

개방형 및 폐쇄형 인공해양소형생태계에서 미소생물상 및 수환경의 변화

정 승 원* · 강 돈 혁¹

한국해양과학기술원 해양시료도서관, ¹한국해양과학기술원 해양방위연구센터

Changes in Planktonic Communities and Environmental Factors between Open Versus Closed Artificial Marine Microcosms

Seung Won Jung* and Don-Hyug Kang¹

Library of Marine Samples, Korea Institute of Ocean Science & Technology, Geoje 53201, Korea

¹Maritime Security Research Center, Korea Institute of Ocean Science & Technology, Ansan 15627, Korea

Abstract - To understand differences of environmental factors and planktonic communities in closed (CS) versus open (OS) enclosed experimental systems, we performed a study on a 100-L indoor-type artificial marine microcosm. For environmental factors, including water temperature, dissolved inorganic phosphorus, and dissolved silica, there were no significant differences between CS and OS; however, salinity was higher in CS than that of OS due to the evaporation effect. The concentration of dissolved oxygen and dissolved inorganic nitrogen was lower in CS than in OS. The abundance of phytoplankton was lower in CS than in OS. However, abundance of autotrophic nanoflagellates and heterotrophic bacteria varied inversely with that of phytoplankton abundances. In particular, the abundance of heterotrophic nanoflagellates and ciliates increased with bacterial growth after a time lag. Therefore, environmental factors and planktonic communities in CS gradually changed over time and characterized a different artificial ecosystem than in OS.

Key words: plankton communities, environmental factors, closed indoor microcosm, open indoor microcosm

서 론

인공 또는 폐쇄생태계 (artificial or enclosed experimental ecosystem) 연구는 자연생태계와 유사하게 만들어 실험 목적에 맞도록 특정 요인을 조절하고 그 외의 요인은 자연상태로 유지하여, 특정 요인에 의한 생태계 변화를 파악할 수 있다. 또한 같은 종류의 실험을 반복적으로 하거나, 일시에

여러 개의 인공생태계를 이용하여 실험하면 재현성이 높은 결과를 도출할 수 있다 (Kim 2001). 이러한 연구는 실험실에서의 결과보다 자연에 가까운 환경조건에서 실험을 할 수 있을 뿐만 아니라 실험 규모가 크기 때문에 자연생태계에 대비할 때 결과를 더욱 신뢰할 수 있다. 인공생태계는 그 크기에 따라 1 m³ 이하의 소형 인공생태계 (microcosm), 1 m³~1,000 m³의 중형인공생태계 (mesocosm), 1,000 m³ 이상의 대형인공생태계 (macrocosm)로 구분되며, 소형인공생태계는 주로 플라스크 및 수조 등 실험실에서 수행되며, 중형 인공생태계는 실내 및 실외에서 연구 특성에 맞게 수행되고

* Corresponding author: Seung Won Jung, Tel. 055-639-8430, Fax. 055-639-8429, E-mail. diatoms@kiost.ac.kr

있고, 대형 인공생태계는 호수 및 만과 같이 자연 생태계 그 자체를 실험대상으로 하고 있다(Grice and Reeve 1982). 또한 실외 인공생태계 (out-door enclosed experiment)는 계절의 영향 등의 주변 환경에 민감하게 영향을 받는 반면 실내 인공생태계 (in-door enclosed experiment)는 비록 생태계의 현장 인공생태계보다 낮지만 온도 및 광량 등의 환경요인의 조절이 현장 인공생태계보다 용이하여 실외 인공생태계보다 실험의 재현성이 높다. 이러한 인공생태계를 이용하여 국외뿐만 아니라 국내에서도 독성실험 및 환경오염에 대한 생태계의 반응 실험 등 다양한 분야에서 응용되고 있다(Kang *et al.* 2005; Kang and Kim 2006; Kim *et al.* 2006; Jung *et al.* 2008, 2010a, 2010b, 2012; 2013; Yang and Jeong 2011).

인공생태계는 기본적으로 실험의 반복성 및 해수의 조성, 광량, 수체 교환율 등 기술적인 문제의 해결이 중요하다. 즉, 인공생태계내에서 생태계가 유지되어, 일차 생산자와 소비자를 포함하여 여러 영양단계가 공존해야 하며, 실험 중에 여러 가지 항목을 측정하기 위해 시료를 일부 채취하여도 인공생태계의 구조나 기능에 영향을 주지 않아야 한다(Lalli 1990). 그러나, 대부분의 부유성 인공생태계 (pelagic enclosed experimental ecosystem)는 물리적으로 주변환경과 분리되어 해수의 유동, 파도 등 자연에서 일어나는 요인들이 차단된다. 또한 인공생태계 내·외부에 생물들이 부착하여 장기간 실험 시 자연생태계와 차이가 발생한다. 한 예로 1999년 한국해양연구소(현 한국해양과학기술원)에서는 현장에서 5 μm 망목을 가지는 개방형 인공생태계를 제작하여 폐쇄성을 극

복하려고 하였으나, 장기간 현장 설치에 따른 외부 생물들이 인공생태계에 부착되어 외부로부터 해수의 유입이 막혔다(KORDI 2000). 그러나, 낙동강에서 저층과 수층과 통합된 인공생태계 연구에서는 외부 수체가 저층의 모래로 유입 유출이 원활하여 외부 수체와 환경요인이 유사한 결과를 관찰한 사례가 있다(Jung *et al.* 2010a, 2012). 따라서 해양의 인공생태계 연구는 실험 목적에 부합될 수 있는 환경요인 및 생물요인 및 상호작용을 고려한 인공생태계의 구축(제작)이 필요하다. 본 연구는 폐쇄성과 개방형 인공생태계의 차이점을 규명하여 향후 다른 연구자들이 인공생태계 연구를 수행함에 있어서 기초자료를 제공하고자 실내에서 외부 해수의 공급이 없는 폐쇄형과 연속적인 외부 해수가 공급되는 개방형 인공해양 소형생태계 (artificial marine microcosm)를 구성하고, 각각의 인공생태계에서 환경요인과 미소생물상의 변화를 파악하여 그 차이를 규명하였다.

재료 및 방법

1. 실내 인공해양 소형생태계 제작 및 실험 방법

정체 시의 해수(폐쇄형)와 지속적인 해수의 유입, 유출이 있는(개방형) 소형 인공생태계 제작은 높이 50 cm, 직경 50 cm 아크릴 재질(두께: 1 cm) 원통으로 총 해수 부피가 100 L를 포함할 수 있도록 하였다(Fig. 1). 실험군은 외부 수체가

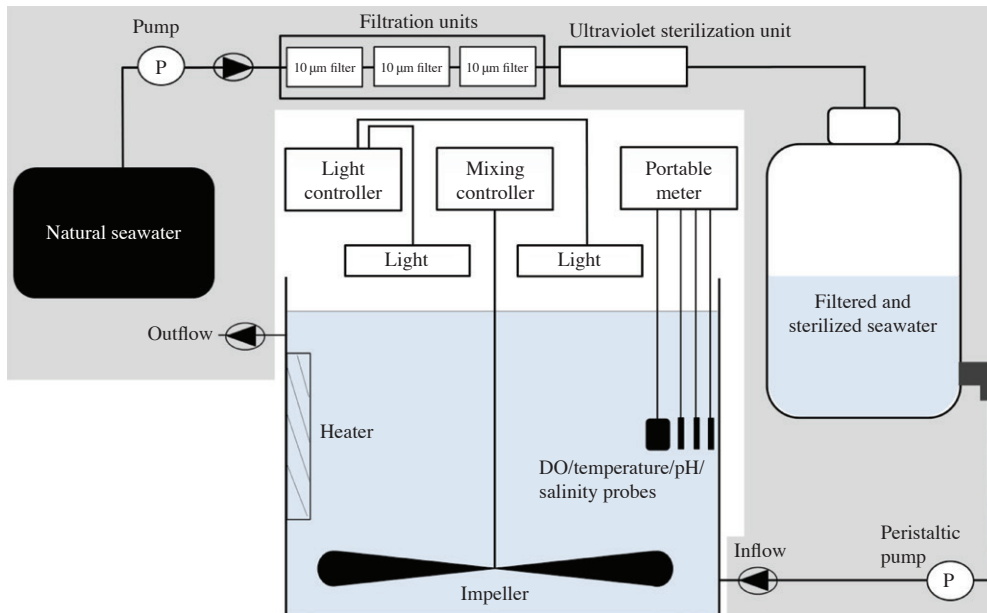


Fig. 1. Schematic diagram of the indoor-microcosm used (radius: 0.5 m, depth: 0.51 m). The box of shaded gray color indicate to use the apparatuses used in the open system (OS) at inflow and outflow of velocity of 200 L d^{-1} .

유입되지 않는 폐쇄형 실험군(CS, closed system)과 해수가 유동하는 개방형 실험군(OS, open system)으로 구성하였다. OS의 자연해수(NS, natural seawater) 공급은 인근 장목만의 해수를 인공생태계 실험실내로 연속적으로 공급할 수 있는 해수 선을 설치한 후, 10 µm filter로 3회 여과 및 자외선(ultra violet)으로 멸균하여 외부 생물이 공급되지 않고 깨끗한 자연해수만 200 L day⁻¹ 공급되도록 하였다. 실험조건 중 광도는 50 µE m⁻² s⁻¹ (12 : 12, light : dark cycle), 수온은 20°C를 유지하였으며, 수체의 균일한 혼합을 위해 자동순환 장치(Automatic circulation system)를 제작하여 30 rpm으로 수체를 혼합하였다. 실험은 3기의 microcosm을 하나의 실험그룹(3배수 실험)으로 수행하였다. 실험기간은 총 15일 동안 24시간 간격으로 환경요인 및 미소생물상의 변화를 관찰하였다.

2. 환경요인 분석

환경요인 중 수온, pH, 염분, 용존산소는 휴대용 수질 측정기(YSI, model 556)를 이용하여 인공생태계 내에서 시료 채집과 함께 측정하였다. 영양염류[용존무기인, 용존규소, 용존무기질소(질산염 + 아질산염 + 암모니아)] 농도를 분석하기 위해 채수된 해수 시료를 GF/F 여과지로 여과한 후, 여과된 해수 300 mL을 채취하여 scintillation vial에 넣고 -80°C에서 냉동 보관하였다. 이 중 암모니아를 측정하기 위한 시료는 여과한 해수 50 mL에 8 N 황산 100 µL을 넣고 -80°C에서 냉동 보관하였다. 영양염류 농도는 자동해수 영양염류 분석기(Quattro, Bran Luebbe co.)를 이용해 측정하였다. 모든 시료에 대하여 3~4회 중복분석과 표준해수 시료(Wako CSK standard solution) 분석을 통하여 분석자료의 신뢰도를 높였다.

3. 부유 생물 분석

Chlorophyll-*a* 농도 측정은 각각의 인공생태계에서 채수된 시료 300 mL를 GF/F 여과지로 여과한 후, 여과지를 90% 아세톤(acetone)에 넣어 암냉소에서 24시간 이상 보관하여 chlorophyll-*a*를 추출하였다. 추출된 chlorophyll-*a*는 형광광도계(Turner 10 AU)에서 흡광도를 측정하여 농도로 계산하였다(Humphrey and Jeffrey 1997). 식물플랑크톤 및 섬모충 개체수 측정은 200 mL의 시료를 루골(Lugol's) 고정액으로 최종농도 2%가 되도록 고정한 후, 24시간 정체시켜 상등액은 버리고 50 mL로 농축시켰다. 농축된 시료는 100~300 µL를 Sedgwick Rafter counting chamber에 분주한 후 광학현미경(Axio Imager. A2, Carl zeiss)하에서 개체를 계수한 후 부피당 개체수로 환산하였다. 타가영양세균(heterotrophic

bacteria)의 총 개체수의 측정은 0.2 µm black membrane으로 세포들을 모은 후, 4',6-diamidino-2-phenylindole (DAPI)로 1 µg mL⁻¹로 염색하여 형광현미경(Axioplan, Zeiss, Germany)으로 계수하였다(Porter and Feig 1980). Heterotrophic nanoflagellates (HNF)와 autotrophic nanoflagellates (ANF)는 25% 글루타알데하이드(buffered glutaraldehyde)로 최종농도 1%로 고정 후, 1 µm black membrane으로 세포들을 모은 후, primuline으로 염색 후 형광현미경하에서 각각 513~556 nm (FITC filter, emission wavelength), 417~477 nm (DAPI filter)를 이용하여 계수하였다(Caron 1983). 타가영양세균과 HNF의 총 개체수는 현미경의 임의의 시야에서 총 세포수가 각각 600 및 300개 이상 계수하여 그에 해당하는 시야수가 전체 시야수에 해당하는 부분을 환산하여 개체수를 산출하였다.

4. 데이터 분석

폐쇄형 및 개방형 폐쇄생태계와 자연해수에서 환경요인과 미소생물상 군집의 차이는 일원배치분산분석(one-way ANOVA) 분석을 하였다. 이때 유의적 차이를 보이고 있는 요인들은 Scheffe 사후 분석을 실시하였다. 또한 폐쇄형과 개방형 폐쇄생태계에서 환경요인 및 미소생물상의 차이점을 파악하기 위하여 Pearson 상관성(correlation) 분석을 실시하였다. 일련의 분석은 SPSS (v. 18) 통계 패키지를 사용하였다.

결 과

1. 환경요인의 변화

수온, 염분, 용존산소, 그리고 pH의 변화는 Fig. 2 및 Table 1과 같다. 수온은 실험실내의 온도가 상시 20°C 내외로 유지되어 CS는 평균 20.30±0.37°C을 보였으며, OS는 19.84±0.15°C을 보여, CS와 OS 내에서 온도의 차이가 거의 없었다(ANOVA, p>0.05). 염분은 CS에서 실험 시작 시 평균 32.73 psu에서 실험 종료 시 33.12 psu(평균 32.92±0.13 psu)로 점차 증가한 반면, OS에서 염분은 외부 해수의 공급(NS, 평균 32.27±0.25 psu)에 따라 평균 32.27±0.26 psu로 CS보다 낮은 염분을 보였다(ANOVA, p<0.001). 용존산소는 CS에서 초기 평균 7.39 mg L⁻¹에서 점차 감소하여 실험 종료 시 6.18 mg L⁻¹로 평균 6.15±0.62 mg L⁻¹를 보인 반면, OS에서는 큰 증감의 변화 없이 평균 7.57±0.18 mg L⁻¹범위를 보였다. pH는 용존산소의 변화와 유사하게 CS에서 점차 감소하여 평균 7.93±0.09를 보였고, OS에서는 8.21에서 8.61로 오히려 증가하였다(평균 8.41±0.15).

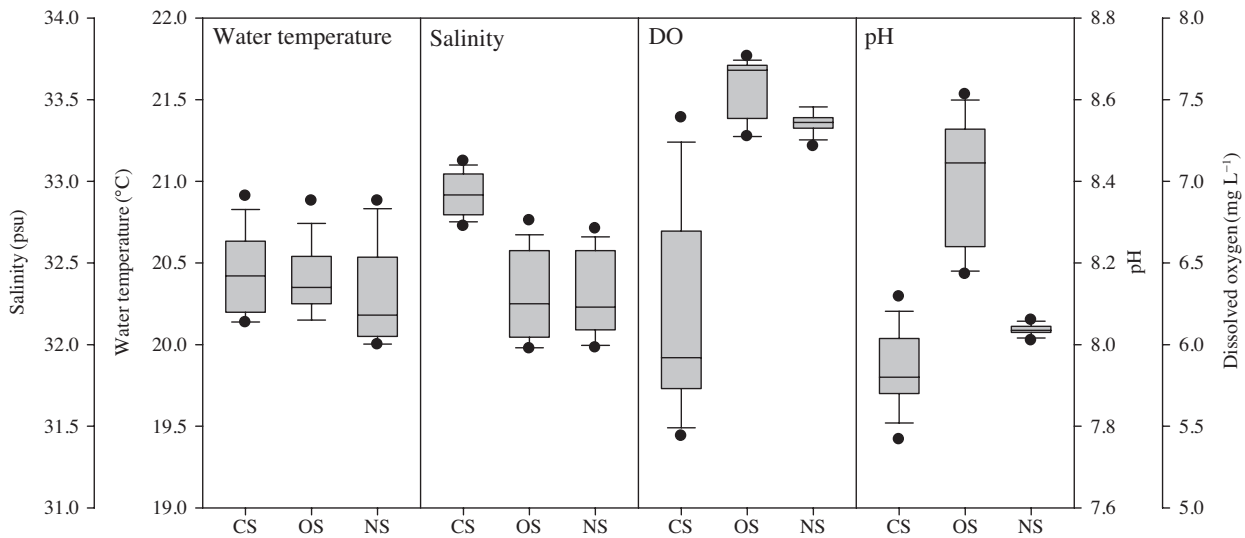


Fig. 2. Changes in concentrations of water temperature (WT), salinity, dissolved oxygen (DO), and pH in the closed system (CS) and open system (OS). Mean error bars are depicted in the 95% confidence points for each top and bottom points in a box plot. Each top and bottom point of closed circles is depicted in the 99% and 1% confidence, respectively. In the each box plot, midline inside the box indicate the mean value. NS, natural seawater.

Table 1. Differences in the biotic and abiotic factors between the closed and open microcosm system

Factor	CS	OS	NS	F-value
WT (°C)	20.30 ± 0.37	20.18 ± 0.15	20.08 ± 0.18	N.S.
Sal. (psu)	32.92 ± 0.13 ^a	32.27 ± 0.26 ^b	32.27 ± 0.25 ^b	44.06*
DO (mg L ⁻¹)	6.15 ± 0.62 ^b	7.57 ± 0.18 ^a	7.36 ± 0.06 ^a	61.89*
pH	7.93 ± 0.09 ^c	8.41 ± 0.15 ^a	8.04 ± 0.01 ^b	93.59*
DIN (μM)	4.57 ± 0.08 ^b	5.33 ± 0.46 ^a	5.06 ± 0.46 ^a	15.20*
DIP (μM)	0.06 ± 0.03	0.06 ± 0.01	0.07 ± 0.00	N.S.
DSi (μM)	3.04 ± 0.46	2.98 ± 0.22	2.97 ± 0.06	N.S.
Chl- <i>a</i> (μg L ⁻¹)	9.03 ± 0.71 ^b	22.83 ± 9.72 ^a	0.00 ± 0.00 ^c	54.79*
Phytoplankton (× 10 ³ cells mL ⁻¹)	3.49 ± 1.65 ^b	5.42 ± 0.32 ^a	0.00 ± 0.00 ^c	119.93*
ANF (× 10 ² cells mL ⁻¹)	3.44 ± 1.04 ^a	1.81 ± 0.53 ^b	0.00 ± 0.00 ^c	97.65*
Heterotrophic bacteria (× 10 ⁶ cells mL ⁻¹)	12.186 ± 5.49 ^a	7.36 ± 0.78 ^b	0.00 ± 0.00 ^c	55.07*
HNF (× 10 ³ cells mL ⁻¹)	7.56 ± 2.83 ^a	1.94 ± 0.40 ^b	0.00 ± 0.00 ^c	85.07*
Ciliate (cells mL ⁻¹)	28.03 ± 8.26 ^a	26.77 ± 2.17 ^a	0.00 ± 0.00 ^b	154.49*

Data represent means ± SD from duplicate independent assays. Results were analyzed by one-way ANOVA and Scheffe's post hoc tests. Letters (a, b, and c) indicate significant differences among experimental groups (*: $p < 0.001$). WT, water temperature; SAL., Salinity; DO, dissolved oxygen; DIN, dissolved inorganic nitrogen; DIP, dissolved inorganic phosphorus; DSi, dissolved silica; Chl-*a*, chlorophyll-*a*; ANF, autotrophic nanoflagellate; HNF, heterotrophic nanoflagellate; N.S., no significance.

영양염류 (용존무기질소, 용존무기인, 용존규소)의 변화는 Fig. 3 및 Table 1과 같다. 용존무기질소 농도는 CS에서 최소 4.43 μM에서 최고 4.70 μM로 큰 차이 없이 유지되었던 반면, OS에서는 초기에 증가하다가 다시 감소하는 양상을 보였다. 이는 외부 해수의 용존무기질소의 농도 변화와 높은 상관관계를 가지고 있었다 ($r = 0.704$, $p < 0.01$). CS에서의 용존무기인의 농도는 실험초기에 일시적으로 증가하다가 감소하였던 반면 OS에서 농도는 큰 변화 없이 초기농도를 유지하고 있었다. OS에 공급되는 자연해수의 농도는 비록 OS의 용존무

기인의 농도의 변화와 상관성을 보이고 있지는 않았으나, 평균 0.07 μM의 농도를 보였다. 용존규소의 농도는 CS 및 OS에서 뚜렷한 변화를 보이지 않고, 각각 평균 3.04 ± 0.21 μM 및 2.98 ± 0.19 μM를 보였으며, 자연해수와 OS의 농도 변화는 유효한 상관성을 보였다 ($r = 0.529$, $p < 0.05$).

2. 부유생물의 변화

식물플랑크톤과 ANF의 개체수의 변화는 CS와 OS에서

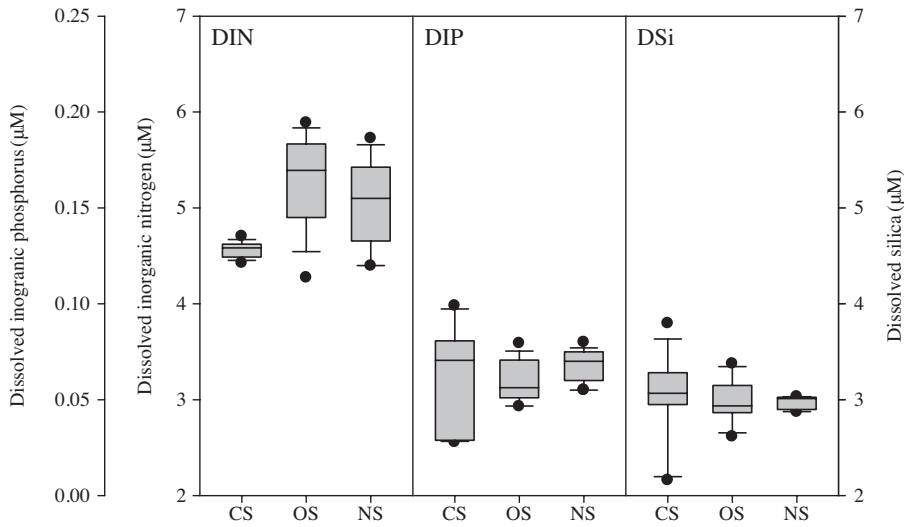


Fig. 3. Changes in concentrations of dissolved inorganic nitrogen (DIN), dissolved inorganic phosphorus (DIP), and dissolved silica (DSi) in the closed system (CS) and open system (OS). Mean error bars are depicted in the 95% confidence points for each top and bottom points in a box plot. Each top and bottom point of closed circles is depicted in the 99% and 1% confidence, respectively. In the each box plot, midline inside the box indicate the mean value. NS, natural seawater.

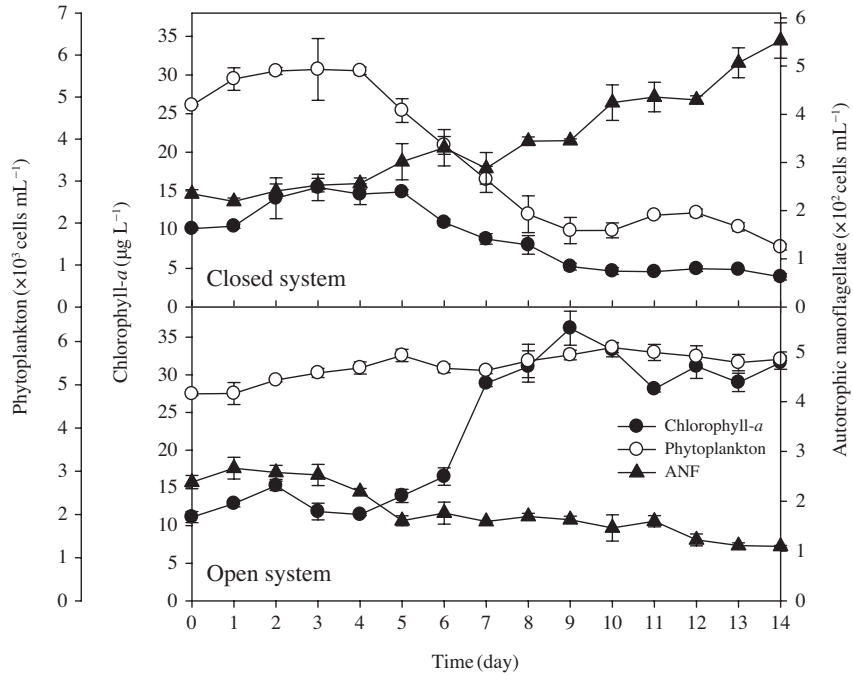


Fig. 4. Changes in concentration of chlorophyll *a* and abundances of phytoplankton and autotrophic nano flagellates (ANF) in the closed system (CS) and open system (OS).

큰 차이를 보이고 있었다(Fig. 4, Table 1). CS에서 micro-size 이상의 식물플랑크톤 개체수는 실험 초기에 4.81×10^3 cells mL⁻¹에서 점차 감소하여 실험 종료 시에는 1.43×10^3 cells mL⁻¹를 나타내었던 반면, nano-size 이하인 ANF 개체

수는 2.35×10^2 cells mL⁻¹에서 5.53×10^2 cells mL⁻¹로 증가하였다. OS에서 식물플랑크톤 및 ANF의 개체수의 변화는 CS에서 개체수의 변화와 반대되는 양상을 보였다. Chlorophyll-*a* 농도는 OS에서 증가하는 양상을 보였으며, CS에서

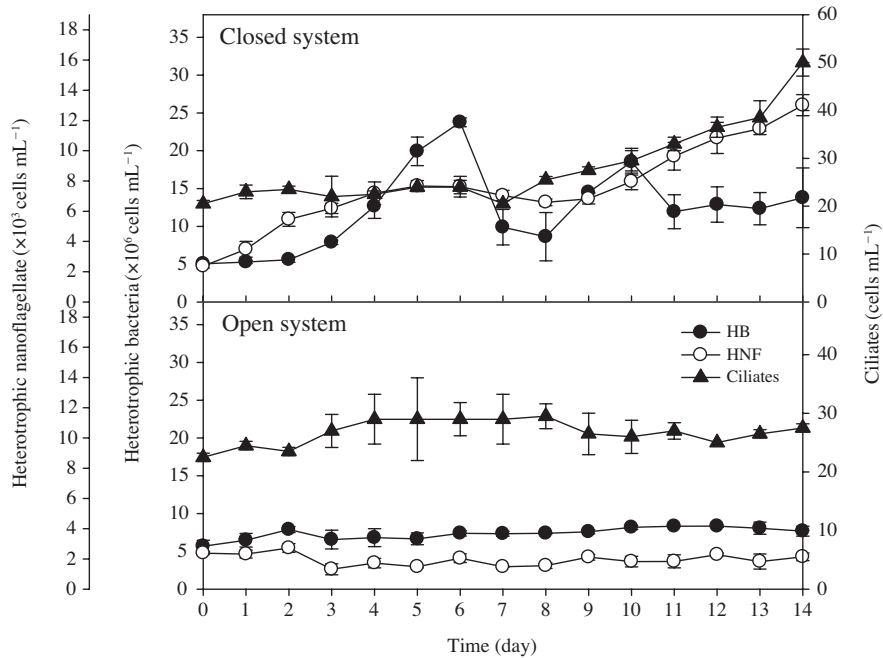


Fig. 5. Changes in abundances of total heterotrophic bacteria (HB), heterotrophic nano flagellates (HNF), and ciliates in the closed system (CS) and open system (OS).

는 감소하는 양상을 나타내었다. 특히, chlorophyll-*a* 농도의 변화는 식물플랑크톤 개체수와 높은 정의 상관성을 보였던 반면($r=0.718$, $p<0.001$), ANF 변화와는 부의 상관성을 보여($r=-0.891$, $p<0.001$), micro-size 이상의 식물플랑크톤 개체수에 의해 chlorophyll-*a*의 농도가 영향을 크게 미치고 있음을 알 수 있었다. 타가영양세균은 CS에서 초기에 5.04×10^6 cells mL⁻¹에서 7일 경과 후 23.77×10^6 cells mL⁻¹로 가장 높게 증가 후 감소하다가 실험 11일에 18.85×10^6 cells mL⁻¹로 재증가 후 감소하는 Bimodal peak의 양상을 보였다. OS에서 타가영양세균의 개체수는 실험 초기에 5.13×10^6 cells mL⁻¹에서 실험 종료 시 7.21×10^6 cells mL⁻¹로 큰 변화 없이 일정하였다. CS에서 HNF, 섬모충의 개체수의 변화는 타가영양세균 개체수의 변화와 시간차를 두고 증가하는 양상을 보였던 반면, OS에서는 어떤 증감 양상을 보이지 않았다.

고 찰

해양생태계에서 환경요인의 변화는 생물들에게 직접적으로 영향을 주는 중요 요인이다. 따라서, 인공생태계 연구에 있어서 각기 다른 목적이 있으나, 외부 자연 수체와 환경요인이 유사해야 자연생태계를 모사하는 실험이 될 수 있다. 본 연구에 따르면 수온을 제외한 다른 환경요인들은 폐쇄성

과 개방형에서 차이를 보이고 있었다. 염분은 폐쇄성 인공생태계에서는 외부 수체의 공급이 없이 외부 온도에 따라 증발효과에 의해 염분이 상승하는 반면, 개방형 인공생태계에서는 계속적인 외부 수체의 공급에 따라 큰 차이를 보이지 않았다. 이렇게 폐쇄성 인공생태계에서의 염분의 증가는 기존 연구에서도 보고된 바 있다(Jung *et al.* 2012; Baek *et al.* 2014). 특히, Jung *et al.* (2012)의 유류오염에 따른 부유생물 군집의 반응 관찰을 위한 현장 중형 폐쇄생태계 연구에서 표층이 원유로 덮여져 수분 증발이 억제되었던 반면, 유류 노출이 없는 대조구에 증발량에 따라 염분이 증가하였다. 따라서, 만약 폐쇄성 인공생태계에서 실험이 장기간 수행된다면 아마도 염분 농도의 상승의 계속적으로 진행되어, 자연생태계와 차이가 큰 생태계가 구성될 것이다. 일반적으로 pH 및 용존산소의 변화는 크게 생물학적 요인과 물리학적 요인에 영향을 받는다. 생물학적 요인은 주로 광합성을 통하여 산소를 발생시키는 식물플랑크톤의 증식과, 반대로 산소를 소비하며 유기물을 분해하는 미생물 등의 활동이고 물리학적 요인은 수온 및 해황의 영향을 크게 받는다(Jung *et al.* 2011). 본 연구에서 pH 및 용존산소의 변화는 폐쇄성 인공생태계에서 감소하는 양상을 나타내고 있었으며, 이는 광합성을 하는 식물플랑크톤들의 성장 억제 및 산소를 소비하는 타가영양세균의 증가에 기인한 현상으로 파악되며, 개방형에서는 자연해수에서 계속적으로 산소의 유입 및 식물플랑

크톤 유지에 따른 산소생산 및 세균의 성장 억제에 따른 산소 소비 억제에 따른 변화라 판단된다.

식물플랑크톤의 성장 제한요인으로는 일반적으로 질소, 인, 규소 및 철을 들 수 있다(e.g. Howarth 1988). 폐쇄형 인공생태계에서 외부의 영양염류 공급 부재에 따른 식물플랑크톤 성장 억제에 영향을 주는 제한요인으로는 계속적으로 감소한 용존무기인을 들 수 있다. 용존무기인 농도의 변화는 폐쇄형 인공생태계에서는 외부 영양염류의 유입원의 단절에 따라 개방형에 비해 감소하는 양상을 보인 반면, 개방형 인공생태계에서는 외부 해수의 유입에 의해 지속적인 영양염류의 공급으로 자연해수와 농도의 차이가 크지 않았다. Jung *et al.* (2015)의 실내 소형 인공생태계 연구에 있어서 개방형 인공생태계는 미소생물상의 큰 변화가 없이 초기 생물량이 계속적으로 유지되었던 반면, 폐쇄형 인공생태계에서는 미소생물상의 군집의 천이가 발생된 것을 관찰할 수 있었다. 식물플랑크톤 군집 중 96% 이상을 차지하는 돌말류의 중요 에너지원인 용존무기질소와 용존규소는 폐쇄형과 개방형에서 큰 차이를 보이지 않았는데, 그 이유는 폐쇄형에서 돌말류가 증식하지 못하여 영양염류를 소비하지 못하였다고 판단된다. 또한 식물플랑크톤 군집의 거동과 반대되는 양상을 보인 ANF는 빈영양화 해역에서 초미소(pico-) 및 미소식물플랑크톤(nano-phytoplankton)등이 성장 경쟁력이 있다는 보고가 있다(Berman *et al.* 1984; Azov 1986; Kimor *et al.* 1987; Bonin *et al.* 1989; Herut *et al.* 2000). 특히 Kress and Herut (2001)의 소형 인공생태계 연구에서 인이 제한요인으로 작용할 때, ANF의 성장 적응이 다른 식물플랑크톤 군집보다 높다는 연구결과와 유사하다.

타가영양세균은 개방형 인공생태계에서는 큰 변화의 차이를 보이지 않았으나, 폐쇄형 인공생태계에서 식물플랑크톤 증가가 억제된 이후에 빠르게 증가와 감소를 반복하였다. 이는 식물플랑크톤과 영양염류 경쟁에서 식물플랑크톤 증가가 억제된 상황에서 기회적으로 증가하고 있음을 알 수 있었다. 이는 Kress *et al.* (2005)의 영양염류 첨가의 소형 인공생태계 연구에서와 유사한 결과를 나타내었다. 일반적으로 타가영양세균의 변동은 영양염류의 변동, 경쟁자와의 관계 및 섭식자의 거동을 같이 고려해야 한다. 타가영양세균의 소비자인 HNF와 섬모충이 시간 차이를 두어 증가를 하였고, bacteria가 감소할 때, 소비자들이 감소하였다. 이와 같은 HNF 및 섬모충과 타가영양세균간의 포식압은 많은 인공생태계 연구에서 관찰되고 있다(Kress *et al.* 2005; Jung *et al.* 2010a, 2012, 2013; Baek *et al.* 2014).

따라서, 본 연구는 외부 해수의 공급이 없는 폐쇄형 인공생태계와 계속적으로 외부 해수의 공급을 받는 개방형 인공생태계에서 미소생태계 및 환경요인의 변동을 관찰한 결과,

개방형 인공생태계는 외부 해수와 큰 차이를 보이지 않았던 반면, 폐쇄형에서는 생태계가 시간이 경과함에 따라 이질적인 생태계가 만들어지고 있었다. 특히 폐쇄형에서는 염분의 증가, 용존산소의 감소, pH의 감소, 용존무기인의 감소에 따른 식물플랑크톤 성장 제한요인으로 작용했다고 판단된다. 생물요인의 변동을 보면, 폐쇄형 인공생태계에서 식물플랑크톤 군집의 감소 및 ANF의 증가, 타가영양세균의 증가 및 이에 따른 소비자인 HNF 및 섬모충의 증가가 뒤를 이었다. 그러나, 본 연구에서는 장기간 실험을 수행하지 못하여 어느 시점에서 개방형과 폐쇄형의 이질성을 가지고 있는가에 대한 시계열 분석을 수행하지 못한 단점을 가지고 있다. 따라서, 향후 계속적인 연구를 통하여 각 시스템에 따른 차이를 규명하여 인공생태계 연구 방법론 개발이 필요하다.

적 요

본 연구는 외부 해수가 계속적으로 유입되는 개방형 인공생태계와 해수의 유입이 없는 폐쇄형 인공생태계에서 미소생태계의 변화를 파악하고자 실험실 내에서 100 L 크기의 인공해양소형생태계 연구를 수행하였다. 수온은 폐쇄형 및 개방형 인공생태계에서 큰 차이가 없었다. 염분은 폐쇄형 생태계에서 수체의 증발에 따라 증가를 보였고 용존산소 및 용존무기질소 농도는 폐쇄형에서 감소하는 반면, 개방형에서는 초기농도와 큰 차이를 보이지 않았다. 용존무기인 및 용존규소는 두 시스템에서 차이가 없었다. 식물플랑크톤은 폐쇄형에서 감소를 하였던 반면, 개방형에서는 증가 양상을 보였으나 Autotrophic nanoflagellates는 식물플랑크톤 개체수의 변동과 반대되는 양상을 보였다. 타가영양세균은 폐쇄형에서 증가하는 양상을 보였고, 이와 함께 heterotrophic nanoflagellates 및 섬모충이 시간차를 두어 증가하는 양상을 보였다. 그러나, 개방형 인공생태계에서는 특이한 변화를 나타내지 않았다. 결론적으로, 폐쇄형 인공생태계와 개방형 인공생태계에서 미소생물상 및 환경요인들의 변화의 연구는 향후 연구자들이 인공생태계 연구에 있어서 기초자료로 활용할 수 있을 것으로 기대하며, 신뢰성 있는 인공생태계 연구를 수행할 수 있을 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 한국해양수산진흥개발원의 “유해적조 실시간 탐지 및 분석을 위한 상용 시스템 개발 및 사업화”(PM 58880) 및 “USCG Phase II 시험, 평가 및 인증시스템 구축”

(PM58580), “해양 유해조류 자동판별시스템 개발 및 방제적용기술 타당성 분석”(PN66430)의 사업 지원을 받아 수행하였음.

REFERENCES

- Azov Y. 1986. Seasonal patterns of phytoplankton productivity and abundance in near-shore oligotrophic waters of the Levant Basin (Mediterranean). *J. Plankton Res.* 8:41-53.
- Baek SH, M Son, SW Jung, DH Na, H Cho, M Yamaguchi, SW Kim and YO Kim. 2014. Enhanced species-specific chemical control of harmful and non-harmful algal bloom species by the thiazolidinedione derivative TD49. *J. Appl. Phycol.* 26:311-321.
- Berman T, DW Townsend, SZ El Sayed, CC Trees and Y Azov. 1984. Optical transparency, chlorophyll and primary productivity in the Eastern Mediterranean near the Israeli coast. *Oceanol. Acta.* 7:367-372.
- Bonin DJ, MC Bonin and T Berman. 1989. Mise en évidence expérimentale des facteurs nutritifs limitants de la production du micro-nanoplancton et de l'ultraplancton dans une eau côtière de la Méditerranée orientale (Haïfa Israël). *Aquat. Sci.* 51:129-159.
- Caron DA. 1983. Technique for enumeration of heterotrophic and phototrophic nanoplankton, using epifluorescence microscopy, and comparison with other procedures. *Appl. Environ. Microbiol.* 46:491-498.
- Grice GM and MR Reeve. 1982. Introduction and description of experimental ecosystems. pp. 1-9. In *marine mesocosms. Biological and chemical research in experimental ecosystem* (Grice GD and MR Reeve eds.). Springer-Verlag, New York.
- Herut B, A Almogi-Labin, N Jannink and I Gertman. 2000. The seasonal dynamics of nutrient and chlorophyll *a* concentrations on the SE Mediterranean shelf-slope. *Oceanol. Acta.* 23:771-781.
- Howarth RW. 1988. Nutrient limitation of net primary production in marine ecosystems. *Ann. Rev. Ecol.* 19:89-110.
- Humphrey GF and SW Jeffrey. 1997. Tests of accuracy of spectrophotometric equations for the simultaneous determination of chlorophylls *a*, *b*, *c1* and *c2*. pp. 616-621. In *Phytoplankton pigments in oceanography: guidelines to modern methods* (Monographs on oceanographic methodology) (Jeffrey SW, RFC Mantoura and SW Wright eds.). UNESCO pub, Paris.
- Jung SW, YH Kang, SH Baek, D Lim and MS Han. 2013. Biological control of *Stephanodiscus hantzschii* (Bacillariophyceae) blooms in a field mesocosm by the immobilized algicidal bacterium *Pseudomonas fluorescens* HYK0210-SK09. *J. Appl. Phycol.* 25:41-50.
- Jung SW, YH Kang, T Katano, BH Kim, SY Cho, JH Lee, YO Kim and MS Han. 2010a. Testing additions of *Pseudomonas fluorescens* HYK0210-SK09 to mitigate blooms of the diatom *Stephanodiscus hantzschii* in small- and large-scale mesocosms. *J. Appl. Phycol.* 22:409-419.
- Jung SW, BH Kim, T Katano, DS Kong and MS Han. 2008. *Pseudomonas fluorescens* HYK0210-SK09 offers species-specific biological control of winter algal blooms caused by freshwater diatom *Stephanodiscus hantzschii*. *J. Appl. Microbiol.* 105:186-195.
- Jung SW, OY Kwon, CK Joo, JH Kang, M Kim, WJ Shim and YO Kim. 2012. Stronger impact of dispersant plus crude oil on natural plankton assemblages in short-term marine mesocosms. *J. Hazard. Mater.* 217-218:338-349.
- Jung SW, D Lim, HH Shin, DH Jeong and YH Roh. 2011. Relationship between physico-chemical factors and chlorophyll-*a* concentration in surface water of Masan Bay: Bi-daily monitoring data. *Korean J. Environ. Biol.* 29:98-106.
- Jung SW, JS Park, OY Kwon, JH Kang, WJ Shim and YO Kim. 2010b. Effects of crude oil on marine microbial communities in short term outdoor microcosms. *J. Microbiol.* 48:594-600.
- Jung SW, SM Yun, JW Yoo, Z Li, PG Jang, D Lim, YC Lee, HU Lee, TK Lee, J Heo, JH Lee and MS Han. 2015. Can the algicidal material Ca-aminoclay be harmful when applied to a natural ecosystem? An assessment using microcosms. *J. Hazard. Mater.* 298:178-187.
- Kang JH and WS Kim. 2006. The effect of enhanced zooplankton on the temporal variation of plankton in a mesocosm. *J. Ocean Eng. Technol.* 9:109-119.
- Kang JH, WS Kim, K Shin, M Chang and KC Hwang. 2005. The effect of enhanced nitrate input on the temporal variation of the plankton community in a mesocosm. *Ocean Polar Res.* 27:341-349.
- Kim YT, YH Jeong, YJ Chae, CW Rhee, SY Kim, KW Choi and JS Yang. 2006. Variation of water qualities due to freshwater introduction to tidal flat A mesocosm study. *J. Korean Soc. Oceanogr.* 11:49-67.
- Kim WS. 2001. Application of enclosed experimental ecosystem to the study on marine ecosystem. *Korean J. Environ. Biol.* 19:183-194.
- Kimor B, T Berman and A Schneller. 1987. Phytoplankton assemblages in the deep chlorophyll maximum layers off the Mediterranean Coast of Israel. *J. Plankton Res.* 9:433-443.
- KORDI. 2000. Mesocosm study on the fate of organic pollutants (BSPE 99765-00-1251-3). Research report of Korea

- Ocean Research & Development Institute.
- Kress N and B Herut. 2001. Spatial and seasonal evolution of dissolved oxygen and nutrients in the Southern Levantine Basin (Eastern Mediterranean Sea). Chemical characterization of the water masses and inferences on the N : P ratios. *Deep-Sea Res. PT. I.* 48:2347-2372.
- Lalli CM. 1990. Enclosed experimental marine ecosystems: a review and recommendation - a contribution of the scientific committee on oceanic research working group 85. *Coastal and Estuarine Studies*. Springer-Verlag, New York.
- Porter KG and YS Feig. 1980. The use of DAPI for identification and counting aquatic microflora. *Limnol. Oceanogr.* 25:943-948.
- Yang JS and YH Jeong. 2011. Mesocosm as a scientific tool for marine science: Focused on the soft-bottom environment. *J. Korean Soc. Mar. Environ. Eng.* 14:93-106.

Received: 3 April 2015

Revised: 23 November 2015

Revision accepted: 23 November 2015