

Review

https://doi.org/10.7850/jkso.2021.26.3.220
pISSN : 1226-2978 eISSN : 2671-8820

해양생태계 모니터링을 위한 식물플랑크톤 자료의 정도 관리 동향

이원호^{1,2} · 박중우³ · 성경아⁴ · 박종규⁵ · 유영두⁵ · 김형섭^{5*}¹군산대학교 해양생물연구교육센터 연구원, ²㈜지오시스템리서치 고문, ³국립수산과학원 갯벌연구센터 해양수산연구사, ⁴군산대학교 해양생명응용과학부 연구원, ⁵군산대학교 해양생명응용과학부 교수

Trends in QA/QC of Phytoplankton Data for Marine Ecosystem Monitoring

WONHO YIH^{1,2}, JONG WOO PARK³, KYEONG AH SEONG⁴, JONG-GYU PARK⁵, YEONG DU YOO⁵ AND HYUNG SEOP KIM^{5*}¹Researcher, Marine Life Research and Education Center, Kunsan National University, Gunsan 54150, Korea²Advisor, GeoSystem Research Corporation, Gunpo 15807, Korea³Researcher, Tidal Flat Research Institute, National Institute of Fisheries Science, Gunsan 54001, Korea⁴Researcher, School of Marine Applied Bioscience, Kunsan National University, Gunsan 54150, Korea⁵Professor, School of Marine Applied Bioscience, Kunsan National University, Gunsan 54150, Korea

*Corresponding author: mudskip@kunsan.ac.kr

Editor Eun-Jin Yang

Received 27 May 2021; Revised 17 August 2021; Accepted 20 August 2021

ABSTRACT

1880년대에 들어서서 해양 식물플랑크톤의 기능적 중요성이 처음 주창된 이래, 전통적인 형태 관찰법 및 진보된 형태 자동분석 기술을 기반으로 하여 다량의 식물플랑크톤 종별 정량자료가 생산되었다. 최근에는 해수시료 중의 색소를 직접 분석하거나 원격탐사 자료를 해석하여 색소특성에 따른 분류군별 정량자료를 생산함으로써, 자료생산 방법이 점점 다양해지고 자료 확보 대상 정점에 대한 시공간적 접근성도 크게 개선되고 있다. 장기적인 해양생태계 모니터링에서 식물플랑크톤의 종별 정량자료가 생산된 경우도 적지 않아, 각각의 해역에서 중장기적인 해양 식물플랑크톤의 구조와 기능의 변동에 대한 중요한 증거로 활용될 수 있다. 그러나 모니터링 기간 전체에 걸친 연대별 자료 생산자 간의 차이로 인해 이러한 자료의 활용성이 제한될 수 있는데, 시료 처리 및 분석법, 종의 확인 및 분류, 분석이 완료된 시료의 관리 등의 다양한 측면에서 연대별 생산자 간의 편차가 적지 않다. 해양 식물플랑크톤의 종별 정량자료 값을 정확하게 구하기 위한 심도있는 연구는 1880년대 후반 Victor Hensen이 시작한 것으로 평가된다. 정확도를 포함한 해양 식물플랑크톤 자료의 정도 관리에 관한 국제적인 논의는 ICSU의 SCOR Working Group 33을 중심으로 1969년에 시작되었다. 첫 결실로 UNESCO 해양과학기술보고서 제18편이 1974년 출판되었는데, 이는 UNESCO의 해양학 방법론의 전문연구서적 제6편인 *Phytoplankton Manual* 출판의 실마리였다. 1990년대 말에는 ISO 기준에 따른 해양 식물플랑크톤 종별 정량자료의 정도관리를 달성하여, 국제적인 자료의 상호비교 및 교정을 가능하게 하려는 수행기구인 IPI (International Phytoplankton Intercomparison)의 전신인 BEQUALM 사업이 유럽에서 본격 출범하였다. IPI는 지난 20여 년간의 경험과 실적을 바탕으로 정도관리 기준을 모든 나라에서 적용할 수 있도록 국제협력을 강화해 나가고 있다. 우리나라의 해양화학 분야 측정자료의 정도관리 체계와 내용이 잘 정립된 데 비하여, 해양생물의 종별 정량자료에 대한 본격적인 정도관리 체계는 아직 법제화 단계에 이르지 못하고 있다. 우선, 해양생태계의 기초 생산자인 식물플랑크톤의 종별 정량자료에 대한 정도관리 체계를 확립하고, 다양한 기능생물군으로 이를 확장해 나갈 필요가 있다.

Since the functional importance of marine phytoplankton was firstly advocated from early 1880s massive data on the species composition and abundance were produced by classical microscopic observation and the advanced auto-imaging technologies. Recently, pigment composition resulted from direct chemical analysis of phytoplankton samples or indirect remote sensing could be used for the group-specific quantification, which leads us to more diversified data production methods and for more improved spatiotemporal accessibilities to the target data-gathering points. In quite a few cases of many long-term marine ecosystem monitoring programs the phytoplankton species composition and abundance was included as a basic monitoring item. The phytoplankton data could be utilized as a crucial evidence for the long-term change in phytoplankton community structure and ecological functioning at the monitoring stations. Usability of the phytoplankton data sometimes is restricted by the differences in data producers throughout the whole monitoring period. Methods for sample treatments, analyses, and species identification of the phytoplankton species could be inconsistent among the different data producers and the monitoring years. In-depth study to determine the precise quantitative values of

the phytoplankton species composition and abundance might be begun by Victor Hensen in late 1880s. International discussion on the quality assurance of the marine phytoplankton data began in 1969 by the SCOR Working Group 33 of ICSU. Final report of the Working group in 1974 (UNESCO Technical Papers in Marine Science 18) was later revised and published as the UNESCO Monographs on oceanographic methodology 6. The BEQUALM project, the former body of IPI (International Phytoplankton Intercomparison) for marine phytoplankton data QA/QC under ISO standard, was initiated in late 1990. The IPI is promoting international collaboration for all the participating countries to apply the QA/QC standard established from the 20 years long experience and practices. In Korea, however, such a QA/QC standard for marine phytoplankton species composition and abundance data is not well established by law, whereas that for marine chemical data from measurements and analysis has been already set up and managed. The first priority might be to establish a QA/QC standard system for species composition and abundance data of marine phytoplankton, then to be extended to other functional groups at the higher consumer level of marine food webs.

Keywords: Long-term marine ecosystem monitoring, Phytoplankton species, Quantitative analysis, QA/QC, IPI

1. 서론

해양 식물플랑크톤은 눈에 보이지 않을 정도로 크기가 작은 광합성 부유생물이지만, 지난 24억년 전부터 지구의 기후 및 생물지구화학적 현상 등을 조절해 온 강력한 기능을 띤 생물군으로 평가되고 있다(Falkowski, 2012; Karlusich *et al.*, 2020). 연구 역사는 350여 년 전으로 거슬러 올라가지만, 해양 식물플랑크톤이 인류 및 지구환경에 중대한 영향을 끼친다는 사실을 인류가 깨닫기 시작한 것은 불과 170여년 전이다(Hooker, 1844). 최근 수십 년 동안 일반화된 오믹스(Omics)와 발달된 화상 기술의 개발에 따라(Lombard *et al.*, 2019; Karlusich *et al.*, 2020) 전 지구적 차원의 식물플랑크톤 생태학 및 진화 역사에 대한 보다 더 명확한 실체가 규명되고 있다. 혁신적인 신기술과 융합된 방법론에 힘입어(Dyomin *et al.*, 2019), 해양 식물플랑크톤의 기능과 역할에 대한 정량적인 평가를 보편적으로 수행할 수 있는 신시대로 점차 접어들고 있다(Ohman *et al.*, 2019; Dyomin *et al.*, 2020).

이와 같은 첨단 기술과 현대적 지식의 진보에도 불구하고, 현미경 관찰에 의한 식물플랑크톤 연구는 여전히 관련 학술 및 기술 발전의 근간이며 핵심이다. 새로운 종, 생활사, 생물 종간의 상호작용 등의 발견은 흔히 살아있는 식물플랑크톤의 관찰에서 비롯된다. 또한 1850년대 이후에 본격화한(Allen, 1919) 해양 식물플랑크톤의 종 분류, 군집 모니터링, 우점종의 생태적 기능 등에 대한 각종 기록을 기반으로 하는 장기적인 생태계 변동 연구는 현재 시점의 식물플랑크톤 관찰이 필수적이다. 더구나, 장기적인 생태계 변동 연구를 위해 해양 식물플랑크톤 관찰로 얻어진 정량자료는 시간과 공간을 초월하여 상호비교가 가능한 방식으로 정리되어야 한다(O'Brien *et al.*, 2017). 이와 같이 상호비교 가능성을 확보하기 위한 해양 식물플랑크톤 연구자들의 각고의 노력은 지금까지도 지속되고 있다(Mills, 2012; O'Brien *et al.*, 2017; Mirtl *et al.*, 2018).

본고에서는 해양 식물플랑크톤 관찰을 통한 초기의 연구와 해양 식물플랑크톤의 생태적 기능성 탐구 등의 연원을 짚어보고, 식물플랑크톤 종별 정량자료 기반의 해양생태계 모니터링에 대한 국내외 현황을 간략히 살펴보고자 하였다. 이로써, 해양 식물플랑크톤 종별 정량 자료에 대한 QA/QC의 국내 현황을 주요 선도국들의 현황과 견주어 보아, 관련 자료의 QA/QC에 대한 우리나라의 향후 발전 방향을 가늠해 보고자 하였다.

2. 본론

2.1 해양 식물플랑크톤 종의 발견과 분류체계 구축

해양 식물플랑크톤 또는 광영양 해양 원생부유생물(phototrophic marine protist plankton)의 연구 역사는 350여 년 전 *Mesodinium rubrum*의 관찰(Leuwenhoek, 1677)로 거슬러 올라간다(Dobell, 1932; Taylor, 1980). 이는 Leuwenhoek(1674)가

담수 녹조류인 해캄(*Spirogyra*)을 관찰하여 조류에 관한 최초의 기록을 남긴 지 불과 3년 후의 일이다. 또한 미세조류인 돌말(규조류)을 처음 현미경으로 관찰하여 보고한(담수산 규조류인 *Tabellaria*로 여겨짐) 때보다 무려 26년 앞선 일이다(Anon, 1703; Leeuwenhoek, 1703).

원양에서 식물플랑크톤을 처음 관찰한 사례는 1768~1771년 James Cook 선장의 Endeavour호 항해에 동승했던 Joseph Banks가 남긴 기록이었다(“The sea was full of a sort of orange-coloured powder, like that we saw on the coast of Brazi”; Parkinson(1773)의 137쪽, 1770년 5월 18일의 항해). 이와 함께, 당시 선원들이 흔히 부르던 “sea sawdust”에 관한 관찰기록(“Great quantities of the brown scum continued to appear upon the water, and the sailors, having given up the notion of its being spawn, found a new name for it, and called it Sea-saw-dust”; Hawkesworth(1773b)의 654-655쪽, 1770년 8월 30일의 항해)에 대하여 Collingwood(1868)와 Taylor(1980)는 이들 기록이 “*Oscillatoria (Trichodesmium) spp.*”에 관한 것이라고 추정하였다. 원양역은 아니라 하더라도 탐사항해 중 1768년 12월 9일 리오데자네이루에서 르마레 해협을 통과하다가 관찰한 해양플랑크톤 대번식에 관한 최초의 기록이 있는데(Hawkesworth (1773a)의 39쪽), Baingridge(1957)는 이를 규조류 *Rhizosolenia*의 대번식으로 추정하였다.

해양 식물플랑크톤 분류에 관한 연구 역사의 초반에는 외편모류 *Ceratimn tripos*를 시작으로(Müller(1776)의 206쪽, Müller(1786)의 136쪽, Tab. XIX, Fig. 22) 새로운 종의 관찰 및 기록을 포함한 분류학적 기재를 통한 계통분류적 체계 구축이 선행되었다(Gran, 1912). 이는 규조류의 몇 종류가 동물로 여겨져서(Fokin, 2004; Kumar *et al.*, 2015), Vermes-Zoophyta의 *Chaos* 속으로 분류된 지(Linnaeus(1767)의 1326-1327쪽; De Kruif, 1926) 불과 10년만의 일이었다. 규조류를 포함한 조류의 분류체계는 자연체계를 기반으로 19세기 전반에 확립되었으며(Williams, 2007; Williams and Kociolek, 2011), Agardh(1824)는 9속 48종의 규조류를 첫번째 목(Ordo I. Diatomee)으로 제시한 Systema Algarum을 발표하였다.

2.2 해양 식물플랑크톤의 생태적 기능성 탐구

19세기 중엽에 이르러 해양 식물플랑크톤의 생태학적 중요성에 대하여(Taylor, 1980), 특히 원양의 대형 동물들에게 절대적인 기초 먹이생물로서 기능성을 인식하기 시작한 것으로 보인다(Fogg, 1990). Joseph Dalton Hooker는 James Clark Ross 선장의 탐험선인 Erebus호와 Terror호를 타고 1839~1843년 남극항해를 하는 동안(Hooker, 1844), 다양한 종의 규조류가 플랑크톤 네트, 빙하 얼음층 속, 해양동물의 소화관, 심지어 퇴적물 속에도 매우 많은 양으로 나타남을 확인하였다(Karlusich *et al.*, 2020). 또한, 그는 일찍이 생태계 내의 기능적 본질을 간파하고 “남극에서 북극까지 어디에나 매우 풍부하며, 해양동물의 주된 먹이원인 동시에 식물 본연의 대사작용으로 오염된 지구대기를 정화하는 역할을 할 것”이라고 주장하였다(Hooker (1844)의 505-506쪽). 그 당시만 하더라도 독일의 원생생물학자 Christian Gottfried Ehrenberg가 규조류를 식물이 아닌 “animalculae 또는 infusoria”라 하여(Ehrenberg(1830)의 57쪽) 규조류를 동물에 속하는 “siliceous polygastrics”로 알고 있었다(Ross(1847a)의 341-345쪽, Ross(1847b)의 146쪽, Fogg, 1990). Hooker는 민꽃식물학자 George Henry Kendrick Thwaites의 자문을 받아 이들 규조류가 식물체 임을 간파하여(Hooker(1844)의 503쪽), 규조류를 포함한 해양 식물플랑크톤의 생태학적 기능성에 대하여 처음으로 언급하였다.

식물플랑크톤이 해양동물의 궁극적인 먹이원이라는 학술논문이 연이어 발표되면서(Brooks, 1894; Gran, 1897), 과학적인 탐구를 위한 플랑크톤 정량분포 연구의 필요성이 대두되었다(Hensen, 1887). 결국, 정량 플랑크톤 생태학(quantitative plankton ecology)이 태동되었다(Brandt, 1905; Taylor, 1980). 그 후에 Hensen(1911)은 해양플랑크톤을 “표층으로부터 상당한 수심에 이르는 수직분포 연구”를 통해 이해할 수 있는 “바다의 혈액(dies Blut des Meer)”이라고 부르며, 해양생태계 구성분자로서 생태생리적 기능성에 대해 강조하였다.

2.3 해양생태계 모니터링과 식물플랑크톤의 종별 정량자료

2.3.1 종별 정량자료 연구의 시작

해양 식물플랑크톤의 종별 정량자료 값을 정확하게 구하기 위한 심도있는 연구는 1880년대 후반 Victor Hensen이 시작한 것으로 평가된다(Allen, 1919). 그는 1883년부터 1886년까지 독일 Kiel 연안에 대한 조사와 1885년 덴마크의 Romsoe 정점에서부터 영국의 외해 St. Kilda 군도에 이르는 연구 항해를 통해 채집된 플랑크톤 시료를 스스로 고안한 정량분석법으로 분석하였다(Hensen(1887)의 도판 I-IV 및 부록 I-III). 이 보고서에서 물속에 떠있는 모든 것을 가리키는 “Plankton”이란 용어를 처음 사용하여, Johannes Müller가 제시했던 용어인 “Auftrieb”를 대체하였다(Mills(2012)의 Part 1.1). 또한, 그는 독일의 기선인 National호를 이용하여 1889년 7월 중순부터 11월 초순까지 북대서양 전체를 “X”자로 가로지르는 연구항해 경로상의 정점에서 수행된 “Plankton Expedition” 사업을 주도하였는데(Hensen, 1892), 이 때 동원되었던 다양한 종류의 정량채집 시스템과 이를 이용하여 분석한 플랑크톤 종별 정량자료 등에 대하여 상세한 기록을 남겼다(Hensen, 1895). Plankton Expedition의 결과를 종합하여 구조류에서 어란 및 자치어에 이르는 다양한 플랑크톤 생물군에 대한 정량조사 자료를 보고(Hensen, 1911)할 때에도, 플랑크톤 네트를 이용한 시료채취 방법에 따른 개체군 추정 오차를 확률 분포에 기반하여 계산하는 과정을 설명하기도 하였다.

Plankton Expedition 보다 20여년 앞서서, 당시 프러시아 정부에 의해 1870년 창립된 Kiel Commission (Kommission zur wissenschaftlichen Untersuchung der deutschen Meere in Kiel, “Kiel 소재, 독일 바다의 과학적 탐사를 위한 위원회”)은 유용 수산생물의 생물학에 특히 중점을 두고(Meyer *et al.*, 1873), 프러시아 어획해역에 서식하는 동물과 식물의 양을 결정하는데 필요한 수심, 조위, 염분, 화학조성 등에 관한 정보를 수집하는 임무를 맡았다. 창립 직후인 1871년부터 Kiel Commission은 북해에서부터 시작하여 후에는 스웨덴 북쪽 해역에 이르는 범위까지 해양탐사를 수행하였다(Matthäus, 2010). 플랑크톤을 포함한 다양한 해양 요소에 대한 정량적인 연구를 선도하는 국제적인 협의체인 ICES (International Council for the Exploration of the Sea)가 독일, 영국, 덴마크, 핀란드, 노르웨이, 네덜란드, 러시아 및 스웨덴 등이 참가한 첫 회의를 1902년에 개최하게 된 역사적 배경에는 Kiel Commission의 전통이 자리하고 있으며(Matthäus, 2010; Mills, 2012), 이 시기를 전후하여 북유럽에서는 본격적으로 식물플랑크톤의 모니터링과 종별 정량 연구를 시작한 것으로 판단된다.

초기의 해양플랑크톤 종별 정량 연구에서 탁월한 업적을 남긴 연구자는 단연 독일의 Hans Lohmann일 것이다(Lohmann, 1903, 1908, 1911). 특히, 종별 생물량을 보다 완벽하게 결정하기 위한 현장채집 실험 결과를 적용하여(Lohmann, 1903), 1905년 4월부터 1906년 8월까지 Kiel Fjord 입구의 고정 정점에서 매주 4개 수층별로 각각 해수 54리터를 채취하여, 원심분리 및 여과농축 그리고 영양염 분석 등에 사용하였다(Lohmann, 1908). 이와 함께 병행하였던 플랑크톤 네트에 의한 채집까지 종합 정리하여 정량분석한 상세한 결과를 부록의 표-A와 표-B로 제시하였고, 일주 간격의 종별 정량변동 시계열을 도판 X~XVI으로 도시하였다(Lohmann, 1908). 나중에는 “nanoplankton”이라는 크기 계급을 새롭게 제안하여 1~20 μm (25 μm 이면 아주 큰 nanoplankton에 속한다 함) 크기의 플랑크톤을 별도로 구분하였으며, 원심분리법(150~300 ml의 시료에 1500 내외의 rpm을 적용)에 의한 농축으로 박테리아와 다양한 원생생물 등의 nanoplankton을 정량적으로 연구하였다(Lohmann, 1911). 수명과 증식속도를 고려할 때, 생태계 내에서 nanoplankton의 생물량(부피) “1”은 기타 원생생물의 “6” 및 다세포 플랑크톤의 “30”에 해당한다고 추산함으로써 nanoplankton의 중요성을 강조하였다(Lohmann, 1911).

2.3.2 해양생태계 모니터링과 플랑크톤의 종별 정량자료

과거의 장기적인 해양생태계 모니터링은 공간적인 방대함보다는 시간적인 지속성 및 주기성을 중시한 편이었으며

(Kraberg *et al.*, 2019; Zingone *et al.*, 2019), 모든 모니터링 자료의 정리 및 체계화는 시간과 공간을 초월한 상호비교를 생각하며 수행되었다. 오랜 역사를 가진 장기모니터링 정점은 대부분 와편모류와 규조류(돌말류)를 주된 대상으로 하였으나(O'Brien *et al.*, 2017), 최근에는 더 크기가 작은 원생생물까지 그 대상을 확대해 나가는 경향이 있다(Käse *et al.*, 2021). 더 나아가, 이제는 flow cytometry에서 underwater vision profiler (UVP)에 이르는 다양한 관찰 장치들이 동원되어, 매우 다양한 크기(1 μm ~1 cm 범위)의 플랑크톤을 대상으로 할 수 있게 되었으며, 인공위성에 장착하는 센서의 발달로 인하여 전 지구적으로 일정성을 갖는 정량적인 생태계 관찰을 눈앞에 두고 있다(Lombard *et al.*, 2019). 최근에는 공간적인 제한성을 갖는 관측정점 중심의 장기적인 모니터링 결과 자료를 집대성하고 통계학적 분석을 통해 상호 비교하여, 보다 광역적인 해양환경에 대한 변동성까지 파악할 수 있게 되었다(O'Brien *et al.*, 2017).

1) 초창기의 대표적인 장기모니터링 선례

해양 식물플랑크톤의 종별 정량 자료를 매일 생산하는 장기생태계 모니터링의 최초의 예는 아마도 1962년부터 시작된 독일 Schleswig-Holstein 주의 Helgoland 정점(54°11.3'N, 7°54.0'E)일 것이다(BAH, 2009). 북해 남동역을 차지하는 German Bight의 남측 소만인 Helgoland Bight에 있는 Helgoland에서는 이미 1873년부터 해양 표층 수온(sea surface temperature, SST)과 함께 표층 염분을 매일 오전 8시에 측정하였는데(BAH, 2009), 이는 전 세계적으로 SST 시계열 모니터링의 시초가 된 1826년도(Rayner *et al.*, 2006; Brohan *et al.*, 2006)와는 50년 미만의 시차에 해당한다. 해양 식물플랑크톤 모니터링을 시작한 1962년에는 기존 항목인 SST와 염분 이외에도 무기 영양염류(phosphate, nitrate, nitrite, ammonium)의 매일 측정을 추가하였으며, 1975년부터 주 3회 동물플랑크톤 네트(망목 150 μm 및 500 μm)로 경사예인 채집을 시작하였다(Wiltshire *et al.*, 2010).

Plankton Expedition (Hensen, 1911)과 같이 광범위한 해양역의 다수 정점에서 일회성 대규모 조사와는 달리, 대부분의 플랑크톤 종별 정량 장기 모니터링은 1~3개 규모의 고정점에서 소규모의 정기적인 조사를 반복하기 때문에 수십 년 이상 지속된 사례가 많다(O'Brien *et al.*, 2017). 이 가운데 1990년 이전부터 식물플랑크톤의 정량 장기 모니터링을 시작하여 현재까지 지속되고 있는 정점은 20여 개이며, 1990년대 이후에는 그 숫자가 급증하고 있다(O'Brien *et al.*, 2017). Helgoland 보다 더 일찍 식물플랑크톤 장기 모니터링을 시작한 정점은 Scripps Pier (Scripps Institution of Oceanography)로써(Frank, 2003), Winfred Emory Allen이 단독으로 1918년부터 1939년까지 주별로 시료채취 및 현미경 분석을 수행하였다(Hewes and Thomas, 2002). 그러나 1939년 이후에는 Scripps Pier의 모니터링이 중단되고(Allen, 1941), 연안역에 대한 승선 시료채취 프로그램으로 전환되었다(Allen, 1945).

1930년대에 소규모 해역의 어류플랑크톤 승선조사 사업은 1937년에 광역조사인 California Cooperative Sardine Research Program으로 발전하여, 1953년에 CALCOFI Program (California Cooperative Oceanic Fisheries Investigation)으로 개명되었으나, 전체적으로 보면, 캘리포니아 근해역에서 광역 해양생태계 승선조사 사업의 역사는 84년에 달한다(Hewitt, 1988). 비록 초기에는 일부 해역에 대한 어류플랑크톤 조사에 국한되었지만(Scofield, 1932; Ahlstrom, 1948), 1949년 이후부터 사계절 조사가 거의 매년 수행되었다(Hewitt, 1988). 아쉽게도, CALCOFI 사업에서 본격적인 식물플랑크톤의 종별 정량분석은 1993년에서야 시작되었다(Venrick, 1998; Ohman and Venrick, 2003). 그럼에도 불구하고, CALCOFI의 사례는 광역 해양생태계에 대한 승선조사 사업을 통해 다수 정점에서 채취한 계절별 시료를 대상으로 종별 정량분석을 30여 년간 지속하고 있다는 점에서, 1~3개의 소수 정점에 대한 여타의 많은 식물플랑크톤 단주기 모니터링의 장기적인 사업들과는 분명한 대조가 되므로 주목할 만한 경우라 할 수 있다(Venrick, 2015, 2021).

일본 Seto inland sea의 19개 정점에서 1973년부터 시작된 월별 연안생태계 장기모니터링 사업에서는 식물플랑크톤의 종별 정량분석도 병행되고 있다(Nishikawa *et al.*, 2010), 이는, Kasumigaura 담수호의 10개 정점에 대한 월별 생태계 조사 사업에서 1978년부터 지속된 식물플랑크톤의 종별 정량분석을 통한 장기모니터링 사례(Takamura and Nakagawa, 2012; Fukushima and Arai, 2015; National Institute for Environmental Studies, 2021)와 쌍벽을 이루는 50여년 역사의 장기 모니터링 성과로 평가할 수 있다(Ohara *et al.*, 2020; Nishijima *et al.*, 2021). 또한 북유럽 Baltic Sea의 8개 정점에서 1978 또는 1979년에 식물플랑크톤에 대한 장기적인 종별 정량 모니터링 사업이 시작되어(O'Brien *et al.*, 2017) 현재까지 지속되는 경우와 비교하더라도, 5년 이상 앞서는 시점에 Seto inland sea의 19개 정점에 대한 장기 모니터링이 시작되었다는 점은 주목할 만하다.

2) Helgoland 정점에서 식물플랑크톤 장기모니터링과 자료의 관리

최단주기(매일)로 장기간 식물플랑크톤의 종별 정량 모니터링을 현재까지 지속하고 있는 정점 가운데, Helgoland 정점은 단연 세계 최고 수준으로 평가할 수 있다(Alfred Wegener Institute, 2021a, 2021b). Helgoland 정점에서 1873년부터 매일 측정된 수온자료와 1962년부터 매일 채집된 식물플랑크톤 군집자료를 바탕으로, 40년간 1.1°C 정도의 온난화 때문에 돌말류의 출현일수는 변동이 없었으나 계절적으로 출현기간이 뒤로 밀려난 것으로 평가하는 등(Wiltshire and Manly, 2004), 장기적인 관점에서 식물플랑크톤의 종별 정량 자료가 기후변화의 평균적 추세뿐만 아니라 하계 최고 온도의 지속일수 변동추세 등을 반영할 수 있다는 심층 연구의 필요성을 제기하기에 이르렀다(Boersma *et al.*, 2016). 최근에는 광학현미경 관찰로 동정이 어려운 Helgoland 정점의 nano- 및 picoplankton에 대하여, NGS (next-generation sequencing)으로 18S rDNA의 V4 region의 염기서열을 분석하여, 이들 종류들의 빈번한 천이현상이 순계군집의 변동성에 큰 영향을 끼친다는 결과를 제시함으로써(Käse *et al.*, 2020), 이러한 요소가 Helgoland 정점의 모니터링에 추가되어야 함을 시사하였다(Metfies *et al.*, 2020; Käse *et al.*, 2021). 더 나아가 50년 동안 Helgoland 정점에서 일별로 식물플랑크톤 종별 정량자료를 분석하여 최근 온난화에 따라 식물플랑크톤 군집의 성장 유지기간이 길어지면서 증가/감소 기울기가 완화된 반면 누적 생물량은 크게 높아진다는 장기적인 추세를 도출하기에 이르렀다(Wiltshire *et al.*, 2015). Helgoland 정점의 식물플랑크톤 종별 정량자료가 더욱 더 중요하게 평가됨에 따라, 총 종 목록을 포함한 각종의 이미지 자료 등을 지속적으로 현행화(updating)하는 등의 보다 근본적 차원의 표준화 작업이 강화되고 있다(Kraberg *et al.*, 2015, 2019).

장기간의 자료 정리 및 관리가 체계적으로 지속된 플랑크톤 생태계 모니터링 사업의 결과물들은 해양환경 및 생태계의 50~100년에 걸친 장기적인 변화 연구에 매우 요긴하다(Wasmund *et al.*, 2008) 특히, 해양 식물플랑크톤의 종별 정량 자료는 다양한 측면에서 응용할 수 있는 환경반응 지시성을 내포하고 있다(Wasmund, 2017; Wasmund *et al.*, 2017). 이런 활용 및 응용을 뒷받침하기 위한 다수의 저명한 장기모니터링 사업에서는 온라인 접근이 가능한 방법으로 종별 정량자료를 공개하고 있으며(예, ICES Data Portal, 2021; PANGEA, 2021a, 2021b; Venrick, 2021 등), 이를 더욱 확산·공유하기 위하여 IOC-UNESCO International Group for Marine Ecological Time Series (IGMETS, 2021) 등의 국제적인 상호협조 체계를 조직, 운영하고 있다(O'Brien *et al.*, 2017). 이와 같이, 국가와 대양의 경계를 넘어서서 식물플랑크톤 종별 정량 자료를 객관적이고 과학적인 차원에서 상호 비교하려면, 가장 우선적으로 자료의 생산을 위한 다중적 작업 과정에서 공통적으로 적용할 수 있는 표준적인 방법론이 반드시 필요하게 된다(HELCOM COMBINE, 2017). 시공간에 따른 방법론의 불일치에 따라 발생하는 일정한 패턴의 격차를 보정하여, 비교 가능한 형태의 범용성 자료로 변환하는 차선책을 동원한다 하더라도 모든 차선책에서 유래한 보정자료에는 현장 자료의 참값과 비교할 때에 다소의 애매모호한 불확실성이 내재되어 있다.

2.4 해양 식물플랑크톤 자료의 QA/QC

2.4.1 식물플랑크톤 정량분석 방법의 탐구와 모니터링 자료의 질적 관리 필요성

해양환경 모니터링에서 정량적으로 측정 또는 분석한 결과 값은 대부분 수치 자료로 도출된다. 이 수치가 실제 현장의 참값에 비해 어느 정도의 오차 범위를 갖는지 추정하는 일은 자연현상에 대한 정확한 정보의 축적, 해석, 이해 등을 위해 매우 중요하다. 시공간적으로 서로 다른 시공점에서 얻은 측정값 또는 분석값 등은 방법론의 차이와 수행 연구자간 또는 동일 연구자의 능숙도 및 일관성의 차이 및 변동에 따라 피할 수 없는 다소의 수행 오차를 내포하게 된다(Wiltshire *et al.*, 2010; Kraberg *et al.*, 2019). 측정/분석 결과 수치와 참값과의 차이에 더하여 수행 시공점 간의 수행 오차까지 고려한다면, 생태계 장기 모니터링에서 특히, 식물플랑크톤의 종별 정량자료의 도출, 해석, 비교 등의 연구 작업 과정에서는 결과 수치의 질적 수준에 특히 유의할 필요가 있다.

고정 정점들에 대한 생태계 장기 모니터링이 시작되기 이전에 해양 식물플랑크톤의 종별 정량자료 값의 정확한 결정에 관한 선도적인 연구는 독일의 두 과학자인 Victor Hensen(1887, 1895, 1911)과 Hans Lohmann(1903, 1908, 1911) 등이 1880년대부터 시작한 것으로 평가된다(Allen, 1919). Hensen(1887)은 1883~1886년 독일 Kiel 연안에 대한 조사와 1885년 덴마크의 Romsø 정점에서 영국의 외해 St. Kilda 군도에 이르는 연구항해를 통해 채집된 플랑크톤 시료를 분석하였는데, 망목 50 μm 의 Müller gauze No.20으로 만든 플랑크톤 네트를 수직 예인하고, 예인거리와 실제 여과율 추산치를 적용하여 시료의 계수치를 실제 바다 속의 플랑크톤 농도로 환산하였다(Allen, 1919; Mills, 2012). 그 후 Lohmann(1903)은 미세한 크기의 Nanoplankton 상당 부분이 Müller gauze No.20의 망목을 빠져 나간다는 사실을 확인하고, 소량의 Nanoplankton 시료를 원심분리하여(일반적으로 1100~1500 rpm에서 6~8분 정도가 적절하다고 함. Lohmann(1908)의 181-190쪽) 보다 정확하게 정량분석 할 수 있음을 입증하고 이를 새로운 정량 연구법으로 제시하였다(Lohmann, 1908, 1911).

해수 시료 속에 있는 플랑크톤 양을 보다 더 정확하게 확인하기 위하여, 원심분리법(시료 10 cc)과 희석배양법(시료 0.5cc)을 배양액 1500cc에 섞어, 66~70개의 배양 플라스크에 나누어 배양 결과를 비교한 Allen(1919)은 원심분리법 역시 실제 값을 3배 이상 심하게 과소평가된다 하였다. 그는 더 나아가, 희석배양 실험에서 현미경 관찰로도 종의 구분이 애매한 경우에는 불가피하게 한 종으로 과소평가하게 되었으므로, 실제 해수 속의 플랑크톤 총 세포를 절대적으로 파악할 수 있는 어떤 방법도 당시로서는 존재하지 않는다고 하였다(Allen, 1919). 정량적인 플랑크톤 연구가 해양연구의 중요한 관건이라는 생각으로, Steemann(1933)은 칩전방식의 도립현미경을 이용하면(Utermöhl, 1927, 1931) 원심분리법(Lohmann, 1908)으로 확보한 플랑크톤의 종별 정량 자료와 유사하거나 보다 더 정확한 결과를 도출할 수 있음을 실험적으로 입증하였다. 이후 Utermöhl의 칩전법은 더욱 보완 개선되어(Lund *et al.*, 1958; Taylor *et al.*, 1986), 식물플랑크톤 정량연구에 널리 활용되고 있다.

독일의 Helgoland 정점에서 수온, 염분 등의 일별 장기모니터링은 1873부터 시작되었고(BAH, 2009), 식물플랑크톤은 용존 무기 영양염류와 함께 1962년부터 일별 조사로 진행되고 있으며, 네트 채집에 의한 주 3회 동물플랑크톤 모니터링은 1975년에 새롭게 추가되어(Wiltshire *et al.*, 2010), 최단주기의 최장기간 플랑크톤 생태계 모니터링 사례로 손꼽히고 있다. Helgoland 정점 장기모니터링의 결과를 활용하여, 플랑크톤 생태계의 변동과 중장기적인 환경의 변동성과의 관계를 좌우하는 핵심요인을 규명하려면(Wiltshire *et al.*, 2015), 식물플랑크톤(Wiltshire and Dürselen, 2004), 용존 무기영양염(Raabe and Wiltshire, 2009), 동물플랑크톤(Boersma *et al.*, 2015) 등의 각종 자료에 대한 질적관리(QA/QC) 상태가 가장 우선해야 함을 확인하였다.

실제로 Helgoland 정점의 식물플랑크톤 자료는 2004년까지만 해도 즉시 활용 가능한 수준으로 목록화되거나 질적 관리가 잘되어 있지 않았다(Wiltshire and Dürselen, 2004). 이를 개선하기 위하여 시료의 즉시 분석, 분석 수행자의 종동정 및 계

수 방법론에 대한 품질관리 프로그램 이수, 정확한 분류 평가를 위한 살아있는 개체 정밀 관찰 등 8가지의 종합적인 대책이 제안되었다(Wiltshire and Dürselen, 2004). 따라서, Helgoland 정점에서 식물플랑크톤의 자료에 대한 본격적인 질적관리(QA/QC)는 Helgoland에서 일별 종별 정량 모니터링이 처음 시작된 1962년 이후 40여년 만에 비로소 착수된 것으로 평가된다.

2.4.2 식물플랑크톤 종별 정량 자료의 질적 관리를 위한 초기의 국제적인 노력

1957년 ICSU (International Council of Scientific Unions) 최초의 다학제적 지속체로 출범한 Special Committee on Oceanic Research (SCOR, 후에 Scientific Committee on Oceanic Research로 개명됨. Revelle, 1957; Wolff, 2010)는 다양한 Working Group을 통해 지난 55년간 무려 147개 주제에 대한 활발한 해양과학 학술활동을 전개해 오고 있다(<https://scor-int.org/work/groups/>). 특히 SCOR의 Working Group 33 (Title: Phytoplankton Methods, Chair: Karl Banse, USA)에서는 해양 식물플랑크톤 자료의 정도 관리에 관한 국제적인 논의를 1969년 처음 시작하여(ICSU, 1969a; 1969b), 해양 식물플랑크톤의 종별 정량연구 방법론 발전에 크게 기여하였다. 1974년에는 첫 결실인 UNESCO 해양과학 기술보고서 18편(Banse, 1974)이 출판되었는데, 여기에는 정도관리를 위한 선제적인 제안사항으로 식물플랑크톤 정량 자료의 상호비교, 식물플랑크톤 분류-정량 교육과정, 각국 데이터베이스에 생산된 원자료의 기탁 권고 등이 포함되어 있었다. 해당 기술보고서는 UNESCO의 해양학 방법론의 전문연구서적 제6편인 ‘Phytoplankton Manual’ 출판의 실마리가 되었다(Sournia, 1978). 뒤이어, 유사한 맥락의 참고자료인 Manual on Harmful Marine Microalgae (Hallegraeff *et al.*, 1995, 2004) 및 Microscopic and Molecular Methods for Quantitative Phytoplankton Analysis (Karlson *et al.*, 2010- IOC 매뉴얼 및 가이드 제 55편) 등이 시차를 두고 새롭게 출판되었다. Manual on Harmful Marine Microalgae는 처음에 IOC 매뉴얼 및 가이드 제 33편(Hallegraeff *et al.*, 1995)으로 출판되었다가, 개정판은 UNESCO의 해양학 방법론의 전문연구서적 제11편(Hallegraeff *et al.*, 2004)으로 출간되었다. Phytoplankton Manual (Sournia, 1978) 후에 출판된 관련서적 3권 모두 1991년의 ICES-SCOR Working Group 97 (Physiological Ecology of Harmful Algal Blooms, Chair: Donald Anderson, USA; UNESCO, 1995), 1994년의 ICES-IOC WG HADB (Working Group on Harmful Algal Bloom Dynamics, Chair: Beatriz Reguera; ICES, 1994), 2005년의 ICES-IOC WKNCT (ICES/IOC Workshop on New and Classic Techniques for the Determination of Numerical Abundance and Biovolume of HAB-Species- Evaluation of the Cost, Time-Efficiency and Intercalibration Methods; ICES, 2006) 등의 국제적인 연구그룹의 협업으로 완성된 출판물이다.

SCOR은 IOC (Intergovernmental Oceanographic Commission), ICES (International Council for the Exploration of the Sea), IGBP (International Geosphere-Biosphere Program) 등과 같은 정부간 또는 비정부간 국제기구들과 협업하고 있다(<https://ioccg.org/about/scor.html>). 처음에는 WGPE (ICES Working Group on Phytoplankton Ecology)로 시작하여 2010년 재조직된 WGPME (ICES Working Group on Phytoplankton and Microbial Ecology, <https://wgpme.net/wgpme-members/2010-meeting>)와 1991년 출범한 WGZE (ICES Working Group on Zooplankton Ecology, Wiebe *et al.*, 2016)는 ICES의 플랑크톤 관련 Working Group으로 종별 정량 연구를 포함한 해양플랑크톤 생태학 분야의 다양한 주제를 다루고 있다(O’Brien *et al.*, 2011, 2012). 특히, WGPME에서는 유럽 해역의 여러 정점에서 1950년대 이후의 장기생태계 모니터링 결과 가운데 해양 식물플랑크톤과 미생물플랑크톤에 관한 상태 보고서인 “ICES Phytoplankton and Microbial Plankton Status Report 2009/2010”를 출간하였는데, 소위 “WGPME 시계열 분석법”으로 장기간의 시계열 자료를 표준적으로 분석하고 도표화하였다(O’Brien *et al.*, 2012).

이와 같은 식물플랑크톤 정량자료의 질적 관리를 위한 국제적 공동 노력의 결과로, 협업 국가에 소속된 많은 실험실들이

다양한 정량기법에 대한 능숙도 관련의 국가인증 자격을 갖추고 있다(Karlson *et al.*, 2010). 이 국가 인증에는 각 기준 항목 별로 능숙도 수준 각각에 따른 자료 생산과정의 추적 및 재현 가능성을 확보하기 위한 프로토콜 개발이 포함되며, 이러한 인증 체계를 확산하기 위하여 보다 많은 실험실에서 국제적으로 인정받는 실험실 간의 Ring Test를 통한 상호 비교 (inter-laboratory comparisons) 사업에 참여할 것을 권장하고 있다(Karlson *et al.*, 2010).

2.4.3 식물플랑크톤 종별 정량 자료에 대한 QA/QC scheme의 정착

1) 영국의 해양생물자료 국가품질관리계획 (UK NMBAQC)

1994년에 출범한 영국의 NMBAQC (UK NMBAQC, National Marine Biological Analytical Quality Control Scheme; 2016년에 North East Atlantic Marine Biological Analytical Quality Control Scheme으로 개명함)는 영국의 환경모니터링 주무당국을 대신하여 관련 해양생물 자료의 품질관리를 위한 계획으로써, 현재 영국과 아일랜드를 위시한 북대서양 연안국들의 Competent Monitoring Authorities(주무당국, CMAs) 및 환경보전기구 등에 소속된 실험실들이 참여하고 있다. 이 계획에는 7가지 해양생물 관련 대상 구성요소가 있는데, Epibiota, Fish, Invertebrates, Macroalgae, Particle Size Analysis, Zooplankton과 함께 Phytoplankton이 포함되어 있다(<http://www.nmbaqcs.org/scheme-components/>).

그 기원을 살펴보면, 영국의 National Marine Monitoring Programme (NMMP) (WILDCOMS, 2014)에서 해양생물 및 화학 자료의 품질 보증 및 분석 품질 관리 문제를 논의하기 위해 구성된 위원회들 가운데, NMMP의 MPMMG (Marine Pollution Monitoring Management Group)에 제출된 1992/3년차 보고서를 통해 해양생물 분야를 담당할 National Marine Biological AQC Coordinating Committee가 신설되어(BEQUALM/NMBAQC Scheme, 2005), 그 이듬해인 1994년도에 NMBAQC가 출범하게 되었다(NMBAQC Coordinating Committee, 1995). 초기의 연례보고서에는 포함되지 않았으나, 12년차 (2005/2006) 보고서(NMBAQC Coordinating Committee, 2007)에는 처음으로 Section-C에 식물플랑크톤이 구성요소로 보고되었다. 구체적으로 식물플랑크톤 종 동정, 세포 농도 계수 등의 수행을 평가하고 이를 분석하여 숙련도 검정 및 종 동정 검정 등을 도출한 과정을 보고하였다(NMBAQC Coordinating Committee, 2007).

2) IPI (International Phytoplankton Intercomparison)

SCOR의 Working Group 33을 통한 해양 식물플랑크톤 자료의 정도 관리에 관한 국제적인 논의를 결과로 출판된 UNESCO의 해양학 방법론의 전문연구서적 제6편인 ‘Phytoplankton Manual’ (Sournia, 1978)의 제안사항에는 특히 식물플랑크톤 정량 자료의 상호비교, 식물플랑크톤 분류-정량 교육과정, 각국 데이터베이스에 생산된 원자료의 기탁 권고 등이 포함되어 있었다. 이 가운데 식물플랑크톤 정량 자료의 국제적인 상호비교를 처음 시도한 것은 아마도 2005년 9월 아일랜드의 Marine Institute일 것이다(NMBAQC Coordinating Committee, 2007). 이후 국제적인 상호비교 및 검정을 통한 해양 식물플랑크톤 자료의 정도 관리 노력은 2015년까지 NMBAQC-BEQUALM (Biological Effects Quality Assurance in Monitoring) 산하의 활동으로 지속되었다(NMBAQC Coordinating Committee, 2017). BEQUALM 프로그램이 2014년에 종료되어, 2016년에는 IPI (International Phytoplankton Intercomparison)로 이 상호 비교검정 프로그램의 이름이 변경되었는데(NMBAQC Coordinating Committee, 2018), 영국의 NMBAQC와 연계된 IOC 유해조류 과학 및 소통 센터(덴마크 소재)와 협동으로 Marine Institute (아일랜드 소재)가 업무를 담당하였다. 2017년 참가자들은 50 ml 해수시료에 배양체를 첨가하여 고정한 시료 3개에 대하여 종 동정과 계수 등을 연습하고, 사진이나 도표를 보고 종 동정을 하도록 한 온라인 HAB 퀴즈에도 참여하였다. 총 45개 실험실에서 91명의 분석자가 연습에 참여하여 전원이 시료분석 결과를 제출하였고, 84명은 HAB 퀴즈를 완결하였다(NMBAQC Coordinating Committee, 2018).

그간 Marine Institute (아일랜드 소재)가 담당해 오던 업무를 2021~2025년에는 스페인의 University of Las Palmas de Gran Canaria (ULPGC)의 Harmful Algal Observatory (OCHAB)가 NMBAQC와 연계된 IOC 유해조류 과학 및 소통 센터 (덴마크 소재)와 협동으로 수행할 것이다 (<https://www.iphyi.org/>). ULPGC의 OCHAB는 해양 식물플랑크톤의 세포농도 및 종조성과 관련된 능숙도 시험 계획에 대해서도 2022년에 ISO 17043 인증을 받게 된다. 참가자의 모든 자료는 ISO 13528에 제시된 통계학적 방법에 따라 분석하는데, 통계데이터베이스 S/W인 QuoData의 ProLab Plus를 사용한 통계적 평가를 수행하고 있다(<https://www.iphyi.org/>). IPI는 2021년에 3월부터 등록을 받아 9월 말까지 시험 시료와 쿼즈를 보내고 11월까지 시험자의 결과를 제출하여, 2022년 1월의 상호보정 보고서 작성 및 워크숍(1월 5일~3월 1일) 등의 사업을 추진 중이다 (Salas, 2021).

2.5 해양 식물플랑크톤 모니터링과 자료 QA/QC의 국내 현황

2.5.1 국내 해양자료에 대한 공적인 QA/QC의 시작

수계의 오염방지 등 환경보전을 위한 우리나라 최초의 법인 오물청소법(법률 제914호)이 1961년 제정된 이래, 공해방지법(법률 제1436호, 1963년), 환경보전법(법률 제3078호, 1977년) 등으로 국가의 환경정책 관련 법이 발전해 왔다. 전적으로 해역의 오염문제를 관리하기 위한 최초의 법률인 해양오염방지법(법률 제3079호, 1977)에 해양환경 보전을 목적으로 시행하는 적극적이고 구체적인 의무와 권한 사항이 명시됨으로써, 상시적이고 주기적인 해양환경 조사가 필요하게 되었다. 약 30년이 지난 2007년에 제정된 해양환경관리법(법률 제8260호)에는 해양환경 보전 및 관리를 위한 조치로써 해양환경기준 및 자료 관리와 해양환경관리종합계획 등이 포함되어 있어, 국가의 체계적인 해양환경 조사 및 관리에 대한 구체적이고 실질적인 법적 발전을 이루게 되었다. 즉, 동법 제8조부터 제13조까지 해양환경기준, 해양환경측정망, 해양환경공정시험기준, 해양환경정보망, 해양환경 측정 및 분석기관의 정도관리, 측정 및 분석능력인증 등 해양환경기준 및 자료관리의 시행을 위한 구체적인 조항들이 있어서, 자료의 정도관리 및 능력인증 등 해양자료에 대한 QA/QC가 매우 중요함을 법제화한 것으로 평가된다.

1990년 제정된 환경정책기본법(법률 제4257호)에서는 해양환경과 해양오염을 정의하고(제3조), 국가가 환경오염과 그 위해를 예방하며 환경을 적정하게 관리·보전하기 위하여 환경보전 계획을 수립하고, 이를 시행할 책무를 진다고 하였다(제4조). 2019년 일부 개정된 동법(법률 제16619호)에는 국가환경종합계획을 보다 구체화하였는데, 해양의 이용 등 환경변화 여건, 해양환경의 보전, 방사능 오염물질의 관리, 기후변화 등 해양관련 사항들을 명확히 하였다. 또한, 타법 개정 법률인 해양수산발전기본법이 2019년 제정(법률 제16570호)되었는데, 국가는 해양환경·해양수산자원 및 해양생태계를 보전할 의무가 있다고 하였으며(제5조), 제17조의 해양과학조사 및 기술개발 등에서는 정부가 조사방법, 정보표준화, 국가해양관측망 운영, 해양과학기술개발 등에 관한 세부계획 및 시행을 이행하도록 하였다. 더 나아가, 2017년 제정된 해양환경 보전 및 활용에 관한 법률(또는 해양환경보전법, 법률 제14746호)에는 해양환경종합계획의 수립·시행 등 해양환경정책 추진에 필요한 기본 사항에 추가하여 해양환경평가체계 구축 및 기후변화대응 시책의 수립 등도 포함되어 있다.

2.5.2 일반 해양관측, 측정, 분석 자료에 대한 QA/QC현황

우리나라 영해에서 획득한 해양 자료 및 정보를 수집·관리하여 국내외에 배포하고 해양자료의 국제교류를 담당하는 한국 해양자료센터(Korea Oceanographic Data Center, KODC) 홈페이지(<http://www.nifs.go.kr/kodc/index.kodc>)에는 국립수산과학원, 국립해양조사원, 기상청 등의 정부기관 및 해양환경공단과 한국해양과학기술원 등에서 제공하는 6대 분야의 32가지 자료에 대한 제공체계가 연동되어 있다. KODC는 ISO 9001:2015 인증으로 국제 수준의 제공자료 품질경영시스템을

구축함으로써 전체 유형의 제공 자료에 대한 통일된 품질관리(QC) 체계를 수립하여 시행해 나가고 있다(예: 국립수산물관리원 실시간 해양환경 어장정보 시스템, http://www.nifs.go.kr/risa/risa_Summary.risa).

해양과학조사법(법률 제17750호) 제22조에 따라 관리기관으로 지정된 국립해양조사원은 해양과학 조사자료 관리기관에 관한 업무 규정에 따라 해양과학 조사 자료에 대한 관리업무를 수행하고 있으며(국립해양조사원 예규 제141호, 2016), 이외에도 관측 자료의 분석 및 품질처리 업무도 포함되어 있다(https://www.khoa.go.kr/khoa/intro/organization/depttree/select_DepartmentTree_List.do). 바다누리 해양정보서비스 사업의 시스템 구성(<http://www.khoa.go.kr/oceangrid/khoa/intro/config.do>)에서도 해양통합DB에 2차 QC 자료가 입력되고 있음을 확인할 수 있다. 또한, 개별 기관 차원에서도 시계열 자료의 국제수준 품질관리(민 등, 2020), 기존 관측시스템의 발전 방향(이 등, 2010) 등의 사례를 포함하여 자료 품질의 향상을 위한 다양한 연구와 개발이 지속되고 있으나, 식물플랑크톤을 포함한 해양생물 정량자료에 대해서는 아직 초기적인 단계에 머물러있는 실정이다.

2.5.3 국내 해양환경의 수질, 퇴적물, 해양생물 자료에 대한 QA/QC

2011년에는 해양환경관리법 제12조, 제13조, 동법 시행령 제7조, 동법 시행규칙 제7조에 따라 해양환경 측정·분석기관의 정도관리(QA/QC)를 위한 평가방법, 평가분야, 평가기준 및 운영기준 등에 관한 사항을 규정한 해양환경관리법에 따른 정도관리 규정(국토해양부고시 제2011-957호, 2011)이 제정되어, 해양자료의 정도관리(QA/QC)를 수행하기 위한 최초의 규정이 되었다. 현행 규정(해양수산부 고시 제2015-211호, 일부개정)의 제5조(평가분야)에는 평가항목을 해수수질, 해저퇴적물, 해양생물로 정하고 각 항목에 대한 시험방법은 해양환경공정시험기준(해양환경관리법 제10조)에 따르는 것을 원칙으로 하였다. 해양환경관리법 제10조에 따라, 해양환경 상태를 조사·평가함에 있어서 그 정확성과 통일성 확보에 필요한 사항을 규정한 해양환경공정시험기준(국토해양부고시 제2008-0호)은 2008년 제정된 이래 2020년까지 5차례의 일부 개정을 거쳐 현행의 해양환경공정시험기준 고시(해양수산부 고시 제2020-143호, 일부개정)로 발전하였다. 해양환경관리법 시행령 제31331호(2021. 12. 29., 일부개정)의 시행에 따라 현행 고시는 공정시험기준의 제개정에 관한 제2장을 포함하여 신규 제정(국립수산물관리원 고시 제2021-06호, 2021. 05. 18.) 중이다.

신규 제정안 제2조에서 해수, 해저퇴적물, 해양생물, 해양폐기물 등의 4 종류 매체별 공정시험기준을 별표 1~4로 정하였다. 이 가운데 별표 3이 해양생물의 공정시험기준인데, 이 기준의 제2장(시료의 채취 및 보관), 제3장(분석자료의 통계처리와 표현방법) 및 제4장(항목별 시험방법)의 제1~2항 등에 플랑크톤의 종별 정량 자료와 일부 관련된 시험기준이 언급되어 있을 뿐, 대부분의 시험항목은 해양동식물 시료 속의 중금속 및 잔류성 오염물질 농도 그리고 해양 동식물 종을 이용한 해양생태 독성 등이다.

해양환경공정시험기준 고시 별표 1 및 2에 제시된 해수 및 퇴적물 공정시험기준에 대한 능숙도를 3년마다 시험하는 측정·분석기관의 정도는 해양환경관리법(법률 제17007호, 2020, 타법개정) 제12~13조에 따라 관리되고 있으며, 세부사항은 해양환경관리법 시행령(대통령령 제31654호, 2021, 일부개정) 제7~8조 및 해양환경관리법 시행규칙(해양수산부령 제466호, 2021, 타법개정) 제7~8조에 따르고 있다. 정도관리 시행을 위한 보다 상세한 사항은 해양환경관리법에 따른 정도관리 규정(해양수산부 고시 제2015-211호, 2015, 일부개정)에 명시되어 있다.

이상의 모든 법령 체계에서 공통적으로 정도관리를 위한 평가대상 항목을 해수수질, 해저퇴적물, 해양생물 등의 3개로 정하였으나, 이 가운데 해수수질과 해저퇴적물 항목에 대하여는 상당수준의 공적인 정도관리가 지속되고 있다. 반면에, 해양생물에 대한 정도관리는 부분적으로 수행되고 있는 실정이며, 그나마도 생물종별 정량자료에 대한 정도관리는 매우 초보적인 단계에 머물러있다.

3. 우리나라 해양식물플랑크톤 정량자료의 QA/QC 발전 방향

해양환경관리법 제12와 제13조에 따라 규정된 해양환경자료의 공적인 정도관리를 위한 최종 기준인 해양환경공정시험기준 고시의 제2장에서 정한 해수, 퇴적물, 해양생물, 해양폐기물 등에 대한 공정시험기준은 매우 중요한 역할을 하고 있다. 이 고시의 “별표 3”이 해양생물의 공정시험기준인데, 이 “별표 3”에는 해양생물의 종별 정량자료를 정도관리하기 위한 구체적인 시험 기준이 거의 없다. 즉 제2장(시료의 채취 및 보관)과 제3장(분석자료의 통계처리와 표현방법)에 정량자료 생산 단계 전과 후의 과정에 대한 기준은 있으나, 제4장(항목별 시험방법)의 제1~2항 등의 식물플랑크톤 색소분석에 관한 내용을 제외하면, 종별 정량 자료의 생산을 위한 상세한 기준에 대한 내용은 거의 없는 실정이다.

실제로 해양생물에 대하여 종별 정량자료를 정도관리하기 위한 구체적인 시험 기준을 법제화하는 일은 매우 복잡한 과정을 거쳐야 하는 과제일 것이다. 더구나, 해양생물의 다양성과 시공간적 분포의 변동성을 감안한다면, 과거 유럽지역에서 영국의 해양생물자료 국가품질관리계획(UK NMBAQC)을 다국적 성격의 North East Atlantic Marine Biological Quality Control Scheme으로 개명해 가면서 다년간 개척발전시켜온 점을 기억할 필요가 있다. 그럼에도 불구하고, 국내에서는 이미 개개의 조사연구 기관차원에서 해양생물의 종별 정량분석 자료의 품질관리에 대한 계획이나 초기 실행을 시도하고 있는 사례들이 점차 생겨나고 있다. 이러한 움직임은 국가기관을 주축으로 하는 다양한 해양자료의 공적관리 체계구축 추세에 따라, 해양생물 정량자료 역시 준 실시간적 공유가 필요하기 때문에 더욱 빠른 속도로 확대될 것이다.

결론적으로, 우리나라 해양식물플랑크톤 종별 정량 자료의 품질관리(QA/QC) 발전을 위해서는 우선적으로,

- (1) 해양환경공정시험기준 고시의 “별표 3(해양생물)”의 개선으로, 제2항(시료의 보관방법)에 언급된 생물분류 전문가에 대하여 실행 가능한 정의를 보완하고,
- (2) 해양생물분류 자료의 정도관리 능력을 갖춘 생물분류 전문가에 대한 <질적 수준 기반, 전문가 등급별> 전문성 세부기준 설정 및 관련 숙련도평가를 위한 표준물질의 제작, 관리, 분석결과 평가에 대한 법적 절차 확립하여,
- (3) 해양환경공정시험기준 고시의 “별표 3(해양생물)”의 “제3항(대장균군)”에 준하는 수준의 시험방법이 다양한 해양생물군 각각에 대하여 신규의 별도 항목으로 추가되고,
- (4) 해양환경 법령 체계 전반에 <해양생물> 요소를 “실행 가능한” 형태로 제고하여 합리적으로 보완하는 일들이 필요하다.

사 사

이 연구는 전북씨그랜트사업(KIMST-20170353), 한국연구재단(NRF-2019R1I1A3A01058442), (주)지오시스템리서치의 지원으로 수행되었습니다. 또한 논문을 세심하게 검토해 주신 군산대학교 권봉오 교수님께 감사드립니다.

참고문헌(References)

- 민용침, 정진용, 장찬주, 이재익, 정종민, 민인기, 심재설, 김용선, 2020. 해양과학기지 시계열 관측 자료 품질관리 시스템 구축: 국제 관측자료 품질관리 방안 수온 관측 자료 시범적용과 문제점. *Ocean and Polar Research*, **42**: 195-210.
- 이준수, 서영상, 고우진, 황재동, 윤석현, 한인성, 양준용, 송지영, 박명희, 이근중, 2010. 운용해양시스템을 위한 한국정선 해양관측시스템 발전방향. *해양환경안전학회지*, **16**: 249-258.
- Agardh, C.A., 1824. *Systema Algarum*. Litteris Berlingianis, Lundae.
- Ahlstrom, E.H., 1948. A record of pilchard eggs and larvae collected during surveys made in 1939 to 1941. U.S. Wildl. Serv. Spec. Sci. Rep. Fish. SSRF-54., 82 pp.

- Alfred Wegener Institute, 2021a. Helgoland Roads Phytoplankton. Alfred Wegener Institute for Polar and Marine Research (Helmholtz centre). (<https://www.awi.de/en/science/biosciences/shelf-sea-system-ecology/working-groups/long-term-observations-lto/helgoland-roads-phytoplankton.html>).
- Alfred Wegener Institute, 2021b. Ecological long-term research at Helgoland. Alfred Wegener Institute for Polar and Marine Research (Helmholtz centre). (<https://www.awi.de/en/science/biosciences/shelf-sea-system-ecology/working-groups/long-term-observations-lto.html>).
- Allen, E.J., 1919. A contribution to the quantitative study of plankton. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, **12**(1): 1-8.
- Allen, W.E., 1941. Twenty years' statistical studies of marine plankton dinoflagellates of Southern California. *The American Midland Naturalist*, **26**(3): 603-635.
- Allen, W.E., 1945. Occurrences and abundances of marine plankton diatoms offshore in Southern California. *Transactions of the American Microscopical Society*, **64**: 21-24.
- Banse, K., 1974. A review of methods used for quantitative phytoplankton studies. Final Report of SCOR Working Group 33, pp. 1-27. (Unesco Tech. Pap. mar. Sci. 18.)
- Anon., 1703. Two letters from a gentleman in the country, relating to Mr. Leuwenhoek's letter in transaction, No. 283. Communicated by Mr. C. Phil., *Trans. Royal. Soc.*, **23**(288): 1494-1501.
- BAH., 2009. Helgoland time series from 1873 to 1893. *Pangaea*. (<https://doi.org/10.1594/PANGAEA.711017>)
- Bainbridge, R., 1957. The size, shape and density of marine phytoplankton concentrations. *BioI. Rev.*, **32**: 91-115.
- BEQUALM/NMBAQC Scheme, 2005. Information starter pack 2004/2005., 7 pp.
- Boersma, M., N. Grüner, N.T. Signorelli, P.E. Montoro González, M.A. Peck and K.H. Wiltshire, 2016. Projecting effects of climate change on marine systems: is the mean all that matters? *Proc. R. Soc., B* **283**: 20152274.
- Boersma, M., K.H. Wiltshire, S.M. Kong, W. Greve and J. Renz, 2015. Long-term change in the copepod community in the southern German Bight. *J. Sea Res.*, **101**: 41-50.
- Brandt, K. 1905. On the production and conditions of production in the sea, Appendix D, 1-12. *Conseil international permanent pour l'Exploration de la Mer, Rapports et Proces-Verbaux des volume III*.
- Brohan, P., J.J. Kennedy, I. Harris, S.F.B. Tett and P.D. Jones, 2006. Uncertainty estimates in regional and global observed temperature changes: A new data set from 1850. *J. Geophys. Res.*, **111**: D12106.
- Brooks, W.K., 1894. The origin of the food of marine animals. *Bull. U.S. Fish. Comm.* 1893, **13**: 87-92.
- Collingwood, C., 1868. Observations on the microscopic alga which causes the discolouration of the sea in various parts of the world. *Trans. Micr. Soc.*, n.s., **16**: 85-92.
- De Kruijff, P., 1926. *Microbe Hunters. A Harvest/HBJ Book.* Harcourt Brace Jovanovich, Publishers. San Diego, New York, London. 175 pp.
- Dobell, C., 1932. *Antony van Leeuwenhoek and his 'Little Animals'.* John Bale Sons & Danielsson Ltd, London, 435 pp.
- Dyomin, V.V., I.G. Polovtsev, A.Yu. Davydova and A.S. Olshukov, 2019. Digital holographic camera for plankton monitoring. *Proc. SPIE 10944, Practical Holography XXXIII: Displays, Materials, and Applications, 109440L* (1 March 2019), SPIE OPTO, 2019, San Francisco, California, United States.
- Dyomin V., A. Davydova, S. Morgalev, N. Kirillov, A. Olshukov, I. Polovtsev and S. Davydov, 2020. Monitoring of plankton spatial and temporal characteristics with the use of a submersible digital holographic camera. *Front. Mar. Sci.*, **7**: 653.
- Ehrenberg, C.G., 1830. *Organisation, systematik und geographisches Verhältniss der infusionsthierchen. Zwei Vorträge, in der Akademie der Wissenschaften zu Berlin gehalten in den jahren 1828 und 1830.* Berlin, Druckerei der Königlichen akademie der wissenschaften. 108 pp.
- Falkowski, P., 2012. Ocean Science: The power of plankton. *Nature*, **483**: S17-S20
- Fogg, G.E., 1990. Our perceptions of phytoplankton: an historical sketch the first Founders' Lecture, *British Phycological*

- Journal, **25**(2): 103-115.
- Fokin, S.I., 2004. A brief history of ciliate studies (late XVII - the first third of the XX century). *Protistology*, **3**(4): 283-296.
- Franks, P., 2003. A century of phytoplankton research at scripps. *Oceanography*, **16**(3): 60-66.
- Fukushima, T. and H. Arai, 2015. Regime shifts observed in Lake Kasumigaura, a large shallow lake in Japan: Analysis of a 40-year limnological record. *Lakes and Reservoirs: Research and Management*, **20**: 54-68.
- Gran, H.H., 1897. Protophyta: Diatomacea, Silicoflagellata and Cilioflagellata. The Norwegian North-Atlantic Expedition 1876-1878, Botany, 1-36.
- Gran, H.H., 1912. Pelagic plant life. Chapter 6 (pp. 307-386) in: *The Depths of the ocean*, edited by Murray J. and J. Hjort, MacMillan, London (reprinted Cramer J., Weinheim, 1965).
- Hallegraeff, G.M., A.D. Anderson and A.D. Cembella, 1995. Manual on harmful marine microalgae. IOC Manuals and Guides 33, UNESCO, Paris, 551 pp.
- Hallegraeff, G.M., D.M. Anderson and A.D. Cembella, 2004. Manual on harmful marine microalgae. Monographs on oceanographic methodology 11, UNESCO, Paris, 793 pp.
- Hawkesworth, J., 1773a. An account of the voyages undertaken by the order of His present Majesty for making discoveries in the Southern hemisphere, and successively performed by Commodore Byron, Captain Wallis, Captain Carteret, and Captain Cook, in the Dolphin, the Swallow, and the Endeavour: Drawn up from the journals which were kept by the several commanders, and from the papers of Joseph Banks, esq. by John Hawkesworth in three volumes. Volume I. (410 pp.), London.
- Hawkesworth, J., 1773b. An account of the voyages undertaken by the order of His present Majesty for making discoveries in the Southern hemisphere, and successively performed by Commodore Byron, Captain Wallis, Captain Carteret, and Captain Cook, in the Dolphin, the Swallow, and the Endeavour: Drawn up from the journals which were kept by the several commanders, and from the papers of Joseph Banks, esq. by John Hawkesworth in three volumes. Volume III (pp. 411-799), London.
- HELCOM COMBINE, 2017. Annex C-6: Guidelines concerning phytoplankton species composition, abundance and biomass. In: PART C programme for monitoring of eutrophication and its effects, manual for marine monitoring in the COMBINE programme of HELCOM. 361 pp. (<https://helcom.fi/media/publications/Manual-for-Marine-Monitoring-in-the-COMBINE-Programme-of-HELCOM.pdf>)
- Hensen, V., 1887. Ueber die Bestimmung des Planktons oder des im Meere treibenden Materials an Pflanzen und Thieren. Funfter Bericht der Kommission zur wissenschaftlichen Untersuchung der deutschen Meere in Kiel für die Jahre 1882-1886, V. Bericht Jahrgang XII-XVI, 108 pp.
- Hensen, V., 1892. Entwicklung des Reiseplans. In: Reisebeschreibung, Edited by Otto Krümmel, der Plankton-Expedition, pp. 1-17., Ergebnisse der Plankton-Expedition der Humboldt-Stiftung, Band 1.A.
- Hensen, V., 1895. Methodik der Untersuchungen. Ergebnisse der Plankton-Expedition der Humboldt-Stiftung, Band 1.B., pp. 1-200, 12 pls.
- Hensen, V., 1911. Das Leben im Ozean nach Zählungen seiner Bewohner. Übersicht und Resultate der quantitativen Untersuchungen. Ergebnisse. der Plankton-Expedition der Humboldt-Stiftung. V.O., Kiel and Leipzig, 406 pp.
- Hewes, C.D. and W.H. Thomas, 2002. W. E. Allen's phytoplankton species time series and environmental factors from the North American Pacific coast, with related illustrations from Cupp and Kofoid. UC San Diego: Libray - Scripps digital Collection. Scripps Institution of Oceanography Technical Report.
- Hewitt, R.P., 1988. Historical review of the oceanographic approach to fishery research. *CalCOFI Reports*, **29**: 27-41.
- Hooker, J.D., 1844. The botany of the Antarctic voyage of HM Discovery Ships Erebus and Terror in the years 1839-1843. Reeve Brothers, London. Reprint 1963: Weinheim, J. Cramer.
- ICES Data Portal, 2021. Data inventory by species (Dinophysis, 1870-2021), ICES/CIEM Homepage. (<https://ecosystemdata.ices.dk/inventory/index.aspx?LatN=54.9199&LatS=53.9970&LonE=8.3545&LonW=7.4097&Sdate=10/04/1870&Filter=dinophysis&Edate=10/04/2021&Area=Species&Species=0>)

- ICES. 1994. Procès-Verbal de la Réunion 1993 (ICES annual report 1993). International Council for the Exploration of the Sea, Dublin. 306 pp.
- ICES. 2006. Report of the ICES/IOC workshop on new and classic techniques for the determination of numerical abundance and biovolume of HAB-species - Evaluation of the cost, time-efficiency and intercalibration methods (WKNCT), 22-27 August 2005, Kristineberg, Sweden. ICES CM 2005/C:10. 30 pp.
- ICSU (International Council of Scientific Unions), 1969a. Proceedings of the Scientific Committee on Oceanic Research. **5**(1): 1-34.
- ICSU, 1969b. Proceedings of the Scientific Committee on Oceanic Research, **5**(2): 35-60.
- IGMETS, 2021. IOC-UNESCO international group for marine ecological time series: Analysis and synthesis of global marine ecological changes as seen through biogeochemical and plankton time series. (<https://igmets.net/>)
- Karlusich, J.J.P., Ibarbalz, F.M., and C. Bowler, 2020. Exploration of marine phytoplankton: From their historical appreciation to the omics era. *Journal of Plankton Research*, **42**: 595-612.
- Karlson, B., C. Cusack and E. Bresnan, 2010. Microscopic and molecular methods for quantitative phytoplankton analysis. UNESCO (IOC Manuals and Guides, No. 55), Paris, 110 pp.
- Käse, L., A.C. Kraberg, K. Metfies, S. Neuhaus, P.A.A. Sprong, B.M. Fuchs, M. Boersma and K.H. Wiltshire, 2020. Rapid succession drives spring community dynamics of small protists at Helgoland Roads, North Sea. *J. Plankton Res.*, **42**: 305-319.
- Käse, L., K. Metfies, S. Neuhaus, M. Boersma, K.H. Wiltshire and A.C. Kraberg, 2021. Host-parasitoid associations in marine planktonic time series: Can metabarcoding help reveal them? *PLoS ONE*, **16**(1): e0244817.
- Kraberg, A., N. Rodriguez and C. Salewski, 2015. Historical phytoplankton data from Helgoland Roads: can they be linked to modern time series data? *J. Sea Res.*, **101**: 51-58.
- Kraberg, A., U. Kieb, S. Peters and K.H. Wiltshire, 2019. An updated phytoplankton check-list for the Helgoland Roads time series station with eleven new records of diatoms and dinoflagellates. *Helgol. Mar. Res.*, **73**: 9.
- Kumar, S., P. Baweja and D. Sahoo, 2015. Diatoms: Yellow or golden brown algae. In: *The algae world*, edited by Sahoo D. and J. Seckbach, pp. 235-258.
- Leewenhoeck A. 1674. More observations from Mr. Leewenhoeck, in a letter of Sept. 7. 1674 sent to the publisher. *Phil. Trans.*, **9**(108): 178-182.
- Leewenhoeck, A.V., 1677. Observation, communicated to the publisher by Mr. Antony van Leewenhoeck, in a dutch letter of the 9th Octob. 1676. here English'd: concerning little animals by him observed in rain-well-sea- and snow water; as also in water wherein pepper had lain infused. *Phil. Trans.*, **12**(133): 821-831.
- Leeuwenhoek, A.V., 1703. Part of a letter from Anthony von Leeuwenhoek, Concerning green weeds growing in water, and some animicula found about them. *Philos. Trans.*, **23**(283): 1304-1311 (reprinted in Leeuwenhoek, A. (1996) Letter nr. 239 of 25 December 1702, In: *The Collected Letters of Antoni Van Leeuwenhoek*, edited by Palm L.C., vol. 14. Swets & Zeitlinger, Lisse, pp. 158-179).
- Linnaeus, C., 1767. *Systema naturae, per regna tria naturae, secundum classes, ordines, genera, species cum characteribus, differentiis, synonymis, locis. Tom. I. Pars II. Editio duodecima, reformata. Holmiae. Typis Joannis Thomae nob. de Trattner, Vindobonae*, pp. 533-1327.
- Lohmann, H., 1903. Neue Untersuchungen über den Reichtum des Meeres an Plankton und über die Brauchbarkeit der verschiedenen Fangmethoden. *Wissenschaftliche Meeresuntersuchungen, Abteilung Kiel, Neue Folge*, **7**: 1-88.
- Lohmann, H., 1908. Untersuchungen zur Feststellung des vollständigen Gehaltes des Meeres an Plankton. *Wissenschaftliche Meeresuntersuchungen, Abteilung Kiel, Neue Folge*, **10**: 129-370.
- Lohmann, H., 1911. Über das Nannoplankton und die Zentrifugierung kleinster Wasserproben zur Gewinnung desselben in lebendem Zustande. *Int. Revue ges. Hydrobiol. Hydrogr.*, **4**: 1-39.
- Lombard, F., E. Boss, A.M. Waite, M. Vogt, J. Uitz, L. Stemmann, H.M. Sosik, J. Schulz, J.-B. Romagnan, M. Picheral, J. Pearlman, M.D. Ohman, B. Niehoff, K.O. Möller, P. Miloslavich, A. Lara-Lpez, R. Kudela, R.M. Lopes, R. Kiko, L.

- Karp-Boss, J.S. Jaffe, M.H. Iversen, J.-O. Irisson, L. Fennel, H. Hauss, L. Guidi, G. Gorsky, S.L.C. Giering, P. Gaube, S. Gallager, G. Dubelaar, R.K. Cowen, F. Carlotti, C. Briseño-Avena, L. Berline, K. Benoit-Bird, N. Bax, S. Batten, S.D. Ayata, L.F. Artigas and W. Appeltans, 2019. Globally consistent quantitative observations of planktonic ecosystems. *Front. Mar. Sci.*, **6**: 196.
- Lund, J.W.G., C. Kipling and E.D. Le Cren, 1958. The inverted microscope method of estimating algal numbers and the statistical basis of estimations by counting. *Hydrobiologia*, **11**(2): 143-170.
- Matthäus, W., 2010. Germany and the investigation of the Baltic Sea hydrography during the 19th and early 20th century. *Meereswissenschaftliche Berichte Marine Science Reports*, No. 83, Warnemünde, 105 pp.
- Metfies, K., J. Hessel, R. Klenk, W. Petersen, K.H. Wiltshire and A. Kraberg, 2020. Uncovering the intricacies of microbial community dynamics at Helgoland Roads at the end of a spring bloom using automated sampling and 18S metabarcoding. *PLoS ONE* **15**(6): e0233921.
- Meyer, H.A., K. Möbius, G. Karsten and V. Hensen, 1873. Die Expedition zur physikalisch-chemischen und biologischen Untersuchung der Ostsee im Sommer 1871 auf S. M. Avisodampfer Pommerania. *Jahresber. Comm. Wiss. Unters. Dt. Meere Kiel für das Jahr 1871*, Berlin, Jg., **1**, pp. 178.
- Mills, E.L., 2012. *Biological oceanography: An early history, 1870-1960*. University of Toronto Press, Ontario, 416 pp.
- Mirtl, M., E.T. Borer, I. Djukic, M. Forsius, H. Haubold, W. Hugo, J. Jourdan, D. Lindenmayer, W.H. McDowell, H. Muraoka, D.E. Orenstein, J.C. Pauw, J. Peterseil, H. Shibata, C. Wohnner, X. Yu and P. Haase, 2018. Genesis, goals and achievements of long-term ecological research at the global scale: A critical review ofILTER and future directions. *Sci. Total Environ.*, **626**: 1439-1462.
- Müller, O.F., 1776. *Zoologiae Danicae Prodromus: seu animalium Daniae et Norvegiae indigenarum; characteres, nomina, et synonyma imprimis popularium*. pp. [i]-xxxii, [1]-274. Havniae [Copenhagen]: Typis Hallageriis.
- Müller, O.F. 1786. *Animalcula infusoria fluvia tilia et marina. que detexit, systematice descripsit et ad vivum delineari curavit Otho Fridericus Müller*. pp. [i]-lx, [1]-367. Havniae [Copenhagen]: Typis N. Mölleri, 1786.
- National Institute for Environmental Studies, 2021. Phytoplankton (Table 9 and 10). Lake Kasumigaura Database, NIES, Japan. (<https://db.cger.nies.go.jp/gem/moni-e/inter/GEMS/database/kasumi/contents/datalist.html>)
- Nishijima, W., Umehara A., Yamamoto K., Asaoka S., Fujii N., Otani S., Wang F., Okuda T. and S. Nakai, 2021. Temporal distribution of primary and secondary production estimated from water quality data in the Seto Inland Sea, Japan. *Ecological Indicators*, **124**: 107405 .
- Nishikawa, T., Y. Hori, S. Nagai, K. Miyahara, Y. Nakamura, K. Harada, M. Tanda, T. Manabe and K. Tada, 2010. Nutrient and phytoplankton dynamics in Harima-Nada, eastern Seto Inland Sea, Japan During a 35 year period from 1973 to 2007. *Estuaries and Coasts*, **33**(2): 417-427.
- NMBAQC Coordinating Committee, 1995. National marine biological analytical quality control (AQC) scheme. Final Report, April 1994- March 1995. UnicoMarine LTD, 76 pp.
- NMBAQC Coordinating Committee, 2007. BEQUALM-NMBAQC Annual Report, Year 12 - 2005/2006. BEQUALM-NMBAQC Scheme, 130 pp.
- NMBAQC Coordinating Committee, 2017. NE Atlantic marine biological analytical quality control scheme. Annual Report 2015/2016, NMBAQC Scheme, 27 pp.
- NMBAQC Coordinating Committee, 2018. NE Atlantic marine biological analytical quality control scheme. Annual Report 2017/2018, NMBAQC Scheme, 34 pp.
- O'Brien, T.D., K. William, W. Li and X.A.G. Morán, 2012. ICES phytoplankton and microbial plankton status report 2009/2010. ICES Cooperative Research Report No. 313, 196 pp.
- O'Brien, T.D., P.H. Wiebe and S. Hay, 2011. ICES zooplankton status report 2008/2009. ICES Cooperative Research Report No. 307, 152 pp.
- O'Brien, T.D., L. Lorenzoni, K. Isensee and L. Valdés, 2017. What are marine ecological time series telling us about the

- ocean? A status report. IOC-UNESCO, IOC Technical Series, No. 129, 297 pp.
- Ohara, S., R. Yano, E. Hagiwara, H. Yoneyama and K. Koike, 2020. Environmental and seasonal dynamics of altering the primary productivity in Bingo-Nada (Bingo Sound) of the Seto Inland Sea. *Plankton and Benthos Research*, **15**: 78-96.
- Ohman, M.D., R.E. Davis, J.T. Sherman, K.R. Grindley, B.M. Whitmore, C.F. Nickels and J.S. Ellen, 2019. Zooglider: An autonomous vehicle for optical and acoustic sensing of zooplankton. *Limnol. Oceanogr.: Methods*, **17**: 69-86.
- Ohman, M.D., and E.L. Venrick, 2003. CalCOFI in a changing ocean. *Oceanography*, **16**(3): 76-85.
- PANGAEA, 2021a. Hydrochemistry and phytoplankton abundance at time series station Helgoland Roads, North Sea, in 1962-2015. PANGAEA, Data Publisher for Earth & Environmental Science (<https://www.pangaea.de/?q=Hydrochemistry+and+phytoplankton+abundance+at+time+series+station+Helgoland+Roads%2C+North+Sea>).
- PANGAEA, 2021b. Total abundance of phytoplankton at time series station Helgoland Roads, North Sea, in 2003-2015. PANGAEA, Data Publisher for Earth & Environmental Science (<https://www.pangaea.de/?q=Total+abundance+of+phytoplankton+at+time+series+station+Helgoland+Roads%2C+North+Sea>).
- Parkinson, S., 1773. *A Journal of a Voyage to the South Seas, in His Majesty's ship, the Endeavour. Faithfully transcribed from the papers of the late Sydney Parkinson, draughtsman to Joseph Banks, Esq. on his late expedition with Dr. Solander around the world.* London.
- Raabe, T. and K.H. Wiltshire, 2009. Quality control and analyses of the long-term nutrient data from Helgoland Roads, North Sea. *J. Sea Res.*, **61**: 3-16.
- Rayner, N.A., P. Brohan, D.E. Parker, C.K. Folland, J.J. Kennedy, M. Vanicek, T.J. Ansell and S.F.B. Tett, 2006. Improved analyses of changes and uncertainties in sea-surface temperature measured in-situ since the mid-nineteenth century. *J. Clim.*, **19**: 446-469.
- Revelle, R., 1957. International cooperation in marine sciences. *Science*, **126**: 1319-1323.
- Ross, J.C., 1847a. A voyage of discovery and research in the Southern and Antarctic Regions, during the years 1839-43 with plates, maps, and woodcuts. In two volumes, Volume 1. London, 366 pp.
- Ross, J.C., 1847b. A Voyage of Discovery and Research in the Southern and Antarctic Regions, during the Years 1839-43 with plates, maps, and woodcuts. In two volumes, Volume 2, London, 447 pp.
- Salas, R.G., 2021. Announcement: The international phytoplankton intercalibration. p. 22, In: *Harmful Algae News (IOC-Unesco)* 67 (April 2021), 25 pp.
- Scofield, E.C., 1932. Early life history of the California sardine (*Sardina caerulea*), with special reference to distribution of eggs and larvae. *Calif. Div. Fish Game Fish Bull.*, **41**: 1-48.
- Sournia, A., 1978. *Phytoplankton manual- Monographs on oceanographic methodology*, 6A. UNESCO, Paris, 337 pp.
- Steemann, N.E., 1933. Über quantitative untersuchung von marinem plankton mit utermöhls Umgekehrten Mikroskop. *J. Cons. Int. Expl. Mer*, **8**: 201-210.
- Takamura, N. and M. Nakagawa, 2012. Phytoplankton species abundance in Lake Kasumigaura (Japan) monitored monthly or biweekly since 1978. *Ecol. Res.*, **27**: 837.
- Taylor, F.J.R., 1980. Phytoplankton ecology before 1900: Supplementary notes to the "Depths of the Ocean". In: *Oceanography: The past*, edited by Sears M. and D. Merriman, Springer, New York, pp. 509-521.
- Taylor, W.D., J.L. Wee and R.G. Wetzel, 1986. A modification of the utermöhl sedimentation technique for improved identification and cell enumeration of diatoms and silica-scaled chrysophyceae. *Transactions of the American Microscopical Society*, **105**: 68-72.
- UNESCO, 1995. Reports of governing and major subsidiary bodies- IOC-FAO Intergovernmental Panel on Harmful Algal Blooms. Third Session. Paris, 24 pp.
- Utermöhl, H., 1927. Untersuchungen ueber den Gesamtplanktongehalt des Kanarenstromes. *Arch. Hydrobiol. Plankt.*, **18**: 464-525.

- Utermöhl, H., 1931. Neue Wege in der quantitativen Erfassung des Plankton (Mit besonderer Berücksichtigung des Ultraplanktons). Internationale Vereinigung für theoretische und angewandte Limnologie: Verhandlungen, **5**(2): 567-596.
- Venrick, E.L., 1998. Spring in the California Current: the distribution of phytoplankton species, April 1993 and April 1995. Marine Ecology Progress Series, **167**: 73-88.
- Venrick, E.L., 2015. Phytoplankton species in the California Current System off Southern California: The spatial dimensions. Calif. Coop. Ocean. Fish. Investig. Rep., **56**: 168-184.
- Venrick, E.L., 2021. Temporal and spatial changes of the abundance and species composition of phytoplankton in the California Current from samples collected aboard CalCOFI cruises from summer 1996 through 2018. Phytoplankton species composition, California Current (CalCOFI Cruises). California Current Ecosystem LTER. (<https://oceaninformatics.ucsd.edu/datazoo/catalogs/ccelter/datasets/254>).
- Wasmund, N. 2017. The diatom/dinoflagellate index as an indicator of ecosystem changes in the Baltic Sea- 2. Historical data for use in determination of good environmental status. Front. Mar. Sci., **4**: 153.
- Wasmund, N., J. Göbel and B.V. Bodungen, 2008. 100-years-changes in the phytoplankton community of Kiel Bight (Baltic Sea). J. Mar. Syst., **73**: 300-322.
- Wasmund, N., J. Kownacka, J. Göbel, A. Jaanus, M. Johansen, I. Jurgensone, S. Lehtinen and M. Powilleit, 2017. The diatom/dinoflagellate index as an indicator of ecosystem changes in the Baltic Sea- 1. Principle and handling instruction. Front. Marine Sci., **4**: 22.
- Wiebe, P.H., R. Harris, A. Gislason, P. Margonski, H.R. Skjoldal, M. Benfield, S. Hay, T. O'Brien and L. Valdes, 2016. The ICES working group on zooplankton ecology: Accomplishments of the first 25 years. Progress in Oceanography, **141**: 179-201.
- WILDCOMS. 2014. Summer Spotlight on the Policy relevance of the WILDCOMS monitoring schemes. Newsletter 11, 1-3. Wildlife Disease & Contaminant Monitoring and Surveillance network.
- Williams, D.M. and Kociolek J.P., 2011. An overview of diatom classification with some prospects for the future. In: The diatoms world series: Cellular origin, life in extreme habitats and astrobiology, edited by Seckbach, J. and J.P. Kociolek, Springer, vol. 19, pp. 47-91.
- Williams, D.M., 2007. Classification and diatom systematics: the past, the present and the future. In: Unravelling the algae: the past, present, and future of algal systematics. edited by Brodie, J. and J. Lewi, CRC Press, Boca Raton., The Systematics Association Special Volume Series 75, pp. 57-91.
- Wiltshire, K.H. and C.D. Dürselen, 2004. Revision and quality analyses of the Helgoland Reede long-term phytoplankton data archive. Helgol. Mar. Res., **58**: 252-268.
- Wiltshire, K.H., M. Boersma, K. Carstens, A.C. Kraberg, S. Peters and M. Scharfe, 2015. Control of phytoplankton in a shelf sea: determination of the main drivers based on the Helgoland Roads Time Series. J. Sea Res., **105**: 42-52.
- Wiltshire, K.H. and B.F.J. Manly, 2004. The warming trend at Helgoland Roads, North Sea: phytoplankton response. Helgol. Mar. Res., **58**: 269-273.
- Wiltshire, K.H., A. Kraberg, I. Bartsch, M. Boersma, H.-D. Franke, J. Freund, Christina, C. Gebühr, G. Gerdts, K. Stockmann and A. Wichels, 2010. Helgoland Roads, North Sea: 45 years of change. Estuaries and Coasts, **33**: 295-310.
- Wolff, T., 2010. The birth and first years of the scientific committee on oceanic research (SCOR). SCOR, Newark, Delaware, USA, pp. 95.
- Zingone, A., D. D'Aleolio, M.G. Mazzocchi, M. Montesor, D. Sarno and LTER-MC team, 2019. Time series and beyond: multifaceted plankton research at a marine Mediterranean LTER site. Nature Conservation, **34**: 273-310.