



하계 완도 주변 육상 양식장 배출수 중 유기탄소 및 영양염의 분포 특성

김규리¹ · 최유정² · 김태훈^{1*}¹전남대학교 지구환경과학부 해양환경전공

(61186) 광주광역시 북구 용봉로 77

²전남대학교 기초과학연구소

(61186) 광주광역시 북구 용봉로 77

Distribution Characteristics of Organic Carbon and Nutrient in Effluent of Land-based Aquaculture Farms around Wando in Korea

GyuRi Kim¹, Yujeong Choi², and Tae-Hoon Kim^{1*}¹Department of Oceanography, Chonnam National University, Gwangju, 61186, Korea²Research Institute for Basic Sciences, Chonnam National University, Gwangju 61186, Korea

Abstract : To evaluate the impact of effluents from land-based fish farms on the coastal ocean of Wando, Korea, we analyzed inorganic nutrients, particulate organic carbon (POC), dissolved organic carbon (DOC), and colored dissolved organic matter (CDOM) in the effluent and influent of land-based fish farms during the summer (July) of 2021. The average concentrations of nutrients (Dissolved inorganic nitrogen, phosphorus, and silicate; DIN, DIP, and DSi, respectively) in the effluents of this study area were $17 \pm 3.7 \mu\text{M}$, $1.4 \pm 0.7 \mu\text{M}$, and $14 \pm 1.6 \mu\text{M}$, respectively. The average concentrations of POC and DOC were $37 \pm 22 \mu\text{M}$ and $81 \pm 13 \mu\text{M}$, respectively, with POC accounting for about 30% for total organic carbon in effluents. The Reduced Dissolved Inorganic Nitrogen/Total Dissolved Inorganic Nitrogen ratio (0.7), potential short-period index, indicates that the discharge of nutrients excreted by the fish and unconsumed feed into coastal water results in such nutrients being deposited and accumulated in the sediment. Subsequently, this continuous accumulation triggers the release of ammonium ions during organic matter decomposition, and the ammonium-enriched waters that encroach on fish farms as influent seem to be due to the diffusion of high concentrations of ammonium from bottom sediment. Furthermore, we used fluorescence indices to examine the characteristics of organic matter sources, obtaining mean values of 1.54 ± 0.19 , 1.06 ± 0.06 , and 1.56 ± 0.06 for the humification index, biological index, and fluorescence index, respectively, in the effluent. These results indicate that the organic matters had an autochthonous origin that resulted from microbial decomposition, and such organic matters were rapidly generated and removed by biological activity, likely supplied from the sediment. Our results suggest that the effluent from land-based fish farms could be a potential source of deoxygenation occurrence in coastal areas.

Key words : organic carbon, dissolved inorganic nutrients, colored dissolved organic matter, land-based fish farms, Wando

1. 서 론

연안 환경은 강, 지하수, 빗물에 의해 유입되는 물질과 농축산 폐수, 하수 처리장 배출수, 양식장 배출수 등의 인위적인 기원에 의해 유입되는 물질로 인해 생지화학적 환경변화가 일어나고 있다(Oh et al. 2021). 연안으로 공급되는 물질 경로 중, 양식장 배출수에 의해 연안으로 유입되는 다량의 유기물과 무기 영양염에 의해 다양한 환경 문제가 대두되고 있다(Holmer et al. 2003; Lenzi et al. 2003; Liu et al. 2011; Azanza and Benico 2013). 이는, 무분별한 사료 공급에 의한 양식장 배출수 내 미ச்ச취 사료, 어분, 양식 생물종의 배설물과 대사물질 등으로부터 유래된다(Wang et al. 2020; Lei et al. 2021; Kwon et al. 2022). 육상 양식장(Land-based Aquaculture Farms, LAFs)의 밀집화에 따른 막대한 양의 배출수가 연안으로 유입되면 해양 수질 감소 및 탁도 증가(Au et al. 2004; Pedersen et al. 2017), 부영양화 발생, 조류 군집의 변화 등 해양환경에 상당한 영향을 미친다(Bonsdorff et al. 2002; Qin et al. 2005; Park 2014). 특히 부영양화의 경우, 유해 조류 증식(Harmful Algal Blooms, HABs)의 발생(Heisler et al. 2008)과 연안지역의 빈산소 수괴를 일으켜 저서 생물에 영향을 줄 수 있다(Hong 1987; 김 등 2010).

전라남도 완도는 국내 양식 전복 생산량의 약 80%(Ock 2010), 국내 양식 해조류 생산량의 약 60%, 국내 양식 넙치 생산량의 약 32%(옥 2007)를 생산하기 때문에 우리나라 수산양식산업의 중심지라 할 수 있다. 완도 육상 양식장은 2022년도 기준 총 208개소로 국내에서 제주도 다음으로 육상 양식장이 많이 집중되어 있다. 제주도 양식장 배출수에 의한 연안 환경 연구에 따르면, 막대한 양의 양식장 배출수의 연안 방류는 연안의 많은 어장을 오염시키고 있고, 바다 사막화 등의 백화 현상의 확산 추세를 일으키는 등의 해양 환경 문제를 야기시키며(JDI 2008; 최 2009), 조간대의 생물 다양성을 감소시킨다(Choi et al. 2021). 그러나 제주도에 비해 완도에서 양식장 배출수가 연안 환경에 미치는 영향에 대한 연구는 매우 미비한 실정이다.

양식장 배출수가 연안 환경에 미치는 영향을 파악하기 위해서는 양식장 배출수의 환경 오염 실태와 이화학적 특성을 제대로 파악하는 것이 중요하다. 그러나 여전히 완도의 양식장 배출수 내 유기물 및 영양염의 농도조차 잘 알려져 있지 않다. 본 연구에서는 육상 양식장 배출수가 완도 연안 환경에 미치는 영향을 전반적으로 평가하기 위해 (1) 완도 연안에 위치한 육상 양식장 배출수 내 입자성 유기탄소(Particulate Organic Carbon, POC), 용존유기탄소(Dissolved Organic Carbon, DOC), 총 유기탄소(Total Organic Carbon, TOC), 영양염(nutrients) 농도를 분석하

였고, (2) 해양 환경의 잠재적 단주기 지표로서 산화성 용존무기질소와 환원성 용존무기질소를 적용하여 양식장 배출수의 산화 및 환원조건을 판단하였다. 또한 (3) 형광 용존 유기물질(Fluorescent Dissolved Organic Matter, FDOM)을 분석하여 완도 육상 양식장 배출수 내 유기물의 기원과 특성을 파악하였다.

2. 재료 및 방법

연구 지역 및 연구 방법

완도는 전라남도 남부에 위치한 군으로 섬으로만 이루어져 있다. 완도군의 면적은 396.7 km²으로 전남의 3.2%를 차지한다. 본 연구는 2021년 7월에 완도군의 동남쪽에 위치한 농공단지길 연안을 따라 운영되는 육상 양식장들 중 임의로 5 개소를 선정하여 양식장 배출수를 배수구에서 바로 무균 채수병에 채수하였고(Fig 1), 유입수는 LAFs 1에서 채수하였다. 이렇게 채수한 시료는 500°C에서 약 3-5시간 동안 구운 pre combusted GF/F filter (Whatman 0.7 μm) 를 이용해 즉시 여과 후 분석하였다. 영양염은 15 ml conical tube 에 채수하여 영하 20°C 에서 냉동 보관하였고, 입자성유기탄소는 여과하는데 사용되었던 GF/F filter paper 를 분석 전까지 petri-dish에 냉동 보관하였다. 용존유기탄소는 pre-combusted 된 glass ampoule 에 약 20 ml의 시료를 담고, pH 를 2 이하로 낮춰서 미생물 활동을 억제하기 위해 염산 20 μL를 첨가하였으며, 대기 중의 기체와의 교환을 막기 위해 입구를 녹여서 완전히 밀봉한 채로 실온에 보관하였다.

영양염은 SEAL Analytical의 영양염 자동 분석기 QuA-Atro39를 이용하여 분석하였다. CRM (Certified Reference Material)으로는 일본에서 공급받은 Kanso의 해수 영양염 표준물질(RMNS)을 이용하였다. 이 연구에서는 아질산염 질소(NO₂⁻), 질산염 질소(NO₃⁻), 암모늄 이온(NH₄⁺)을 용존무기질소(Dissolved Inorganic Nitrogen, DIN)로, 인산염(PO₄⁻)을 용존무기인(Dissolved Inorganic Phosphate, DIP)으로, 규산염(SiOH₄)을 용존규산염(Dissolved Inorganic Silicate, DSi)으로 정의하였다. 질산염 질소를 산화성 용존무기질소(Oxidized Dissolved Inorganic Nitrogen, ODIN), 아질산염 질소와 암모늄 이온을 합하여 환원성 용존무기질소(Reduced Dissolved Inorganic Nitrogen, RDIN), 둘을 모두 합하여 총 용존무기질소(Total Dissolved Inorganic Nitrogen, TDIN)로 정의하였다.

입자성유기탄소의 농도는 Thermo Scientific 사의 CHNS analyzer로 고온 연소법을 이용하여 분석하였다. Sulfanilamide 와 L-Cystine 시약에 따른 검정곡선을 이용해 탄소의 무게(mg)를 계산하여 시료의 부피(L)로 나누어 농도를 구하였다.

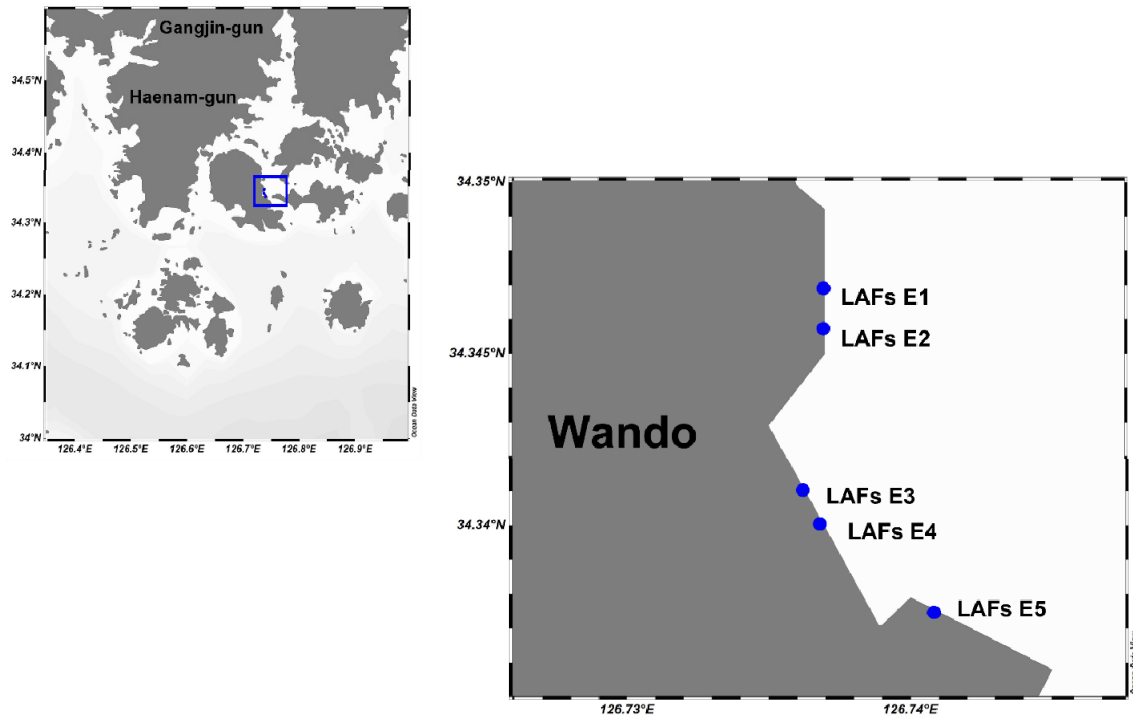


Fig. 1. Maps of study sites in Wando

용존유기탄소의 농도는 Shimadzu 사의 TOC-V_{CPH} 장비의 고온 산화법을 이용해 분석하였다. 아세트아닐리드 (acetanilide)를 이용하여 표준 용액을 제조하여 농도에 따른 검정곡선을 그려 표준화하였다. 용존성 유기탄소 표준 물질인 DSR (Deep Seawater Reference)과 비교하여 오차 범위 5% 이내를 확인하여 신뢰도를 입증하였다. 총 유기탄소는 입자성유기탄소와 용존유기탄소 농도의 합으로 산정하였다.

용존 유기물질의 형광 분석은 SCINCO사의 FluoroMate FS-2를 이용하여 측정하였다. 시료의 형광세기(Intensity)는 여기 방출 연속파장법(excitation-emission matrix spectroscopy, EEMs)을 바탕으로, 들뜸 파장(excitation wavelength)은 250–500 nm 범위에서 5 nm 간격으로, 방출 파장(emission wavelength)은 250–600 nm 범위에서 2 nm 간격으로 측정하였다. 바탕값의 보정과 라만 산란 피크의 제거를 위해 초순수(De-ionized water)의 형광세기를 측정하였다. Counts per second (초당 카운트, cps) 단위로 표현되는 측정 값은 1 ppb의 quinine sulfate dihydrate 용액을 표준물질로 사용하여 Quinine sulfate 용액을 Ex/Em = 350/450 nm에서 형광 측정하여 quinine sulfate units (QSU)로 변환하였다. 이렇게 변환한 값은 PARAFAC (Parallel Factor Analysis) 모델링을 통해 FDOM component로 구분하였다.

용존유기물질의 휴믹 지수(humification index, HIX)는

255 nm의 들뜸 파장에서 관측되는 435–480 nm 방출 파장에서의 총 형광세기와 300–345 nm 방출 파장에서의 총 형광세기의 비율로 계산하였다(Zsolnay et al. 1999). 생물 지수(biological index, BIX)는 310 nm의 들뜸 파장에서 관측되는 380 nm 방출파장의 형광세기와 430 nm 방출파장의 형광세기의 비율로 계산하였다(Huguet et al. 2009). 형광 지수(Fluorescence index, FI)는 370 nm의 들뜸 파장에서 관측되는 470 nm 방출파장의 형광세기와 520 nm 방출파장의 형광세기의 비율로 계산하였다(McKnight et al. 2001).

3. 결과 및 고찰

완도 배출수 중 영양염과 유기탄소의 분포

완도 육상 양식장 배출수 내 용존무기질소, 용존무기인, 그리고 용존규산염의 농도는 각각 11–22 μM (평균: $17 \pm 3.7 \mu\text{M}$), 0.5–2.5 μM (평균: $1.4 \pm 0.7 \mu\text{M}$), 그리고 12–17 μM (평균: $14 \pm 1.6 \mu\text{M}$)의 범위를 보였고, 입자성 유기탄소와 용존유기탄소 농도는 각각 14–78 μM (평균: $37 \pm 22 \mu\text{M}$), 60–98 μM (평균: $81 \pm 13 \mu\text{M}$)의 범위를 보였다(Table 1). 완도 육상 양식장 배출수의 영양염, 입자성 유기탄소, 용존유기탄소 농도는 다른 나라 양식장 배출수(용존무기질소: 0.03–284 μM ; 용존무기인: 0.03–19.6 μM ; 용존규산염: 2.6–114 μM ; 입자성 유기탄소: 8.3–4033 μM ; 용존유

기탄소: 158–1033 μM)에 비해 낮은 경향을 보였다(Table 2). Lee et al. (2018)에서 보고된 우리나라 자란만 농도(아질산염 질소+질산염 질소: 0.05–14.4 μM ; 용존무기인: 0.002–1.26 μM ; 용존규산염: 1.43–48.3 μM)와 Lee et al. (2009)에서 보고된 진해만 농도(용존무기질소: 2.7–32 μM ; 용존무기인: 0.28–3.10 μM ; 용존규산염: 3.3–41 μM)는 용존규산염을 제외하고 완도 육상 양식장 배출수에서 유사한 농도 범위를 보였다. 또한 완도 육상 양식장 배출수 내 입자성 유기탄소의 농도는 Lee et al. (2020)에서 보고된 패류 양식이 활발한 자란만 내 해수 농도(평균: 33 \pm 16 μM)와 유사하게 나타난 반면 진해만 내 해수 농도(25–193 μM)에 비해 낮은 농도 범위를 보였다(Kim et al. 2013). 완도 육상 양식장 배출수의 용존유기탄소 농도는 진해만 농도(29–

233 μM)에 비해 낮았다(Kim et al. 2013). 이와 같이, 양식장 배출수 중 영양염과 유기탄소 농도가 나라별 지역별로 다양한 분포로 나타나는 것은 양식생물종에 따른 사료 및 배설물의 차이에 의해 나타난 결과로 판단된다.

완도 육상 양식장 유입수 내 용존무기질소, 용존무기인, 그리고 용존규산염의 농도는 각각 11 μM , 0.4 μM , 16 μM 을 보였다(Table 1). 완도 육상 양식장 유입수는 용존무기인을 제외하고 Kwon et al. (2022)에서 조사된 제주도 육상 양식장 유입수 농도보다 현저히 낮은 농도(용존무기질소: 5–223 μM , 용존규산염: 9–388 μM)를 보였다. 완도 육상 양식장 유입수 내 입자성유기탄소와 용존유기탄소의 농도는 각각 25 μM , 89 μM 로 Kim (2023)에서 조사된 제주도 육상 양식장 유입수(입자성유기탄소: 6–9 μM , 평균:

Table 1. Concentrations of nutrients, POC, and DOC in effluent and influent of land-based fish farms during the summer (July) of 2021

	DIN (μM)	NH ₄ ⁺ (μM)	DIP (μM)	DSi (μM)	POC (μM)	DOC (μM)	RDIN/TDIN	ODIN/TDIN	HIX	BIX	FI
LAFs E1	16	10	1.6	13	31	77	0.67	0.33	1.42	0.99	1.61
LAFs E2	11	5	0.5	13	14	60	0.46	0.54	1.76	1.14	1.53
LAFs E3	16	10	0.7	12	28	98	0.69	0.31	1.68	1.11	1.61
LAFs E4	19	16	2.5	15	78	82	0.88	0.12	1.29	1.02	1.47
LAFs E5	22	17	2.0	17	35	87	0.80	0.20	1.53	1.04	1.59
LAFs I1	11	8	0.4	16	25	89	0.81	0.19	1.58	1.05	1.49

Table 2. Comparison of nutrients, POC, and DOC concentration in effluents from land-based fish farms: a Contrast between Wando, Korea, and Different Countries, including Jeju, Korea

	DIN (μM)	NH ₄ ⁺ (μM)	DIP (μM)	DSi (μM)	POC (μM)	DOC (μM)	Reference
Korea (Wando)	11-22 (17 \pm 4)	5-17 (12 \pm 4)	0.5-2.5 (1.4 \pm 0.7)	12-17 (14 \pm 2)	14-78 (37 \pm 22)	60-98 (81 \pm 13)	This study
Korea (Jeju)	15-190 (70 \pm 40)		0.9-1.6 (2.4 \pm 0.9)	22-290 (122 \pm 62)		41-307 (116 \pm 52)	Oh et al. (2021)
China							
Fish farm	0.5-284 (62 \pm 50)		0.8-19.6 (4.2 \pm 3.8)	3.7-114 (53 \pm 36)	8.3-4,033 (833)	179-1,033 (472 \pm 262)	Herbeck et al. (2013)
Shrimp farm		7.1-58 (31 \pm 1.4)	1.2-3.2				Yang et al. (2017)
France							
Fish farm					53		Garren et al. (2008)
Shrimp farm	0.03-8.97 (1.3 \pm 2.6)		0.03-4.45 (0.47 \pm 0.47)	2.6-39.2 (15.8)	81-387		Thomas et al. (2010)
Chile	39.5	19	3.42			158	Ryan et al. (2022)
Turkey		~3.18	~0.61	~14.55	97		Basaran et al. (2010)
Hungary		5.6	6.4				Gál et al. (2016)

8±1 μM; 용존유기탄소: 33–87 μM, 평균: 53±21 μM)보다 높은 농도 범위를 보였다. 본 연구 지역과 비슷하게 육상 양식장이 밀집되어 있는 제주도 양식장 유입수를 비교해 보면, 완도 육상 양식장 유입수는 해수의 형태로 양식장으로 공급되지만 제주도 양식장 유입수는 육상으로부터 해양으로 유출되는 담지하수(fresh groundwater)와 물리적인 외력에 의해 육상으로 침투한 해수가 해저면에서 해양으로 재순환 및 혼합되어 유출되는 염지하수(saline groundwater)를 포함하는 해저 지하수(Submarine Groundwater Discharge, SGD)(Moore 2010)의 형태로 공급된다. 따라서 유입수 형태로 인해 사육수의 바탕 값이 결정되어진다. 영양염의 경우, 완도 유입수는 상대적으로 제주도 유입수에 비해 낮은 농도를 보이고, 유기탄소는 상대적으로 높은 농도를 보인다. 이는 제주도에서 유입수로 사용하는 해저 지하수에 육상기원의 영양염 농도가 상대적으로 높기 때문에 나타난 결과로 판단된다. 농업 활동에 사용되는 합성 비료에 의해 해저 지하수 내 용존무기질소는 높은 농도를 보이며, 용존규산염은 지각을 구성하는 대표적인 지각 기원 물질이기 때문에 해수보다 지하수에 높은 농도를 보인다(Kim 2023). 또한 제주도 해저 지하수 내 유기탄소 농도는 해수의 유기탄소보다 낮게 나타나기 때문에(Song 2021) 해수를 유입수로 사용하는 완도에서 상대적으로 더 높은 농도 범위를 보이는 것으로 판단된다. 또한 제주도의 경우 모든 측정 항목에서 배출수가 유입수 보다 높은 농도를 보이지만 완도는 서로 유사하게 나타났다. 본 연구에서 체류시간을 계산하진 못했지만 반 폐쇄적 내만 형태를 보이는 완도는 해수 유동이 상대적으로 정체되어 사면이 바다와 접하는 섬 지형의 제주도보다 체류시간이 더 길 가능성이 높을 것으로 보인다.

완도 양식장 배출수 중 유기탄소 비율과 단주기 지표(ODIN/TDIN과 RDIN/TDIN ratios)

완도 육상 양식장 배출수 내 총 유기탄소 중 입자성 유기탄소의 비율은 19–49%(평균: 29±10%), 용존유기탄소의 비율은 51–81%(평균: 71±10%)로 유입수(입자성 유기탄소: 22%, 용존유기탄소: 78%)와 유사하게 나타났다. 그러나 Kim (2023)에서 조사된 하계 제주도 육상 양식장의 경우, 본 연구와 다르게 배출수에서 유입수보다 상대적으로 더 높은 입자성 유기탄소 비율을 보였다. 본 연구에서 용존유기물질을 PARAFAC 모델링으로 EEM 을 분류하였다(Fig 2). Coble (2007)에서 제시한 피크 파장위치에 따른 component는 Stedmon and Markager (2005)에서 제시한 피크 파장위치에 따라 excitation/emission 이 430 nm/460 nm에서 강한 피크를 보였다. 이는, 미생물 분해에 의해 빠르게 생성되고 제거되는 부식 형광(Humiclike fluorescence)의 특성을 보인다. 용존유기물질의 기원과 특성을

파악하기 위하여 완도 육상 양식장 배출수의 용존유기탄소 농도와 Component 의 상관관계를 살펴본 결과, $r^2 = 0.991$ 로 높은 상관관계를 보였다(Fig 3). 따라서 육상 양식장 배출수의 용존유기탄소는 미생물에 의한 입자성 유기탄소의 빠른 분해가 주 기원으로 판단된다.

완도 육상 양식장 배출수의 암모늄 이온 농도는 5–17 μM (평균: 12±4 μM)의 범위를 보였다(Table 1). 유입수의 암모늄 이온 농도는 8 μM로 나타났다(Table 1). 완도 육상 양식장 배출수의 암모늄 이온 농도와 다른 나라 양식장 배출수 농도를 비교하였을 때, 헝가리나 터키에 비해 상대

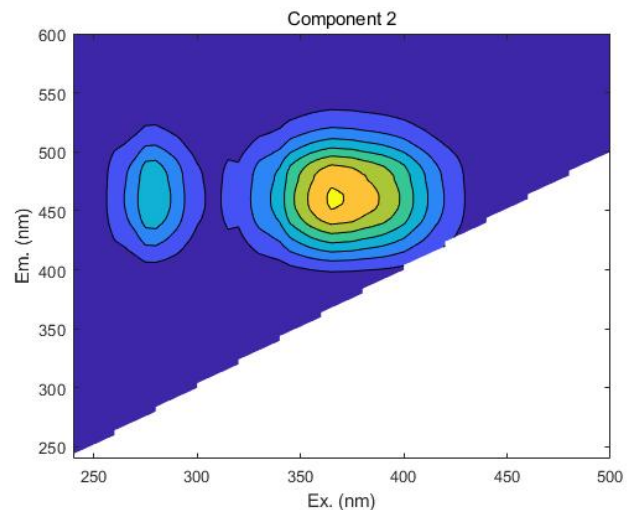


Fig. 2. Excitation-emission matrix spectroscopy (EEMs) contour plots of each component determined by using the parallel factor analysis (PARAFAC) model

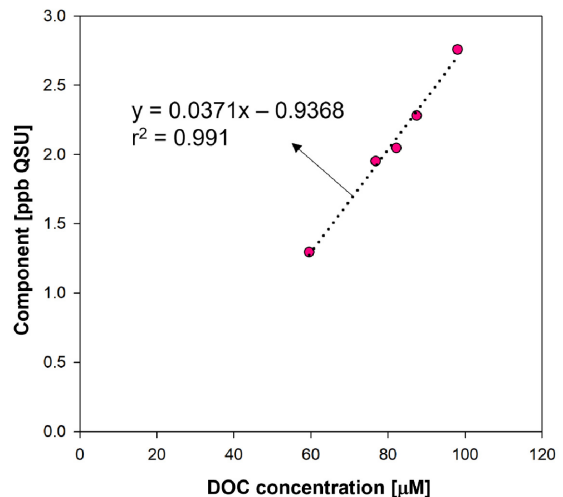


Fig. 3. Correlations between intensity of Component and DOC concentration in effluents of land-based aquaculture farms (n = 5)

적으로 높은 농도 범위를 보였으나 중국과 칠레보단 상대적으로 낮은 농도 범위를 보였다(Table 2). 본 연구 지역 내 암모늄 이온 농도는 자란만 농도(0.26–12.00 μM)에 비해 높은 농도 범위를 보였다(Lee et al. 2018). 본 연구 지역의 유입수 내 암모늄 이온 농도는 Kwon et al. (2022)에서 조사된 제주도 육상 양식장 유입수의 농도(0.2–0.5 μM)보다 훨씬 높은 농도를 보였다.

암모늄 이온은 상대적으로 단시간 내에 산화되기 때문에 RDIN/TDIN 또는 ODIN/TDIN의 비율로 나타내는 단기 지표로 활용할 수 있다(정과 양 2016). ODIN/TDIN은 총 용존무기질소 중 산화가 완료된 비율을 뜻하고, RDIN/TDIN은 앞으로 산화가 진행되어야 할 비율을 뜻한다. 본 연구에서 조사한 완도 육상 양식장 배출수 및 유입수의 RDIN/TDIN과 ODIN/TDIN 비율을 Table 1에 제시하였다. 배출수의 평균 RDIN/TDIN 비율(0.70)과 유입수의 비율(0.81)은 Lee et al. (2022)에서 조사한 제주도 하수처리장 배출수의 비율(0.59)보다 높게 나타났다. 조 등 (1998)은 유기물 분해에 의해 저층의 산소 소모가 크게 증가하여 빈산소화되면 표층과 저층 사이에 용존 산소 성층화가 발생하며, 저질 퇴적층 용출에 의해 저층의 암모늄 이온 농도가 높게 나타난다고 보고하였다. Yang et al. (2017) 또한 퇴적물에서 암모늄 이온이 방출되기도 하고, 양식 활동에 의해 생성된 유기물질의 미생물 광물화에 의해 암모늄 이온 농도가 높게 나타난다고 보고하였다. 따라서, 본 연구 지역의 높은 RDIN/TDIN 비율은 (1) 유입수로 사용되는 저층수의 높은 암모늄 이온 농도와 (2) 배출수에서 유기물이 분해되며 생성되는 암모늄 이온 농도에 의해 나타난 결과로 판단된다.

완도 배출수 중 형광지수를 이용한 용존유기물질 기원 파악

유기물의 기원을 추적하는 지표로 HIX, BIX, FI를 사용하였다(Huguet et al. 2009; McKnight et al. 2001). Huguet et al. (2009)에 의하면 HIX의 값은 미생물에 의한 유기물 분해작용의 정도를 나타내기 때문에 미생물에 의한 부식 정도가 늘어날수록 값이 증가한다. HIX < 4일 경우 생물학적 또는 해양 박테리아 기원의 특성을 띤다. HIX는 값이 커질수록 휴믹 특성도 강해진다. 4–6일 경우 용존유기물질은 약한 휴믹 특성 및 강한 자생적 component의 특성을 갖고, 6–10일 경우 강한 휴믹 특성과 약한 자생적 component의 특성을 가진다. 그리고 > 16일 때 강한 부식 정도 및 육상 기원의 특징을 보인다. 완도 육상 양식장 배출수에서 HIX 값은 1.29–1.76(평균: 1.54±0.19)의 범위를 보였으며 유입수에서 HIX 값은 1.58로 나타났다(Table 1). 완도 육상 양식장 배출수와 유입수에서 HIX < 4를 보였기 때문에 본 연구 지역의 용존유기물질은 부식화 정도가 낮고, 강한 자생적 또는 해양 박테리아 기원

의 특성을 띤다.

BIX는 해양에서 1차 생산 기원이나 박테리아에 의한 자생적 기원에 의해 비교적 최근에 생성된 유기물의 정도를 나타내는 지표로 값이 작아질수록 오래 전에 생성된 유기물의 특성을 띤다. Huguet et al. (2009)에 의하면 BIX 값이 0.6–0.7일 경우 낮은 자생적 component의 특성을 갖고, 0.8–1일 때 강한 자생적 component의 특성을 갖는다. 그리고 BIX > 1일 때 생물학적 또는 해양 박테리아 기원의 특성을 띤다. 완도 육상 양식장 배출수에서 BIX 값은 0.99–1.14(평균: 1.06±0.06) 범위를 보였으며 유입수에서 생물 지수 값은 1.05로 나타났다(Table 1). 완도 육상 양식장 배출수와 유입수에서 생물 지수가 1보다 큰 값을 보였기 때문에 본 연구 지역의 용존유기물질은 자생적 기원의 최근에 생성된 특성을 띤다. 이는 앞서 언급한 Component의 미생물 분해에 의해 빠르게 생성되고 제거되는 용존유기물질의 특성을 뒷받침한다.

FI는 육상식물과 퇴적물에서 기원한 유기물과 수층의 미생물 활동에 의해 생성된 유기물의 기원을 나타내는 지표이다. McKnight et al. (2001)에 의하면 FI 값이 1.4–1.5일 경우 주로 육상 기원이며, 값이 높으면(~1.9) 미생물 기원의 특성을 띤고 값이 낮으면(~1.4) 육상 기원 풀빅산의 특성을 갖는다. 완도 육상 양식장 배출수에서 FI 값은 1.47–1.61(평균: 1.56±0.06)의 범위를 보였으며 유입수에서 FI 값은 1.49로 나타났다(Table 1). 완도 육상 양식장 배출수와 유입수에서 FI 값이 1.4로 나타났기 때문에 본 연구 지역의 용존유기물질은 퇴적물에서 기원한 유기물의 특성을 띤다.

이와 같이, 유기물의 기원을 추적하는 지표인 HIX, BIX, FI 값을 통해, 완도 양식장 배출수에서는 미생물 분해에 의해 생성된 자생적 기원과 퇴적물에서 공급되어지는 용존유기물질이 우세한 것으로 판단된다.

4. 결 론

완도 육상 양식장 배출수 중 영양염과 유기탄소의 분포는 유입수의 형태에 의한 영향을 받은 것으로 보인다. 본 연구지역의 높은 RDIN/TDIN 비율은 배출수 중 유기물질이 미생물 광물화 등에 의해 분해되면서 암모늄 이온 농도가 증가하고, 분해 과정 중 산소 소모가 증가하여 빈산소화된 저층에서 암모늄 이온이 용출되는데 본 연구 지역은 유입수로 저층수를 사용하기 때문에 나타난 결과로 판단된다(Fig 4). Component와 배출수 내 용존유기탄소 농도가 유의미한 양의 상관관계를 보이는 것으로 보아, 본 연구 지역 유기물의 주요한 기원은 미생물에 의한 입자성 유기탄소의 빠른 분해인 것으로 판단된다. 완도 육상 양식장 배출수 중 유기물은 낮은 HIX와 높은 BIX를 통해 미

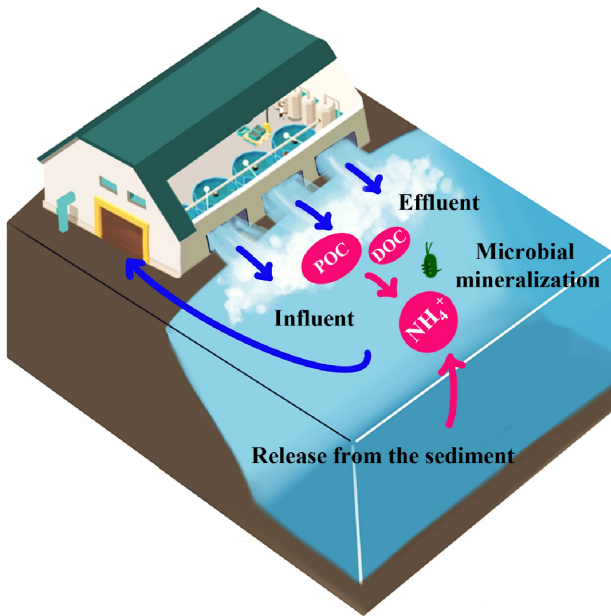


Fig. 4. A schematic diagram showing the dynamics of the “organic carbon and nutrients” in effluent of land-based fish farms

생물 분해 활동에 의한 자생적 기원의 특성을 가지는 것으로 추정되었다. 또한, FI 와 RDIN/TDIN ratio 를 통해 주로 퇴적물에서 공급되었다고 판단된다. 본 연구는 양식장 배출수는 연안 환경의 빈산소화 발생에 영향을 줄 수 있음을 시사하였다. 그러나 배출수의 특성에 대해 더 자세히 조사하기 위해 양식장이 없는 control site 와 비교분석과 배출수의 영향이 어디까지 미치는지에 대해 배출수 뿐만 아니라 배출수가 방류되는 연안 해수 및 퇴적물에 대한 추가적인 조사도 필요할 것으로 판단된다. 추후 장기간에 걸친 심도 깊은 모니터링이 더 이루어진다면 현재 우리나라 양식장 배출수 오염 실태가 어느 정도인지 고찰할 수 있을 것이다.

사 사

이 논문은 2022년 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구입니다(전남씨그랜트).

참고문헌

김정배, 박정임, 정춘구, 최우정, 이원찬, 이용화 (2010) 가막만 빈산소 수괴 소멸기의 물리화학적 특성. 해양환경안전학회지 **16**(3):241-248
 옥영수 (2007) 넙치 양식업의 실태 분석과 향후 발전방향. 월

간 해양수산 **271**:44-60

정용훈, 양재삼 (2016) 해수 암모늄 자료의 재평가: 독특한 단주기 수질지표 가능성. 바다 **21**(2):58-66

조경제, 최만영, 곽승국, 임성호, 김대윤, 박종규, 김영의 (1998) 마산-진해만의 수질 부영양화 및 계절변동. 한국해양학회지 **3**(4):193-202

최영찬 (2009) 마을어장 이용에 따른 어촌계와 주민간의 갈등 해소 방안 연구. 수산해양교육연구 **21**(4):568-575

Au DWT, Pollino CA, Wu RSS, Shin PKS, Lau STF, Tang JYM (2004) Chronic effects of suspended solids on gill structure, osmoregulation, growth, and triiodothyronine in juvenile green grouper *Epinephelus coioides*. Mar Ecol-Prog Ser **266**:255-264

Azanza RV, Benico GA (2013) Toxic Alexandrium blooms in fish farming sites in Bolinao, Pangasinan. J Environ Sci Manag **16**(Special Issue 1):44-49

Basaran AK, Aksu M, Egemen O (2010) Impacts of the fish farms on the water column nutrient concentrations and accumulation of heavy metals in the sediments in the eastern Aegean Sea (Turkey). Environ Monit Assess **162**:439-451

Bonsdorff E, Rönnerberg C, Aarnio K (2002) Some ecological properties in relation to eutrophication in the Baltic Sea. Hydrobiologia **475**(476):371-377

Choi SK, Kim TH, Kang YH, Kim S, Kim TH, Kim JK, Lee T, Son YB, Lee HJ, Park SR (2021) Changes in the dynamics and nutrient budget of a macroalgal community exposed to land-based fish farm discharge off Jeju Island, Korea. Sustainability **13**(21):11793. doi:10.3390/su13211793

Coble PG (2007) Marine optical biogeochemistry: the chemistry of ocean color. Chem Rev **107**(2):402-418

Gál D, Pekár F, Kerepeczki É (2016) A survey on the environmental impact of pond aquaculture in Hungary. Aquac Int **24**:1543-1554

Garren M, Smriga S, Azam F (2008) Gradients of coastal fish farm effluents and their effect on coral reef microbes. Environ Microbiol **10**(9):2299-2312

Heisler J, Glibert PM, Burkholder JM, Anderson DM, Cochlan W, Dennison WC, Dortch Q, Gobler CJ, Heil CA, Humphries E, Lewitus A, Magnien R, Marshall HG, Sellner K, Stockwell DA, Stoecker DK, Suddleson M (2008) Eutrophication and harmful algal blooms: a scientific consensus. Harmful Algae **8**(1):3-13

Herbeck LS, Unger D, Wu Y, Jennerjahn TC (2013) Effluent, nutrient and organic matter export from shrimp and fish ponds causing eutrophication in coastal and back-reef waters of NE Hainan, tropical China. Continent Shelf Res **57**:92-104

- Hong JS (1987) Summer oxygen deficiency and benthic biomass in the Chinhae Bay system. Korea. *J Oceanol Soc Korea* **22**:246–256
- Huguet A, Vacher L, Relexans S, Saubusse S, Froidefond JM, Parlanti E (2009) Properties of fluorescent dissolved organic matter in the Gironde Estuary. *Org Geochem* **40**(6):706–719
- Hussenot JM (2003) Emerging effluent management strategies in marine fish-culture farms located in European coastal wetlands. *Aquaculture* **226**(1–4):113–128
- JDI (2008) Study on the solving conflicts between fishing village community and residents in using community fishing ground. Jeju Development Institute, Synthesis Report, 135 p
- Kim D, Choi HW, Choi SH, Baek SH, Kim KH, Jeong JH, Kim YO (2013) Spatial and seasonal variations in the water quality of Jinhae Bay, Korea. *N Z J Mar Freshw Res* **47**(2):192–207
- Kim GR (2023) Estimating fluxes of particulate organic carbon and ammonium in aquaculture farm of Jeju Island. M.S. Thesis, Chonnam National University, 80 p
- Kwon HK, Kim G, Kim TH, Park SE, Lee WC (2022) Quantification of groundwater versus fish-farm sources of nutrients in the coastal water off Jeju Island, Korea, using fluorescent dissolved organic matter as a tracer. *J Sea Res* **188**:102270. doi:10.1016/j.seares.2022.102270
- Lee JH, Kim HC, Lee T, Lee WC, Kang JJ, Jo N, Lee D, Kim KW, Min JO, Kang S, Lee SH (2018) Monthly variations in the intracellular nutrient pools of phytoplankton in Jaran Bay, Korea. *J Coastal Res* **85**:331–335
- Lee JH, Lee WC, Kim HC, Jo N, Jang HK, Kang JJ, Lee D, Kim K, Lee SH (2020) Transparent exopolymer particle (TEPs) dynamics and contribution to particulate organic carbon (POC) in Jaran bay, Korea. *Water* **12**(4):1057. doi:10.3390/w12041057
- Lee MY, Park HJ, Moon JH, Kim S, Kim S, Choi Y, Song YK, Kim TH (2022) Effects of wastewater effluent-borne nutrients on phytoplankton off the coast of Jeju Island. *Mar Poll Bull* **185**:114280. doi:10.1016/j.marpolbul.2022.114280
- Lee YW, Hwang DW, Kim G, Lee WC, Oh HT (2009). Nutrient inputs from submarine groundwater discharge (SGD) in Masan Bay, an embayment surrounded by heavily industrialized cities, Korea. *Sci Total Environ* **407**(9):3181–3188
- Lei J, Yang L, Zhu Z (2021) Testing the effects of coastal culture on particulate organic matter using absorption and fluorescence spectroscopy. *J Clean Prod* **325**:129203. doi:10.1016/j.jclepro.2021.129203
- Lenzi M, Palmieri R, Porrello S (2003) Restoration of the eutrophic Orbetello lagoon (Tyrrhenian Sea, Italy): water quality management. *Mar Poll Bull* **46**(12):1540–1548
- Liu SM, Pui HL, Zhang GL, Wang DR, Du JZ, Herbeck LS, Zhang J, Ren JL (2011) The impact of anthropogenic activities on nutrient dynamics in the tropical Wenchanghe and Wenjiaohe Estuary and Lagoon system in East Hainan, China. *Mar Chem* **125**(1–4):49–68
- McKnight DM, Boyer EW, Westerhoff PK, Doran PT, Kulbe T, Andersen DT (2001) Spectrofluorometric characterization of dissolved organic matter for indication of precursor organic material and aromaticity. *Limnol Oceanogr* **46**(1):38–48
- Moore WS (2010) The effect of submarine groundwater discharge on the ocean. *Ann Rev Mar Sci* **2**:59–88
- Ock YS (2010) Pending issues and policy about abalone culture. *Policy Res Fish* **5**:13–36
- Oh YH, Kim Y, Park SR, Lee T, Son YB, Park SE, Lee WC, Im DH, Kim TH (2021) Spatiotemporal change in coastal waters caused by land-based fish farm wastewater-borne nutrients: Results from Jeju Island, Korea. *Mar Poll Bull* **170**:112632. doi:10.1016/j.marpolbul.2021.112632
- Park SR (2014) Seasonal patterns and recruitment dynamics of green tide-forming *Ulva* species along the intertidal rocky shores of the southern coast of Korea. *Ocean Sci J* **49**:383–390
- Pedersen PB, von Ahnen M, Fernandes P, Naas C, Pedersen LF, Dalsgaard J (2017) Particle surface area and bacterial activity in recirculating aquaculture systems. *Aquac Eng* **78**:18–23
- Qin G, Liu CC, Richman NH, Moncur JE (2005) Aquaculture wastewater treatment and reuse by wind-driven reverse osmosis membrane technology: a pilot study on Coconut Island, Hawaii. *Aquac Eng* **32**(3–4):365–378
- Ryan KA, Palacios LC, Encina F, Graeber D, Osorio S, Stubbins A, Woelfl S, Nimptsch J (2022) Assessing inputs of aquaculture-derived nutrients to streams using dissolved organic matter fluorescence. *Sci Total Environ* **807**:150785. doi:10.1016/j.scitotenv.2021.150785
- Song BC (2021) Monthly variations of submarine fresh Running title 9 groundwater discharge (SFGD) and SFGD-driven nutrients and dissolved organic matter fluxes in Jeju Island. M.S. Thesis, Jeju National University, 65 p
- Stedmon CA, Markager S (2005) Resolving the variability in dissolved organic matter fluorescence in a temperate estuary and its catchment using PARAFAC analysis. *Limnol Oceanogr* **50**(2):686–697
- Thomas Y, Courties C, El Helwe Y, Herbland A, Lemonnier H (2010) Spatial and temporal extension of eutrophication

- associated with shrimp farm wastewater discharges in the New Caledonia lagoon. *Mar Poll Bull* **61**(7-12):387-398
- Wang H, Wang Y, Zhuang WE, Chen W, Shi W, Zhu Z, Yang L (2020) Effects of fish culture on particulate organic matter in a reservoir-type river as revealed by absorption spectroscopy and fluorescence EEM-PARAFAC. *Chemosphere* **239**:124734. doi:10.1016/j.chemosphere.2019.124734
- Yang P, Lai DY, Jin B, Bastviken D, Tan L, Tong C (2017) Dynamics of dissolved nutrients in the aquaculture shrimp ponds of the Min River estuary, China: concentrations, fluxes and environmental loads. *Sci Total Environ* **603**:256-267
- Zsolnay A, Baigar E, Jimenez M, Steinweg B, Saccomandi F (1999) Differentiating with fluorescence spectroscopy the sources of dissolved organic matter in soils subjected to drying. *Chemosphere* **38**(1):45-50
- 국문 참고자료의 영문표기**
English translation / Romanization of references originally written in Korean
- Kim JB, Park JI, Jung CG, Choi WJ, Lee WC, Lee YH (2010) Physicochemical characteristics of seawater in Gamak Bay for a period of hypoxic water mass disappearance. *J Korean Soc Mar Environ Saf* **16**(3):241-248
- Ock YS (2010) Analysis of current status of flounder aquaculture and future development direction. *Monthly Marine Fisheries* **271**:44-60
- Lim DI, Kim YO, Kang MR, Jang PK, Shin K, Jang M (2007) Variability of water quality and limiting factor for primary production in semi-enclosed Masan Bay, South Sea of Korea. *Ocean Polar Res* **29**(4):349-366
- Jeong YH, Yang JS (2016) Re-evaluation of ammonium data in seawater: an unique short-term index. *The Sea* **21**(2): 58-66
- Cho KJ, Choi MY, Kwak SK, Im SH, Kim DY, Park JG, Kim YE (1998) Eutrophication and seasonal variation of water quality in Masan-Jinhae Bay. *The Sea* **3**(4):193-202
- Choi YC (2009) Study on the solving conflicts between fishing village community and residents in using community fishing ground. *J Fish Mar Sci Edu* **21**(4):568-575

Author's Information

GyuRi Kim

Ph. D. Student, Chonnam National University

Tae-Hoon Kim

Associate Professor, Chonnam National University

Yujeong Choi

Research Professor, Research Institute for Basic Sciences, Chonnam National University

Received Jul. 27, 2023

Revised Sep. 5, 2023

Accepted Sep. 11, 2023

Copyright © 2023 Ocean and Polar Research

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>), which permits unrestricted educational and non-commercial use, provided the original work is properly cited.