「The Sea」 Journal of the Korean Society of Oceanography
Vol. 15, No. 1, pp. 41 — 50, February 2010

저층 경계면 연구용 Benthic chamber(Belc*I*) 개발

이재성[1]* · 박경수[2] · 강범주[2] · 김영태[1] · 배재현[3] · 김성수[1] · 박정준[1] · 최옥인[1]
[1]국립수산과학원 환경연구과, [2]백년기술, [3]국립수산과학원 환경연구과

The Development of a Benthic Chamber (Belc*I*) for Benthic Boundary Layer Studies

JAE SEONG LEE[1]*, KYUNG-SOO BAHK[2], BUEM-JOO KHANG[2], YOUNG-TAE KIM[1], JAE HYUN BAE[3], SEONG-SOO KIM[1], JUNG JUN PARK[1] AND OK-IN CHOI[1]
[1]*Marine Environment Research Division, NFRDI, Busan 619-705, Korea*
[2]*Centennial Technology Co., Ansan 426-901, Korea*
[3]*Fisheries Engineering Division, NFRDI, Busan 619-705, Korea*

소형선박에서 운영이 가능한 연안용 benthic chamber(Belc*I*)를 개발했다. 운영상에 유연성이 큰 Belc*I*는 연안 저층 경계면 연구에 폭넓게 이용될 수 있을 것으로 판단된다. Belc*I*는 몸체, 자동채수기, 교반기 및 전자제어부로 구성된다. 운영상에 유연성을 극대화하기 위해 몸체는 사각 셀 단위의 2단 구조로 설계했다. 센서신호의 증폭, 교반기 및 채수장치 제어회로를 초 전력 소모 회로로 구성하여 외부 전원장치를 제거했다. PIV(particle image velocimetry) 기법으로 측정한 chamber 내부의 유체유동은 전형적인 radial-flow impeller의 특성을 나타냈다. chamber내 물의 혼합시간은 약 30초로 추정되었으며, 바닥면에서 shear velocity(u*)는 약 0.32 cm s^{-1}였다. 석고용해 실험으로 계산된 확산경계층(DBL) 두께는 약 180~230 μm였다. 현장에서 측정한 산소소모율은 약 84 mmol O_2 m^{-2} d^{-1}로 선상배양결과 보다 2배 이상 컸다. 저층 영양염 플럭스는 "질산+아질산"이 0.18 ± 0.07 mmol m^{-2} d^{-1}, 암모니움이 2.3 ± 0.5 mmol m^{-2} d^{-1}, 인산인이 0.09 ± 0.02 mmol m^{-2} d^{-1}, 규산규소가 23 ± 1 mmol m^{-2} d^{-1}로 추정되었다.

We have developed an *in-situ* benthic chamber (Belc*I*) for use in coastal studies that can be deployed from a small boat. It is expected that Belc*I* will be useful in studying the benthic boundary layer because of its flexibility. Belc*I* is divided into three main areas: 1) frame and body chamber, 2) water sampler, and 3) stirring devices, electric controller, and data acquisition technology. To maximize *in-situ* use, the frame is constructed from two layers that consist of square cells. All electronic parts (motor controller, pA meter, data acquisition, etc.) are low-power consumers so that the external power supply can be safely removed from the system. The hydrodynamics of Belc*I*, measured by PIV (particle image velocimetry), show a typical "radial-flow impeller" pattern. Mixing time of water in the chamber is about 30 s, and shear velocity (u*) near the bottom layer was calculated at 0.32 cm s^{-1}. Measurements of diffusivity boundary layer thickness showed a range of 180-230 μm. Sediment oxygen consumption rate, measured *in-situ*, was 84 mmol O_2 m^{-2} d^{-1}, more than two times higher than on-board incubation results. Benthic fluxes assessed from *in-situ* incubation were estimated as follows: nitrate + nitrite = 0.18 ± 0.07 mmol m^{-2} d^{-1} ammonium = 2.3 ± 0.5 mmol m^{-2} d^{-1} phosphate = 0.09 ± 0.02 mmol m^{-2} d^{-1} and silicate = 23 ± 1 mmol m^{-2} d^{-1}.

Keywords: Benthic boundary layer, benthic chamber, benthic flux, *in-situ* measurement

서 론

해양에서 해저면은 물질순환의 중요한 통로이다. 해수에 용존되어있는 다양한 물질은 해저면 표면을 통해 교환되며, 다양한 물리·생물학적 요인에 의해 물질교환이 조절된다(Chester, 1990).

수주에서 입자성 유기물질(POC)은 중력에 의해 저층으로 가라앉는다. 해저면 표층에 퇴적되는 신선한 입자성 유기물질은 미생물들이 서식할 수 있는 공간과 에너지원을 지속적으로 제공한다. 그리고 표층 퇴적층에서 서식하는 미생물의 군집과 활동은 물질의 생지화학적 순환 경로의 특성을 결정한다(Canfield *et al.*, 2006).

연안의 기초 생산력은 매우 높으며, 육지에서 다량의 유기물이 공급된다. 연안으로 유입된 유기물은 얕은 수심 때문에 많은 부분이 수중에서 분해되지 않고 퇴적물 표층으로 퇴적된다. 상부 퇴적층에서 미생물들은 산소와 산화형태의 무기물들을 전자수용체(O_2,

*Corresponding author: leejs728@nfrdi.go.kr

NO_3^-, $Fe(OH)_3$, MnO_2, SO_4^{2-}, CO_2)로 이용하여 유기물을 분해한다(Canfield *et al.*, 2006). 유기물 분해과정에서 생성되는 여러 종류의 환원성 물질은 공극수와 입자 표면에서 복잡한 생지화학적 반응을 거치게 된다. 이러한 물질 반응과정에 최종 결과인 순 생산(net production)은 해수와 공극수간의 농도 차이를 유발하여 퇴적물-해수 계면에서 교환되는 물질 플럭스(benthic flux)를 결정한다.

일반적인 저층플럭스(benthic flux) 추정 방법은 1) 공극수 농도의 수직분포에 1차 이류-확산 모델(1-D advection-diffusion model)을 적용하는 것과(Berner, 1980), 2) 퇴적물을 일정시간 동안 배양시켜 시간 변화에 따른 농도 변화 기울기로 계산하는 방법이 있다(Aller *et al.*, 1996; Ståhl *et al.*, 2004). 그러나 이 두 방법은 현장 환경(*in-situ*)이 아닌 실험실에서 전처리와 분석이 이루어져 분석대상 시료에 물리·생물학적(압력, 온도, 호흡 등) 변화를 초래하여, 결과적으로 분석 결과에 인위적 영향(artifact)을 줄 수 있다. 따라서 실험실(ex-situ) 결과는 미생물의 생리활동과 순수 화학반응에 큰 영향을 줄 수 있는 한계성이 있어 "참 결과" 보다는 잠재적인 반응 혹은 잠재적 플럭스(potential reaction or potential flux)로 표현될 수 있다.

Benthic chamber는 해수-퇴적물 경계면을 지나는 저층 플럭스(benthic flux)를 추정 할 수 있는 현장(*in-situ*) 배양측정 장비이다. 장비의 기본 원리는 비교적 간단하다. 부피 및 면적을 알고 있는 용기를 퇴적물 표층에 설치한 후 일정시간 동안 배양시킨다. 배양시간동안 chamber내 물질의 농도 변화 기울기를 파악한 후 아래의 식에 적용하여 저층 플럭스를 추정한다.

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

식 1에서 $F_{chamber}$는 퇴적물/해수 계면을 통과하는 물질의 순플럭스(net flux)(mmol m^{-2} d^{-1}), dC/dt는 시간 증가에 따른 물질 농도 변화 기울기(mmol L^{-1} d^{-1}), V는 용기부피(m^3), A는 해저면에 설치한 용기의 면적(m^2) 이다.

개발 초기의 benthic chamber는 수동이었다. 즉, 잠수부가 chamber를 설치한 후 일정 시간 간격으로 시료 채집을 했거나, 긴 호스를 chamber와 연결하여 수면에서 시료 채집을 했다. 이런 운영방식은 수심이 얕은 해역에서만 가능했다. 그러나 몇 몇의 대형 연구프로젝트(GEOSECs, JGOFs)에서 저층플럭스(benthic flux)와 유기탄소 순환 연구의 중요성이 강조되면서 다기능 심해저용 장비가 개발되었다(Tengber *et al.*, 1995). 더욱이 최근에 연안 저층에서 유기탄소 순환이 전 지구적 탄소 순환과 수층의 환경변화에 매우 중요한 역할을 담당하고 있는 것이 밝혀지면서 다양한 형태와 기능을 갖는 chamber가 지속적으로 개발되고 있다(Morse *et al.*, 1999; Sommer *et al.*, 2008).

이 연구의 목적은 소형 선박에서 운영이 용이한 연안용 benthic chamber를 개발하는데 있다. 여러방법을 통해 Benthic chamber calibration을 수행했으며, 현장 적용 연구를 통해 개발기기의 유용성을 검증했다.

재료 및 방법

개발한 benthic chamber(NAFRI Belc*I*: National Fisheries Research and Development Institute Benthic lander: Benthic chamber version I)의 구성 모식도 및 현장실험사진을 Fig. 1과 2에 나타냈다.

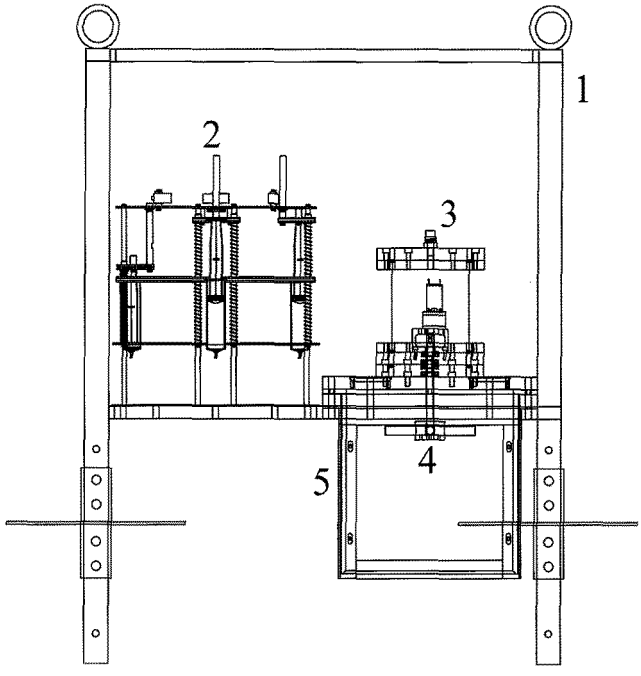

Fig. 1. The Belc*I* benthic chamber instrument for benthic boundary layer studies in coastal sea. The drawing shows 1) frame with disk feet, 2) automatic water sampler, 3) stirring motor casing on lid, 4) stirring device, and 5) opaque PVC chamber.

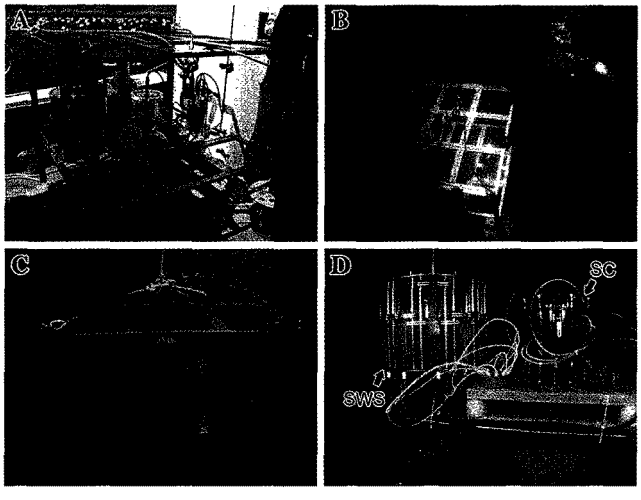

Fig. 2. Pictures of the Belc*I* instrument. The photographs show the sequence of Belc*I* deployment onto surface sediment: (A) The Belc*I* on board a small boat, (B) descending through the water column, (C) landing on the surface sediment, and (D) stirrer on the chamber lid (SC) and water sampler (SWS).

Belc*I*의 기본 구성 설계 및 제작

Belc*I* 프레임

프레임은 부식에 강한 스테인레스 강(SUS-304)으로 제작됐다. 프레임은 2단 구조로 설계 제작됐다. 각 단은 사각 셀(30 cm × 30 cm) 구조로, 하단은 향후 개발될 profiler, DET probe sampler 등

을 추가로 장착할 수 있도록 했다(Fig. 2A, B, C). 그리고 상단은 각종 관측 장비(CTD, 수중 카메라 등), 부이 및 회수 시스템 등을 (rader reflector, satellite antenna etc) 추가로 장착할 수 있도록 했다.

다리는 챔버 높이를 5 cm 간격으로 조절할 수 있게 하여 배양수의 부피를 조절할 수 있게 했다. 그리고 해저면에 설치 시 안전성 증대와 chamber 자체 무게에 의한 퇴적물 속으로 매몰을 막기 위해 금속 원형 디스크(ID 15 cm)를 부착시켰다.

주사기형 자동 해수채수기

챔버 내부의 해수를 시간별로 채수할 수 있는 주사기형 자동 채수기를 개발했다(Fig. 2C, D). 채수기 모양은 원형으로 부피를 최소화 했다. 채수기에는 용량 약 50 mL 일회용 주사기를 12개 장착할 수 있다. 1번 주사기는 챔버의 누수 확인, 챔버 내부 부피 추정, 퇴적물의 생물교란 영향(bio-irrigation)을 파악하기 위해 추적자 물질(Br^-, Cs^+등)을 주입한다. 그리고 2~12번 주사기는 chamber 내 해수를 시간별로 채집 한다.

간략히 채수기 작동을 설명하면, 채수기는 저 전력 소형 DC motor와 스프링으로 작동된다. 포터 커플러가 장착된 DC motor 회전축에 암(Arm)을 장착하여 설정된 시간에 주사기의 작동 트리거 위치로 회전 시킨다. 암은 주사기의 작동 트리거를 풀어 압축 또는 팽창되어 있던 스프링을 작동시켜 추적자 주입과 시료 채집을 한다.

DC motor 케이스는 투명 아크릴로 제작해 육안으로 내부 이상 여부를 쉽게 알 수 있도록 했고, 수압으로 외부 케이스가 파손되는 것을 막기 위해 압력 보정용 용액(Fluorinert FC-40(3M))을 넣을 수 있도록 했다.

BelcI chamber 몸체

Chamber재질은 몸체 자체의 산화 효과와 시료의 오염문제를 최소화하기 위해 고밀도 PVC(THK: 1 cm)로 만들었다. 모양은 육면체로 외부 크기는 가로 30 cm, 세로 30 cm, 높이 70 cm 이다. chamber 상부는 뚜껑을 쉽게 열고 닫히도록 했다. 챔버 몸체와 챔버 뚜껑 사이에는 고무막을 설치해 배양시 외부의 물과 완전히 차단하게 했다. 그리고 하단부는 챔버가 퇴적물 속으로 쉽게 들어갈 수 있도록 "edge"가공을 했다.

Chamber 뚜껑 및 교반기

뚜껑은 chamber 몸체와 같은 재질로 재작했다. 중앙에는 교반기를 설치했으며, 2개의 용존산소 센서(마이크로센서 1기, 마크로센서 1기)와 해수 채수 분배기를 장착했다. 시료의 오염영향을 막기 위해 시료 접촉부는 모두 폴리에틸렌 재질로 제작했다. 또한 연결부는 고무 O-ring으로 밀봉했다.

교반기는 감속기가 장착된 저전력 소형 DC모터로 작동된다. 교반기는 직경 5 cm, 두께 3 cm인 원판에 90° 간격으로 4개의 봉(ø: 1.5 cm, L: 8 cm)이 장착된 것으로 중앙에 모터 회전축이 연결된다(radial-flow impeller). 교반기의 회전 속도는 30 rpm이다. 투명 아크릴재질의 방수 케이스에 모터와 감속기가 설치되었고 회전축은 shaft seal로 방수처리했다. 또한 자동채수기의 모터케이스와 같이 압력 보정용 용액를 넣을 수 있도록 했다.

전자제어 장치

전자제어 장치는 자동 채수기와 교반기를 제어하며, 용존산소센서의 신호를 저장하는 자료수집(Data logger) 기능을 갖는다. 주요 구성은 Microcontroller, Real-time clock, 2개의 motor driver, pA meter, single-channel 16-bit AD converter, multi-channel 16-bit AD converter, SD memory card, RS-232 driver, 밧테리 등이다.

Microcontroller는 pA meter의 작동시간, 교반기의 교반 시작시간, 자동채수기의 채수시간 등을 설정할 수 있도록 프로그램 되었으며, real-time clock에 의해 정확한 시각에 motor driver을 작동시킨다. 한편, pA meter는 microsensor의 reference 전극에 -0.8V의 전압을 걸어주고, guard전극과 working전극으로 흐르는 수십~수백 pA 범위의 극 저전류를 증폭한다.

전자제어 회로 구성에 대해 간략히 설명하면, pA meter에서 증폭된 전류는 1초 간격으로 single-channel 16-bit AD converter로 디지탈화 한 후 SD memory card에 기록된다. 자료전송 시 노이즈를 최소화하도록 isolator IC를 사용하여 pA meter와 microcontroller 사이를 전기적으로 분리하였다.

교반기용 motor driver는 교반기를 회전시키는 것으로 수중에서 pA meter 다음으로 작동되며 채수를 마칠 때까지 작동 된다. 채수기의 motor driver 는 30° 각도 마다 감지되는 센서 신호에 의하여 제어되어 스프링으로 장전된 주사기를 트리거 시킨다.

Microcontroller에 직접 연결되어 있는 multi-channel 16-bit AD converter는 마크로 용존산소센서 및 수온센서의 신호들을 측정하여 SD memory card에 기록한다. 마크로 용존산소 센서 신호는 매 초 간격으로 isolator IC에서 전송되어 오는 마이크로센서자료와 동기되며, 별도의 수온센서 자료는 매 분 마다 SD memory card에 기록하도록 제작되었다. SD memory card(memory size: 256 MB, 512 MB)에 저장된 자료는 컴퓨터의 USB Reader기를 이용하여 추출할 수 있다. 또한 RS-232 통신을 통해 직접 컴퓨터로 자료를 전송 받을 수 있다.

제어장치의 작동 시간, sensor calibration, 자료추출, 센서 테스트를 위해 별도의 GUI 기반의 제어 설정 PC용 프로그램이 Visual Basic(Microsoft, Ver. 6)으로 작성되었다.

전원은 제어 모듈별로(microcontroller, 교반기, pA meter) 독립적인 전원을 사용한다. Microcontroller의 주 전원은 D-cell 알칼라인 건전지 6개를 팩으로 조합하여 사용되며, 자동 채수기 모터의 전원을 겸한다. 이 밧테리팩의 용량은 약 8 AH이며, 전자제어 장치의 소비전력이 매우 적으므로 1개의 밧테리팩으로 6회 이상 챔버를 설치하여 채수할 수 있다. 교반기용 전원으로는 D-cell 알칼라인 건전지 7개를 팩으로 만들어 사용한다. 교반기 모터는 소비전력이 커 1개의 팩으로 약 24시간 정도 연속 사용이 가능하다. pA meter용 전원으로는 카메라용 소형 2CR5 리튬전지를 사용하며, 사용가능 시간은 약 60시간이다.

BelcI의 calibration

가시화분석

Chamber내의 유체유동 특성과 혼합 속도는 입자영상속도법(Particle Image Velocimetry, PIV)으로 측정했다. PIV 실험구성을 Fig. 3 및 Table 1에 나타냈다. 간략히 설명하면, chamber와 동일한 규격의 투명 수조 안에 물을 채운 후 은으로 코팅된 유리 구슬

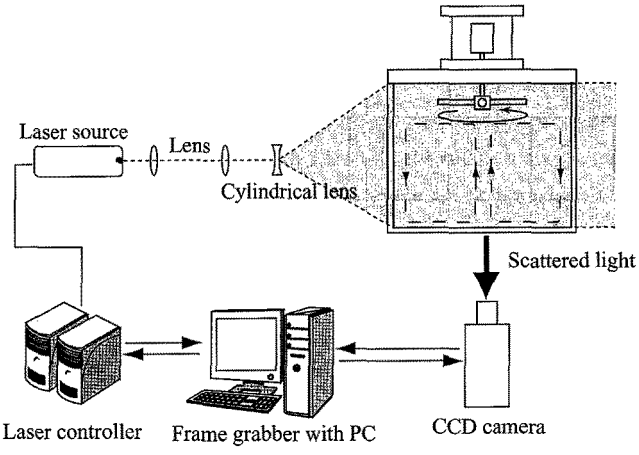

Fig. 3. Schematic diagram of the PIV velocity field measurement system.

(Potters Industries Inc., I.D.: 44 μm)을 약 2 g 넣었다. 교반기를 작동시킨 후 Nd:YAG laser 광을 구형 렌즈와 실린더 렌즈로 평면광을 만들어 수조 단면에 조사했다. 이후 입자의 반사광을 100 μs의 시차를 두고 두 장의 사진을 연속 촬영했다. 이런 촬영을 4 ms 간격으로 50회 반복 촬영했으며, 각 쌍의 영상자료는 화상해석 소프트웨어(Visual PIV, Inteck Systems Inc.)로 분석하여 chamber 내부의 유속장 벡터와 평균 유속을 추출했다. 이와 별도로 교반시 입자의 이동을 비디오 카메라(Sony, TR-10)로 촬영하여 혼합 속도를 측정했다. 동영상 자료는 Matlab(ver. 7., MathWorks)을 이용하여 프레임별로 추출한 후 교반을 시작한 이후 입자가 완전히 혼합될 때까지의 시간을 측정했다.

확산경계층 두께 추정

석고판 용해속도를 이용하여 확산경계층(Diffusivity boundary layer: DBL) 두께를 추정했다(Santschi *et al.*, 1983, 1991; Tengberg *et al.*, 2005). 실험을 위해 조소용 석고가루로 약 5 mm 두께의 석고 원판을 제작했다. 응고된 석고판은 건조기(온도 60 ℃)에서 3일 동안 건조했다. Polyurethane paint로 석고판의 옆면과 바닥면을 칠해 용해 실험 시 윗면만 물에 접촉하도록 했다. 무게를 측정한 석고판을 수조 바닥면에 부착하고 수조에 증류수를 채웠다. 교반장치가 장착된 chamber 뚜껑을 닫고 실내온도를 20 ℃로 유지하는 항온 항습실에서 교반을 하면서 약 8시간 동안 용해 실험을 실시했다. 용해실험 동안 약 1시간 간격으로 주사기로 25 ml의 시료를 채집하였으며, 채집된 양만큼 증류수를 보충해 주었다. 시료는 주사기 여과지(ADVANTEC, pore size: 0.45 μm)로 여과한 후 원자흡광광도계(Varian, SpectraAA 55)로 Ca^{2+} 농도를 측정했다. 한편, 용해실험이 끝난 석고판은 상온에서 완전 건조시켜 무게를 측정했다.

수조에서 석고판의 용해 플럭스는 질량감소로 정량화 할 수 있다(식 2). 계산된 Ca^{2+}의 용해 플럭스(F), 용존 Ca^{2+}의 분자확산계수와 포화농도를 아래의 식 (3)에 적용하여 확산경계층의 두께를 추정했다.

$$F = \frac{(\text{alabaster plate weight loss[g]} \times 0.2328)}{(\text{surface area of alabaster plate [cm}^2\text{]}) \times (\text{time exposed to dissolutions[s]})} \quad (2)$$

$$Z = \frac{D_{Ca^{2+}} \times [Ca^{2+}]_{sat}}{F} \quad (3)$$

식 2에서 F는 chamber 내에서 Ca^{2+} 이온의 flux(g cm^{-2} s^{-1}), 상수 0.2328은 순수 $CaCO_3$에서 Ca^{2+}의 함유량이며, 식 3에서 Z는 확산경계층의 두께(μm), $D_{Ca^{2+}}$는 실험온도(20 ℃)에서 Ca^{2+}의 분자확산계수(10^{-5} cm^2 s^{-1}), $[Ca^{2+}]_{sat}$는 Ca^{2+}의 포화농도이다(g cm^{-3}).

플럭스는 1) 석고판의 용해 실험 전후 무게차와 2) 시간경과에 따른 Ca^{2+} 농도의 증가 기울기로 추정했다. 식 (3)에 대입하여 확산 경계층의 두께를 계산했다. 식 (2)에 사용된 Ca^{2+}의 포화농도 및 분자확산계수는 실험온도에 보정된 값을 이용했다(Tengberg personal communication).

Belcl의 현장 실험

On-board incubation chamber 제작 및 산소소모율 측정

Benthic chamber의 산소소모율 결과를 비교하기 위해 현장 및 실험실에서 쉽게 사용할 수 있는 배양 chamber를 제작했다. 배양챔버 장치는 Fig. 3과 같이 1) 산소센서, 2) 해수 배출/주입 밸브, 3) 몸체와 방수 뚜껑, 4) 센서 보호 캡, 5) 교반용 물 순환 장치로 구성된다. 이 장치의 산소소모율 측정원리는 Benthic chamber와 동일하다. 즉, 빛을 차단한 상태에서 배양 chamber안에 용존산소 유입이 없다고 가정하면, 용존 산소 소모는 퇴적물 표층에서 미생물 및 저서동물의 호흡과 퇴적물/해수 계면을 통과하는 환원물질의 재산화에 의한 것이다. 따라서 시간증가에 따른 초기의 용존산소 감소기울기($dO_2/dt|_{t=0}$)는 퇴적물 산소소모율을 의미한다(식 1).

시료 채집은 scuba diver가 했다. 원통 몸체를 퇴적물 속으로 조심스럽게 밀어 넣은 후 밑 뚜껑과 윗 뚜껑을 닫았다. 수중에서 포

Table 1. Experimental condition of the PIV system

Articles	Item	Specification
Visualization equipment	Image board	Epix PIXCI D/D2X (2×2k pixel)
	Light source	300 mJ, Nd:YAG Laser
	Light sheet	Cylinderical Lens (width: 3 mm)
Measuring condition	Working fluid	Water
	Particle	Silver coated glass sphere (44 μm)
	Input device	Kodak ES-40, (2×2k pixel)
Image processing	Host computer	CPU speed: 2 GHz
	Number of time mean data	100 Frames
	Identification	Two-frame gray-level cross correlation algorith

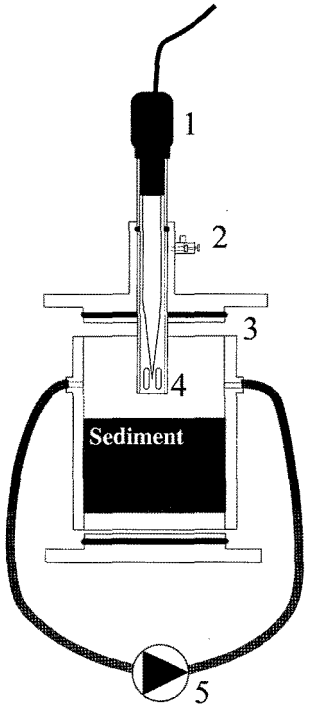

Fig. 4. Schematic diagram of the on-board incubation chamber for measuring sediment oxygen consumption rate. The chamber contains 1) oxygen microsensor, 2) inlet and/or outlet valve, 3) core and watertight lids, 4) sensor protector, and 5) water circulation pump.

장용 테이프를 이용하여 배양 챔버의 구멍들을 모두 밀봉하여 이동 시에 표층 퇴적물의 교란을 최소화 했다. 선상에서 시료의 급격한 온도 상승을 막기 위해 현장 해수를 순환 시키는 수조에 넣어 측정시까지 보관했다.

배양 챔버 내에 용존산소 농도 측정은 주사기 바늘형(needle type) 마이크로센서(Unisense, OX-N)를 이용했다. 센서에서 출력되는 미세전류는 picoammeter(Unisense, PA-2000)로 증폭했다. 증폭된 신호는 A/D변환기를 거쳐 휴대용 컴퓨터에 10초 간격으로 저장했다. Data acquisition 프로그램은 LabVIEW(National Instrument, Ver 8.5)로 작성했다(이 등, 2007). 배양 챔버 속의 물 교반은 소형 물 펌프(flow rate: < 50 mL min^{-1})로 했다. 산소센서의 calibration은 현장 저층 해수를 공기와 질소가스로 완전히 포화시켜 산소포화농도 및 무산소 농도 신호로 이용했다. 산소포화농도는 현장 염분 및 수온으로 계산했다(García and Gordon, 1992).

영양염 분석

Benthic chamber에서 30분 간격으로 채수된 시료는 회수 즉시 주사기 박막 여과지(ADVANTEC, pore size: 0.45 μm)로 여과했다. 여과된 시료는 분석 전까지 -20 °C에서 냉동 보관했다. 실험실에서 용존 무기 영양염(암모니움, 아질산질소, 질산질소, 인산인, 규산규소)은 분광광도계(Varian, CARY 100)를 이용하여 비색법으로 측정했다(해양수산부, 2005).

Benthic chamber 설치 및 회수

2009년 5월 12일에 진해만 중부 가조도 주변해역에서(수심 23 m) 현장실험을 실시했다. 선상에서 chamber의 작동 시작시간, 자동 채수기의 채수 간격 시간 등을 chamber controller에 입력했다. 특히, 작동 시작시간을 설치 후 2시간 이후에 수행하도록 설정하여 chamber설치 시 교란 영향을 최소화 했다. 또한 chamber의 뚜껑을 열어 놓아 배양용기 내부 물과 외부 저층수가 교환되도록 했다. 챔버가 작동되기 전 약 2-3분 사이에 chamber 뚜껑을 닫았다. 그리고 30분 간격으로 시료를 채취했다. 장비의 설치확인, 자동 채수기의 작동여부의 확인, chamber의 회수 등은 scuba diver가 했다 (Fig. 2B).

결과 및 토의

연구목적에 따라 제작된 chamber는 형태, 규격, 교반기 종류에 따라 chamber 내부에 와류(vortex)와 바닥면에 압력경사(pressure gradient)가 생긴다. 바닥면 주변에 발생하는 빠른 유속은 큰 bottom shear stress(τ)를 일으켜 확산경계층 두께를 감소시킨다(Jørgensen and Des Marais, 1990). 이런 인위적인 결과는 저층 플럭스에 영향을 줄 수 있어 chamber개발 시 반드시 고려해야 할 부분이다 (Oldham *et al.*, 2004).

일반적으로 chamber내 물의 혼합은 펌프 또는 수직수평으로 회전하는 교반기를 사용한다. 펌프 교반기의 장점은 빠른 혼합속도, 바닥면에 균일한 유속, 비교적 균일한 확산경계층의 형성 등이다. 그러나 펌프는 상대적으로 많은 전력을 소모함으로 용량이 큰 전원이 요구된다. 한편, 수직 교반기는 수평 교반기 보다 안정된 압력분포를 조성한다. 그러나 chamber 구조가 복잡해 질 수 있다 (Tenberg *et al.*, 2005). 이러한 이유로 수평교반기 형태가 많이 이용되고 있다.

수평 교반기는 교반기 형태에 따라 chamber 내부 물의 유동특성이 달라진다. 즉, 회전날(blade)이 장착된 교반기(axial-flow impeller)는 물을 아래로 밀어주어 chamber 중앙부에서 높은 압력을 일으키는 반면, 봉 또는 원형 판으로 만들어진 교반기는(radial-flow impeller) 물을 옆으로 밀어주어 chamber 옆벽면에 높은 압력이 작용한다. 이에 따라 chamber 내부의 물 유동도 서로 다르게 나타난다. Axial-flow impeller가 장착된 chamber의 물은 중앙부에서 바닥면으로 이동한 후 벽면을 따라 이동하는 유체 유동 특성을 갖는 반면, radial-flow impeller는 반대의 물 순환 특성을 갖는다(Oldham *et al.*, 2004). BelcI은 전력소모가 적고, 구조가 간단한 연안용 benthic chamber이다. 따라서 위의 장단점을 고려하여 radial-flow impeller 방식의 교반기를 채택했다.

가시화 분석결과

PIV 분석 결과를 Fig. 5에 나타냈다. 그림에서 화살표의 방향은 유속장의 벡터, 화살표의 길이와 색은 평균 유속을 의미한다. PIV로 관찰한 BelcI 내부의 물 유동은 크게 4개 지역으로 나뉘어졌다. 교반기 끝 부분에는 소형돌이(vortex)와 강한 유속이 발생했고 교반기가 회전하는 높이의 chamber 벽면에 빠른 유속 나타났다. 이는 교반기가 물을 수평방향으로 밀어줌으로 부분적으로 물이 압축되어 생긴 현상이라 생각된다. 또한 교반기 중앙에 유동이 비교적 작은 지역이 존재했다. 이 지역은 교반 봉을 연결하는 원형 디스크가 있는 부분이다. 한편 중앙을 중심으로 좌-우에 물이 순환

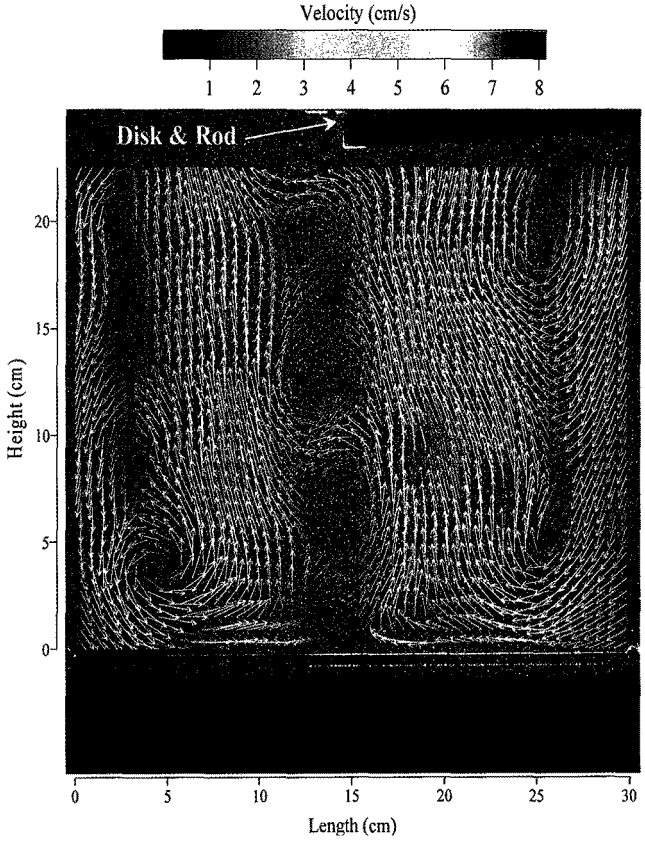

Fig. 5. 2-D velocity vector in Belc*I*.

하는 셀이 나타나 radial-flow impeller의 특성을 잘 나타냈다. Chamber 내부 물의 평균 유속은 4.5 cm s^{-1}였으며, 챔버 하단부 양쪽 모서리 부분에서 상대적으로 느렸다. 반면, 좌-우로 물이 회전하는 셀 안쪽부분에 비교적 빠른 유속을 보였다. 챔버 내부의 유속 범위는 1.0~9.2 cm s^{-1}였다. 그리고 바닥면 주변에서 평균 유속은 4.4 cm s^{-1}였으며, 범위는 2.0~7.8 cm s^{-1} 였다.

확산경계층 두께(DBL thickness)

석고판 용해에 의한 무게 차이로 얻어진 확산경계층의 두께(DBL thickness)는 125-288 μm(평균: 181 μm, n=3)였다. 한편, Ca^{2+} 용해 플럭스를 이용하여 계산한 결과는 232 μm였다(Fig. 6). 실험에 사용한 석고판 중 하나는 실험도중에 모서리 부분이 떨어져 나가 계산에서 제외시켰다. 서로 다른 두 가지(석고판의 무게 차 및 Ca^{2+} 용해 플럭스) 방법으로 얻어진 DBL 두께는 기존에 개발된 여러 종류의 chamber 실험에서 얻어진 값 범위에 속했다(Tenberg *et al.*, 2005). 그러나 각 석고판 용해는 상대적으로 큰 차이가 있었다. 이는 Belc*I*의 유체유동의 특성과 용해 실험시 석고판의 설치 위치에 따라 생긴 현상이라 생각된다. 즉, 물리적 힘을 상대적으로 강하게 받는 곳의 석고판은 더 많이 용해될 수 있다(Tenberg *et al.*, 2005).

우리가 측정한 결과를 검증하기 위해 shear velocity(u*)와 DBL thickness의 관계식을 이용했다(Tenberg *et al.*, 2004). Shear velocity는 PIV로 측정한 수직 유속분포를 아래 (식 4)에 적용해서 계산했다(Boudreau and Jørgensen, 2001).

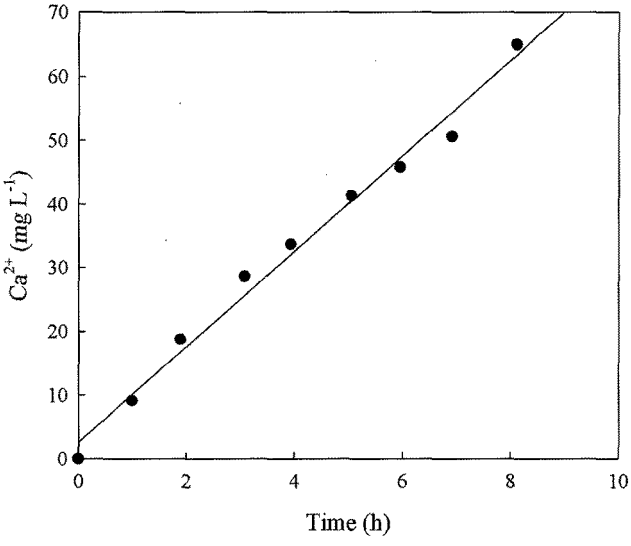

Fig. 6. Calcium concentration increase with time in the Belc*I* chamber water during alabaster plate dissolution experiment. Solid line represents a linear best-fit.

$$\frac{u}{u^*} = \frac{1}{\kappa}\ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (4)$$

여기서 u는 수직분포의 유속(cm s^{-1}), u^*는 shear velocity(cm s^{-1}), κ는 von Karman 상수(0.41), z는 바닥 면에서 거리(cm) 이다. 바닥 면 주변에 유속(u)과 바닥 면부터 거리(z)의 자연로그를 최소자승법을 이용하여 기울기(u^*)를 추정한 후 shear velocity(u*)를 계산했다. 계산된 shear velocity(u^*)는 아래의 관계식(r^2 = 0.97)에 적용하여 DBL을 계산했다(Tengberg *et al.*, 2004).

$$DBL = 76.17 \times (u^*)^{-0.933} \quad (5)$$

수직 유속 분포로 계산된 평균 shear velocity는 0.32 cm s^{-1}(n=40)였으며, 계산된 DBL thickness는 223 μm로 Ca^{2+} 용해플럭스로 추정한 결과와 유사했다.

Benthic chamber의 총 산소소모율(TOU)과 선상 배양 결과 비교

Fig. 7과 8에 현장(in-situ)과 선상(on-board)에서 측정한 용존산소 소모 결과를 나타냈다. Benthic chamber내 용존산소의 초기농도는 172 μmol L^{-1}(산소포화도: 약 65%)였으며, 점차 감소했다. 한편, on-board dark incubation chamber에 초기 용존산소 농도는 약 220 μmol L^{-1}(산소 포화도: 83%)였고, 현장 측정 결과와 같이 시간에 따라 감소했다.

현장 및 선상 배양 실험결과로 계산된 산소소모율 결과를 Table 2에 나타냈다. 현장 배양을 통해 얻어진 산소소모율은 약 83 mmol m^{-2} d^{-1} 였다. 한편, 선상에서 동시에 측정한 2개 시료의 산소소모율은 각각 27과 32 mmol m^{-2} d^{-1}로 기존의 하계 진해만 중부에서 산소미세전극으로 측정한 결과(35 mmol m^{-2} d^{-1})와 유사했다(Lee *et al.*, 2009). 그러나 선상배양의 산소소모율은 현장 측정 결과 보다 약 2배 이상 낮은 수치였다.

표층 퇴적물의 산소소모율은 여러 요인에 영향을 받을 수 있다. 특히, 저층 해수의 용존산소 농도와 수온 영향이 큰 것으로 알려져

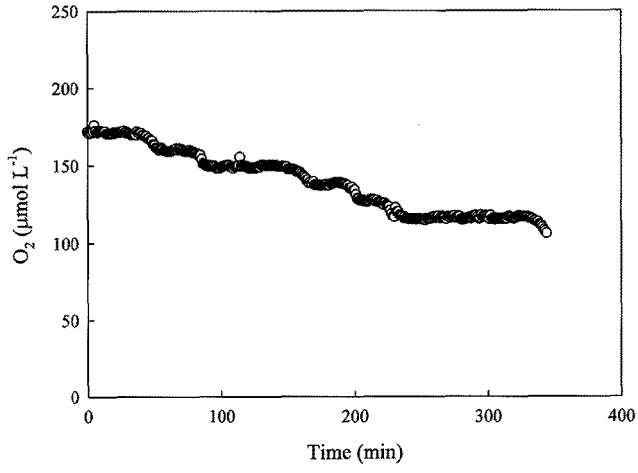

Fig. 7. Variation of oxygen concentration with time in the Belc*I* chamber during 6 h incubation. Oxygen concentrations were measured at 1-min time intervals.

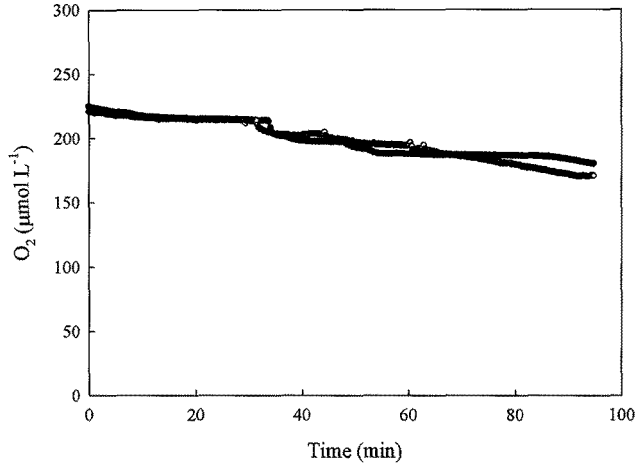

Fig. 8. Results of oxygen decrease over time in on-board incubation chamber.

Table 2. Results of sediment oxygen consumption rates and organic carbon oxidation rates measured by on-board and in-situ incubation

Methods	O_2 consumption	C_{org} oxidation rate
	(mmol m^{-2} d^{-1})	(g C m^{-2} d^{-1})
On-board incubation #1	31.8	0.29
On-board incubation #2	27.4	0.25
In-situ incubation	83.4	0.77

있다(Cai *et al.*, 1996, Thamdrup *et al.*, 1998). 이 연구에서 선상 배양 실험의 경우 배양수의 용존산소 농도를 현장 저층수의 용존산소 농도로 유지할 수 없어 두 방법간의 직접적인 비교는 불가능하다. 단, 현장 저층수의 용존산소 농도가 배양수보다 현저히 낮았고, 배양기간 동안 온도가 증가했을 가능성 등을 고려한다면 선상배양으로 얻어진 산소소모율은 benthic chamber 결과보다 높을 것으로 예상된다. 하지만 결과는 반대였다.

선상배양 실험에서 산소소모가 과소평가된 이유는 저서동물의 호흡(respiration) 및 활동(bio-irrigation)의 영향 등으로 소비되는 산소소모가(fauna mediated oxygen uptake: FOU) 반영되지 않아서 생긴 결과로 설명할 수 있다. Glud *et al.*(2003)은 Aarhus 만에서 *in-situ* benthic lander(chamber, microprofiler)를 이용하여 총 산소소모율(total oxygen utilization: TOU), 확산성 산소소모율(diffusivity oxygen utilization: DOU)을 구분해서 측정했고, 두 값의 차이를 FOU(FOU = TOU - DOU)라 했다. 한편, 실험실에서 코아 배양과 미세전극을 이용하여 산소소모율을 측정하였고, 현장 측정 결과(*in-situ* vs. *ex-situ*)와 비교했다.

비교 결과 현장에서 benthic chamber로 측정한 총 산소소모율(TOU)은 실험실의 코아 배양 실험 결과보다 약 2배 정도 높게 추정되었다. 실험실 배양의 과소평가 문제를 1) 선택적인 코아 채집과 2) 코아 채집시 저서 동물의 burrow 파괴, 3) 대형저서동물의 생리활동 변화에 따른 것으로 설명하고 있다(Glud *et al.*, 2003). 즉, 교란되지 않은 시료를 쉽게 채집하기 위해 대형저서동물이 없는 퇴적물을 선택적으로 채집한 퇴적물의 산소소모율은 benthic chamber 결과보다 낮을 수 밖에 없다. 또한 채집 과정에서 생기는 물리적 교란은 저서동물의 활동(호흡, 펌핑)을 저하시키기 때문에 결과적으로 산소소모율의 과소평가를 유도할 수 있다.

위 연구 결과는 퇴적물 산소소모율 추정에서 저서동물 영향의 중요성을 제시한 연구결과인 동시에 benthic chamber의 유용성을 보여준 하나의 예이다. 또한 고전적인 실험실 배양 실험 결과 중 반응 프로세스(reaction rate) 또는 플럭스 추정(flux estimation) 결과가 퇴적물의 여러 복잡한 요인들에 의해 과대 또는 과소 평가될 수 있는 가능성을 제시한 것이다.

진해만은 대표적인 부영양화된 해역이다. 저서동물의 출현 개체수 밀도가 타해역에 비해 2배 이상 크다(정 등, 2001). 따라서 현장에서 benthic chamber로 측정한 높은 산소소모율은 저서동물의 영향에서 생기는 결과로 추정될 수 있으며, 기존에 보고된 한국 남해 연안의 표층 퇴적물에서 추정한 유기탄소 산화율이 과소평가 되었을 가능성을 제시 한다(이 등, 2003).

영양염의 저층 플럭스

30분 간격으로 5시간 동안 채수 되어 분석된 영양염 농도 변화를 Fig. 9에 나타냈다. 산화형태의 용존 무기질소(NO_2^- + NO_3^- 이하 "nitrate"이라 함) 농도는 1.17 μmol L^{-1}에서 1.29 μmol L^{-1}로 증가했다. 비교적 짧은 배양시간이라 질산염의 농도 변화는 뚜렷한 변화추이를 보이지 않았다. 농도증가 기울기로 얻어진 nitrate의 저층 플럭스는 0.18 ± 0.07 mmol m^{-2} d^{-1}(n = 11, r^2 = 0.49, P<0.001)였다. 용존 암모니움(NH_4^+)은 초기농도(t=0)가 4.18 μmol L^{-1}였으며, 배양 시간 동안 약 1.5배로 증가했다. 저층플럭스는 2.3 ± 0.5 mmol m^{-2} d^{-1}(n = 11, r^2 = 0.57, P<0.001)로 추정되었다. 한편, 용존 인산인의 농도범위는 0.80-0.89 μmol L^{-1}였으며, 저층 플럭스는 0.09 ± 0.02 mmol m^{-2} d^{-1} 였다(n=11, r^2 = 0.71, P<0.001). 또한 용존 규소 역시 시간에 따라 점차 증가하는 경향을 보였으며, 농도 범위는 38.6-56.3 μmol L^{-1}로 플럭스는 23 ± 1 mmol m^{-2} d^{-1} (n= 11, r^2 = 0.98, P<0.001)로 추정되었다. 이 연구결과에서 얻어진 진해만 퇴적물/해수 경계면에서 영양염의 플럭스는 기존에 보고된 연안 및 대륙붕 결과의 범위에 속했다 (Table 3).

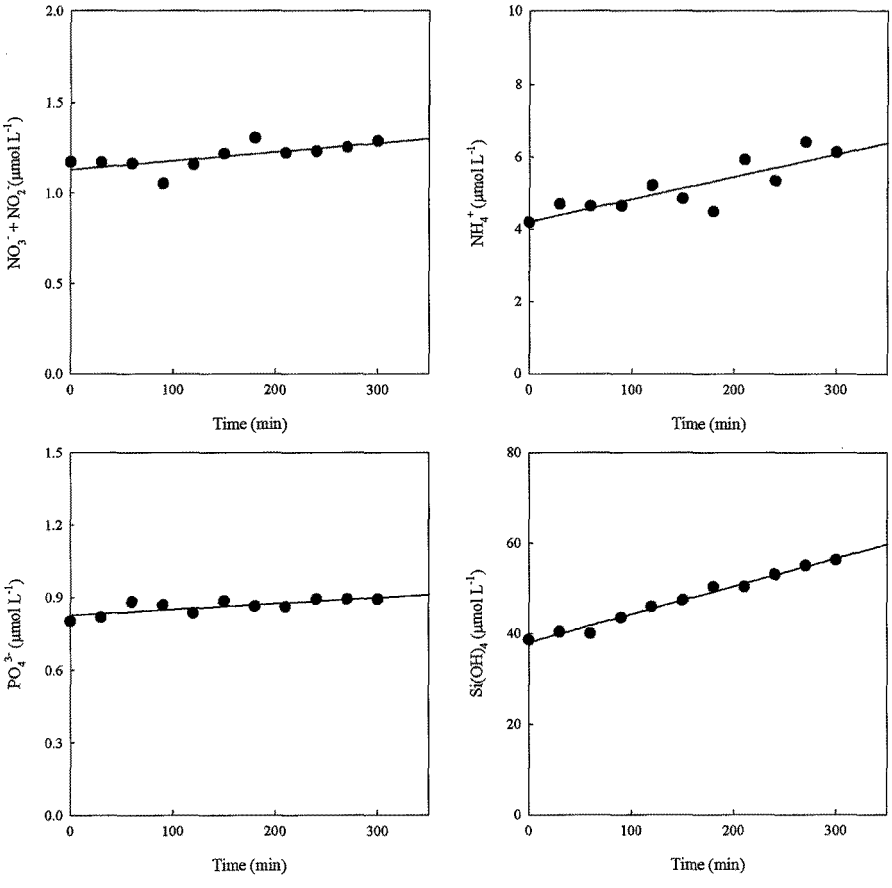

Fig. 9. Nutrients concentrations over time measured in situ using the Belc*I*. Solid lines represent a linear best-fit regression.

Table 3. Summary of benthic nutrients fluxes in coastal sea and continental shelves

Location	Ammonium	Phosphate	Silicate	Methods	References
	(mmol m^{-2} d^{-1})				
Jinhae Bay	2.3	0.09	23	B.C.*	This study
Washington shelf	0-1.5	0-0.09	4-20	B.C.*	Archer and Devol (1992) Devol and Christensen (1993) Christensen *et al.* (1984)
Amazon shelf	0-1.5	0-0.09	1.3	C.I.**	Aller *et al.* (1991) Aller *et al.* (1996)
San Pedro shelf	3	0.61	3.1	B.C.*	Berelson *et al.* (2002)
Monterey Bay	0.5	0.08	6.5	B.C.*	Berelson *et al.* (2003)

*B.C: Benthic chamber
**C.I.: Core incubation

결 론

이 연구에서 개발한 Belc*I*의 특성실험 결과는 기존에 개발되어 운영되고 있는 외국의 benthic chamber와 유사한 기능을 보였다.

Chamber 내부에서 물 유동은 교반기의 구조에 따라 전형적인 radial-flow impeller 특징을 나타냈다. Chamber내부 물의 혼합시간은 약 30초였으며, 석고판의 용해실험과 Ca^{2+} 플럭스로 추정한 확산경계층 두께는 약 180~230 μm였다. 한편, 진해만에서 현장 배양으로 얻어진 퇴적물의 산소소모율 결과는 과거 이 등(2003)이 남해연안 퇴적물에서 얻어진 결과 보다 2~3배 이상 높았으며, 저층 영양염 플럭스는 외국의 연안 및 대륙붕 퇴적물의 연구결과와 유사했다.

Belc*I*는 저 전력소모 장치로 구성되어 외부의 전원 공급 장치가 없다. 따라서 기기의 소형화가 가능하여 소형선박에서 운영이 가능하다. 또한 2단 셀 구조로 여분의 공간에 chamber 1기를 추가 장착할 수 있다. 이로서 퇴적물 표면에서 명-암 배양(light-dark benthic chamber)이 가능하여 투광대 지역의 저서미세조류의 환경적 기능 등을 연구할 수 있을 것으로 판단된다(Rasheed *et al.*, 2004). 한편, 최근에 개발되고 있는 eddy-correlation 분석기법(Berg *et al.*, 2003, 2007, Crusius *et al.*, 2008)등과 같이 운영된다면 benthic boundary layer에서 보다 많은 정보를 얻을 수 있을 것으로 생각한다.

이 연구의 최종목적은 능동형 benthic lander(autonomous in-situ benthic lander)를 개발하는데 있다. 목적 달성 위해 chamber 뚜껑의 자동 개폐장치와 weight release system, microprofiler, DET probe sampler 등이 개발되고 있다. 향후 축적된 기술은 심해저 연구용 benthic lander개발에 기반이 될 것으로 판단한다.

사 사

이 논문을 세밀하게 심사해주신 부산대학교 안순모 교수님과 해양연구원 강동진 박사님께 진심으로 감사드립니다. 이 연구는 국립수산과학원 경상과제인 "현장측정장비개발-연안용 benthic lander 개발 및 현장적용연구(RP-2009-ME-041)"의 연구 결과 중 하나입니다. 현장 조사와 시료 분석에 도움을 준 손미애, 손미영 연구원께 감사드립니다. 특히, benthic chamber calibration 실험에 조언을 준 Tengberg 박사님, 설치 및 수중 촬영을 담당했던 오션테크 박진호 사장님 및 직원 여러분의 도움이 컸습니다. 아울러 이 과제에 많은 관심과 도움을 주신 권정로 박사님, 박종수 박사님, 조수진 선생님께 감사의 글을 올립니다.

참고문헌

이재성, 김기현, 유준, 정래홍, 고태승, 2003. 산소 미세전극을 이용한 남해연안 퇴적물/해수 계면에서 산소소모율 및 유기탄소 산화율 추정. 한국해양학회지-바다, **8**: 392–400.

이재성, 박미옥, 안순모, 김성길, 김성수, 정래홍, 박종수, 진현국, 2007. 낙동강 하구 갯벌 사질퇴적물에서 생지화학적 유기탄소 순환. 한국해양학회지-바다, **12**: 349–358.

정래홍, 임현식, 김성수, 박종수, 전경암, 이영식, 이재성, 김귀영, 고우진, 2001. 남해안 가두리 양식장 밀집해역의 대형저서동물 군집에 대한 연구. 한국해양학회지-바다, **7**: 235–246.

해양수산부, 2005. 해양환경공정시험방법. 400pp.

Aller, R.C., J.Y. Aller, N.E. Blair, J.E. Mackin, P.D. Rude, I. Stupakoff, S. Patchineelam, S.E. Boehme and B. Knoppers, 1991. Biogeochemical processes in amazon shelf sediments. Oceanography, **4**: 27–32.

Aller, R.C., N.E. Blair, Q. Xia and P.D. Rude, 1996. Remineralization rates, recycling, and storage of carbon in Amazon shelf sediments. Continental Shelf Research, **16**: 753–786.

Archer, D. and A. Devol, 1992. Benthic oxygen fluxes on the Washington shelf and slope: a comparison of in situ microelectrode and chamber flux measurements. Limnol. Oceanogr., **37**: 614–629.

Berelson, W., J. McManus, K. Coale, K. Johson, D. Burdige, T. Kilgore, D. Colodner, F. Chavez, R. Kudela and J. Boucher, 2003. A time series of benthic flux measurements from Monterey Bay, CA. Continental Shelf Research, **23**: 457–481.

Berelson, W., K. Johnson, K, Coale and H.-C, Li, 2002. Organic matter diagenesis in the sediments of the San Pedro shelf along a transect affected by sewage effluent. Continental Shelf Research, **22**: 1101–1115.

Berg, P., H. Røy, F. Janssen, V. Meyer, B.B. Jørgensen, M. Huettel and D. de. Beer, 2003. Oxygen uptake by aquatic sediments measured with a novel non-invasive eddy-correlation technique. Mar. Ecol. Prog. Ser., **261**: 75–83.

Berg, P., H. Røy and P.L. Wiberg, 2007. Eddy correlation flux measurements: the sediment surface area that contributes to the flux. Limnol. Oceanogr., **52**(4): 1672–1684.

Berner R.A., 1980. Early diagenesis: A Theoretical Approach. Princeton Univ. Press, Princeton, N.J., 241p.

Boudreau B.P. and B.B. Jørgensen, 2001. The Benthic Boundary Layer: Transport Processes and Biogeochemistry, Oxford, New York, pp. 4–43.

Cai W.-J. and F.L. Sayles. 1996. Oxygen penetration depths and fluxes in marine sediments. Mar. Chem., **52**: 123–131.

Canfield D.E., B Thamdrup and E. Kristensen, 2006. Aquatic Geomicrobiology, Elsevier Academic Press, San Diego, pp. 640.

Chester R., 1990. Marine Geochemistry, Unwin Hyman Ltd., London, pp. 422–437.

Christensen, J.P., A.H. Devol and W.M. Smethie, 1984. Biological enhancement of solute exchange between sediments and bottom water on the Washington continental shelf. Continental Shelf Research **3**: 9–23.

Cruisius J., P. Berg, D.J. Koopmans and L. Erban, 2008. Eddy correlation measurement of submarine discharge. Mar. Chem., **109**: 77–85.

Devol, A.H. and J.P. Christensen, 1993. Benthic fluxes andnitrogen cycling in sediments of the continental margin of the eastern N. Pacific. J. Mar. Res., **51**: 345–372.

García H.E. and L.I. Gordon, 1992. Oxygen solubility in seawater: Better fitting equations. Limnol. Oceanogr., **37**: 1307–1312.

Glud, R.N., J.K. Gundersen, R. Hans and B.B. Jørgensen, 2003. Seasonal dynamics of benthic O_2 uptake in a semienclosed bay: Importance of diffusion and faunal activity. Limnol. Oceanogr., **48**(3): 1265–1276.

Jørgensen, B.B. and J. Des Marais, 1990. The diffusive boundary layer of sediments: Oxygen microgradients over a microbial mat. Limnol. Oceanogr., **35**: 1343–1355.

Lee, J.S., S. Kim, S-S, Kim, S. An and Y.-T. Kim, 2009. Sediment Oxygen Consumption in Semi-Closed Korean Coastal Bays during Summer. Ocean Sci. J., **44**(3): 161–171.

Morse, J.W., G. Boland and G.T. Rowe, 1999. A 'gilled' benthic chamber for extended measurement of sediment-water fluxes. Mar. Chem., **66**: 225–230.

Oldham, C.E., G.N. Ivey and C. Pullin, 2004. Estimation of a characteristic friction velocity in stirred benthic chambers. Mar. Ecol. Prog. Ser., **279**: 291–295.

Rasheed M., C. Wild, U. Franke and M. Huettel, 2004. Benthic photosynthesis and oxygen consumption in permeable carbonate sediments at Heron Island, Great BarrierReef, Australia. Estuar. Coast. Shelf Sci., **59**: 139–150.

Santschi, P.H., R.F. Andersson, M.Q. Fleisher and W. Bowles, 1991. Measurements of diffusive sublayer thickness in the ocean by alabaster dissolution, and their implications for the measurements of benthic fluxes. J. Geophys. Res., **96**: 10641–10657.

Santschi, P.H., P. Bower, U.P. Nyffeler, A. Azevedo and W.S. Broecker, 1983. Estimates of the resistance to chemical transport posed by the deep-sea boundary layer. Limnol. Oceanogr., **28**: 899–912.

Sommer, S., M. Türk, S. Kriwanek and O. Pfannkuche, 2008. Gas

exchange system for extended in-situ benthic chamber flux measurements under controlled oxygen concentrations: First application Sea bed methan emission measurements at Captain Arutyunov mud volcano. Limnol. Oceanogr., Methods, **6**: 23–33.

Ståhl, H., A. Tengberg, J. Brunnegård, E. Bjørnbom, T.L. Forbes, A.B. Josefson, H.G. Kaberi, I. M. Karle Hassellöv, F. Olsgard, P. Roos and P.O.J. Hall. 2004. Factors influencing organic carbon recycling and burial in Skagerrak sediments. J. Mar. Res., **62**: 867–907.

Tengberg, A., F. de, Bovee, P. Hall, W. Berelson, D. Chadwick, G. Ciceri, P. Crassous, A. Devol, S. Emerson, J. Gage, R. Glud, F. Graziottini, J. Gundersen, D. Hammond, W. Helder, K. Hinga, O. Holby, R. Jahnke, A. Khripounoff, S. Lieberman, V. Nuppenau, O. Pfannkuche, C. Reimer, G. Rowe, A. Sahami, F. Sayles, M. Schurter, D. Smallman, W. Wehrli and P. de Wilde, 1995. Benthic chamber and profiling landers in oceanography - A review of design, technical solutions and functioning. Prog. Oceanogr., **35**: 253–294.

Tengberg, A., H. Ståhl, G. Gust, V. Muller, U. Arning, H. Andersson and P.O.J. Hall, 2004. Intercalibation of benthic flux chamber I. Accuracy of flux measurements and influence of chamber hydrodynamics. Pro. Oceanogr., **60**: 1–12.

Tengberg, A., P.O.J. Hall, U. Andersson, B. Lindén, O. Styrenius, G. Boland, F. de. Bovee, B. Carlsson, S. Ceradini, A. Devol, G. Duineveld, J.-U. Friemann, R.N. Glud, A. Khripounoff, J. Leather, P. Linke, L. Lund-Hansen, G. Rowe, P. Santschi, P. de Wilde and U. Witte, 2005. Intercalibation of benthic flux chambers II. Hydrodynamics characterization and flux comparisions of 14 different designs. Mar. Chem., **94**: 147–173.

Thamdrup, B., J.W. Hanssen and B.B. Jørgensen. 1998. Temperature dependence of aerobic respiration in a coastal sediment. FEMS Microbiol. Ecol., **25**: 189–200.

2009년 9월 18일 원고접수
2009년 11월 24일 수정본 채택
담당편집위원: 김동선