

조석에 의한 수질조사에 미치는 영향에 관한 연구 -마산만 특별관리해역을 중심으로-

최수빈* · 장원근**† · 이종훈*** · 권봉오**** · 이용우***** · 최훈***** · 이문진*****

* 한국해양수산개발원 해양연구본부 전문연구원, ** 한국해양수산개발원 해양연구본부 연구위원,
*** 한국해양수산개발원 경제전략연구본부 부연구위원, **** 군산대학교 해양생물자원학과 교수,
***** 해양환경공단 해양수질처 차장, ***** 선박해양플랜트연구소 해양공공디지털연구본부 연구원,
***** 선박해양플랜트연구소 해양공공디지털연구본부 영년 책임연구원

A Study of the Effect of Tides on Coastal Water Testing -Focusing on Masan Bay-

Subeen Choe* · Wonkeun Chang**† · Jonghoon Lee*** · Bong-oh Kwon**** · Yong-Woo Lee***** ·
Hoon Choi***** · Moonjin Lee*****

* Senior researcher, Marine Policy Research Department, KMI, Busan 49111, Korea

** Research Fellow, Marine Policy Research Department, KMI, Busan 49111, Korea

*** Associate Research Fellow, Ocean Economy Strategy Department, KMI, Busan 49111, Korea

**** Professor, Department of Marine Biological Resources, Kunsan National University, Jeonbuk Gunsan 54150, Korea

***** Senior Researcher, Marine Environment Monitoring Department, KOEM, Busan 49111, Korea

***** Researcher, Ocean and Maritime Digital Technology Research Division, KRISO, Daejeon 34103, Korea

***** Tenured Principal Research Scientist, Ocean and Maritime Digital Technology Research Division, KRISO, Daejeon 34103, Korea

요 약 : 하구와 연안역은 조석주기에 따라 수층 혼합과 해수 유동이 활발하므로 보다 정확한 수질측정 결과를 얻기 위해서는 조석조건을 고려해서 시료를 채취해야 한다. 우리나라 해양환경공정시험기준에서는 평균적인 상황에 대한 자료를 확보하고자 조석중간에 시료 채취를 권장하는 반면, Kaplovsky(1957), Fortune and Mauraud(2015) 등 다수의 해외 연구에서는 간조 또는 만조와 같은 정조시 조사할 것을 권장한다. 또한 국내 해양환경정책의 수립과 평가에 활용 중인 해양환경측정망 자료의 조석효과를 파악하기 위해 2014~2020년 마산만 조사결과를 정조시와 조석중간 두 그룹으로 나누어 분석한 결과, COD, TN, TP 등 주요 해양환경지표의 두 그룹 간 수질측정값 간 차이가 있음을 확인했다. 해양환경측정망은 연안오염총량관리를 비롯한 다양한 해양환경정책의 계획수립, 목표설정 및 평가에 활용되는 만큼 정도관리가 중요하다. 이를 위해서 해양환경측정망 자료 항목으로 조석정보를 추가하고, 같은 조석조건하의 조사를 단계적으로 확대해 갈 것을 제안한다.

핵심용어 : 조석, 수질관측자료, 해양환경측정망, 마산만, 배출오염

Abstract : In estuaries and coastal areas, where water layer mixing and seawater flow are influenced by tidal conditions, it is essential to consider these tidal conditions when collecting water samples to ensure the accuracy of water quality measurements. For obtaining data that reflects average conditions, the Korean Standard Method of Examination for Marine Environment recommends collecting samples during the mid-tide. However, previous studies conducted by Kaplovsky (1957) and Fortune & Mauraud (2015) recommend sample collection during high or low tides. Furthermore, after categorizing the Masan Bay survey results from 2014 to 2020 into two groups: stand of tide (STAND) and mid-tide (MID), there was a difference between the water quality measurements between the two groups. To improve the quality of Marine environment monitoring system data, tidal information should be provided first, and sampling water under the same tidal conditions should be gradually incorporated.

Key Words : Tide, Water quality data, Marine environment monitoring system, Masan bay, Emission pollutants

* First Author : choesubin@kmi.re.kr, 051-797-4741

† Corresponding Author : wkchang@kmi.re.kr, 051-797-4732

1. 서론

해양환경측정망은 「해양환경 보전 및 활용에 관한 법률」 제18조 제1항과 「해양환경관리법」 제9조 제1항에 따라 구성·운영되는 해양환경 정기조사이다. 따라서 해양환경측정망은 국가와 국민이 해양환경의 현황과 추세를 파악하고, 오염원 확인과 추적에 활용할 수 있는 기초자료로서 해양환경정책의 수립, 이행과 평가에 전반적으로 활용되는 유일한 국가 공인 해양수질 정기조사 자료이기 때문에 신뢰성과 객관성 확보가 무엇보다 중요하다. 예를 들어, 해양환경측정망은 해양환경종합계획을 비롯한 환경관리해역 기본계획과 해역별 관리계획의 계획 수립 기초 조사로 활용되고 있고, 9개 해역별 관리계획과 4개 연안오염총량관리 기본계획의 관리목표 수립과 평가에도 이용된다.

미국의 경우, 청정수법(CWA: Clean Water Act)에 따라 주(州)마다 손상된 수역 목록(303(d) list)을 작성하게 하고, 해당 수역에 대해 총량규제인 오염총량관리(TMDL: Total Maximum Daily Loads) 계획을 세우게 한다. 주정부는 손상된 수역을 식별할 때 연방규정(40 C.F.R. §130.7(b) (5))에 따라 “기존의, 쉽게 이용가능한 모든 정보(AERAI: all existing and readily available information)”를 활용하는데, 이는 주정부가 사용할 데이터와 정보를 선택할 수 없으며, 다른 데이터와 정보를 의도적으로 무시할 수 없음을 의미한다. 주정부는 303(d) 목록 작성뿐만 아니라 CWA 섹션 305(b) 수질평가, CWA 섹션 319 비점오염원 프로그램에 따라 수행된 평가에서도 소위 말하는 AERAI를 활용한다. AERAI는 법적 용어는 아니지만 미국 환경정책에서 흔히 사용되는 용어로, 주정부 환경국의 심의를 통해 목표 달성 평가, 규제 기준 해당 여부 등 정책에 활용된다.

우리나라의 경우 수질 분야 해양환경정책에 활용할 수 있는 AERAI로 현재 해양환경측정망이 유일하므로, 해양환경측정망의 정도관리가 더욱 중요하다고 할 수 있다. 해양환경측정망의 조사 범위인 하구와 연안역은 조석주기에 따라 수층의 혼합과 해수 유동이 활발하므로 보다 정확한 수질측정 결과를 얻기 위해서는 시료 채취 시 조석주기를 고려해야 한다. 조위에 따라 해역의 수질 특성이 크게 달라진다면, 조석효과를 고려하지 않고 확보한 수질자료를 활용하여 정책을 수립·평가하는 것이 바람직하지 않기 때문이다.

본 연구에서는 우리나라 연안수질조사 시 미치는 조석효과를 파악하고, 개선 방향을 제안하고자 한다. 이를 위해 해외 선행연구와 국내 여건을 분석하여 시사점과 한계점을 정리했다. 이어 실제 국내 연안수질조사 사례를 통해 조석효과를 알아보고자 해양환경측정망 마산만 조사자료를 분석하여 실태를 파악하고, 개선이 필요한 문제점을 도출하였다.

2. 이론적 배경

2.1 해외 선행연구

조위에 따라 연안수질조사 결과가 달라질 수 있으므로 조사 시 조석을 고려해야 함을 연구한 해외 사례는 Table 2과 같다.

Kaplovsky(1957)는 미국 델라웨어 강 하구에서 정점별 영양염 조사를 한 결과, 정조(간조 또는 만조) 시 동일한 조석조건하에 시료를 채취해야 해야 정점간 차이를 줄이고, 그렇지 않을 때보다 훨씬 유효한 결과를 제공한다고 결론지었다.

캐나다 환경부장관 협의회(CCME: Canadian Council of Ministers of the Environment)의 수질지표인 CCME WQI 가이드라인에서는 표층수 채취 시 해류, 조석, 파랑, 홍수 등을 고려할 것을 명시하고 있는데, 시계열 자료를 취득하기 위해서는 반드시 같은 조석주기에 채수할 것을 명시했다(CCME, 2016).

Fortune and Mauraud(2015)가 호주 다윈하버 하구 중 Jones Creek에서 조석에 따른 수질변화를 연구한 결과, 탁도, pH, DO 등 수질항목 측정값의 결과가 조석(조금과 사리, 밀물과 썰물)에 따라 차이가 크게 나타났음을 분석했고, 수질 시료는 동일한 조석주기(소조)에 만조 전후 3시간 이내에 채취할 것을 권장했다. 또한 수질조사 결과를 해석할 때 조석이 수질항목에 미친 영향에 대한 이해가 필요하다고 명시했다.

Cornelisen et al.(2011)는 뉴질랜드 노스랜드 지역의회(NRC: Northland Regional Council)의 연안수질자료를 분석하여 조석이 염분, 탁도, 용존 영양염 등 수질변수에 큰 영향을 미칠 수 있음을 파악했다. 그러므로 같은 조석조건에서 시료를 채취할 것을 권장했으며, 이를 수행하기 어려울 경우에는 조석효과를 명시하여 결과 해석에 도움이 되도록 했다.

Nascimento et al.(2021)는 중조차 환경인 포르투갈 Sado 강 하구에서 대조와 소조에 따른 연안수질 변화를 측정했는데, 조석주기에 따라 수질측정값이 크게 영향을 받는 것으로 관찰되었다. 영양염과 부유물질 등은 간조시에 높은 값을 보이는 특성이 있으므로 오염측정을 위해 간조시 측정할 것을 권장했다.

Table 1. Summary of precedent studies

Precedent study	Summary
Kaplovsky (1957)	Results obtained by the "same slack" procedure provide far more valid data than the cross-sectional technique.
CCME (2016)	If a surface water body will be sampled repeatedly, the design should specify frequency (e.g., daily, weekly, monthly, during flood events that exceed a threshold flow velocity, during specific stages of the tidal cycle) of sample collection.

Fortune and Mauraud (2015)	Given the influence of tide on water quality indicators measured, a monitoring program should take into account the variability due to tidal cycles. In order to limit this variability, water quality monitoring programs undertaken by the Aquatic Health Unit occurs at the same tidal cycle (neap tide) and during a three hour window around high tide.
Cornelisen et al.(2011)	Ideally water samples would also be collected at a comparable tide height. Knowledge of the effects of tides on water quality parameters is required when interpreting results over time within the context of guideline compliance.
Nascimento et al.(2021)	To assess the worst-case scenario in water quality of the Sado Estuary, low water should be chosen as the sampled tidal phase.

sources: Kaplovsky(1957), p. 1043, 1053; Canadian Council of Ministers of the Environment(2016), p. 228; Fortune and Mauraud(2015), p. 32; Cornelisen et al.(2011), p. 32; Nascimento et al.(2021), p. 14.

2.2 국내 여건

해양환경측정망은 해양수산부고시인 「해양환경측정망 구성·운영계획」에 따라 운영한다. 같은 고시에서 현장조사 및 시료채취에 대한 사항을 다루고 있으며, 여기서 다루지 않는 사항은 국립수산과학원 고시인 「해양환경공정시험기준」을 따른다.

「해양환경측정망 구성·운영계획」에서는 시료채취시기를 정할 때, “시료채취 시 조사해역의 조석·조류, 기상상태, 강우 등에 의한 담수유입량의 변화, 시료채취 정점 및 인근 해역에서의 공사 상황 등을 사전에 고려하여 수질이 대표적인 상태라고 판단되는 시기에 채수하는 것을 원칙”으로 할 것을 명시했으며, 가능한 한 조사월(2, 5, 8, 11월) 초순에 시료채취할 것을 권장한다.

「해양환경공정시험기준」에서는 시료채취시기에 대해 조금 더 자세히 다룬다. 「해양환경공정시험기준」은 「해양환경공정시험기준 고시」를 통해 고시되며, 조사대상에 따라 「해수공정시험기준」, 「퇴적물공정시험기준」, 「해양생물공정시험기준」, 「해양폐기물공정시험기준」 등으로 세분화되며, 본 연구에서는 연구목적에 따라 「해수공정시험기준」을 살펴보았다. 「해수공정시험기준」에서는 하구 및 연안역을 포함하여 해역의 수질측정값은 조석에 따라 염분, pH, 탁도, 영양염, 용존산소, 유기물 등의 변화가 크기 때문에 조석효과를 고려하여 시료채취 할 것을 명시한다. 서로 다른 조석주기에 채취한 시료에서 부유물질, 엽록소 농도 등을 비교하는 것은 무의미하다고도 적시되어 있다. 또한 이상적인 시료채취 시기로 조석중간 시기를 권장한다.

이는 정조시의 측정값은 극단적일 수 있기 때문이며, 조석표, 인근 지역의 조석, 기존 자료 등을 활용하여 조석주기를 파악하도록 한다. 집중 감시 대상 해역의 경우, 여러 선박을 동원하여 가능한 한 동시관측을 하고, 대조기, 소조기 2차례의 시료를 추가 취득할 것을 권장한다.

3. 분석결과 및 해석

3.1 분석 개요

조위에 따른 수질관측값 차이를 알아보기 위해 국립해양조사원 바다누리 조위관측소 자료와 해양환경공단 해양환경측정망 자료를 이용했다. 분석항목은 WQI(Water Quality Index) 산정에 필요한 수온, 염분, 용존산소(DO: Dissolved Oxygen), 용존무기질소(DIN: Dissolved Inorganic Nitrogen), 용존무기인(DIP: Dissolved Inorganic Phosphorus), 엽록소-a(Chl-a: Chlorophyll a), 투명도와 「해양환경관리법 시행령」 제12조의 오염물질 총량규제항목인 화학적 산소요구량(COD: Chemical Oxygen Demand), 총질소(TN: Total Nitrogen), 총인(TP: Total Phosphorus)와 해양산성화지표인 수소이온농도지수(pH: power of Hydrogen) 등 12개 물질의 표층과 저층 농도의 평균이다. 분석대상 기간은 2014-2020년이며, 연 4회(2, 5, 8, 11월) 자료를 모두 활용했다. 분석 및 해석 기준에 따라 월별이 아닌 계절별 구분이 필요한 경우에는 2월을 겨울, 5월을 봄, 8월을 여름, 11월을 가을로 대치했다. 조사팀의 일정에 따라 3월에 채수를 한 경우가 있었으며, 이는 2월 자료로 보았다. 분석대상 공간은 마산만 특별관리해역 관리구역으로 설정했다. 분석정점은 Fig. 1에서 보는 바와 같이 조위자료는 마산 조위관측소 지점이며, 연안수질자료는 마산만 특별관리해역 관리구역 내에 위치한 해양환경측정망 마산만1~15정점, 진해만1~2정점, 행암만1~4정점, 등 총 21개 정점이다.

마산 조위관측소 1분 단위 자료 중 해양환경측정망 조사일자와 겹치는 86일의 자료를 추출한 뒤, 각 일자별 조석을 파악했다. 조위에 따라 고조·저조 전후 2시간을 정조시(STAND), 나머지 구간을 조석중간(MID)으로 그룹화했다. 이후 해양환경측정망 조사 시점(분단위)과 매칭하여 해양환경측정망 시료 수집을 어떤 조석주기에 했는지 구분했다. 총 588회의 측정횟수 중 정조시 조사가 215회, 조석중간의 조사가 373회였다.

정조시와 조석중간 그룹 간 수질측정값이 다른 특성을 보이는지 알아보기 위하여 두 그룹의 평균비교 검정법인 독립표본 t-test를 수행했다. 분석을 위해 통계 패키지 SAS® 9.4를 이용했다.

조석이 연안수질조사에 미치는 영향에 관한 연구 -마산만 특별관리해역을 중심으로-

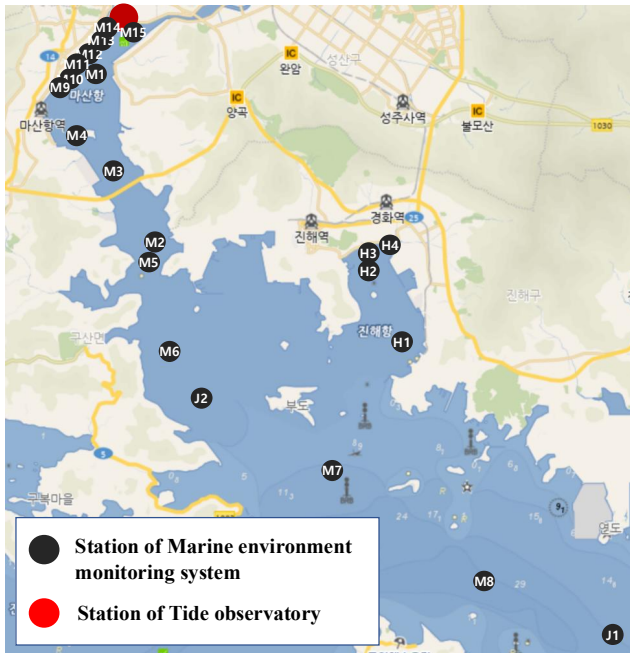


Fig. 1. Monitoring station.

3.2 분석 결과

이하의 표들은 바틀렛 검정을 통해 등분산 검정을 수행한 후, 각 분산 가정에 해당하는 t-test의 유의확률(p-value)을 나타낸다. 연구자가 정한 유의수준(α)보다 유의확률이 낮을 경우, 귀무가설을 기각할 수 있다. 유의수준은 일반적으로 5% 또는 10%로 설정한다. 본 연구의 귀무가설은 ‘정조시 조사한 수질측정값과 조석중간에 조사한 수질측정값 간 특성 차이가 없다’이다.

먼저, Table 2의 정점별 조석에 따른 측정항목별 t-test 결과를 살펴보면, 252회의 검정 조합 중 15회, 5.9%가 유의수준 5% 하에서 정조시와 조석중간 그룹 간 수질측정값의 특성이 다르다고 할 수 있었다. 마산만1정점의 경우, pH, DIN, TN 세 항목이 조석에 따라 다른 특성을 보인다고 할 수 있다. 이어 행암만2정점(수온, TP)과 마산만2정점(COD, Chl-a)에서 각각 2회 귀무가설을 기각했다.

Table 2를 측정항목별로 해석할 경우, Chl-a가 4회(마산만2, 5, 6, 9정점)로 귀무가설을 기각하는 경우가 가장 많았다. 총량규제항목인 COD, TN, TP는 각각 2회, 1회, 2회 귀무가설을 기각했다.

유의수준을 조금 더 유연하게 설정하여 10%로 본다면, 귀무가설을 기각하는 경우는 252회의 검정 조합 중 37회, 14.6%를 차지한다.

Table 2. Table of p-value results according to t-test by station: MID vs STAND. P-value of 5% or less is **in bold**, 10% or less is *in italics*

Station	Temp.	Salinity	pH	DO	COD	DIN
H1	0.1183	0.1836	0.1640	0.6951	0.2613	0.7189
H2	0.0311	0.1475	0.1134	0.6912	<i>0.0960</i>	0.7152
H3	<i>0.0518</i>	<i>0.0829</i>	0.4923	0.9392	0.1501	0.3380
H4	0.4253	0.2242	0.8089	0.7643	0.1398	0.4350
J1	0.3116	<i>0.0749</i>	0.2953	0.2596	0.7985	0.3477
J2	0.9149	0.2660	0.3226	0.2919	0.8169	0.9014
M1	0.2682	0.3178	0.0327	0.1170	0.4516	0.0103
M2	0.5593	0.2759	0.2676	0.5839	0.0213	0.6379
M3	0.2253	0.5493	0.3038	0.9873	<i>0.0903</i>	0.1664
M4	0.6269	0.3185	0.6882	0.9751	0.5893	0.8686
M5	0.6287	0.5311	0.1704	0.3230	0.2634	0.7389
M6	0.2114	0.2069	0.7014	0.5480	0.7732	0.9177
M7	<i>0.0813</i>	0.9170	<i>0.0828</i>	<i>0.0584</i>	0.7149	0.9626
M8	0.5730	0.8213	0.8170	0.7967	0.0092	0.5593
M9	0.6297	0.6961	0.5090	0.5855	0.7916	0.5863
M10	0.2384	0.7183	0.9707	0.7391	0.5892	0.5897
M11	0.2397	0.7681	<i>0.0760</i>	0.3533	0.7334	<i>0.0874</i>
M12	0.4839	0.7290	0.7196	0.8545	0.8708	0.4367
M13	0.4776	0.6090	0.8723	0.8050	0.5799	0.3401
M14	0.5347	0.5508	0.7581	0.8815	0.3536	0.1682
M15	0.8304	0.5331	0.5346	0.4036	0.3214	0.4909
Station	TN	DIP	TP	SS	Chl-a	Transp.
H1	0.9277	0.8163	0.2878	0.2684	0.1335	0.005
H2	0.1191	0.5681	0.0337	0.3507	0.1456	<i>0.0866</i>
H3	<i>0.0930</i>	0.6849	0.0247	0.1866	<i>0.0997</i>	<i>0.0656</i>
H4	<i>0.0981</i>	0.1799	0.2635	0.2770	<i>0.0610</i>	0.2036
J1	0.9233	0.3663	0.5355	0.1897	0.6542	0.3845
J2	0.7396	0.4403	0.5288	0.2945	0.8523	0.5953
M1	0.0171	<i>0.0838</i>	0.1761	0.3189	0.7519	0.9733
M2	0.2191	0.4832	0.6721	<i>0.0705</i>	0.0290	0.4448
M3	0.9649	0.1392	0.6219	0.7855	<i>0.0582</i>	0.6877
M4	0.7286	0.9935	0.6836	0.3640	0.2569	0.6369
M5	0.2898	0.2033	0.4444	<i>0.0694</i>	0.0297	0.5390
M6	0.4885	0.9252	0.6880	0.2718	0.0308	0.7247
M7	0.2296	0.5599	0.345	0.2888	0.6339	0.4059
M8	0.6136	0.6725	0.6568	0.5010	0.9321	0.5864
M9	0.5571	0.5953	0.8040	0.2670	0.0046	<i>0.0501</i>
M10	0.8208	0.7896	0.1895	0.4681	0.8180	0.0104
M11	0.2553	0.3425	0.6771	0.9873	0.6216	0.0320
M12	0.9712	0.9751	0.3701	0.6626	0.8604	0.1521
M13	0.9062	0.9077	0.5779	0.5481	0.8952	<i>0.0765</i>
M14	0.9792	0.7809	0.7128	0.2938	0.9361	0.5819
M15	0.3822	0.4856	0.1149	0.5521	0.9006	0.4584

이어서 연도별 월별 조석에 따른 측정항목별 t-test 결과가 Table 3에 나타나 있다. 총 336회의 검정 조합 중 75회, 22.3 %가 유의수준 5 % 하에서 정조시와 조석중간 그룹 간 수질측정값 특성차이를 보인다고 할 수 있다.

Table 3을 측정항목별로 해석할 경우, 유의수준 5 % 하에서 귀무가설을 기각하는 경우가 각 측정항목마다 26회의 검정 중 최소 2회(DO)에서 최대 11회(TN, TP)로 나타났다. 귀무가설 기각 횟수가 높은 순은 TN, TP(이상 11회), COD(이상 9회), 염분, 부유물질(이상 7회) 등이다. 총량규제항목인 COD, TN, TP의 귀무가설 기각 경우가 많다는 점이 주목할 만하다.

유의수준을 조금 더 유연하게 설정하여 10 % 하에서 해석한다면, 귀무가설을 기각하는 경우는 336회의 검정 조합 중 103회, 30.6 %를 차지한다.

Table 3. Table of p-value results according to t-test by time: MID vs STAND. P-value of 5 % or less is **in bold**, 10 % or less is *in italics*

Time (yy-mm)	Temp.	Salinity	pH	DO	COD	DIN
'14-02	0.0134	0.0240	0.5703	0.1203	0.2545	0.2376
'14-05	0.7504	0.1636	0.5951	0.4761	0.0074	0.4061
'14-08	<i>0.0782</i>	0.6577	0.5366	<i>0.0765</i>	0.3136	0.6776
'14-11	<i>0.0759</i>	0.2306	0.1086	0.2698	<i>0.0609</i>	0.5965
'15-02	0.0304	0.0048	0.0053	<i>0.0769</i>	0.0016	0.2717
'15-05	0.4290	0.8402	<i>0.0650</i>	<i>0.0638</i>	0.6477	0.0201
'15-08	0.2689	0.8261	0.7860	0.7544	0.1665	0.5533
'15-11	0.2458	0.8865	0.5223	0.5209	0.6803	0.1478
'16-02	0.5883	0.1348	0.4989	0.2717	0.1690	0.3304
'16-05	0.2538	<i>0.0557</i>	0.1451	0.1073	0.4165	0.3529
'16-08	0.3948	0.4827	0.3282	0.1945	0.9799	0.5700
'16-11	0.2325	0.1156	0.2937	0.1501	0.0203	0.0060
'17-02	0.2321	0.5247	0.3855	0.6348	0.1608	<i>0.0756</i>
'17-05	0.5533	0.6554	0.5618	0.4425	0.0118	0.0105
'17-08	0.5920	0.1201	0.8386	0.5293	0.1125	0.2672
'17-11	0.0044	0.0224	0.7169	0.7933	0.6800	0.9555
'18-02	0.0164	0.0347	0.9513	0.5125	0.5745	0.3819
'18-05	0.0023	0.0181	0.0008	0.0002	0.0064	0.0196
'18-08	0.5545	0.1155	0.8399	0.1503	0.0123	<i>0.0646</i>
'18-11	0.7053	0.5077	0.5474	0.8622	0.5717	0.9928
'19-02	<i>0.0999</i>	0.0031	0.0011	0.8946	0.0293	<i>0.0515</i>
'19-05	<i>0.0940</i>	0.3326	<i>0.0737</i>	0.3757	0.1541	<i>0.0592</i>
'19-08	0.9183	0.3947	0.9211	0.5583	0.8910	0.9117
'19-11	0.6721	0.1313	0.6234	0.5527	<i>0.0720</i>	<i>0.0839</i>
'20-02	0.3421	0.3690	0.0146	0.1817	0.4734	0.6267
'20-05	0.0022	0.0015	<i>0.0698</i>	0.0093	0.0111	0.9415
'20-08	0.3344	0.1821	0.2116	0.4247	0.2893	0.2043
'20-11	0.2015	0.2037	<i>0.0840</i>	0.1511	0.0114	0.0334

Time (yy-mm)	TN	DIP	TP	SS	Chl-a	Transp.
'14-02	0.8564	0.8284	0.3202	0.9330	0.3270	0.6692
'14-05	0.5318	0.6418	0.0368	0.0499	0.7843	<i>0.0596</i>
'14-08	0.6211	0.1202	0.7380	0.6312	0.8317	0.3951
'14-11	0.4031	0.6486	0.4478	0.3470	0.0033	0.0238
'15-02	0.0263	0.1124	0.0040	0.3675	0.0043	0.1066
'15-05	0.0157	0.0471	0.0233	0.0473	0.0121	0.2925
'15-08	0.4115	0.8261	0.2346	0.3539	0.4120	0.1310
'15-11	<i>0.0605</i>	0.2209	0.0364	0.0227	0.0038	0.1171
'16-02	0.0154	0.5892	<i>0.0573</i>	0.0569	0.2739	0.1154
'16-05	0.2579	0.1057	0.6051	0.3545	0.2123	0.1861
'16-08	0.8732	0.8987	0.6485	0.8228	0.3509	0.2874
'16-11	0.0021	0.1279	0.0006	0.5355	0.9331	0.0045
'17-02	0.3426	0.5423	0.4168	0.1652	0.7355	0.1350
'17-05	0.0434	0.6471	<i>0.0981</i>	0.2246	0.1087	0.6673
'17-08	0.1161	0.9303	0.1483	0.2034	0.3141	0.7512
'17-11	0.4308	0.8917	0.3660	0.8998	0.1173	0.7537
'18-02	0.2570	0.3656	0.0273	0.7752	0.3315	0.3273
'18-05	0.1360	0.0308	0.0381	0.6659	0.8960	0.1867
'18-08	0.0469	0.1308	<i>0.0958</i>	0.2500	<i>0.0993</i>	0.1504
'18-11	0.5947	0.7262	0.7013	0.4170	0.7974	0.4838
'19-02	0.0058	0.4665	0.0003	0.7903	0.0399	0.6416
'19-05	0.0005	0.8110	0.0017	0.0047	<i>0.0775</i>	0.1827
'19-08	0.4547	0.9962	0.4795	<i>0.0935</i>	0.9599	0.7984
'19-11	0.0304	0.5083	0.3218	0.3477	0.1111	0.0109
'20-02	0.4482	0.2179	0.5732	0.0442	0.3085	0.6727
'20-05	0.0011	0.8881	0.0004	0.0093	0.2257	0.0010
'20-08	0.1170	0.3670	0.4801	0.5350	<i>0.0707</i>	0.8843
'20-11	0.0290	0.0333	0.0025	0.0224	0.2165	0.0017

끝으로 Table 4는 계절별 조석조건에 따른 측정항목별 t-test 결과다. 해충 48회의 검정 조합 중 12회, 25.0%가 유의수준 5 % 하에서 정조시와 조석중간 그룹 간 수질측정값 특성차이를 보인다고 할 수 있다.

유의수준 5 % 하에서의 귀무가설 기각 횟수는 계절별 12회의 측정항목별 검정 중 봄 5회, 여름 3회, 가을 1회, 겨울 3회이다. 예를 들어 봄의 경우, pH, DO, COD, SS, 투명도 총 5개의 측정항목이 정조시와 조석중간 그룹 간 특성차이를 보인다고 할 수 있다.

Table 4를 측정항목별로 해석할 때 가장 많은 횟수의 귀무가설 기각을 한 측정항목은 COD로, 사계절 중 가을을 제외한 세 계절에서 조석조건에 따른 수질측정값 특성차이를 보인다고 할 수 있다(유의수준 5 % 하).

Table 4. Table of p-value results according to t-test by season: MID vs STAND. P-value of 5% or less is **in bold**, 10% or less is *in italics*

Season	Temp.	Salinity	pH	DO	COD	DIN
Spring	0.9402	0.1311	0.0015	0.0103	0.0357	0.0707
Summer	0.144	0.1427	0.2045	0.6572	0.0049	0.4232
Fall	<i>0.0937</i>	0.0042	0.4353	0.6045	0.8026	0.1127
Winter	0.30021	0.3755	0.3433	0.6934	0.0175	0.6405
Season	TN	DIP	TP	SS	Chl-a	Transp.
Spring	0.7206	0.8858	0.1300	0.0143	0.5372	0.0147
Summer	0.1270	0.4570	0.016	0.2173	0.1539	0.0071
Fall	0.1202	0.9056	0.2115	0.2903	0.3387	0.2476
Winter	0.2595	0.4964	<i>0.0672</i>	0.7619	0.0332	0.6689

3.3 해석

분석을 통해 귀무가설을 기각하는 경우가 무시할 수 없는 수준으로 나타났기 때문에, 정조시와 조석중간의 수질측정값의 특성이 같다고 할 수 없다는 결과를 얻었다. 이에 실제 측정값 차이가 얼마나 나타나는지 알아보기 위해 Table 5에 분석에 이용한 자료 중 마산만 특별관리해역 연안오염총량관리 관리기준점인 5개 정점(마산만1-2, 진해만1-2, 행암만1)의 측정값을 조석주기별로 정리하였다.

관리대상 오염물질 중 하나인 COD의 경우, 조석구분 없는 기존 평균값과 정조시 또는 조석중간의 평균값 간 최소 0.006 mg/L에서 최대 0.366 mg/L의 차이를 보였다.

COD 외 측정항목별 조석에 따른 최대 수치 차이는 수온 4.24℃, 염분 2.99, pH 0.154, DO 1.805 mg/L, DIN 0.102 mg/L, TN 0.119 mg/L, DIP 0.009 mg/L, TP 0.012 mg/L, SS 2.528 mg/L, Chl-a 4.119 µg/L, 투명도 0.911 m이다. 이는 평균값 간의 차이이기 때문에 실제 각 관측치는 더 큰 차이가 나타날 수 있다.

Table 5. 2014~2020 Water quality of Masan bay by tide

St.	Tides	Temp. (°C)	Salinity	pH	DO (mg/L)	COD (mg/L)	DIN (mg/L)
H1	ALL	21.30	31.89	8.30	8.90	2.60	0.066
	MID	20.36	32.41	8.31	8.56	2.45	0.078
	STAND	22.56	31.19	8.29	9.35	2.79	0.050
	diff(ALL-MID)	0.94	-0.52	-0.01	0.34	0.15	-0.012
	diff(ALL-STAND)	-1.25	0.70	0.01	-0.46	-0.19	0.016
J1	ALL	18.48	32.99	8.16	7.30	1.64	0.069
	MID	17.44	33.13	8.20	7.66	1.74	0.061
	STAND	21.10	32.63	8.07	6.38	1.38	0.090
	diff(ALL-MID)	1.05	-0.14	-0.04	-0.37	-0.10	0.008
	diff(ALL-STAND)	-2.62	0.36	0.10	0.92	0.25	-0.021

J2	ALL	20.50	31.89	8.18	7.21	2.19	0.090
	MID	19.41	31.69	8.23	7.72	1.98	0.099
	STAND	22.47	32.25	8.09	6.29	2.55	0.075
	diff(ALL-MID)	1.09	0.20	-0.05	-0.51	0.20	-0.009
	diff(ALL-STAND)	-1.97	-0.36	0.09	0.92	-0.37	0.015
M1	ALL	21.83	30.15	8.27	8.04	3.41	0.072
	MID	20.68	30.97	8.31	8.53	3.42	0.044
	STAND	26.08	27.16	8.12	6.24	3.39	0.174
	diff(ALL-MID)	1.16	-0.82	-0.04	-0.49	-0.01	0.028
	diff(ALL-STAND)	-4.24	2.99	0.15	1.81	0.02	-0.102
M2	ALL	20.50	31.74	8.14	6.47	2.31	0.075
	MID	21.03	31.50	8.15	6.70	2.33	0.083
	STAND	18.53	32.62	8.11	5.64	2.24	0.044
	diff(ALL-MID)	-0.54	0.24	-0.01	-0.23	-0.02	-0.008
	diff(ALL-STAND)	1.96	-0.89	0.03	0.83	0.07	0.030
St.	Tides	TN (mg/L)	DIP (mg/L)	TP (mg/L)	SS (mg/L)	Chl-a (µg/L)	Transp. (m)
H1	ALL	0.307	0.0046	0.033	8.17	9.50	2.91
	MID	0.304	0.0045	0.032	8.49	6.92	3.20
	STAND	0.310	0.0048	0.035	7.74	12.93	2.51
	diff(ALL-MID)	0.0027	0.0001	0.0012	-0.32	2.58	-0.29
	diff(ALL-STAND)	-0.0036	-0.0002	-0.0016	0.43	-3.44	0.39
J1	ALL	0.225	0.0099	0.026	11.49	2.60	3.86
	MID	0.227	0.0081	0.026	11.00	2.70	3.50
	STAND	0.221	0.0145	0.027	12.71	2.37	4.78
	diff(ALL-MID)	-0.0019	0.0018	0.0002	0.49	-0.09	0.36
	diff(ALL-STAND)	0.0048	-0.0046	-0.0004	-1.22	0.23	-0.91
J2	ALL	0.306	0.0111	0.034	7.84	6.32	2.98
	MID	0.315	0.0094	0.032	7.79	5.47	3.06
	STAND	0.288	0.0142	0.037	7.92	7.86	2.84
	diff(ALL-MID)	-0.0098	0.0017	0.0017	0.05	0.86	-0.08
	diff(ALL-STAND)	0.0176	-0.0031	-0.0031	-0.08	-1.54	0.14
M1	ALL	0.371	0.0085	0.054	9.56	10.46	1.71
	MID	0.338	0.0060	0.051	9.59	10.40	1.68
	STAND	0.489	0.0174	0.066	9.45	10.69	1.80
	diff(ALL-MID)	0.0323	0.0024	0.0032	-0.03	0.06	0.03
	diff(ALL-STAND)	-0.1185	-0.0089	-0.0116	0.11	-0.23	-0.09
M2	ALL	0.313	0.0122	0.042	8.93	6.38	2.88
	MID	0.337	0.0136	0.043	9.62	7.50	3.00
	STAND	0.225	0.0072	0.037	6.40	2.26	2.43
	diff(ALL-MID)	-0.0240	-0.0014	-0.0014	-0.69	-1.12	-0.12
	diff(ALL-STAND)	0.0879	0.0050	0.0052	2.53	4.12	0.45

Table 6는 마산만 특별관리해역 연안오염총량관리 관리기준점 5개 정점(마산만1-2, 진해만1-2, 행암만1)의 조석에 따른 평균을 비교한 결과이다. COD의 경우, 정조시와 조석중간 평균값 간 최대 차이는 1.089 mg/L이다(2018년). 전체와 정조시 평균값 간 최대 차이는 1.033 mg/L(2018년), 전체와 조석중간 평균값 간 최대 차이는 0.212 mg/L이다(2014년).

제3차 연안오염총량관리 수립 당시 관리목표 설정 과정에서 COD 목표를 2.1 mg/L, 2.19 mg/L, 2.23 mg/L 중 어떤 농도로 정할지를 두고 마산만 특별관리해역 민관산학협의회에서 치열한 논의를 했음을 고려하면 0.366 mg/L의 차이는 매우 큰 차이임을 알 수 있다. 마산만 특별관리해역 연안오염총량관리의 관리목표는 기하평균으로 산출하고, 본 연구는 산술평균을 이용했으므로 평균결과값의 범위 차이는 있겠으나 해양수질 관련 정책상의 목표 또는 기준이 0.01 mg/L 단위의 값에 영향을 받는다는 사실은 여전하므로 보다 정확한 수질조사 값을 제공하기 위해 측정의 정확도를 높여야 하며, 이를 위해 조석주기를 고려한 시료채취를 제안한다.

Table 6. Mean values of COD and TP by tide

Material	Tides	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
COD	ALL	2.145	2.033	2.341	2.250	2.320	2.140	2.990
	MID	1.933	2.039	2.225	2.277	2.264	1.983	3.025
	STAND	2.310	1.696	2.341	1.394	3.353	2.314	2.955
	diff (ALL-MID)	0.212	-0.006	0.116	-0.027	0.056	0.157	-0.035
	diff (ALL-STAND)	-0.165	0.337	0	0.856	-1.033	-0.174	0.035
	diff (MID-STAND)	-0.377	0.343	-0.116	0.883	-1.089	-0.331	0.07
	ALL	0.039	0.032	0.029	0.023	0.034	0.038	0.042
	MID	0.034	0.032	0.029	0.023	0.037	0.038	0.045
	STAND	0.046	0.029	0.033	0.022	0.032	0.033	0.036
	TP	diff (ALL-MID)	0.005	0	0	0	-0.003	0
diff (ALL-STAND)	-0.007	0.003	-0.004	0.001	0.002	0.005	0.006	
diff (MID-STAND)	-0.012	0.003	-0.004	0.001	0.005	0.005	0.009	

4. 결론

해양에서 관측되는 주요 인자들은 시공간적으로 상당한 차이를 보여 장기적인 변화 양상을 살펴보기 위해서는 동일한 조건에서 시료를 채취하는 것이 중요하다(Lee et al., 2021; Lee et al., 2023). 마산만의 경우 평균 수심은 약 15 m이고, 평균 조차는 약 1.3 m로 현장조사 시 조석도 고려할 필요가 있다. 본 연구에서는 해양 관측에서 중요한 고려 요소 중 하나인 조석에 의한 자료의 영향 여부를 파악하였으며, 연안오염총량관리 지표인 COD를 포함한 일부 인자의 경우 정조시와 조석중간 평균 값 간에 차이를 보였다. 2014~2020년 마산만 특별관리해역 내 해양환경측정망 조사 중 정점별로는

6.6%, 연도별 월별로는 22.3%가 조석주기에 따른 측정값 특성 차이가 있다고 정리할 수 있었다.

선행연구를 통해 살펴본 결과, 같은 정조시 조석조건일 때, 특히 만조시 연안수질조사를 해야한다고 권장하는 경우가 많았으나, 우리나라 「해양환경공정시험기준」에서는 평균적인 상황에 대한 자료 확보를 위해 조석중간에 시료채취할 것을 권장하고 있었다. 실제 해양환경측정망 조사시기의 조석 현황을 분석한 결과, 2014~2020년 총 588회의 조사 중 215번은 정조시, 373번은 조석중간에 조사되었다.

현재 해양환경측정망 결과로 제공하는 자료에서는 조사시간을 분단위까지 표기한다. 조사정점과 가까운 조위관측소의 자료를 활용해 해양환경측정망 조사가 어느 조석주기에 이루어졌는지 대략적으로 알 수 있으나 Fig. 1에서도 보듯이 조위관측소가 많지 않다보니 실제 해양환경측정망 조사정점과 조위차가 발생할 수 밖에 없고 이는 해양환경측정망 조사시기의 정확한 조석조건을 알기 어렵다는 의미이다. 당장 모든 해양환경측정망 조사시기의 조석조건을 동일화하기 어렵기 때문에, 해양환경측정망 결과 공표시 조석조건을 명시하는 방안도 고려할 수 있다.

해양환경측정망 운영 사업을 통해서 조사되고 있는 마산만의 조사 정점은 진해만 일부(2개 정점)와 행암만(4개 정점)을 포함하여 총 21개 정점이다. 마산만의 조사 해역 범위와 조사 정점수를 고려했을 때 한정된 조사 시간으로 인하여 조석을 고려하여 현장조사를 실시하는 데에는 한계가 있을 것으로 보인다. 그러나 마산만 해양환경의 장기적인 변화 양상을 파악하기 위해서는 가용한 수준에서 조석을 고려한 조사가 이루어져야 할 것으로 판단된다. 최대한 조석조건을 동일시키기 위한 측면에서는 조사정점을 늘리는 것보다 조사선박 추가와 조사인원 충원을 통해 같은 해역에서는 같은 시기에 조사하는 것이 바람직하고, 이를 매계절 매해 지속적으로 조사하여 시계열 자료를 쌓을 수 있도록 관리할 것을 제안한다. 이와 같은 조사방식의 변경은 도입까지 시일이 걸리므로, 현재로서 제안할 수 있는 방안으로는 대표정점을 지정·운영하는 것을 들 수 있다. 해역별로 해양환경 파악에 있어 대표성을 띄거나, 연안오염총량관리 관리기준점과 같이 이미 정책의 시행·평가에 활용되고 있는 정점을 대표정점으로 지정하고, 다른 정점은 기타정점으로 구분하여 해역 내에서도 대표정점은 우선 동일한 조석주기에 조사하는 방안을 고려할 수 있다.

끝으로, 본 연구에서는 마산만 특별관리해역 내 정점들을 대상으로 연도별 표층·저층 측정값의 평균을 정조와 조석중간 2개 그룹으로 나누어 비교했다. 후속연구에서는 분석지역을 전국 연안으로 확대, 수질조사값을 표층과 저층 값 각각으로 분리, 분석시기를 계절별·연도별, 고조·저조·조석중

간 3개 그룹으로 나누는 등 분석방법을 세분화하여 분석할 필요가 있다.

사 사

이 논문은 2023년도 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구이다(RS-2021-KS211535, 해양 위험유해물질(HNS) 배출 등 관리기술 개발사업, 해양 산업시설 배출 위험유해물질 영향평가 및 관리기술 개발).

References

- [1] Act On Conservation And Utilization Of The Marine Environment, Amended by Act No. 18469, Sep. 24, 2021.
- [2] Kaplowsky, A. J.(1957), Estuarine Pollution Investigation Employing "Same-Slack" Technique, Sewage and Industrial Wastes, Vol. 29, No. 9 (Sep., 1957), pp. 1042-1053, Wiley.
- [3] Nascimento, Â., B. Biguino, C. Borges, R. Cereja, J. P. C. Cruz, F. Sousa, J. Dias, C. Palma, and A. C. Brito(2021), Tidal variability of water quality parameters in a mesotidal estuary (Sado Estuary, Portugal), Scientific Reports, Volume 11, Article number: 23112.
- [4] Canadian Council of Ministers of the Environment(2016), Guidance Manual For Environmental Site Characterization In Support Of Environmental And Human Health Risk Assessment: Volume 1 Guidance Manual.
- [5] Cornelisen, C., W. Jiang, and R. Griffiths(2011), Interpreting Northland's Coastal Water Quality Monitoring Results Under Different Tide Conditions, Northland Regional Council.
- [6] Clean Water Act, 33 U.S.C., 2018.
- [7] Fortune, J. and N. Muraud(2015), Effect of tide on water quality of Jones Creek, Darwin Harbour, Department of Land Resource Management.
- [8] Lee, Y. W., Y.H. Oh, S. H. Lee, D. Kim, and D. Joung (2023), Assessment of water quality in a coastal region of sea dike construction in Korea and the impact of low dissolved oxygen concentrations on pH changes. Journal of Marine Science and Engineering.
- [9] Lee, Y. W., M. O. Park, S. G. Kim, S. S. Kim, B. Khang, J. Choi, D. Lee, and S. H. Lee(2021), Major controlling factors affecting spatiotemporal variation in the dissolved oxygen concentration in the eutrophic Masan Bay of Korea. Regional Studies in Marine Science.
- [10] Marine Environment Management Act, Amended by Act No. 19013, Oct. 18, 2022.
- [11] Marine environment monitoring system data(2014-2020), <https://www.meis.go.kr/>.
- [12] Marine environment information map, <https://www.meis.go.kr/map/oemsBaseMap.do>.
- [13] MOF(2022), Organization and operation plan of Marine environment monitoring system.
- [15] Public Notice of Korean Standard Method of Examination for Marine Environment, Amended by Act No. 2023-4, Aug. 1, 2023.
- [16] SAS Institute, SAS® 9.4.
- [17] Tide Station data(2014-2020), <http://www.khoa.go.kr/oceangrid/>.

Received : 2023. 09. 12.

Revised : 2023. 10. 26.

Accepted : 2023. 10. 27.