화가 급격히 발생하는 남극해역에서 지속적인 연구는 향후 기후변화 및 생태계 영향관련 국제프로그램에서 능동적으로 대처할 수 있는 과학적 기반 구축하고자 한다.



제 5 장 연구개발결과의 활용계획

- 본 연구를 통해 정립된 수층의 호흡율 측정기술은 다양한 해양환경에서 수온상승 및 환경변화에 따른 미생물 호흡율과 그로 인한 탄소순환을 정량화하기 위한 필수적인 지표로 활용 가능하다.
- 지구 온난화에 따른 해양 환경변화가 가장 급격히 발생하는 남극해역에서 지속적인 연구는 향후 기후변화 및 생태계 영향관련 국제프로그램에서 능동적으로 대처할 수 있는 과학적 기반 구축할 것이다.
- 남극 환경에 대한 지속적인 생태/환경 연구수행을 통해, 지구적 규모의 환경 변화 및 물질순환에서 남극의 역할을 이해하기 위한 자료획득 외에도 향후 예상되는 남극의 부존자원에 대한 기득권 확보 근거자료로 활용 가능하다.



제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

- 미생물 호흡률은 측정방법이 미생물 생산력에 비해 어려워 접근이 용이하지 않았다. 가장 보편적으로 사용하는 측정법은 Winkler 방법을 이용한 산소농도 측정법이다 (Robinson and Williams, 2005).
- 최근, McDonnell et al. (2015)은 남극해에서 optode가 부착된 RESPIRE 트랩을 이용하여 미생물 호흡률을 측정하였다. 이 장비는 장기간 동안 현장조건에서 optode가 부착된 incubation chamber를 사용하여 산소농도를 측정할 수 있다.

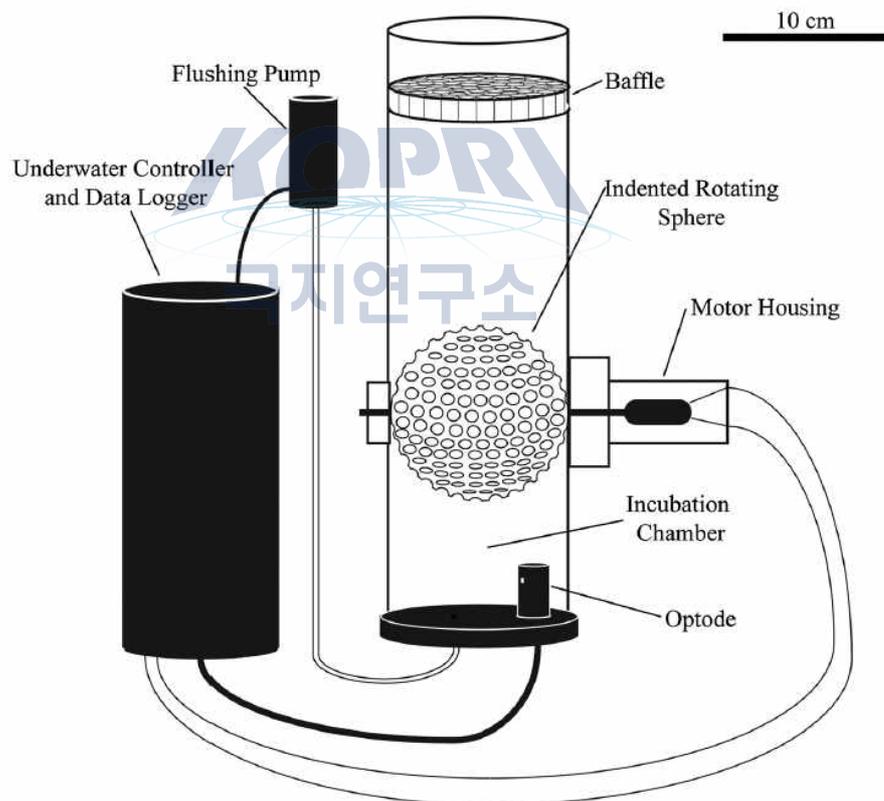


그림 8 침강입자의 미생물 호흡률을 측정할 수 있는 RESPIRE 장치 모식도
(McDonnell et al., 2015)

제 7 장 참고문헌

- Choi, D.H., Gim, B.-M., Choi, T.S., Lee, J.-S., Noh, J. H., Park, Y.-G., Kang, S.-G. 2014. Seasonal variation of bacterial community composition in sediments and overlying waters of the south East Sea. *Journal of the Korean Society of Oceanography* 19: 147-154.
- Ducklow, H.W., Dickson, M.-L., Kirchman, D.L., Steward, G., Orchardo, J., Marra, J., Azam, F. 2000. Constraining bacterial production, conversion efficiency and respiration in the Ross Sea, Antarctica, January-February, 1997. *Deep-Sea Research II* 47: 3227-3247.
- Ducklow, H.W., Wilson, S.E., Post, A.F., Stammerjohn, S.E., Erickson, M., Lowry, K.E., Sherrell, R.M., Yager, P.L. 2015. Particle flux on the continental shelf in the Amundsen Sea Polynya and Western Antarctic Peninsula. *Elementa Science of the Anthropocene* 3:000046. doi: 10.12953/journal.elementa.000046.
- Kirchman, D.L., Hill, V., Cottrell, M.T., Gradinger, R., Malmstrom, R.R., Parker, A. 2009. Standing stocks, production, and respiration of phytoplankton and heterotrophic bacteria in the western Arctic Ocean. *Deep-Sea Research II* 56: 1237-1248.
- Lechtenfeld, O.J., Kattner, G., Fleus, R., McCallister, S.L., Schmitt-Kopplin, P., Koch, B.P. 2016. Molecular transformation and degradation of refractory dissolved organic matter in the Atlantic and Southern Ocean. *Geochimica et Cosmochimical Acta* 126: 321-337.
- McDonnell, A.M.P., Boyd, P.W., Buesseler, K.O. 2015. Effects of sinking velocities and microbial respiration rates on the attenuation of particulate carbon fluxes through the mesopelagic zone. *Global Biogeochemical Cycles* 29: 175-193.
- Robinson, C., Williams, P.J.leB. 2005. Respiration and its measurement in surface marine waters. (Eds.), *Respiration in Aquatic Ecosystems*. Oxford University

Press, New York, pp. 147-180.

Widdicombe, S., Needham, H.R. 2007. Impact of CO₂-induced seawater acidification on the burrowing activity of *Nereis Virens* and sediment nutrient flux. Marine Ecology Progress Series 341: 111-122.



뒷 면



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