



Original Article

생태기반 해수수질 기준 개정의 필요성에 대한 고찰

정진현¹ · 임재현² · 김귀영³ · 노태근⁴ · 이용우⁵ · 탁대호^{6,†}

¹국립수산과학원 해역이용영향평가센터 석사후 연구원
²국립수산과학원 해역이용영향평가센터 해양수산연구소
³국립수산과학원 해역이용영향평가센터 해양수산연구소
⁴한국해양과학기술원 해양기기개발·운영센터 센터장
⁵해양환경공단 해양수질팀 차장
⁶국립수산과학원 해역이용영향평가센터 해양수산연구소

A Study on Revision of Water Quality Index for Sea water

Jin-Hyun Jeong¹, Jae-Hyun Lim², Gui-Young Kim³, Tae Keun Rho⁴, Yong-Woo Lee⁵, and Dae-Ho Tac^{6,†}

¹Scientific Researcher, Marine Environmental Impact Assessment Center, National Institute of Fisheries Science, Busan 46083, Korea

²Scientific Officer, Marine Environmental Impact Assessment Center, National Institute of Fisheries Science, Busan 46083, Korea

³Senior Scientific Officer, Marine Environmental Impact Assessment Center, National Institute of Fisheries Science, Busan 46083, Korea

⁴Senior Scientific Researcher, Instrumental Development and Management Center, Korea Institute of Ocean Science and Technology, Busan 49111, Korea

⁵Deputy Department Head, Marine Environment Monitoring Team, Korea Marine Environment Management Corporation, Busan 48940, Korea

⁶Scientific Officer, Marine Environmental Impact Assessment Center, National Institute of Fisheries Science, Busan 46083, Korea

요 약

생태기반 해수수질 기준에서 각 평가항목의 비교 대상이 되는 해역별 기준값은 2000년부터 2007년까지 해양환경측정망 자료를 이용하여 설정되었다. 그러나, 기준값이 설정된 이후 해양환경 변화에 대응한 기준값의 개선이나 보완은 이루어지지 않았다. 지금까지 평가항목들에 대한 자료는 지속적으로 축적되어 왔으므로, 현행 해역별 기준값이 현재의 우리나라 해양환경을 대변하는지에 대한 평가가 필요한 시점으로 판단된다. 이러한 측면에서, 본 연구에서는 최근까지의 자료(2000-2016)를 적용하였을 때 해역별 기준값의 변화 여부를 살펴보았다. 우리의 결과는 현행 해역별 기준값과 평가항목별 그리고 생태구역별로 상당한 차이를 보였다. 그리고 이로 인해 각 평가항목 및 WQI 등급 역시 변하는 것으로 나타났다. 이러한 결과들은 현행 해역별 기준값이 현재 우리나라 해양환경의 자연 상태를 대표하지 못하고 있음을 지시하며, 따라서 최근 자료를 적용한 기준값의 개선이 필요하다. 추가적으로, 해양환경이 지속적으로 변함에 따라 기준값의 주기적인 개선이 필요하며, 이를 위해서는 우리나라에 적합한 지속적이고 체계적인 프로토콜 역시 마련되어야 한다.

Abstract – In the water quality index (WQI), reference value (RV) is an important factor to determine the grade of each assessment item for evaluating sea water quality. The existing RV was made by using the Marine Environmental Monitoring System (MEIS) data from 2000 to 2007. After establishing WQI in 2011, marine environmental condition has been changed until now, and monitoring data have been accumulated continuously. Therefore, we applied the additional MEIS data (2000-2016) to reconstruct RV, and then evaluated the water quality in Korean coastal areas. Our results showed that the RV developed from additional data was significantly different with existing RV, which resulted in changes in the grades of each assessment item and WQI. Also, these results indicated that the existing RV had a possibility not to represent the natural conditions in the Korean coast at present. Therefore, it is necessary to revise the RV using more recent data and re-establish new WQI. In addition, systematic protocol is also required for periodic improving the RV to reflect spatiotemporal changes of the marine environmental conditions.

Keywords: Marine environmental standards(해양환경기준), Water quality index(수질평가지수), Reference values(기준값), Establish procedure(설정과정), Improvement(개선방안)

†Corresponding author: jjang73815@gmail.com

1. 서 론

우리나라는 급속한 산업화 및 도시화로 인해 육상으로부터 해양으로의 오염부하가 증가하는 등 연안해역의 오염이 심화됨에 따라 지속적이고 건강한 해양환경을 유지 및 효율적으로 이용하기 위한 과학적인 관리의 필요성이 증가하였다. 이에 따라 정부에서는 이화학적 분석항목 (pH, COD, DO, SS, TN, TP)에 대해 3등급으로 구분하는 해역별 수질등급기준을 설정하여 수질평가를 수행하여 왔다(해양수산부 고시 제98-37호). 그러나, 이 수질평가 체계는 일본의 해역 수질기준을 준용한 것으로, 호수 환경의 자료를 바탕으로 하고 있어 해수수질 평가에 대한 항목과 항목별 기준치의 타당성 및 근거가 미흡하였다(MLTM[2010]). 또한, 우리나라의 해역 및 환경특성을 고려하지 않고 모든 해역에 일률적인 평가기준을 적용하였으며, 각 항목을 개별적인 등급으로 구분함으로써 같은 지역이라도 평가항목에 따라 수질등급이 다르게 나타나는 경우가 빈번하여 각 해역의 오염상태에 대한 명확한 평가 및 적절한 수질관리 대책을 수립하는데 어려움이 있었다(Rho *et al.*[2012]; Ra *et al.*[2013]). 이러한 이유로, 우리나라 해역의 환경특성을 반영한 통합적인 수질평가 및 관리의 필요성이 제기되었다.

기존의 해수수질평가 기준에 대한 단점을 보완하기 위한 노력으로 2011년 「해양환경관리법」 제8조에 따른 해양환경기준에서 생태기반 해수수질 기준이 제정되었다(국토해양부 고시 제2011-972호). 평가항목은 해수의 부영양화를 평가하기 위한 저층 용존산소포화도(Dissolved oxygen saturation, DO% [sat.]), 엽록소(Chlorophyll-a, Chl-a), 투명도(Secchi depth), 용존무기질소(Dissolved inorganic nitrogen, DIN) 그리고 용존무기인(Dissolved inorganic phosphorus, DIP)의 5개 항목으로 구성되어 있으며, 해역의 환경특성(수심, 해류, 탁도, 조위차, 기후)에 따라 우리나라 연안을 동해, 대한해협, 서남해역, 서해중부, 그리고 제주 생태구로 구분하여 각 항목에 대한 해역별 기준값을 설정하고 있다. 해수수질은 각 평가항목을 해역별 기준값과의 비교를 통해 점수화한 후 종합적인 수질평가지수(Water Quality Index, WQI)로 환산하여 I 등급(매우 좋음)부터 V 등급(매우 나쁨)까지 총 5개의 등급으로 평가하고 있다. 따라서, 이 기준은 우리나라 해역별 환경특성을 반영한 해양환경기준이라 할 수 있으며, 단일 항목을 이용한 수질평가 시 발생할 수 있는 특정 이벤트나 요인 등에 민감하게 반응하는 문제를 해소하면서 대상해역의 전체적인 부영양화 상태 및 세부 항목별 환경상태에 대한 평가가 가능하다는 장점이 있다(Rho *et al.*[2012]; Ra *et al.*[2013]; KMI[2015]).

해양환경기준은 환경여건의 변화에 따라 달라질 수 있으므로 지속적인 개선 및 보안을 통해 그 적정성이 유지되어야 한다(KMI[2015]). 생태기반 해수수질 기준에서 각 평가항목의 비교 대상이 되는 해역별 기준값은 가장 기본이 되는 중요한 요인으로, 선행 연구에서 2000년부터 2007년까지 해양환경측정망 자료를 이용하여 설정되었다(Rho *et al.*[2012]). 그러나, 기준값이 설정된 이후 지난 10여 년간 해양환경 조건들은 지속적으로 변해왔으나, 이러한 변화에 대응한 해역별 기준값의 개선이나 보원은 전혀 수행되지 않았다.

Table 1. Major classifier and sea boundary in each Ecological Region

| Ecological Region | Major classifier | Boundary |
|-------------------|------------------|-------------------|
| East Sea | Depth | Geojin ~ Yeongil |
| Korea Strait | Current | Guryongpo ~ Yeosu |
| western South | Turbidity | Gamak ~ Jeonjupo |
| central West | Tide | Gunsan ~ Incheon |
| Jeju | Climate | Jeju ~ Hallim |

현재까지 평가항목에 대한 자료는 지속적으로 축적되어 왔으므로, 현행 해역별 기준값이 현재의 해양환경을 잘 대변하는지에 대한 평가가 필요한 시점으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 최근까지의 측정망 자료를 적용하였을 때 해역별 기준값과 이에 따른 평가항목 및 WQI 등급의 변화 여부를 알아보았으며, 우리의 결과를 토대로 향후 기준값 개선과정에서 고려되어야 할 사항들을 제시하였다.

2. 재료 및 방법

본 연구에서는 2000년부터 2016년까지 해양환경측정망 자료를 이용하여 해역별 기준값을 계산해 보았다. 계산방법은 현행 해역별 기준값을 설정한 선행 연구의 계산과정을 따랐기 때문에, 자세한 정보는 Rho *et al.*[2012]에서 확인 가능하다.

계산과정을 단계별로 간략히 설명하면, 첫 번째 단계로 측정망 정점을 생태구역별로 구분하였다. 각 생태구역의 지리적 경계는 Table 1과 같으며, 이 경계에 따른 측정망 정점의 지역적 구분은 「해양환경관리법」에 따른 해양환경측정망 구성·운영계획에 고시되어 있다. 따라서, 본 연구에서 측정망 정점의 생태구역 구분은 해양환경측정망 구성·운영계획을 따랐다.

두 번째 단계에서는 측정망 정점들 중 외양역의 정점을 구분하였다. 각 생태구역의 자연 조건을 기준값으로 설정하기 위해서는 연안 해역의 수질 변동에 대해 육상으로부터 유입되는 인위적인 요소들의 영향을 제외하여야 한다. 이를 위해, 육상으로부터 유입은 하천을 통한 유입만을 고려하였으며, 하천유입의 공간적 영향 범위를 파악하기 위하여 하천유입이 가장 작은 것으로 예상되는 2월과 하천유입의 영향이 가장 클 것으로 예상되는 8월의 표층염분 차이(2월의 표층염분-8월의 표층염분)를 이용하였다. 각 측정망 정점에서 2월과 8월의 표층염분 차이를 구하여 생태구역별 하천유입의 공간적 분포를 파악하였으며, 염분차이가 클수록 하천유입의 영향이 큰 것으로 가정하였다. 그러나, 염분은 하천유입뿐만 아니라 외양역에서 일어나는 자연적인 변동에 의해서도 변하기 때문에, 하천유입의 영향만을 받는 정점을 선별하기 위해서는 외양역의 염분 특징을 파악할 필요가 있다. 외양역이 갖는 염분의 특징을 정의하기 위해서 국립수산과학원의 정선관측 자료를 이용하였다. 각 생태구역에 포함된 정선관측의 연안 내측 2개 정점에서 2월과 8월의 표층염분 차이를 외양역 해수가 갖는 염분 특징으로 정의하였으며, 이를 측정망의 외양역 정점을 구분하기 위한 기준값으로 사용하였다. 각 측정망 정점에서 구한 염분차이 값을 외양역 구분 기준값과 비교하였으며, 측정망 정점들 중 염분차이 값이 외양역 구분 기준값보다 작은 정점들

을 하천유입의 영향이 없는 외양역 정점으로 선정하였다.

세 번째 단계에서는 구분된 외양역 정점의 자료를 이용하여 해역별 기준값을 계산하였다. 각 평가항목의 자연적 그리고 정점 간의 변동을 고려하여 표층 DIN, 표층 DIP, 그리고 표층 Chl-*a*의 기준값은 각 생태구역 내 외양역 정점의 계절별 평균값 중 최대값에 표준편차를 더한 값으로 정하였으며, Secchi depth의 기준값은 각 생태구역 내 외양역 정점에서 계절 평균의 최소값에 표준편차를 빼 값으로 하였다. 저층 DO% [sat.]의 경우, 전체 외양역 정점들에서 계절 평균값이 최소로 나타난 값을 전 생태구역의 기준값으로 적용하였다.

계산결과는 현행 해역별 기준값과 비교하였으며, 2016년 8월 해양환경측정망 자료를 대상으로 해역별 기준값의 차이에 따른 각 평가항목 및 WQI 등급의 변화를 살펴보았다. 등급 산정은 국가해양환경정보통합시스템 (Marine Environment Information System, MEIS)에서 제공되는 WQI 등급계산 엑셀시트를 이용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 선행 연구의 계산과정 검증

해역별 기준값을 계산하는데 있어 선행 연구의 계산과정이 일부

명확하지 않았고, 이로 인해 우리의 계산과정에서 오차가 발생할 가능성이 있다. 따라서 2000년부터 2007년까지의 자료를 이용하여 현행 해역별 기준값의 재현을 선행하였으며, 각 단계별 계산과정을 선행 연구의 결과와 비교하여 검증하였다. 추가적으로, 선행 연구에서 정점의 명칭이나 위치 등에 대한 정보가 제시되어 있지 않기 때문에, 정점에 대한 정보는 정점의 수로 추정하였다.

3.1.1 측정망 정점의 생태구역 구분

선행 연구에서 측정망 정점의 생태구역 구분은 각 정점에 대한 2000년부터 2007년까지 평균한 2월과 8월의 표층염분 및 2월과 8월의 표층염분 차이의 분포 결과에서만 확인할 수 있었다(Fig. 1a). 이 분포에는 2007년 이후 추가되어 해당기간 동안 자료가 없는 정점들도 포함되어 있기 때문에, 2007년 이후 고시된 측정망 정점의 변동이 발생한 해양환경측정망 구성·운영계획들(즉, 2009년, 2012년, 그리고 2014년)을 대상으로 재현해 보았다. 재현 대상으로 2009년 해양환경측정망 구성·운영계획을 선택하였고, 이는 2012년의 정점 수(n=282)는 2009년(n=279)과 유사하였으며, 2014년의 경우 총 정점의 수(n=347)가 선행 연구 결과의 범위를 크게 벗어났기 때문이다(Table 2).

재현에 사용된 정점 수는 총 283개로, 2009년 해양환경측정망

Table 2. The number of stations included each Ecological Region in the Marine Environmental Monitoring Structure and Operation Plan

| | | 2004 | 2006 | 2009 | 2012 | 2014 |
|-------------------|---------------|------|------|----------|----------|----------|
| Ecological Region | East Sea | 56 | 56 | 56 | 56 | 56 |
| | Korea Strait | 88 | 90 | 90 (+4) | 90 (+4) | 131 (+4) |
| | western South | 49 | 51 | 57 | 57 | 67 |
| | central West | 55 | 57 | 57 | 60 | 74 |
| | Jeju | 19 | 19 | 19 | 19 | 19 |
| Total | | 267 | 273 | 279 (+4) | 282 (+4) | 347 (+4) |

The numbers in parentheses mean the Seomjin Estuary stations in the Korea Strait Ecological Region.

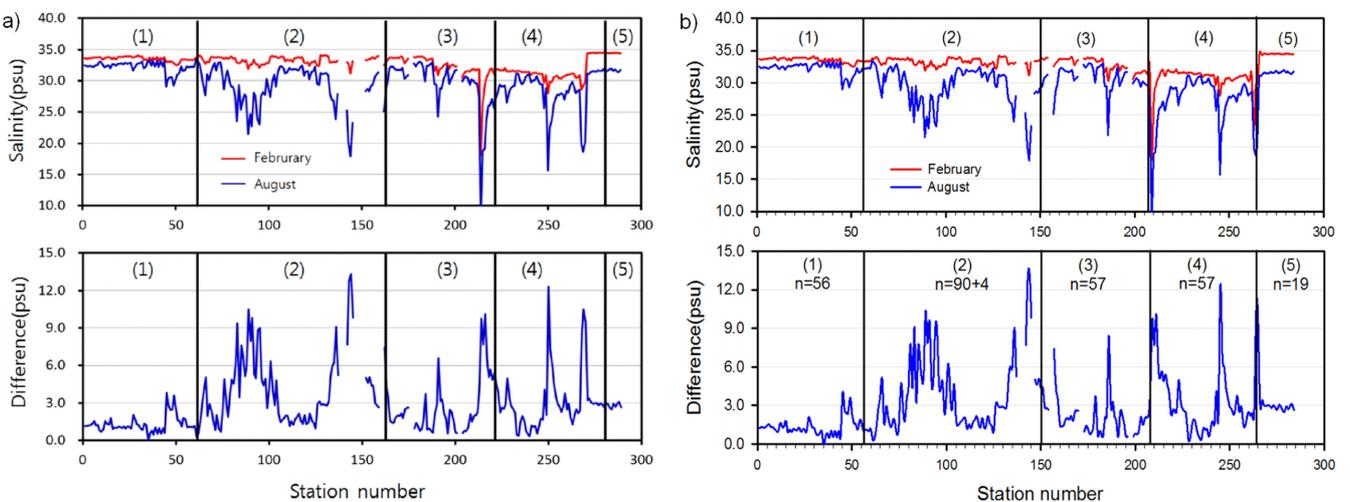


Fig. 1. Distribution of mean surface salinity of February and August from 2000 to 2007 and its difference. Arabic numbers in the figures indicate Ecological Region : (1) East Sea, (2) Korea Strait, (3) western South, (4) central West, and (5) Jeju Ecological Region. (a) Left figures are the original submitted in Rho *et al.*[2012]. (b) Right figures are presented in this study based on the Marine Environmental Monitoring Structure and Operation Plan in 2009.

구성·운영계획에 포함된 279개 정점에서 2000년부터 2007년까지 자료는 있으나 2009년 고시에서 제외된 대한해협 생태구의 섬진강 하구 정점 4개를 포함시켰다. 이들 정점에 대한 8년간 2월과 8월의 표층염분 평균값과 그 차이의 분포는 선행 연구의 결과와 거의 일치하였고, 따라서 전체 정점의 수는 유사한 것으로 판단된다(Fig. 1). 그러나, 이러한 정점들의 생태구역 구분은 차이를 보였다. 본 연구의 각 생태구역에 포함된 정점 수는 동해, 대한해협, 서남해역, 서해중부, 그리고 제주 생태구에서 각각 56, 94(섬진강 하구 정점 4개 포함), 57, 57, 그리고 19개 이었다. 반면, 선행 연구에서 생태구역별 정점의 정확한 수는 확인할 수 없었지만, 각 생태구역의 구분 범위(즉, Fig. 1의 x축)는 명백한 차이를 보였다. 추가적으로, 2004년과 2006년 해양환경측정망 구성·운영계획에 포함된 정점들과도 비교해 보았지만, 모두에서 선행 연구의 결과와 유사한 범위를 보이지 않았다(Table 2). 예를 들면, 제주 생태구는 총 19개의 정점이 포함되어 있으나, 선행 연구의 제주 생태구 구분 범위는 이보다 크게 작았다. 결론적으로 선행 연구의 생태구역 구분에 대한 기준이나 근거를 확인할 수 없었으며, 따라서 본 연구에서 측정망 정점의 생태구역 구분은 비록 정점 수는 차이를 보였지만 염분분포가 가장 유사하게 나타난 2009년 해양환경측정망 구성·운영계획을 기준으로 하였다.

3.1.2 외양역 정점의 구분

선행 연구에서는 외양역 정점을 구분하기 위한 기준값으로 정선관측의 연안내측 2개 정점에 대한 2월과 8월의 8년 평균 염분차이 값을 이용하였으며, 제시된 각 생태구역의 외양역 구분 기준값은 동해, 대한해협, 서남해역, 서해중부, 그리고 제주 생태구에서 각각 1.48, 2.08, 1.67, 0.82, 그리고 3.48이었다. 그러나, 외양역 구분 기준값을 계산하기 위해서는 정선관측의 연안내측 2개 정점이 (a) 전체 정점에 대해 2개의 정점인지, (b) 해당 생태구역에 포함된 각 정선에서의 2개 정점인지 명확하지 않았다. 예를 들면, 동해 생태구에서 정선관측점은 총 6개 정선(즉, 102, 103, 104, 105, 106, 그리고 107)의 60개 정점으로 구성되어 있고, 이에 따라 동해 생태구에서 연안내측 2개 정점이 총 60개 정점 중 2개의 정점인지, 각 정선

에서 2개의 정점을 선정한 총 12개의 정점인지 정확히 알 수 없었다. 따라서 상기 언급된 두 경우(즉, (a)와 (b)) 모두에 대한 외양역 구분 기준값을 계산해 보았다.

본 연구에서 계산된 외양역 구분 기준값은 (a)와 (b) 모두에서 선행 연구의 결과와 차이를 보였다(Fig. 2a). (a)의 경우에서 외양역 구분 기준값은 최소 1.63(서해중부 생태구)부터 최대 4.14(제주 생태구)까지 범위로 모든 생태구역에서 선행 연구의 결과보다 높게 나타났으며, (b) 역시 동해 생태구는 동일한 반면 나머지 생태구에서는 다소 차이를 보였다. 그리고 이러한 차이로 인해 외양역 정점의 수도 다르게 나타났다(Fig. 2b). (a)와 (b) 사이에서 각 외양역 구분 기준값으로 구분된 외양역 정점의 수는 제주 생태구를 제외한 모든 생태구에서 차이를 보였으며, 특히 서남해역과 서해중부 생태구에서는 약 2배의 큰 차이를 보였다. 비록 선행 연구에서 외양역 정점의 수가 제시되지 않아 직접적인 비교는 할 수 없었지만, 본 연구와 선행 연구 사이에서 외양역 구분 기준값이 차이를 보임에 따라 외양역 정점의 수 역시 다를 것으로 예상된다. 현행 해역별 기준값이 외양역 정점의 자료를 이용하여 계산되었음을 고려하면, 외양역 정점의 차이는 정점 간 해양환경 조건의 차이에 따른 오차를 초래할 가능성이 있다. 따라서, 비록 재현할 수 없었지만 본 연구에서는 선행 연구에서 제시된 외양역 구분 기준값을 이용하였다.

3.1.3 현행 해역별 기준값의 재현 결과

상기 조건들을 이용한 우리의 계산결과를 현행 해역별 기준값과 비교해 본 결과, 동일한 기간(2000-2007)의 자료를 사용하였음에도 불구하고 저층 DO% [sat.]를 제외한 모든 평가항목들에서 기준값은 상당한 차이를 보였으며, 그 차이의 정도는 생태구역마다 다르게 나타났다(Fig. 3). 예를 들면, Secchi depth와 Chl-*a*는 각각 제주 생태구와 서남해역 생태구에서 1.5 m와 2.1 $\mu\text{g L}^{-1}$ 의 가장 큰 차이를 보이며, 본 연구에서 더 높게 나타났다. DIN의 경우, 서남해역과 서해중부 생태구 모두에서 약 30% 이상의 차이를 보였으나, 서남해역에서는 본 연구의 결과가 높게 나타난 반면 서해중부 생태구에서는 낮게 나타났다.

그리고 이러한 차이는 일부 정점에서 평가항목과 WQI 등급의

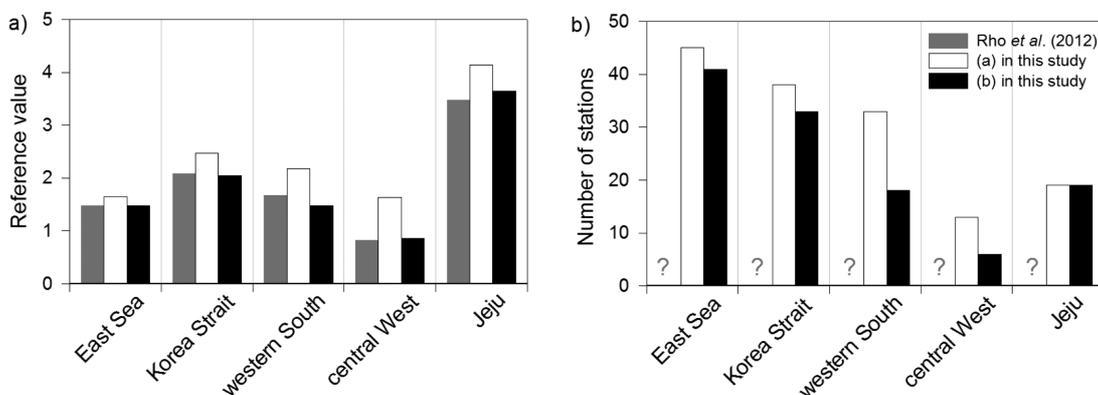


Fig. 2. (a) Reference values for identifying stations with characteristics of oceanic region and (b) number of oceanic stations. Gray bar is the result of Rho et al. [2012] and White and black bars are the values calculated in this study.

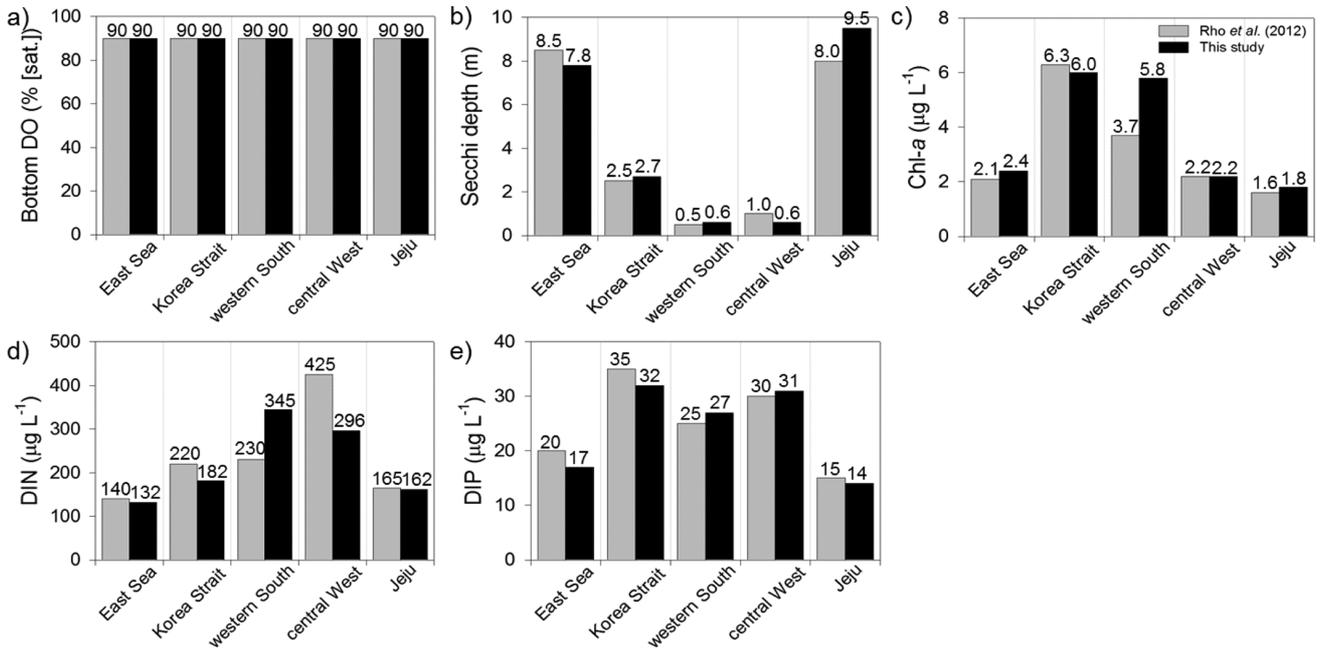


Fig. 3. Reference values of a) bottom dissolved oxygen saturation (DO % [sat.]), b) Secchi depth, c) chlorophyll-*a* concentration (Chl-*a*), d) dissolved inorganic nitrogen (DIN), and e) dissolved inorganic phosphate(DIP). Gray bar is the established Reference value (calculated in Rho *et al.* [2012]) and black bar is value calculated in this study.

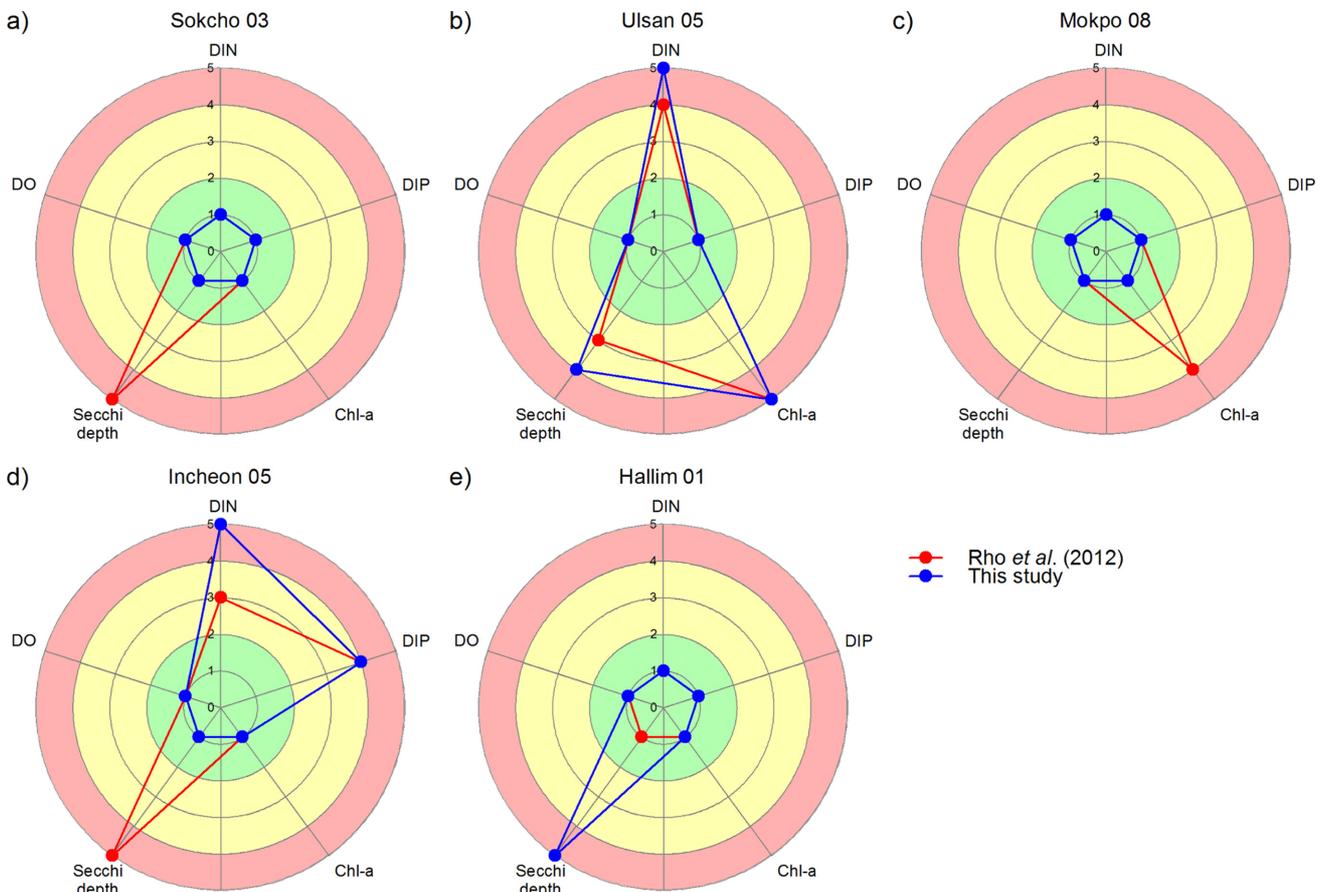


Fig. 4. Grade of each parameter in August 2016 at selected stations of a) East Sea, b) Korea Strait, c) western South, d) central West, and e) Jeju Ecological Region. Arabic number means the grade score.

변화도 초래하였다. 2016년 8월 해양환경측정망의 총 347개 정점들 중 DIN, DIP, Chl-*a*, Secchi depth, 그리고 WQI 항목에서 등급이 변한 정점은 각각 13, 5, 24, 39, 그리고 19개 이었다. 각 생태구역에서 임의로 선정된 정점의 등급 변화를 살펴보면, 속초연안 03, 인천연안 05, 그리고 한림연안 01 정점에서 Secchi depth는 I등급에서 V등급으로 최대 4개 등급의 변화를 보였으며(Fig. 4a, d, and e), 울산연안 05와 인천연안 05 정점에서는 DIN과 Secchi depth의 2개 항목에서 등급의 변화가 나타났다(Fig. 4b and d).

종합하면, 본 연구에서는 선행 연구의 계산과정을 따라 현행 해

역별 기준값을 재현할 수 없었다. 비록 본 연구의 계산과정에서 오차가 발생하였을 가능성도 있지만, 측정망 정점의 생태구역 구분에 대한 기준이나 근거가 명확하지 않았으며 외양역 구분 기준값과 외양역 정점의 수가 차이를 보이는 등 선행 연구의 계산과정을 따라 현행 해역별 기준값을 재현할 수 없는 것은 명백하다. 이는 현행 해역별 기준값의 신뢰성과 직접적으로 연관되므로, 현행 해역별 기준값의 계산과정과 그 결과에 대한 면밀한 재검토가 시급한 것으로 판단된다.

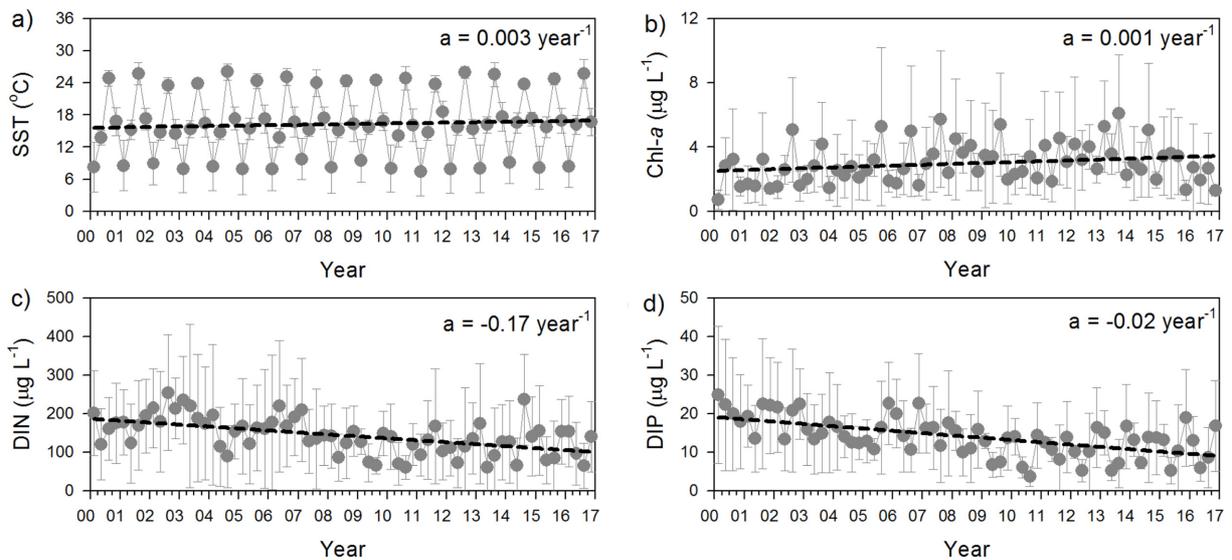


Fig. 5. Long-term variability of a) sea surface temperature (SST), b) chlorophyll-*a* (Chl-*a*), c) dissolved inorganic nitrogen (DIN), and d) dissolved inorganic phosphorus (DIP) in the surface ocean using the data in the Marine Environmental Monitoring System from 2000 to 2016.

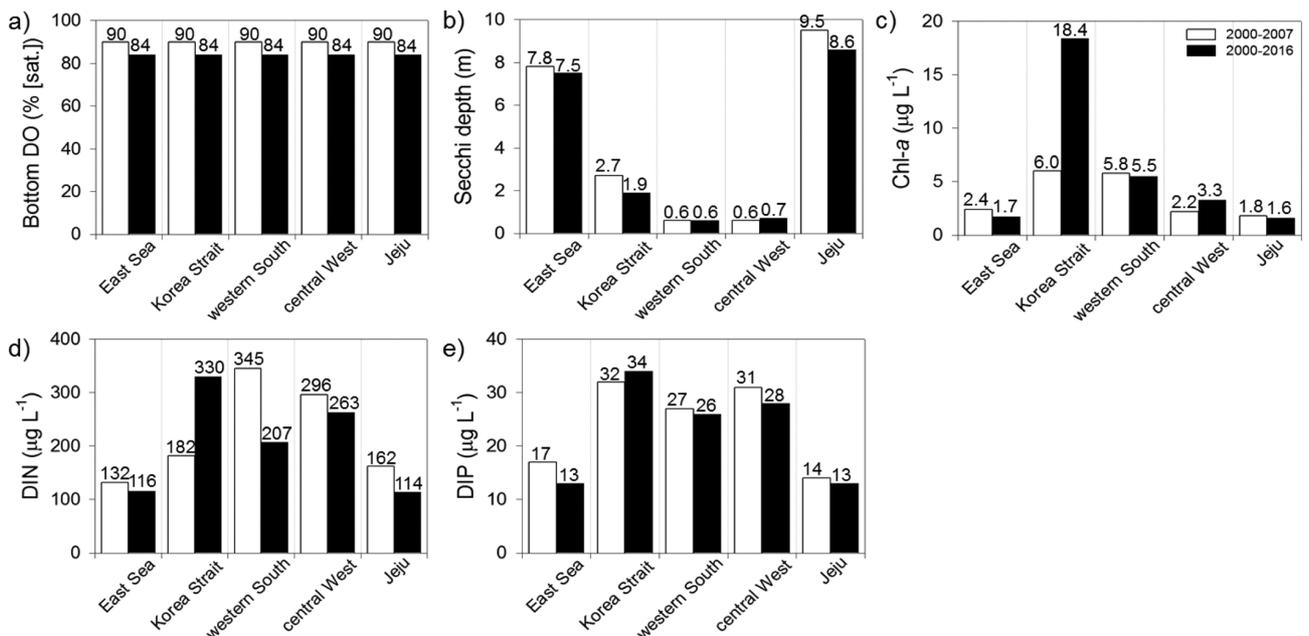


Fig. 6. Reference values of a) bottom dissolved oxygen saturation (DO % [sat.]), b) Secchi depth, c) chlorophyll-*a* concentration (Chl-*a*), d) dissolved inorganic nitrogen (DIN), and e) dissolved inorganic phosphate (DIP). White and black bars are calculated in this study using data from 2000 to 2007 and from 2000 to 2016, respectively.

3.2 해양환경의 변화에 따른 해역별 기준값의 변화

3.2.1 최근 자료를 적용한 해역별 기준값

2000년부터 2016년까지 해양환경측정망 자료의 시계열 분포에서 평가항목을 포함한 해양환경 조건들은 장기적인 변화 경향을 보였다(Fig. 5), 이에 따른 해역별 기준값의 변화 가능성이 있다. 따라서, 본 연구에서는 최근까지의 자료를 적용하여 해역별 기준값의 변화를 살펴보았다. 계산과정에서 측정망 정점의 생태구역 구분은 정점 수 및 위치의 변동을 고려하여 2014년 해양환경측정망 구성·운영계획을 토대로 하였으며, 외양역 구분 기준값은 생태구역 내 각 정선에서 연안내측 2개 정점을 선정하고 이들 정점들의 2월과 8월의 표층염분차이 평균값을 이용하였다(즉, 3.1.2.에서 (b)의 경우).

본 연구의 결과와 현행 해역별 기준값의 비교는 Fig. 6에 제시하였다. 여기서, 현행 해역별 기준값은 이전 논의에 따라 재현할 수 없었기 때문에, 계산과정에서의 오차를 제거하기 위해 본 연구의 계산결과를 대신하였다. 해역별 기준값은 사용된 자료의 기간에 따라 큰 변화를 보였으며, 각 평가항목에 대한 기준값의 변화 경향은 생태구역마다 다르게 나타났다. 예를 들면, 최근까지의 자료를 적용하였을 때, Chl-*a*의 기준값은 대한해협 생태구에서 약 3배 이상

의 큰 증가를 보인 반면, 동해 생태구, 서남해역 생태구, 그리고 제주 생태구에서는 상대적으로 작은 감소를 보였다. 또한, DIN의 기준값은 대한해협 생태구에서 증가하고 서남해역 생태구에서 감소하며, 모두 상당한 차이를 보였다. 계산과정이 동일함을 고려하면 이러한 해역별 기준값의 변화 경향은 해양환경 조건의 장기적인 변화에 의한 결과로 판단되며, 이는 평가항목들의 자연적 변동이 항목별 그리고 해역별로 다를 수 있음을 시사한다.

3.2.2 WQI 등급화

WQI는 해역관리의 목표설정을 용이하게 하기 위해 5개의 등급으로 구분되어 있으며, 각 등급의 상한은 2000-2007년까지 모든 자료에 대한 WQI 점수의 도수분포 특징과 최소값 및 표준편차를 이용하여 설정되었다(Table 3). 구체적으로, 총 8,340개의 자료에서 WQI 점수의 최소값, 평균, 그리고 표준편차는 각각 20, 33, 그리고 13이었으며, 도수분포는 최소값에서 가장 높은 빈도수를 보이고 23까지 급격히 감소하다 다시 증가하여 30에서 두 번째 봉우리가 나타난 쌍봉분포의 특징을 보였다. 이러한 결과를 토대로, I 등급의 상한은 두 봉우리 사이에서 가장 작은 값인 23으로 정하였으며, II, II, 그리고 IV 등급의 상한은 각각 최소값(20)에 1×표준편차, 2×표준편차, 그리고 3×표준편차를 더한 33, 46 그리고 59로 설정되었다.

해역별 기준값의 변화에 따른 WQI 점수의 변화는 등급화에 사용되는 변수들(즉, 최소값, 표준편차 등)의 값과 결과적으로 각 등급의 상한을 변화시키게 된다. 2000년부터 2016년까지 총 19,003개의 자료에 대해 동일한 기간의 해역별 기준값을 적용하였을 때, WQI 점수의 최소값은 20이었으며, 평균과 표준편차는 31과 15로 나타났다. 그리고 첫 번째 봉우리와 두 번째 봉우리는 각각 20과

Table 3. Water quality index criteria determined from frequency distribution of WQI scores

| WQI Grade | Rho <i>et al.</i> [2012] | This study |
|-----------|--------------------------|------------------|
| I | $I \leq 23$ | $I \leq 23$ |
| II | $23 < I \leq 33$ | $23 < I \leq 38$ |
| III | $33 < I \leq 46$ | $33 < I \leq 52$ |
| IV | $46 < I \leq 59$ | $46 < I \leq 67$ |
| V | $60 \leq I$ | $67 \leq I$ |

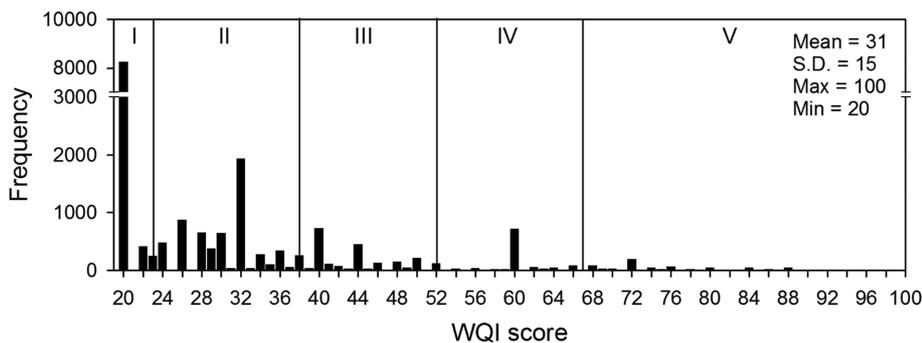


Fig. 7. Frequency distribution of WQI scores over 2000-2016.

Table 4. Number of stations with change in the grade of each parameter and WQI in August 2016 between Rho *et al.* [2012] and this study

| Parameter | Total (n=347) | Ecological Region | | | | |
|--------------|---------------|-------------------|----------------------|----------------------|---------------------|-------------|
| | | East Sea (n=56) | Korea Strait (n=131) | western South (n=67) | central West (n=74) | Jeju (n=19) |
| DIN | 17 | 1 | 4 | 2 | 10 | 0 |
| DIP | 2 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 |
| Chl-a | 58 | 3 | 15 | 18 | 22 | 0 |
| Secchi depth | 52 | 3 | 37 | 0 | 8 | 4 |
| DO% [sat.] | 90 | 17 | 37 | 13 | 19 | 4 |
| WQI | 173 | 21 | 84 | 29 | 30 | 9 |

() is the total number of stations included in each Ecological Region.

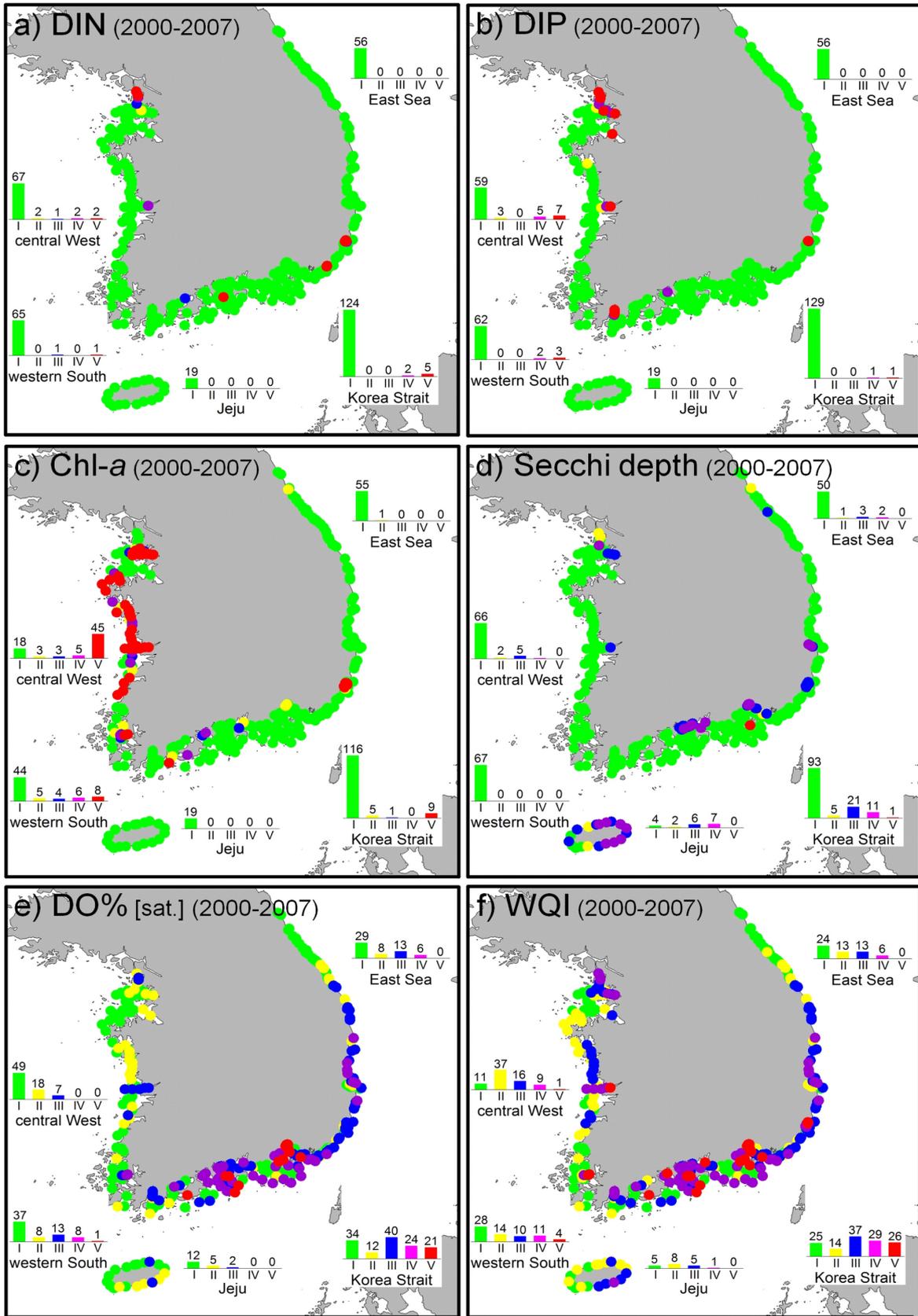


Fig. 8. Grade distributions of a) DIN, b) DIP, c) Chl-a, d) Secchi depth, e) bottom DO% [sat.], and f) WQI in August 2016 applied the reference values calculated using data from 2000 to 2007. Bar inserted in the figures indicates the number of stations with each grade in each Ecological Region.

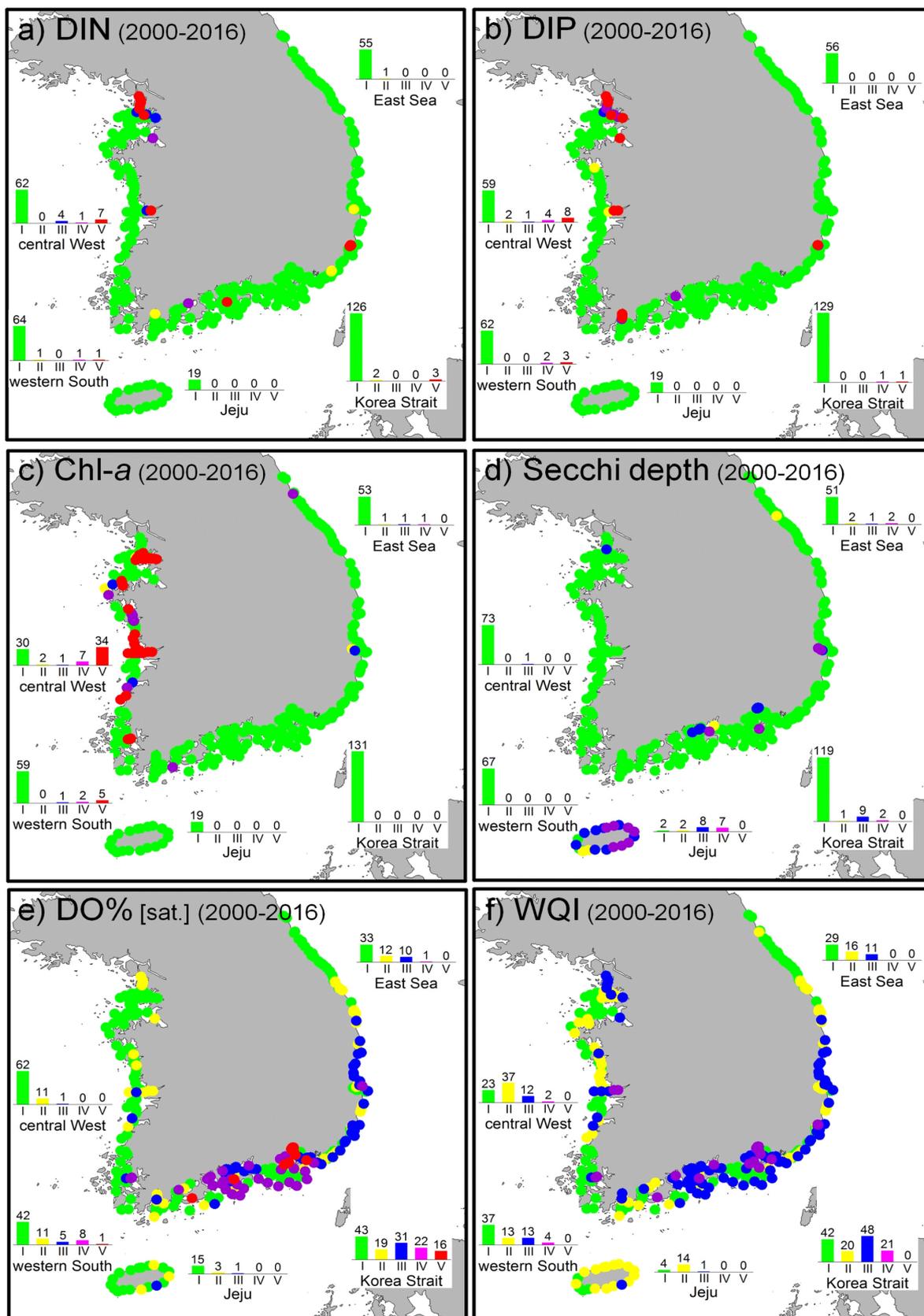


Fig. 9. Grade distributions of a) DIN, b) DIP, c) Chl-a, d) Secchi depth, e) bottom DO% [sat.], and f) WQI in August 2016 applied the reference values calculated using data from 2000 to 2016. Bar inserted in the figures indicates the number of stations with each grade in each Ecological Region.

32에서 나타났으며, 두 봉우리 사이에서 가장 작은 값은 23으로 나타났다(Fig. 7). 우리의 결과를 이용한 등급의 상한은 I, II, III, 그리고 IV 등급에서 각각 23, 38, 52, 그리고 67이었다(Table 3).

3.2.3 평가항목 및 WQI 등급

2016년 8월 해양환경측정망 자료를 대상으로 우리의 결과와 현행 해역별 기준값 사이에서 상당한 정점들이 평가항목과 WQI 등급의 변화를 보였다. 총 347개의 정점에서 등급의 변화가 나타난 정점은 DIN, DIP, Chl-*a*, Secchi depth, DO% [sat.], 그리고 WQI에서 각각 17, 2, 58, 52, 90, 그리고 173개 이었다(Table 4). 생태구역별로, DIN과 Chl-*a*는 서해중부 생태구에서 가장 많은 정점들이 등급의 변화를 보였으며, Secchi depth와 저층 DO% [sat.]는 대한해협 생태구의 정점들에서 가장 많은 등급 변화가 나타났다. WQI 역시 대한해협 생태구에서 정점의 1/2 이상이 등급의 변화를 보이며 가장 큰 비중을 차지하였다.

현행 해역별 기준값과 최근까지의 자료를 이용하여 계산된 기준값을 적용한 각 평가항목 및 WQI 등급의 분포는 각각 Fig. 8과 Fig. 9에 제시하였다. 해역별 기준값의 변화로 인해 평가항목 및 WQI에 대한 등급의 변화 경향(즉, 좋음등급↔나쁨등급) 역시 생태구역별로 다르게 나타났다. 최근까지의 자료를 적용하였을 때, Chl-*a*의 등급은 대한해협 생태구에서는 모든 정점에서 I 등급으로 나타나 좋음등급 쪽으로의 뚜렷한 변화를 보였으나, 동해 생태구에서는 I 등급이 감소하고, II, III, IV 등급이 증가하여 나쁨등급 쪽으로의 변화를 보였다. 또한, Secchi depth 역시 대한해협 생태구에서 I 등급을 갖는 정점의 수가 증가하고 나머지 등급의 정점 수가 감소하여 좋음등급 쪽으로의 변화를 보였지만, 제주 생태구에서는 I 등급이 감소하고 III 등급이 증가하여 나쁨등급 쪽으로의 변화가 나타났다. 저층 DO% [sat.]와 WQI는 모든 생태구에서 I 등급의 수가 증가하고 V등급의 수가 감소하는 등 전반적으로 좋음등급 쪽으로의 변화를 보였다. 이러한 결과들은 현행 해역별 기준값이 현재의 우리나라 해양환경을 대변하지 못하고 있음을 의미하며, 따라서 최근 자료를 적용한 기준값의 개선이 필요한 것으로 판단된다.

3.3 해역별 기준값 개선 시 고려사항

본 연구에서는 해양환경의 변화에 따라 최근 자료를 적용한 현행 해역별 기준값의 개선에 대한 필요성을 제시하였다. 특히, 해양환경 조건들이 지속적으로 변화함에 따라, 이에 대응하기 위해서는 기준값의 주기적인 개선이 필요할 것으로 판단된다. 실제로, 환경

선진국들은 이미 환경기준의 설정 방법에 대한 프로토콜을 만들어 주기적인 개선 및 보완을 수행하고 있다. 예를 들면, 미국과 호주·뉴질랜드, 영국은 다양한 매체에 대한 기준을 3-6년의 주기로 검토하도록 규정하고 있으며, 정부는 관련 기관 및 전문가 위원회 등의 의견 수렴 및 합의를 통해 필요 시 기준을 개선 및 개정하고 있다(Washington State[2011]; UKTAG[2013]; Warne *et al.*[2014]). 그러나, 현재 우리나라에서는 기존의 환경기준을 검토 및 개선하기 위한 제도나 절차는 매우 미흡한 상황이다. 따라서, 환경 선진국들의 기준 개선 체계를 벤치마킹하여 우리나라에 적합한 지속적으로 이용 가능한 프로토콜을 마련하기 위한 노력이 필요하다. 이러한 측면에서, 본 연구의 분석 결과를 토대로 한 추가적인 고려사항을 제안하였다.

3.3.1 외양역 정점의 구분 방법 개선

현행 기준값 설정 과정에서 외양역 정점을 구분하기 위한 하천 유입의 공간적 영향범위를 파악하기 위하여 표층염분(즉, 2월과 8월의 표층염분 차이)이 사용되었다. 염분은 보존성 물질로 담수의 영향범위를 파악하는 추적자로 광범위하게 활용되고 있지만, 연안 해역에서는 담수유입 및 해양물리적 조건 등의 계절적 그리고 연간 변동에 의해 크게 변하기 때문에 담수의 영향범위에 대한 정량적이고 구체적인 기준이 정의되어야 한다(Lee *et al.*[2003]; Lim *et al.*[2007]; Cho *et al.*[2008]). 그러나, 현행 방법에서는 정선관측 정점과 해양환경측정망 정점 사이에서 염분의 상대적인 차이를 이용하여 하천유입의 영향 범위를 파악하였기 때문에, 염분의 시·공간적 변화에 의존하여 외양역 정점의 수는 변동성을 가질 것으로 판단된다. 실제로, 우리의 결과에서 외양역 정점의 수는 두 기간 사이(즉, 2000-2007년과 2000-2016년)에서 상당한 차이를 보였다(Table 5). 이러한 결과는 기준값 개선 과정에서 사용되는 자료의 기간이나 범위가 변할 때마다 외양역 정점 역시 변하게 될 가능성을 지시한다. 각 평가항목의 연간 그리고 정점 간 큰 변동폭을 고려하면(Fig. 10), 외양역 정점의 변화로 인해 기준값은 평가항목들의 자연적 변동뿐만 아니라 어느 정점이 외양역에 포함되느냐에 따른 정점 간의 공간적 차이에 의한 영향도 크게 받을 것으로 판단된다.

또한, 한강, 금강, 낙동강 등 큰 강과 연계하여 육지로부터 담수 유입의 변동이 큰 우리나라 연안 해역 특성 상 상대적인 염분차이를 이용하여 구분된 외양역 정점은 해당 생태구역을 대표하지 못하는 경우도 있는 것으로 나타났다. 예를 들면, 서해중부 생태구에서 외양역 정점의 수는 두 기간 모두에서 총 정점 수의 약 10% 정

Table 5. Number of stations with characteristics of oceanic region in each Ecological Region

| Ecological Region | 2000-2007 | | 2000-2016 | |
|-------------------|---------------|-----------------|---------------|-----------------|
| | Total station | Oceanic station | Total station | Oceanic station |
| East Sea | 56 | 41 | 56 | 26 |
| Korea Strait | 94 | 33 | 135 | 65 |
| western South | 57 | 20 | 67 | 31 |
| central West | 57 | 6 | 75 | 8 |
| Jeju | 19 | 19 | 19 | 19 |

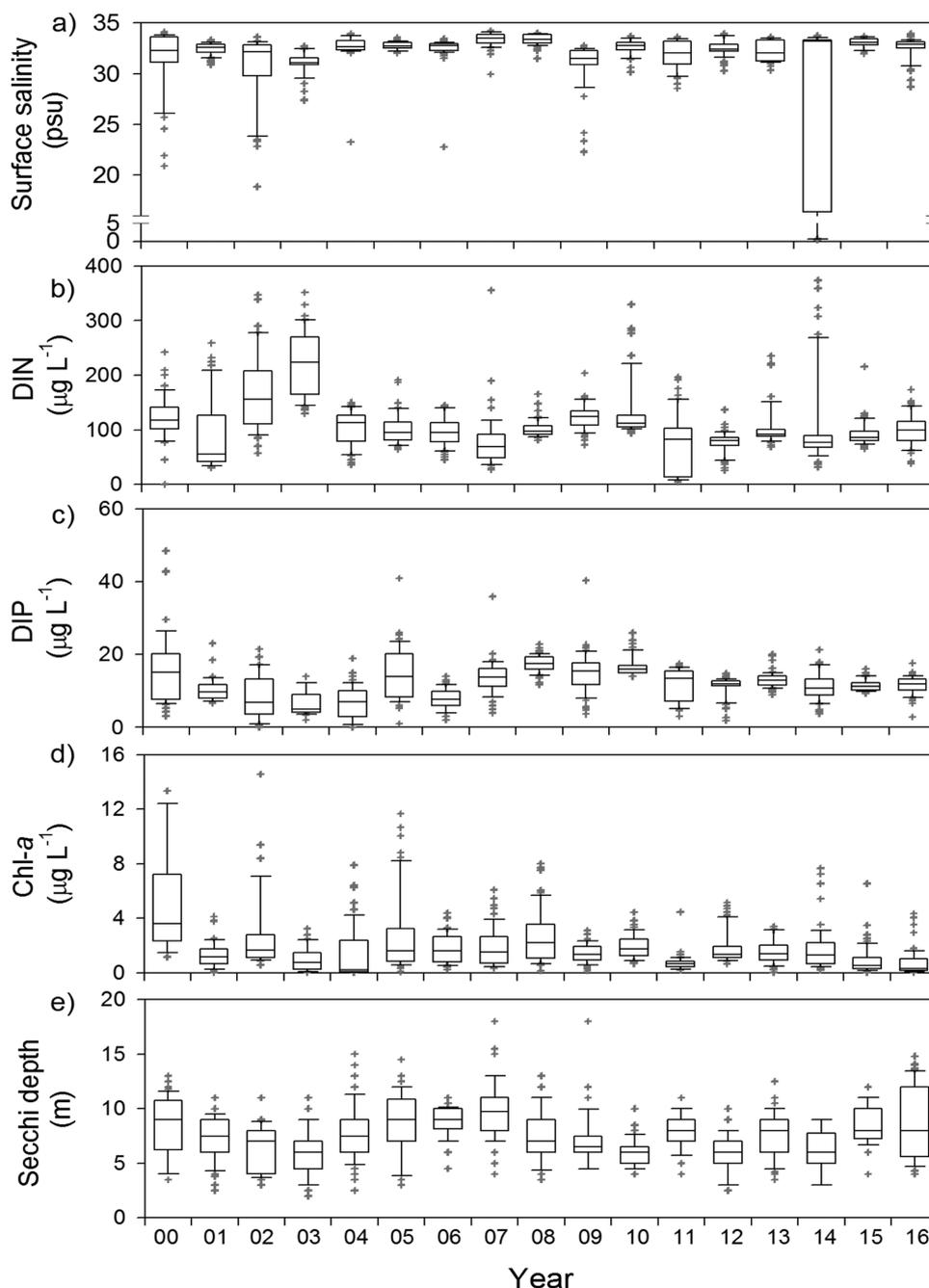


Fig. 10. Spatio-temporal distribution of a) Surface salinity in August, b) DIN in February, c) DIP in February, d) Chl-a in May, and e) Secchi depth in May in the East Sea Ecological Region for 2000-2016.

도에 불과하였으며(Table 5), 이들의 위치는 가로림연안 해역에서 집중되어 있었다(Fig. 11). 일반적으로 연안 해역에서 해양환경 조건들은 육상에서 공급되는 담수와 해수의 혼합으로 인해 상당한 공간적 차이를 보이기 때문에(즉, Fig. 10), 이러한 제한된 공간적 범위에 포함된 일부 정점의 자료만을 이용하여 설정된 기준값이 서해중부 생태구를 대표하기는 어려울 것으로 판단된다.

측정망 정점의 자료를 이용하여 해역별 기준값을 설정하는 과정에서 인위적인 영향을 배제하기 위한 외양역 정점의 구분은 필수

적인 과정으로 판단된다. 그러나, 상기 결과들을 고려하면 현행 외양역 정점 구분방법은 기준값을 주기적으로 개선하는데 있어 적합하지 않은 것으로 판단된다. 따라서, 외양역 정점을 구분하기 위한 담수의 영향범위에 대한 정량적이고 객관적인 기준이 우선 정의될 필요가 있으며, 이를 토대로 각 생태구역을 대표할 수 있는 고정적인 정점을 선정하는 등 외양역 정점의 구분 방법에 대한 전반적인 개선이 필요할 것으로 판단된다.

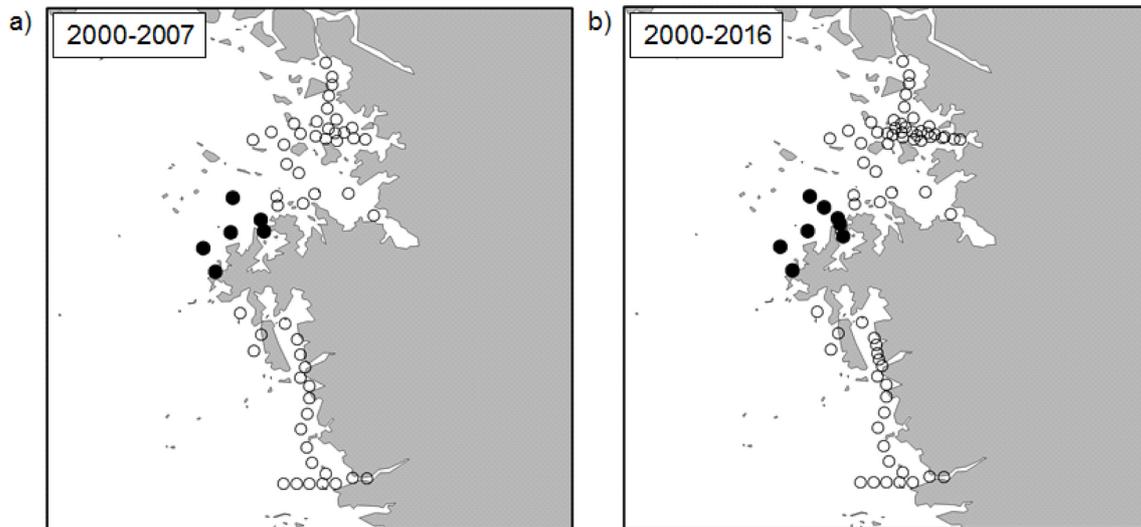


Fig. 11. The location of the stations in the central West Ecological Region. Black circles are stations with characteristics of oceanic region.

3.3.2. 자료 검증

기준값 설정에 사용되는 해양환경측정망 자료는 다양한 해양환경 관리정책을 수립하기 위한 기초자료로 활용되고 있으며, UNEP 나 OECD 등 국제기구에 제출하는 해양환경 국가보고서 등에도 이용되는 등 공신력 있는 현장관측 자료이다. 그러나, 여기에는 현장조사 특성 상 조사 당시의 해양 조건(즉, 적조, 태풍, 집중강우 등)이나 관측기기의 오차 등으로 인해 매우 높거나 낮게 나타나는 비이상적인 값 (abnormal value)들이 일부 포함되어 있다. 만약 이러한 값들이 사용된다면 그 결과는 상당한 오차를 포함할 가능성이 크다.

2000년부터 2016년까지의 자료를 이용한 우리의 계산결과에서 대한해협 생태구의 Chl-*a* 기준값은 $18.4 \mu\text{g L}^{-1}$ 로 나타났다(Fig. 6c). 이는 Chl-*a*의 부영양화 기준인 $10 \mu\text{g L}^{-1}$ 를 초과하는 매우 높은 값으로(Wasmund *et al.*[2001]), 대한해협 생태구의 자연 상태를 대표하기는 어려울 것으로 판단된다. 그럼에도 불구하고, 이러한 결과가 나타난 것은 일부 정점에서 Chl-*a* 농도가 매우 높았기 때문이다. 예를 들면, 외양역 정점들에서 2000년부터 2016년까지 Chl-*a*의 최대값은 대한해협 생태구의 마산만 15정점에서 $129.6 \mu\text{g L}^{-1}$ (2015년 5월)로 나타났다. 비록 2014년부터 조사정점으로 추가되어 3년(2014-2016)의 기간이지만, 이 정점에서 5월 Chl-*a* 농도의 연간 변동을 보면(Fig. 12), 이 최대값은 자연적 변동이기 보다는 적조 같은 식물플랑크톤의 대량 번성이나 관측 오차 등 특정한 이벤트에 의한 결과일 가능성이 큰 것으로 예상된다. 그리고 이 값의 포함 여부에 따라 대한해협 생태구에서 Chl-*a*의 기준값은 $18.4 \mu\text{g L}^{-1}$ 와 $16.2 \mu\text{g L}^{-1}$ 로, 약 12% 차이를 보였다. 만약 $10 \mu\text{g L}^{-1}$ 이상의 Chl-*a* 값을 모두 제외한다면, 대한해협 생태구에서 Chl-*a*의 기준값은 $4.3 \mu\text{g L}^{-1}$ 로, 현행 해역별 기준값과 비교적 큰 차이를 보이지 않았다. 이러한 결과를 고려하면, 기준값 설정에 사용되는 자료들에 대해 각 생태구역의 자연 상태를 벗어나는 비이상적인 값을 선별하는 것이 중요한 것으로 판단되지만, 현행 방법에서 이를 위한

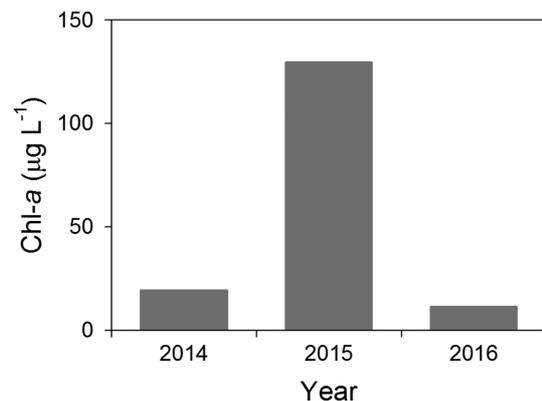


Fig. 12. Annual variations of Chl-*a* concentration in May at Masan 15 station in the Korea Strait Ecological Region.

기준이나 근거는 마련되어 있지 않다. 따라서, 각 생태구역에 포함된 측정망 정점의 역사적 자료를 토대로 각 평가항목의 자연적 변동 범위를 파악하고, 이 범위를 벗어나는 이상치를 제거하는 과정이 추가될 필요가 있다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 최근까지의 해양환경측정망 자료(2000-2016)를 적용하여 해양환경의 장기적인 변화에 따른 해역별 기준값의 변화 여부를 살펴보았다. 그러나, 선행 연구의 계산과정에서 측정망 정점의 생태구역 구분에 대한 근거가 명확하지 않았고 외양역 구분 기준값과 외양역 정점 수의 차이로 인해 현행 해역별 기준값을 재현할 수 없었기 때문에, 우리의 결과를 현행 해역별 기준값과 직접적으로 비교할 수 없었다. 두 기간 (2000-2007과 2000-2016)에 대한 우리의 계산결과를 비교해 본 결과, 해양환경 조건의 변화로 인해 해역별 기준값은 상당한 차이를 보였으며, 이로 인해 각 평가항

목 및 WQI 등급도 변하는 것으로 나타났다. 이는 현행 해역별 기준값이 현재의 우리나라 해양환경을 반영하지 못한다는 것을 지지하며, 그러므로 최근 자료를 이용한 기준값의 개선이 필요한 것으로 판단된다.

현재 생태기반 해수수질 기준에 대해 전반적인 개선의 필요성이 제기되고 있다. 복잡한 우리나라 연안환경의 특성을 반영하기 위해 5개 생태구역에 대한 보다 세분화한 해역으로의 구분, 다양한 매체(퇴적물, 생물 등)를 고려한 종합적인 해양환경기준의 설정, 육상(하천, 호수 등) 수질평가 기준과 연계하기 위한 평가항목 및 평가방법의 설정, 수질평가지수 산정 시 각 평가항목에 대한 보다 객관적인 가중치 산출 등 다양한 개선 사항들이 제시되고 있다. 이에 대해 과학적 근거와 사회적·경제적 여건을 종합적으로 고려하여 정부, 관련 기관 및 각 분야의 전문가 등의 신중한 논의와 합의를 통해 점진적으로 개선 및 보완해 나아가야 할 것이다. 이러한 측면에서, 비록 본 연구에서는 해역별 기준값에 초점을 두었지만, 현재 축적되어 있는 자료를 이용하여 즉시 개선 가능하므로, 생태기반 해수수질 기준의 개선을 위한 첫 단계가 될 수 있다. 해역별 기준값의 개선을 계기로 우리나라 해양환경에 적합한 수질평가 기준을 설정하기 위한 지속적인 수정 및 보완이 이루어질 것으로 기대된다.

후 기

본 논문은 2018년도 국립수산물과학원 어장환경모니터링사업(R2018051)의 지원으로 수행된 연구이며, 연구비 지원에 감사드립니다. 또한, 논문의 심사를 맡아주신 익명의 심사위원님들께 감사드립니다.

References

- [1] Cho, H.Y., Cho, B.J. and Kim, S.J., 2008, Estimation on the Regions of Freshwater Influence using the Seasonal Salinity Data in Asan Bay Coastal Zone, *J. Korean Soc. Coast. Ocean Eng.*, 20(2), 219-231.
- [2] KMI (Korea Maritime Institute), 2015, A study on Measures for Improving Application of Marine Environmental Standards.
- [3] Lee, S.-H., Choi, H.Y., Son, Y.T., Kwon, H.K., Kim, Y.K., Yang, J.S., Jeong, H.J. and Kim, J.G., 2003, Low-salinity Water and Circulation in Summer around Saemangeum Area in the West Coast of Korea, *J. Korean Soc. Oceanogr.*, 8(2), 138-150.
- [4] Lim, D-I., Rho, K.C., Jang, P.G., Kang, S.M., Jung, H.-S., Jung, R.H. and Lee, W.C., 2007, Temporal-spatial Variations of Water Quality in Gyeonggi Bay, West Coast of Korea, and Their Controlling Factor, *Ocean and Polar Research*, 29(2), 135-153.
- [5] MLTM (Ministry of Land Transport, Maritime Affairs), 2010, A Study on Establishment and Improvement of Marine Environmental Standards.
- [6] Ra, K, Kim, J.K., Kim, E.S., Kim, K.T., Lee, J.M., Kim S.K., Kim, E.Y., Lee, S.Y. and Park, E.J., 2013, Evaluation of Spatial and Temporal Variations of Water Quality in Lake Shihwa and Outer Sea by Using Water Quality Index in Korea: A Case Study of Influence of Tidal Power Plant Operation, *J. Korean Soc. Mar. Environ. Energy*, 16(2), 102-114.
- [7] Rho, T.K., Lee, T.S., Lee, S.Y., Choi, M.S., Park, C., Lee, J.H., Lee, J.Y., and Kim, S. S., 2012, Reference Values and Water quality Assessment Based on the Regional Environmental Characteristics, *J. Korean Soc. Oceanogr.*, 17(2), 45-58.
- [8] UKTAG (UK Technical Advisory Group), 2013, Updated Recommendations on Environmental Standards River Basin Management (2015-21).
- [9] Warne, M.S.J., Bately, G.E., Braga, O., Chapman, J.C., Fox, D.R., Hickey, C.W. and Van Dam, R., 2014, Revisions to the derivation of the Australian and New Zealand guidelines for toxicants in fresh and marine waters, *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 21(1), 51-60.
- [10] Washington State, 2011, Surface Water Quality Standards Triennial Review Results : Five-Year Plan (FY2012-FY2016).
- [11] Wasmund, N., Andrushaitis, A., Lysiak-Pastuszek, E., Muller-Karulisb, B., Nausch, G., Neumann, T., Ojaveer, H., Olenina, I., Postel, L. and Witek, Z., 2001, Trophic Status of the South-Eastern Baltic Sea: A Comparison of Coastal and Open Areas, *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 53, 849-864.

Received 1 October 2018

Revised 26 October 2018

Accepted 5 November 2018