

낙동강 하굿둑 개방 실험에 의한 장목만 표층수의 용존유기물과 염분 특성

차형곤*, 이충현*, 신상아*, 신경순***

*한국해양과학기술원

e-mail:chahg@kiost.ac.kr

**corresponding author:ksshin@kiost.ac.kr

Characteristics of Dissolved Organic Matter and Salinity in the Surface Water of Jangmok Bay by Opening Experiment of Nakdong River Estuary Bank

Hyung-Gon Cha*, Chung-Hyeon Lee*, Sang A, Shin*, Kyoungsoon, Shin*

*Korea Institute of Ocean Science and Technology

요약

본 논문은 2019년과 2020년에 실시한 낙동강 하굿둑 개방에 따른 장목만 표층수의 염분과 용존유기물 특성을 연구하였다. 조사기간 동안 장목만 평균 염분농도는 31.5 ± 2.77 psu로 나타났다. 조사기간 동안 장목만의 평균 SUVA의 값은 1.23으로 대부분 비 휴믹 용존물질로 생분해성, 친수성을 가지며 분자량이 작은 수중기원의 용존유기물질로 추정되는 값을 나타내었다. 2020년 6월부터 7월까지 약 1개월 동안 하굿둑 개방이후 장목만 표층 SUVA의 값이 3.62로 기존의 장목만의 SUVA값에 비해 약 3배 증가하였다. SUVA는 염분과 높은 음의 상관관계($r=-0.6784$, $p<0.001$),를 나타내었고, fDOM 센서로 측정된 휴믹 용존물질은 염분과 더욱 명확한 음의 상관관계를 나타내었다($r=-0.8428$, $p<0.001$). 육상기원의 휴믹물질의 증가로 인해 낙동강 하굿둑 개방 실험은 장목만 표층수에 영향을 미쳤다고 판단된다.

1. 서론

해양에서 유기물(Organic matter)은 일차생산자인 식물플랑크톤에 의해 대부분 생산되며 내륙에 근접한 해역의 경우 식물플랑크톤 뿐만 아니라 대기나 강 등으로부터 육상기원의 유기물이 해양으로 유입이 된다. 이러한 유기물은 해양에서 박테리아의 호흡에 의해 무기탄소로 재광물(remineralization) 되거나, 먹이망 내 에너지원으로 전달된다. 또한 수심이 깊은 대양에서 용존 및 입자성 유기물들은 입자성 유기물 또는 입자성 무기물과 함께 침강하여 탄소를 심해로 수송하는 생물학적 탄소 펌프(biological pump)작용을 한다[1].

낙동강 하구역에는 염수를 최소화하여 농업수 및 공업수 등을 공급하기 위해 1987년 인공제방 건설이 완료되었다. 이로 인한 주변 환경 변화가 관찰 되었고[2], 대한민국 환경부에서 낙동강 하구의 기수 생태계 복원을 위해 낙동강 하굿둑 수문 건설 32년 만인 2019년 6월(총 개방 1일)에 하굿둑 개방 실험을 실시하였다. 이후 2019년 9월(총 개방 1일), 2020년 6월~7월(총 개방 1개월) 개방 실험이 이루어졌으며, 2021년에는 3~4차례 개방이 계획되어 있다[3].

지 등(2020)의 연구에 따르면 낙동강 하구의 용존유기물 중 분자크기에 따라 분리한 결과 휴믹 물질(Humic substances)이

가장 많이 분포하였으며, 낙동강 하류의 용존유기물질은 소수성, 친수성, 토양기원, 수중기원, 방향족성 등의 특성이 서로 공존하여 존재 한다고 보고하였고, 유기물질 거동에 가장 큰 영향을 미치는 요인은 강우에 의한 외부 유기물질의 유입, 플랑크톤의 생물활동에 의한 자생적 유기물질의 유입 순이라고 보고 하였다[4]. 나 등(2018)는 하굿둑 수문 개방 시 EFDC-NIER (Environmental Fluid Dynamic) 조류 모의 3차원 수치 모델결과 표층 염분의 공간적 분포는 가덕도 남단까지 담수의 영향이 미칠 것이라고 보고 하였다[5].

장목만은 낙동강 하굿둑으로부터 직선거리 약 28 km에 위치해 있으며 가덕도의 인근에 위치해 있다. 본 연구는 낙동강 하굿둑 개방으로 인한 장목만의 표층수의 유기물특성에 기여하는 요소들을 파악하기 위해 진행되었으며, 표층수의 염분, 유기물질의 대다수를 차지하는 용존유기탄소(Dissolved organic carbon) 농도, 적은 시간 안에 분자량 및 소수성 물질의 정도를 상대적으로 가늠 할 수 있는 SUVA(Specific Ultraviolet Absorbance)를 산출하고, 형광 발하는 유기 용존물질(fluorescent dissolved organic matter, fDOM)의 상관관계를 확인하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 연구 지역 및 샘플링

경상남도 거제시 장목만에 위치한 한국해양과학기술원 연구용부두에서 샘플링 하였으며[그림 1], 샘플링 기간은 2020년 1월 04일부터 2021년 12월 09일까지 약 2주일 간격으로 만조 시간에 이루어졌다. 샘플링은 표층수에서만 실시되었다.

2.2 분석 방법

수온(Temperature), 염분(Salinity), pH, fDOM (fluorescent dissolved organic matter)은 다항목수질 측정기인 EXO2 (YSI co., USA)로 현장에서 측정하였다. EXO2에 장착된 fDOM 센서는 UV 370nm에서 여기(excitation)되며 470nm에서 감지(emission)되며 휴믹 유사물질(humic-like substances)을 대상으로 한다.

용존유기탄소(Dissolved organic carbon; DOC) 측정을 위해 표층수를 450°C로 구워진 25mm GF/F 필터에 여과 후 즉시 인산(50%)를 첨가하여 샘플용액이 pH 2이하가 되게 하였다. 이후 분석 시 까지 냉동보관하였고 TOC-V_{CPH}(Shimadzu co., Japan)로 DOC농도를 측정하였다.

SUVA(Specific Ultraviolet Absorbance) 측정은 자외선 254nm에서 흡광도와 DOC 농도의 비로 산출하며 다음과 같이 계산하였다[1].

$$SUVA_{254}(L \cdot mg^{-1} \cdot cm^{-1} \cdot m^{-1}) = Abs_{254}(cm^{-1}) / DOC \text{ 농도}(mg L^{-1}) \times 100 \quad [1]$$

흡광도(Absorbance, Abs)는 Optizen 3220UV (Mecasys co., Republic of Korea)로 측정 하였다.



[그림 1] 샘플링 지역, 경상남도 거제시 장목만 한국해양과학기술원 연구용 부두 (34°59'38.43"N, 128°40'28.14"E)

2.2 자료 분석

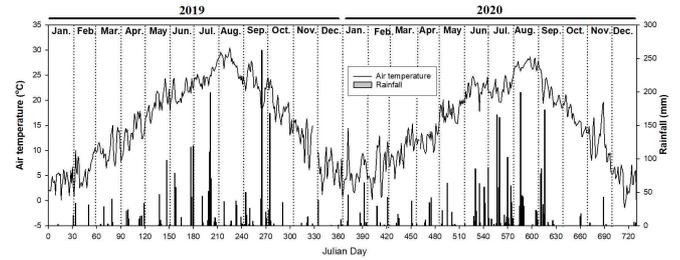
기상자료의 거제시 평균기온과 강우량은 기상청 자료를 이용하였다[6]. 분석자료의 도표 및 Pearson 상관계수(correlation coefficient) 분석은 Sigmaplot

(ver.14.0), Excel (ver. 2019)과 Grapher (ver. 17.3.454)를 이용 하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 장목만 환경 및 유기물 농도

2019년부터 2020년까지 거제시의 기온은 -2.2~30.4°C(15.2±7.88°C)이며, 강우량은 0.0~252.6 mm(20.7±38.9 mm)로 확인되었다[6][그림 2].



[그림 2] 2019년부터 2020년까지 거제도 기온과 강우량 일변화

조사기간 동안 측정된 장목만의 표층수의 수온, 염분, pH, fDOM, POC 농도, DOC 농도, 254nm에서 UV 흡광도, 계산된 SUVA₂₅₄ 그리고 TSS의 최소, 최대, 평균 및 표준편차는 표 1에 나타내었다.

조사기간 동안 월 총강수량과 월 평균 표층 염분과의 Pearson 상관계수는 $r = -0.6346$, $p < 0.01$ 로 나타나 음적 선형관계를 나타내었다.

2019년 7월과 10월의 장목만 표층 염분은 각각 평균 29.6 ± 2.54 psu, 평균 27.5 ± 3.39 psu, 2020년 7월부터 9월의 염분은 각각 7월 평균 27.1 ± 2.68 psu, 평균 8월 25.0 ± 6.35 psu 그리고 9월 평균 28.9 ± 1.17 psu로 조사기간 장목만의 평균 염분보다 낮은 염분을 나타내었다. 2019년 2회(6월과 9월, 총 2일), 2020년 1회(6월~7월, 총 1개월) 낙동강 하굿둑 개방 실험을 실시한 이후에 나타났다. 장목만의 DOC 농도는 2019년 12월 4일 (4.09 mg L^{-1})을 제외하고 큰 변화를 나타내지 않았다.

[표 1] 장목만에서 2020년 1월 04일부터 2021년 12월 09일까지 수온, 염분, pH, fDOM, DOC, Abs₂₅₄, SUVA₂₅₄의 최대, 최소, 평균 및 표준편차

	Unit	Min	Max	Mean	SD
Temp.	°C	6.71	28.40	17.2	6.54
Salinity	psu	16.4	34.1	31.5	2.77
pH	-	7.76	8.75	8.08	0.16
fDOM	QSU	1.00	17.5	4.31	2.72
DOC	mg L ⁻¹	0.98	4.09	1.60	0.49
Abs ₂₅₄	cm ⁻¹	0.007	0.050	0.018	0.007
SUVA ₂₅₄	L·mg·C ⁻¹ ·m ⁻¹	0.62	3.62	1.23	0.48

SUVA₂₅₄는 2020년 8월 13일 3.62 L·mg·C⁻¹·m⁻¹으로 가장 높은 값을 나타내었고 이를 제외하고 <2 L·mg·C⁻¹·m⁻¹의 값을 보였다. 선행연구에서 SUVA 값이 4 이상일 경우 DOM 성분은 난분해성 및 소수성인 휴믹물질(humic substance), 방향족성, 토양기원, 외부생성 유기물질로 구분하고, 2에서 4사이의 SUVA 값은 소수성 휴믹 물질(hydrophobic humic substance)과 친수성 비 휴믹 물질(hydrophilic non-humic substance)의 혼합 물질로 구분하며, 2 미만은 비 휴믹 물질로 생분해성, 친수성을 가지며 분자량이 작은 수증기원의 유기물질로 추정 할 수 있다 [4][7][8]. fDOM 값은 2020년 8월 13일에 17.5 QSU로 가장 높은 휴믹 유사 물질 농도를 나타내었다[그림 3].

3.1 장목만 유기물질 인자

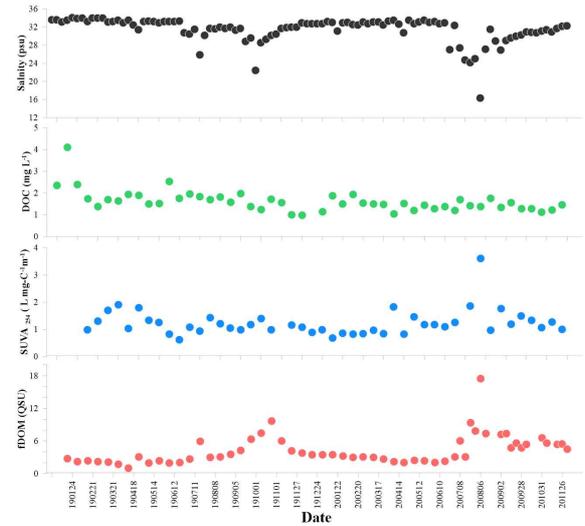
염분과 DOC 농도와의 *Pearson* 상관계수 $r=-0.0348$ ($p=0.8085$)으로 거의 무시 할 수 있는 결과를 나타내었다. 염분과 SUVA 그리고 염분과 fDOM과의 상관계수는 각각 $r=-0.6784$ ($p<0.001$), $r=-0.8428$ ($p<0.001$)으로 높은 상관관계를 나타내었다. 즉, 염분을 감소시킨 요인이 장목만 내 난분해성 휴믹 물질의 비율을 증가에 기여하였다는 것을 확인 할 수 있었다[그림 4].

DOC 농도와 fDOM은 $r=0.0353$ ($p=0.8057$)로 상관관계를 보이지 않았다. 장목만의 DOC농도는 염분 30 psu 이상일 때 상대적으로 해양 자생기원의 용존유기물질로 이루어져 있지만 염분이 30 psu 미만일 때는 용존유기물질 중 휴믹 물질의 비율이 상대적으로 높게 증가하는 것으로 판단된다. SUVA와 fDOM과의 상관계수는 $r=0.6162$ ($p<0.001$)로 높은 상관계수를 확인하였다 [그림 5].

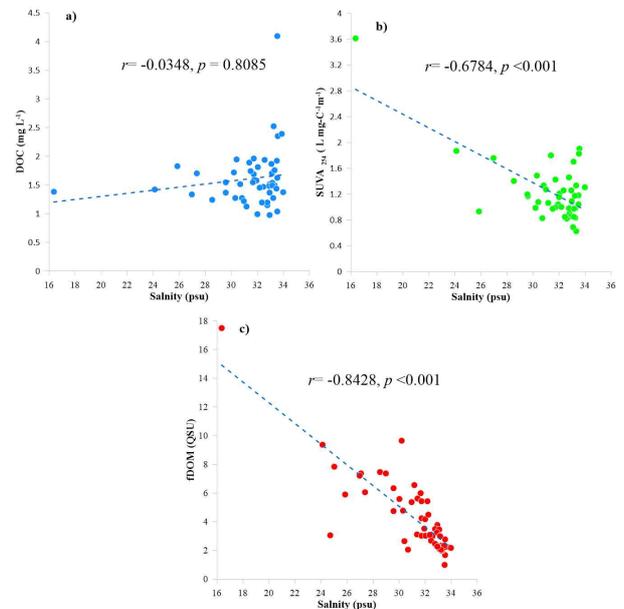
4. 결론

조사기간의 장목만 수중 내 유기물질은 플랑크톤 및 박테리아에 의한 자생기원의 친수성 용존 유기 물질이 대 다수이지만 낮은 염분수와 함께 육상기원의 많은 유기물질이 함께 유입되어 DOC 농도 중 휴믹물질의

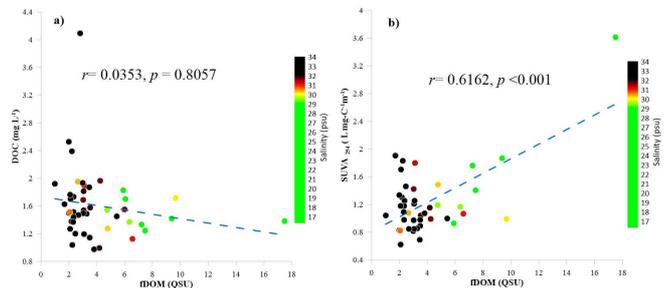
비율이 증가하였다. 따라서 2019년과 2020년에 실시된 하굿둑 개방실험으로 장목만 표층 수괴(water mass)에 영향을 미쳤다고 판단된다.



[그림 3] 조사기간 장목만 표층에서 염분, DOC, SUVA 및 fDOM의 농도 변화



[그림 4] (a)염분과 유기물 농도, (b)염분과 SUVA, (c)염분과 fDOM의 *Pearson* 상관관계



[그림 5] (a)fDOM과 DOC, (b)fDOM과 SUVA의 *Pearson* 상관관계

참고문헌

- [1] Libes SM, “Introduction to marine biogeochemistry”, Wiley, New York, NY, pp 207-219, 2009년
- [2] 광석남, 허성희, “낙동강 하구역 어류의 종조성 변화”. 한국수산학회지, 제 36권, 2호, pp. 129-135, 2003년
- [3] 환경부, (공동-보도)낙동강 하굿둑 최대 4개월 연다...올해 3~4회 개방 계획, 2021년,
<http://www.me.go.kr/home/web/index.do?menuId=286>
- [4] 지화성, 김미희, 이유정, 손희중, “낙동강 하류 수역에서 분자량 크기 및 형광특성을 고려한 용존유기물질 특성”, 제 36권, 3호, pp. 194-20호, 5월, 2020년.
- [5] 나은혜, 장주형, 김다례, 이소영, 김병익, 강미리, 강태구, “지표수 수리 및 수질 변동 해석을 위한 3차원 수치모델링 연구(III) -낙동강 하류 구간을 중심으로-”, 국립환경과학원, 2018년
- [6] 기상청, 관측·기후/과거관측/일별자료
<https://www.weather.go.kr/w/obs-climate/land/past-obs/obs-by-day.do>
- [7] EPA , “Drinking Water Advice Note 4: Disinfection By-Products in Drinking Water”, Environmental Protection Agency, 6월, 2012년.
- [8] 채선하, 이경혁, 임재립, 김성수, 황창근, 안효원. “수원에 따른 용존유기물질의 생성 특성과 계절적 변화”, 대한환경공학회지, 제 26권 11호, pp.1244-1250, 11월, 2004년.