

수질환경인자에 따른 수영강 수계의 적조 발생 특성 연구

정선영[†], 이유정, 이정인, 곽진숙, 조은정

물환경생태팀

A study on the characteristics of red tide occurrence based on water environmental factors in Suyeong river

Sun-young Jeong[†], Yoo-jeong Lee, Jeong-in Lee, Jin-suk Gwak, Un-jeong Jo

Aquatic Environment & Ecology Team

Abstracts

The Suyeong River, a key urban river in Busan, frequent occurrences of red tide (*Cryptomonads*) events, particularly during the winter. This study analyzed the physical, chemical, and biological characteristics of the Suyeong River system, investigating the relationship between *Cryptomonads* and water quality parameters to inform comprehensive river management strategies. The results reveal that *Cryptomonads* populations proliferate during the dry winter months due to reduced flow and velocity, which create stagnant conditions favorable for algal growth. Nitrogen (N) and phosphorus (P) concentrations increase downstream, driven by wastewater effluents, urban sewage, and tidal sediment resuspension, with notably high nitrogen levels observed at Banseok Bridge (SY1) due to wastewater treatment plant discharges and upstream agricultural runoff. Correlation analysis demonstrated that low temperatures and high nutrient levels significantly enhance *Cryptomonads* growth, identifying nitrogen and phosphorus as key drivers. Principal component analysis highlighted the roles of tidal actions, nutrient recycling, light availability, and hydrological variations in *Cryptomonads* proliferation. Short-term mitigation measures, such as increasing river flow during winter, and long-term strategies, including sediment dredging, non-point source pollution control, and stricter wastewater effluent standards, are proposed to manage red tide occurrences. This study provides essential insights into the spatiotemporal dynamics of *Cryptomonads* in the Suyeong River system, contributing to effective water quality management and red tide control in urban rivers.

Key words : *Cryptomonads*, *Water environmental factors*, *Statistical analysis*, *Eutrophication*

1. 서론

수영강은 부산시의 주요 하천 중 하나로, 발원지로 부터 주거·상업·공업 지역이 혼재되어 있는 도심 지역을 흐르며 온천천, 석대천과 같은 지류들이 유입되어 수영만으로 흐르고 있다(Kwon, 2008). 이 과정에서 다양한 오염원이 유입되고 있으며, 특히 온천천의 비점오염원과 하수처리장 방류수의 지속적인 유입의 영향으로 유기오염물이 하천에 유입되어 수질이 악화되고 있다. 이로 인해 부영양화가 빈번하게 일어나며, 그에 따라 조류가 번성하기 유리한 조건이 된다. 하루에 두 번 조석에 의한 바닷물과 만나는 감조하천 구간을 포함하고 있는 수영강 하류 구간은 매년 동절기마다 적조 현상이 발생하고 있다. 기존 연구들(Lee et al., 2014; Kim et al., 2018; Yoon et al., 2022)에 따르면, 이 지역에서 발생하는 적조는 해수와 담수가 만나는 기수역에서 흔히 번성하는 은편모조류(*Cryptomonads*)에 의한 것으로 2011년 이후부터 주기적인 번성과 소멸이 반복되고 있다.

*Cryptomonads*는 출현종에 따라 적색, 갈색, 청색 등 다양한 색을 띠는데 수영강 하구에서는 주로 붉은 색을 띠며, 조류의 군집 번성 시 하천의 물빛을 붉게 변화시켜 폐수 배출로 오인되는 사례가 발생하고 있다. 이러한 현상은 수생태계에 미치는 영향, 수질 악화, 그리고 심미적 불쾌감 등을 초래한다.

적조 발생의 주요 원인으로는 육상에서 유입되는 비점오염과 생활오수로 인한 유기물 및 영양염류, 기상인자(강수량, 기온, 일사량), 그 외 수질인자(수온, 염분 등)가 있다. 특히 수영강 하류는 염분 농도가 5~30 psu 범위에서 변동하며, 해수 유동에 의해 수질 환경이 더욱 복잡해진다. 육지에서 내려온 영양물질이 조석에 의해 바다로 완전히 빠져나가지 못하는 지역은 ‘영양소의 함정’이라고 불리며, 이 곳은 다른 지역에 비해 일차생산력이 높고 적조 현상이 발생할 확률이 크다고 언급하였다(Park, 2009).

기존 연구들은 주로 수질의 이화학적 특성에 집중해 왔으나, 수영강의 감조하천 구간에서 발생하는 적조 현상을 명확하게 이해하기 위해서는 수질환경인자 간의 복합적인 상호작용을 분석할 필요가 있다. 특히 동절기 적조 발생 메커니즘을 파악하기 위해서는 단순한 수질 분석만으로는 한계가 있으며, 수질환경인자(기상, 수리, 수질)와 적조생물 간의 관계를 종합적으로 분석해야 한다. 선행 연구들(Kim et al., 2018; Jeong

et al., 2022)을 바탕으로, 기상·수리인자를 포함한 복합적인 요인을 고려하여 수영강 수계의 적조 발생 특성을 파악해보고자 하였다.

따라서, 본 연구는 수영강 수계의 수질환경 특성을 분석하고, *Cryptomonads*와 수질환경인자 간의 통계 분석을 통해 수영강 수계의 적조 발생 시·공간적 특성을 복합적으로 평가하고, 이를 바탕으로 수질 관리 및 적조 제어 대책 마련을 위한 기초 자료를 제공하고자 한다.

2. 재료 및 방법

2.1. 조사지점 및 기간

본 연구의 조사지점은 해마다 강수량이 적은 동절기에 적조 발생이 빈번하고 조석의 영향을 받는 수영강 수계의 하류 구간을 대상으로 지점을 선정하였다. 온천천은 수영강 하구로부터 약 3.1 km 상류지점에서 수영강 우안 측으로 유입되는 수영강의 제1지류이며, 연안교(OC2), 연산교(OC3), 안락교(OC4), 수영강과 합류하는 수영강합류부(OCSY)로 구분하여 4개소를 선정하였다. 수영강은 세월교(SY3), 원동교(SY4), 하류인 과정교(SY5)까지 3개소를 선정하여 총 7개소에 대해 조사하였다(Fig. 1.). 또한 조사지점의 전반적인 수질 특성을 알아보기 위하여 보건환경연구원에서 수행 중인 물환경측정망 자료를 참고하였다. 온천천의 경우 세병교(OC1), 연안교(OC2), 수영강으로 유입되는 석대천 반석2호교(SY1), 수영강은 동천교(SY2), 원동교(SY4), 좌수영교(SY6) 지점의 자료를 활용하였다. 수영강의 양안에는 수영, 동부하수처리장이 운영 중이며 하수처리장의 처리수가 수영강 하류에 방류되고 있다(Lee et al., 2018). 석대천은 주거지를 관통하여 흐르는 하천으로 석대천 중류 지점에 위치한 동부하수처리장 방류수 일부를 유지용수로 활용하고 있으며, 석대매립장과 원예단지 등의 소규모 사업장이 인근에 위치하여 수영강 수질에 영향을 미치고 있다(Lee et al., 2020). 조사시기는 2021년 1월부터 2024년 6월까지 월 1회 채수하였으며 특히 적조가 주로 번성하는 시기(12월 ~ 이듬해 4월)는 최대 월 2회 조사하였다. 물환경측정망 자료는 조사기간과 동일한 기간의 데이터를 활용하였다.

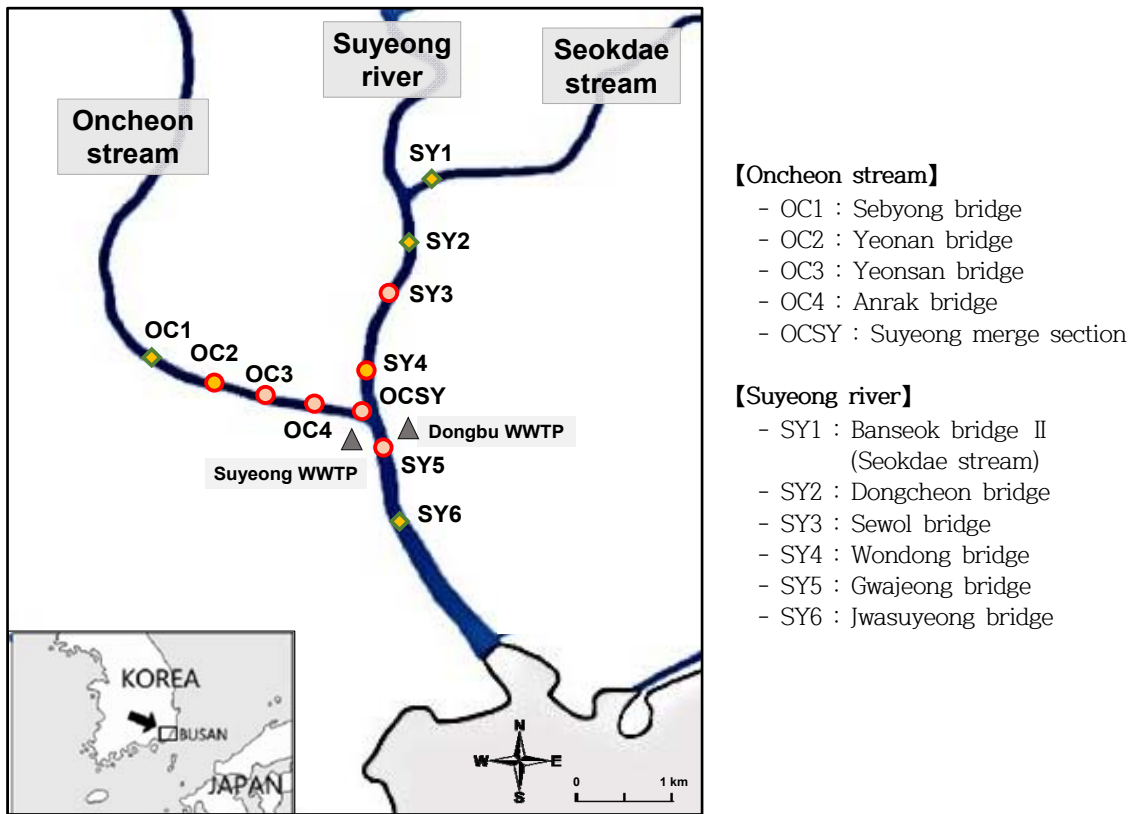


Fig. 1. The map of monitoring sites in this study.

2.2. 연구방법

2.2.1 기상 및 수질인자 조사

수명강 수계의 기상학적 자료인 강수량과 기온, 일사량, 일조시간은 기상청의 기상자료개방포털 (<https://data.kma.go.kr>)에서 제공하는 자료를 사용하였으며, 수리학적 자료인 조위 자료는 국립해양조사원의 바다누리 해양정보 서비스 (<http://www.khoa.go.kr/oceangrid/khoa/intro.do>)에서 제공하는 자료를 사용하였다. 수온(Water temperature), 수소이온농도(Hydrogen ion concentration, pH), 용존산소량(Dissolved Oxygen, DO), 전기전도도(Electrical Conductivity, EC), 염분(Salinity, Sal.)의 농도는 현장측정기(YSI-ProDSS, USA)를 이용하여 현장에서 채수 즉시 측정하였으며, 생물화학적 산소요구량(Biochemical Oxygen Demand, BOD), 화학적산소요구량(Chemical Oxygen Demand, COD), 총질소(Total Nitrogen, T-N), 총인(Total Phosphate, T-P), 영양염류($\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{NH}_3\text{-N}$, $\text{PO}_4\text{-P}$), 클로로필-a 농도(Chl-a) 등의 항목은 시료 2 L를 채수 후 실험실로 운반하여 수질오염공정시험기준에 따라서 분석하였다.

2.2.2 식물플랑크톤 조사

적조 원인생물을 포함한 식물성 플랑크톤 동정을 위한 시료는 Lugol's 용액으로 최종농도가 0.2%가 되도록 현장에서 고정한 후 실험실로 운반하여 고정된 시료를 48시간 이상 암실에서 정치한 후 siphon을 이용해 상등액을 제거하였다. 침전 농축된 시료는 Sedgwick-Rafter Chamber에 골고루 분산시킨 다음, 200~400 배의 광학현미경(CARL ZEISS, DE/Axio Imager, Germany)을 이용하여 계수하여 단위 체적당 세포수(cells/mL)로 현존량을 산출하였다.

2.2.3 통계분석

자료의 통계분석을 위해 통계처리 프로그램인 SPSS (ver. 25)를 활용하여 *Cryptomonads*와 수질환경인자간의 상관성 분석, 주성분 및 요인분석을 실시하였다. 상관분석은 일반적으로 이용되는 Pearson's correlation analysis를 이용하였고, 주성분 분석은 주성분 수를 결정하기 위해 요인을 설명하는 분산의 크기인 고유치(eigenvalue)가 1.0 이상인 값을 갖는 주성분 축만을 고려하였다. 고유치가 1.0 이하인 경우는 1개의 요인이 변수 1개의 분산을 설명할 수 없으므로

로 요인으로서 의미가 없기 때문에 제외하였다. 주성분 분석으로 요인을 추출한 후 요인과 변수와의 상관 계수에 따른 요인 구조 명확화를 위해 직교회전방식(Varimax) 방식을 적용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 기상학적 특성

기상인재(강수량, 기온, 일조시간 등)는 조류 발생에 직접적인 영향을 미치는 주요 인자이다. 특히 강수량은 하천으로 유입되는 물의 양과 유속을 증가시켜 하천의 물리적 특성(유량, 수위)에 변화를 일으킬 수 있으며, 강우 시 비점오염원이 하천으로 유입되면 수질의 화학적 특성 변화와 함께 조류 발생 환경에 영향을 미칠 수 있다(Kim et al., 2010). 조사기간 동안 동래 지점의 일강수량과 온천천·수영강 평균 *Cryptomonads* 개체수를 Fig. 2.에 나타내었다. *Cryptomonads*는 매년 강우량이 적은 동절기(12월 ~ 이듬해 4월)에 개체수가 증가하

고 강우가 잦은 하절기에는 감소하는 경향을 보이고있다. 해마다 동절기 강수량(강우일수)은 2021년 393.7mm(23일), 2022년 257.5mm(16일), 2023년 295.5mm(26일), 2024년 507.0mm(43일)로 기록되었다. Fig. 2.에서 볼 수 있듯이, 특히 2022년은 다른 해에 비해 강수량이 적었으며, 2021년 12월 3.5mm, 1~2월의 경우에는 강수량이 0mm로 무강우기간이 길었다. 이 시기(2021년 12월 ~ 2022년 4월)의 *Cryptomonads* 개체수는 최소 1,131 cells/mL에서 최대 152,100 cells/mL로 적조 밀도가 높은 기간이 지속되었다. 적조 발생 시기에 강수량이 적고 무강우기간이 지속됨에 따라 유량 및 유속 감소로 정체된 수역에 조류가 대량 번성하기에 적합한 환경이 조성된 것으로 판단된다.

Fig. 3.에서 조사기간 동안 기온, 수온, 합계일사량을 분석한 결과, 동절기의 평균기온은 8.6°C(-3.2°C ~ 18.9°C), 평균수온은 12.3°C(5.1°C ~ 20.2°C), 평균합계일사량은 17.5 MJ/m²(6.7MJ/m² ~ 27.9 MJ/m²) 범

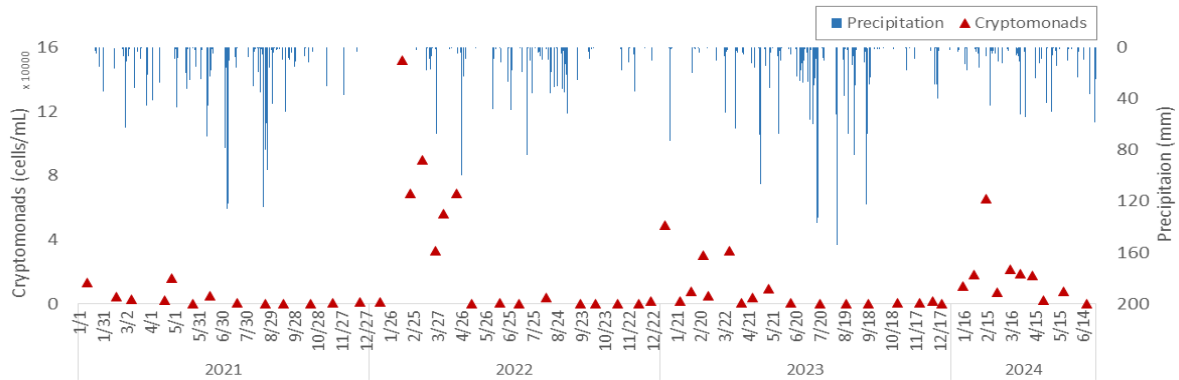


Fig. 2. Daily precipitation and *Cryptomonads* abundance in Suyeong river.

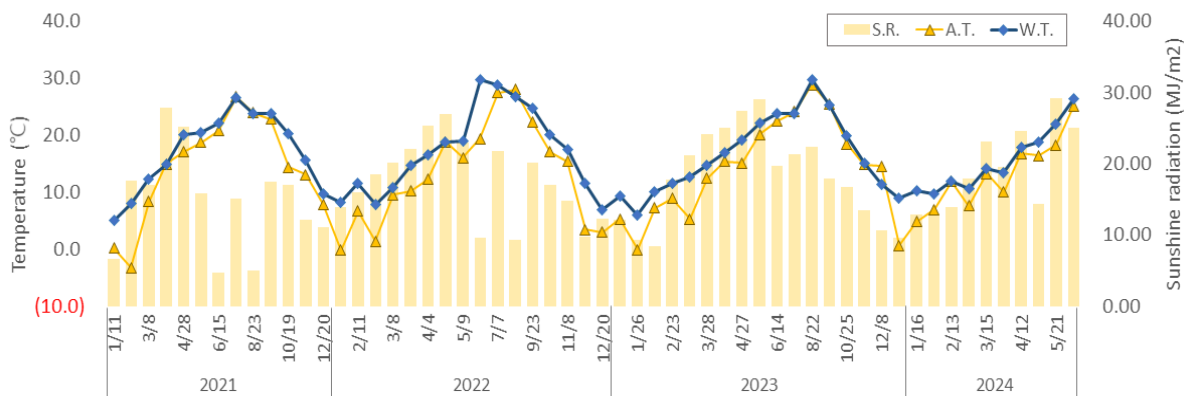


Fig. 3. Fluctuation of air temperature, water temperature and accumulated solar radiation by sampling site in Suyeong river.

위로 측정되었다. 적조 밀도가 높았던 2022년의 경우의 수온은 7.8°C ~ 18.8°C이었으며 맑은 날이 많아 일사량이 증가하면서 조류 번성에 영향을 미쳤을 가능성이 크다. 수온은 수중 생물상과 식물플랑크톤의 조성 및 생장에 영향을 미치는 주요 인자이며, 수영강 하류에서 주로 번성하는 *Cryptomonads*는 주로 10°C ~ 20°C의 수온에서 활발히 증식하는 것으로 알려져 있으며 특히, 낮은 온도와 조도가 유지되는 조건에서 *Cryptomonads*는 다른 조류보다 경쟁적으로 우세한 군집을 형성할 수 있다(Kim, 2002).

3.2. 수영강 수계 수질특성

3.2.1 물리·화학적 특성

전기전도도는 물속에 용해된 이온 농도를 나타내는 지표로, 염분 농도와 밀접하게 연관되어 있다. 염분과 전기전도도는 물리·화학적 특성이 유사하며 일반적으로 높은 상관관계를 가진다. 수영강 수계에서 해수의 영향을 받아 적조가 번성하는 구간을 확인하기 위하여 수영강 하류의 전기전도도의 월별 농도 분포(Fig. 4.)를 분석한 결과, 수영강 하구로부터 약 2.1 km에 위치한 OC2 지점과 2.4 km에 위치한 SY2 지점까지 해수가 유입되고 있는 것으로 나타났으며 기존 연구결과(Lee et al, 2012)와 유사한 경향을 보였다. 한편, 석대천 SY1 지점의 전기전도도가 상대적으로 높게 나타났는데, 이는 동부하수처리장 방류수의 영향으로 판단된다. 연구에 따르면, *Cryptomonads*는 염분 내성이 높아(Jang, 2008) 염분 농도가 2~30 psu까지 변화하는 환경에서도 번성할 수 있는 특성을 가지며, 염분 적응 범위가 비교적 넓은 것으로 알려져 있다(Menezes and Novarino, 2003).

질소(N)과 인(P)은 조류가 성장하기 위해 필수적인

영양소로, 본 연구에서는 수영강 하류의 각 지점에서 T-N, NH₃-N, T-P, PO₄-P의 농도 분포를 Box Plot로 시각화하였다(Fig. 5.). 조사 기간 동안 수영강 하류의 질소 계열은 갈수기에 상대적으로 높은 농도를 보였으며, 인 계열은 계절적 변동이 적고 하천 상류에서 하류로 갈수록 영양염 농도는 증가하는 경향이 나타났다. 이러한 경향은 기존 연구들(Kim et al, 2014; Jeong et al, 2022)와 유사한 양상을 보였다.

T-N의 경우 석대천 SY1 지점이 평균 9.657 mg/L로 가장 높은 농도를 보였으며, 석대천 합류 직후인 SY2 지점에서 평균 7.320 mg/L로 나타났다. 또한 SY1와 SY2 지점의 농도 변동성이 컸는데, 이는 오염된 석대천이 수영강으로 유입되면서 수영강의 질소 농도에 높은 영향을 미치고 있는 것으로 판단된다. 조석의 영향을 크게 받는 SY5 ~ SY6 지점은 농도 범위가 상대적으로 넓어 수영강에서 유입되는 질소 이외의 다양한 환경적 요인에 영향을 받는 것으로 보인다. NH₃-N의 경우 T-N과 마찬가지로 SY1 지점에서 평균 2.499 mg/L로 높은 농도를 보였으며, 수영강은 온천천에 비해 농도 변동성이 크게 나타났다. 암모늄염(NH₄⁺)은 *Cryptomonads*가 주로 질소원으로 선호하는 것으로 알려져 있으며, 이는 질산염(NO₃⁻)이나 아질산염(NO₂⁻)보다 흡수와 동화 과정에서 에너지 소모가 적기 때문이다(Sabrina et al, 2019). 또한 물속에 유입된 NH₄⁺는 질산화작용(Nitrification)에 의해 NO₂⁻로 전환된 후 NO₃⁻로 변환되므로 새로운 오염원이 추가되지 않는 한 T-N의 농도 변화는 크게 나타나지 않는다(Kim, 2019). 석대천에서의 높은 질소 농도의 원인으로는 2가지를 고려해볼 수 있다. 첫 번째는 석대천 유지용수로 사용되고 있는 동부하수처리장 방류수의 영향이다. 동부하수처리장은 고도하수처리시

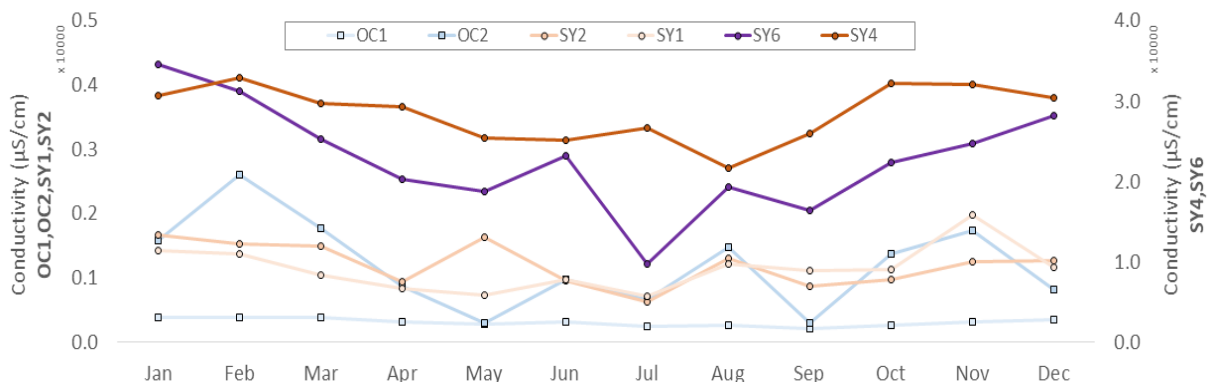


Fig. 4. Monthly variations of conductivity in Suyeong river.

시스템을 갖추고 있으나 최종 방류수의 T-N 농도는 약 8.251 mg/L(Table 1)로 여전히 높은 수준이다. 두 번째는 수영강 상류에 위치한 화훼지역에서 유출되는 질소 비료의 영향으로 판단된다(Cho et al., 2018; Lee., 2021). 환경정책기본법에 따르면 하천 생활환경기준에는 T-N 기준은 규정되어 있지 않으나, 수영강 하구의 높은 질소 농도를 보이고 있다는 연구결과(Yoon, 2022)와 마찬가지로 본 연구 결과, 수영강의 T-N 농도가 평균 5.700 mg/L로 확인되었으며 온천천의 T-N 농도(평균 3.092 mg/L)와 비교해보았을 때 석대천의 질소 관리가 필요할 것으로 판단된다.

T-P의 경우 모든 지점이 하천의 생활환경기준으로

보통(Ⅲ) ~ 약간나쁨(Ⅳ) 수준에 해당하며, SY6 지점이 평균 0.279 mg/L로 가장 높은 농도와 큰 농도 편차를 보였다. PO₄-P은 모든 조류와 미생물의 세포 대사, 에너지 전달, 그리고 핵산(DNA, RNA) 합성에 필수적인 영양소로 SY5, SY6 지점에서 높은 농도를 보였으며 농도 변동성이 컸다. OC4 지점과 SY4 지점에서부터 농도가 상승하여 하류인 SY6 지점까지 농도 분포가 점차 커졌는데, 이는 SY5 지점에 위치한 수영하수처리장과 동부하수처리장 방류수에 포함된 인이 지속적으로 유입되고 있으며(Table 1), 수영강 하구역에서 우천 시 미처리된 도시하수의 유입과 도시하수의 영향을 받은 하수처리장 방류구 인근 퇴적물로 인한 오염

Table 1 Average water quality parameters of final effluent from wastewater treatment plants (2021.1. ~ 2024.6.)

site	Effluent volume (m ³ /day)	pH (-)	BOD (mg/L)	COD (mg/L)	SS (mg/L)	T-N (mg/L)	T-P (mg/L)
Suyeong	347,218	6.7	8.5	8.9	3.9	8.472	0.488
Dongbu	75,160	6.4	5.0	6.1	3.1	8.251	0.107
Effluent standard		-	10	25	10	20	2

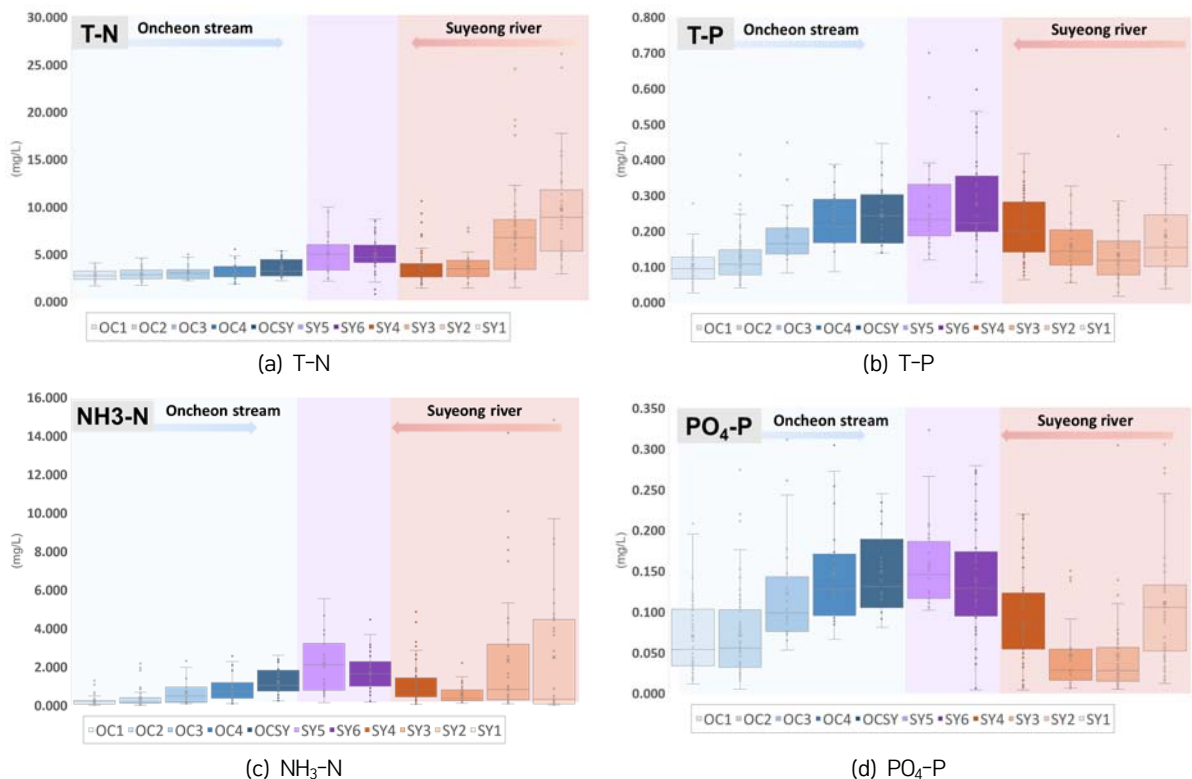


Fig. 5. Box plots of water quality factors by sampling sites in Suyeong river: T-N(a), T-P(b), NH₃-N(c), PO₄-P(d).

이 주요 원인으로 보고되었다(Baek et al., 2014). 온천천과 수영강이 합류되는 지점은 조석에 의해 정체구간이 형성되어 유입된 하수가 빠져나가지 못하고 저층 퇴적물이 해수 유동에 따른 침전과 용출이 반복되면서 인의 농도에 영향을 미친 것으로 판단된다(Kim et al., 2014).

유기물 오염의 정도를 평가하는 지표인 BOD와 COD의 농도 분포를 물환경측정망 자료를 활용하여 분석하였으며, 결과를 Fig. 6.에 나타내었다. 온천천의 BOD는 낮은 농도를 유지하며 큰 변동성을 보이지 않았다. 그러나 수영강은 지점별로 농도 변화가 크며, 최하류인 SY6 지점의 변동성이 가장 크게 나타났다. 이를 보았을 때, 비점오염원 유입 가능성과 함께 수체의 조류 번성에 의한 영향을 고려할 수 있다. 적조가 대량 발생했던 2022년 3~4월에 SY4 지점과 SY6 지점의 BOD가 21.5 ~ 62.2 mg/L로 급격히 증가한 것과 관련이 있다. BOD와 Chl-a 농도 간의 양의 상관관계는 조류의 대량 발생으로 인한 생분해성 유기물의 증가를 반영할 수 있으며, 반대로 생분해성 유기물의 증가는 조류 대량 발생의 원인으로 작용할 가능성도 있다(Smith, 1985; Sohn et al., 2013).

COD의 경우 BOD와 유사한 경향을 보이고 있으며 SY6 지점의 농도 편차가 가장 컸다. 유기물의 생분해 특성을 파악할 수 있는 지표로 BOD/COD 비율이 있는데, 값이 0.6 이상이면 유기물이 생물학적으로 분해 가능한 성질을 가지고 있음을 나타낸다(Sawyer et al., 2003). BOD/COD 비율을 계산해본 결과, SY4 지점이 1.04로 가장 높았으며 SY6 지점 0.90, SY2 지점 0.68, SY1 지점 0.63, OC2 지점 0.43, OC1 지점 0.36으로 나타나 수영강은 생물학적으로 분해 가능한 유기물질의 비율이 상대적으로 높음을 알 수 있으며, 정체

수역에서 번성한 조류에 의해 생성된 유기물질의 영향을 크게 받고 있는 것으로 판단된다.

3.2.2 생물학적 특성

조사기간 동안 수영강 하류의 생물학적 특성인 클로로필-a(*Chl-a*)와 총대장균군(*Total coliform*), 분원성대장균군(*Fecal coliform*)을 Table 2에 나타내었다. Chl-a는 광합성 색소로서 모든 광합성 생물에 공통적으로 존재하며, Chl-a의 양을 측정하면 식물플랑크톤의 현존량을 파악할 수 있어 수계 환경의 부영양화 지표로 흔히 사용된다(Choi, 2013). SY4 지점에서 평균 76.1 mg/m³(0.4 ~ 988.6 mg/m³)로 평균 Chl-a 농도가 높고 큰 농도 편차를 보였으며 극단적인 이상치가 많은 지점이었다. 월별 평균 Chl-a 농도 분포를 보면(Fig. 7.), SY4 지점과 SY6 지점의 3~6월의 Chl-a 농도가 급격히 증가했는데, 수영강 최하류인 SY6 지점에서 번성한 조류가 해수 유동에 따라 이동하면서 하폭이 넓고 정체가 심한 SY4 지점에 체류하면서 조류 밀도가 상승한 것으로 판단된다. 식물성 플랑크톤의 종에 따른 월별 현존량을 Fig. 8.에 나타내었다. 조사 수계는 동절기에 *Cryptomonads*가 우점적으로 번성하다가 하절기는 규조류가 우점하고 그 외 녹조류, 남조류들이 출현하는 패턴을 보이고 있었다. 동절기에 번성하는 *Cryptomonads*가 낮은 온도에 의해 경쟁적 우위를 차지할 수 있다(Sohn et al., 2013). 수온은 조류 종조성 및 현존량에 있어 가장 중요한 요인이며 군집에 있어서 천이의 동력이 된다(Shitao, 2012, Yoo et al., 2014). 또한 하절기에 소수의 *Cryptomonads*는 사라지지 않고 수계 내에 항상 존재하고 있었는데 이는 *Cryptomonads*가 번성하기에 적당한 환경 조건이 되면 언제든지 증식할 수 있다는

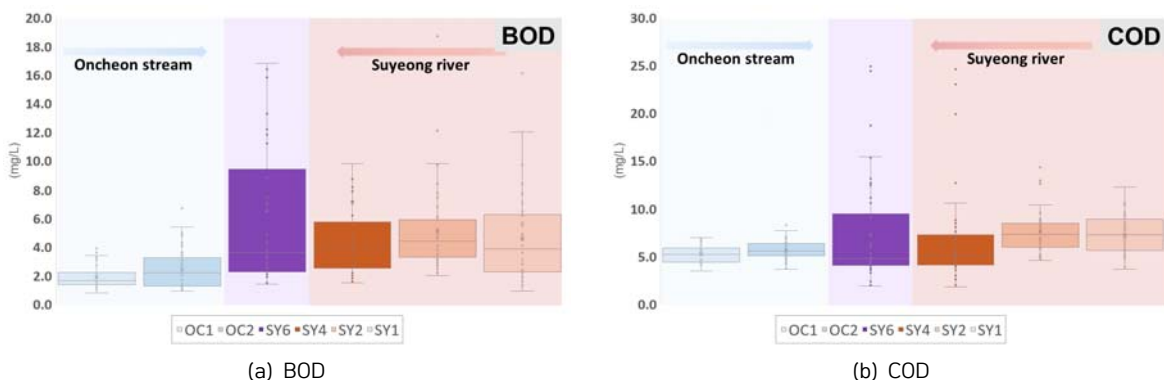


Fig. 6. Box plots of water quality factors by sampling sites in Suyeong river: BOD(a), COD(b).

것을 의미한다.

대장균은 인간이나 온혈동물의 분변에 의한 오염을

지표하는 가장 정확하고 효과적인 지표세균이다(Lee et al, 2007). 조사 수계에 하수 유입에 대한 영향을 알

Table 2 Results from the biological in Suyeong river

Site Parameter		OC1	OC2	SY6	SY4	SY2	SY1
Chl-a (mg/m ³)	Min.	0.1	0.4	0.5	0.4	1.2	0.4
	Max	66.9	58.0	661.7	988.6	47.8	164.6
	Mean (S.D.)	4.8 (±10)	10.8 (±15)	70.4 (±125)	76.1 (±186)	14.4 (±13)	24.0 (±35)
Total coliform (CFU/100mL)	Min.	660	1,200	490	2,200	4,700	910
	Max	520,000	1,000,000	240,000	280,000	2,000,000	170,000
	Mean (S.D.)	77,000 (±105,000)	96,000 (±190,000)	35,000 (±45,000)	68,000 (±82,000)	109,000 (±304,000)	32,000 (±47,000)
Fecal coliform (CFU/100mL)	Min.	260	920	1,100	9,900	17,000	4,900
	Max	55,000	98,000	99,000	99,000	350,000	28,000
	Mean (S.D.)	13,000 (±13,000)	14,000 (±18,000)	18,000 (±21,000)	9,900 (±18,000)	17,000 (±54,000)	4,900 (±7,600)

S.D. : standard deviation

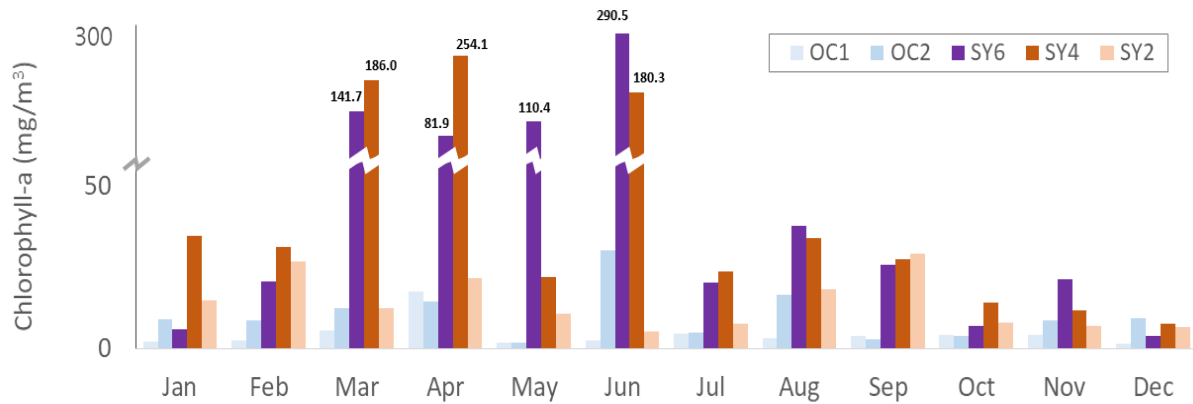


Fig. 7. Seasonal variations of *Chlorophyll-a* in Suyeong river.

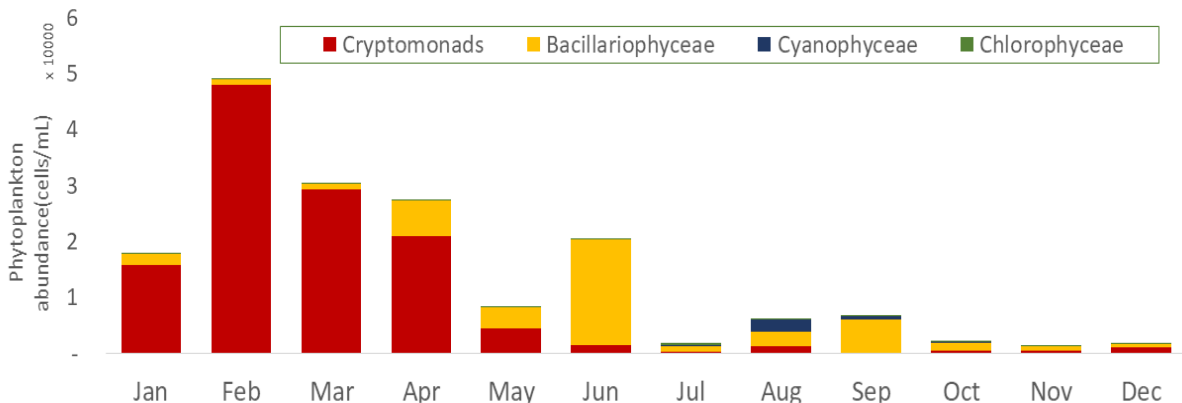


Fig. 8. Seasonal variations of *Phytoplankton* abundance in Suyeong river.

아보기 위하여 총대장균군과 분원성 대장균군의 지점 별 농도 분포를 확인해본 결과, 총대장균군은 SY2 지점이 평균 109,000 CFU/100mL로 높았으며 생활오수 유입의 지표가 되는 분원성 대장균군은 SY6 지점이 18,000 CFU/100mL로 가장 높았는데, 이는 온천천과 수영강 인근 빌라 및 단독주택에서 배출되는 생활오수가 미처집되어 처리되지 못한 도시하수유입에 따른 오염으로 판단되었다. 하수방류수에서의 대장균 발생은 유기물의 농도가 높을수록 대장균군의 출현에 영향을 미친다고 보고하였으며, 수영강 하류 지역은 분변 및 하수영향해역이라는 조사 결과와 일치한다 (Baek et al, 2014).

3.3. 통계분석

3.3.1 상관분석

상관분석은 두 변수 간의 관계 존재 여부와 강도를 통계적으로 파악하는 방법으로, 상관계수의 절댓값이 1에 가까울수록 강한 선형관계를 나타낸다(Sim, 2011). *Cryptomonads*와 수질환경인자 간의 상관관계를 분석하기 위하여 수영강 하류의 온천천과 수영강의 7개 지점에서 수집한 자료를 바탕으로 전체 조사기간과 동절기(12월 ~ 이듬해 4월) 동안의 상관분석 결과를 비교 분석하였으며, 그 결과는 Table 3에 제시되어 있다.

기상인자와의 상관분석 결과, 기온(-0.224)은 전체 기간 동안 음의 상관관계를 보였고, 이는 기온이 낮을수록 *Cryptomonads*의 개체수가 증가하는 경향을 나타내며, 이는 저온 환경에서 경쟁적 우위를 차지하는 조류임을 알 수 있다(Sohn et al, 2013). 동절기는 기온과의 상관성이 약해졌는데, 낮은 기온인 상태는 조류가 성장하기 적합한 환경이 조성되면서 *Cryptomonads*의 번성에 영향이 적게 나타나는 것으로 판단된다. 평균운량(-0.164)은 약한 음의 상관성을 보였고, 일조율(0.165)은 약한 양의 상관성을 나타냈다. *Cryptomonads*는 낮은 광조건에서도 생존할 수 있으며, 일부 종은 장기간 암흑 상태에서도 생존할 수 있는 특성과 빛의 강도를 감지하고 일주기 수직 이동(diel vertical migration)을 통해 극단적인 빛 환경을 피할 수 있는 특성이 보고된 바 있다(John, 2003).

수리인자인 조위(조석 진폭)는 *Cryptomonads*의 개체수와 전체 기간(0.326) 및 동절기(0.332) 모두에서 유의미한 양의 상관관계를 나타냈다. 이는 조위가 하천 내 조류의 이동과 번성에 중요한 요인임을 보여준

다. 동절기에는 기상학적 요인의 영향이 상대적으로 감소하는 반면, 수리인자인 조위의 영향은 꾸준히 유지되고 있는 것으로 나타나 조류와 단일 인자와의 관계뿐만 아니라 여러 환경 요인과의 상호작용을 종합적으로 고려해야 할 필요가 있다.

수질인자와의 상관분석 결과, *Cryptomonads*는 질소(N)와 인(P) 관련 변수들과 강한 양의 상관관계를 보였다. 전체 기간 동안 Chl-a(0.608), T-N(0.463), DTN(0.270), NO₂-N(0.336), NH₃-N(0.257), T-P(0.417)와 유의미한 양의 상관성을 나타냈다. 이는 질소와 인이 조류의 성장에 필수적인 영양염류로 작용하며, 영양염류의 농도가 증가할수록 조류의 번성이 촉진됨을 보여준다(Paerl & Huisman, 2008). 담수와 해수의 혼합이 시공간적으로 변화하는 하구역에서는 식물플랑크톤의 제한 영양염이 계절적, 공간적으로 크게 변화한다(Caraco, N. et al, 1988; Harrison et al., 1990). 동절기에는 이러한 상관성이 더욱 강하게 나타났다. 이는 *Cryptomonads*가 동절기에 질소와 인의 공급을 통해 급격한 증식을 유발했음을 의미한다(Kim et al, 2019). 수온(-0.241)은 *Cryptomonads* 개체수와 약한 음의 상관관계를 보였으나, 동절기의 수온(0.000)과는 상관관계가 사라졌다. 이는 기온과 마찬가지로, 낮은 수온이 *Cryptomonads* 성장에 이미 최적화된 상태임을 반영한다. 전체 기간 동안 DO(0.404)는 양의 상관관계를 보였으며, 이는 조류의 광합성 활동이 DO 농도를 증가시켜 이로 인해 DO 농도가 높은 환경이 조류 번성에 긍정적인 영향을 미쳤음을 시사한다(Mann et al, 2013). 염분(0.275)과의 양의 상관관계는 *Cryptomonads*가 폭넓은 염분 농도에서도 생존 가능함을 나타내며, 수영강 하류의 환경에 적응했음을 나타낸다.

결론적으로, 동절기에는 질소와 인의 영향력이 전체 기간보다 더 뚜렷하게 나타나 *Cryptomonads*가 저수온, 충분한 일사량, 영양염류 공급을 통해 급격히 증식하여 조석에 따라 이동함을 의미하며, 이러한 결과는 *Cryptomonads*의 번성에 있어 계절적 요인을 고려한 질소와 인의 종합적인 관리가 필요할 것으로 판단된다.

3.3.2 요인분석

동절기 *Cryptomonads* 번성에 기여하는 주요 환경요인을 파악하기 위해 수질환경인자들을 사용하여 주성분 분석(Principal Component Analysis)을 수행한

Table 3 Pearson correlation coefficients between *Cryptomonads* and water environmental factors

Factor		Total	Winter	Factor		Total	Winter
Meteorological	Air temperature	-.224**	0.037	Water quality	Chl-a	.608**	.681**
	Average cloud cover	-.164*	-0.155		TN	.463**	.531**
	Total solar radiation	-0.055	-0.014		DTN	.270**	.300**
	Sunshine duration	0.106	0.095		NO ₂ -N	.336**	.343**
	Sunshine ratio	.165*	0.129		NO ₃ -N	-0.023	-0.092
Hydraulic	Tidal range	.326**	.332**		NH ₃ -N	.257**	.344**
					TP	.417**	.523**
					DTP	0.067	0.147
					PO ₄ -P	-0.117	-0.099
					Water temperature	-.241**	0.000
					pH	0.130	0.128
					DO	.404**	.347**
					Salinity	.275**	.228**

** : p<0.01, * : p<0.05

Table 4 Rotated component matrix for water environmental factors based on PCA in winter season

Variable	Component				
	1	2	3	4	5
T-N	0.978	0.002	0.035	0.103	0.029
DTN	0.967	-0.164	-0.037	-0.063	-0.054
NH ₃ -N	0.817	0.334	-0.044	-0.174	0.095
NO ₂ -N	0.793	0.303	0.072	-0.020	-0.169
NO ₃ -N	0.396	-0.811	0.061	0.009	-0.162
T-P	0.475	0.750	0.020	-0.060	0.195
DTP	0.279	0.739	-0.109	-0.494	0.029
Salinity	0.211	0.729	0.287	-0.030	-0.242
Sunshine ratio	0.009	-0.085	0.915	0.226	-0.101
Sunshine duration	-0.014	-0.050	0.913	0.186	0.211
Average cloud cover	-0.118	-0.111	-0.808	0.119	0.092
Tidal range	0.130	-0.089	-0.553	0.407	-0.232
DO	0.070	-0.309	0.007	0.863	-0.063
pH	-0.296	-0.062	-0.046	0.817	-0.010
Chl-a	0.309	0.344	0.221	0.714	0.235
PO ₄ -P	0.146	0.637	-0.133	-0.660	0.017
Water temperature	0.034	0.227	0.036	-0.057	0.925
Air temperature	-0.050	-0.158	-0.029	0.045	0.913
Total solar radiation	-0.069	0.061	0.615	0.020	0.684
Total	3.941	3.262	3.187	2.923	2.498
Variance (%)	20.744	18.949	17.105	11.225	9.430
Cumulative (%)	20.744	45.453	62.557	73.782	83.212

Kaiser Meyer Olkin (KMO) measure of sampling adequacy = 0.644

Barlett's test of sphericity = 0.000 (p<0.001)

결과, 총 5개의 주성분이 추출되었으며 추출된 요인에 의해 총 분산의 83.2%가 설명되었다(Table 4) 통계분석에 사용된 변수들이 요인분석에 적합한지 확인하기 위해 Kaiser-Meyer-Olkin(KMO) 검정을 실시한 결과, KMO 값은 0.644로 분석되었으며, Bartlett's test의 구형성 검증에서도 p-value가 0.000으로 나타나 변수 간의 상관관계가 통계적으로 유의하며 요인분석 실행이 타당한 것으로 분석되었다.

제 1요인은 고유치 3.941로 총 분산에서 20.7 %를 설명하며 질소 계열 오염요인(T-N, DTN, $\text{NH}_3\text{-N}$, $\text{NO}_2\text{-N}$)으로 구성되었다. 이는 질소가 *Cryptomonads* 성장의 주요 제한 영양소로 작용함을 나타낸다. 제 2요인은 고유치 3.262로 총 분산에서 19.0 %를 설명하며 조석에 의한 염분 변동 및 퇴적물의 침전과 재부유에 따른 인 계열 오염요인으로 설명되었다. 이는 감소구간 내 조석 작용이 영양염류의 재순환에 기여할 수 있음을 나타낸다(Lee et al., 2018). 제 3요인은 고유치 3.187로 총 분산에서 17.1 %를 설명하며 빛과 관련된 기상인자(일조율, 일조시간, 평균운량)와 조위 영향에 따른 수위 차이로 설명된다. 이는 *Cryptomonads*의 광합성 활동이 빛 조건 및 수리적 변화에 의해 영향을 받을 수 있음을 보여준다. 제 4요인은 고유치 2.923로 총 분산에서 11.2 %를 설명하며 하천 내 물질대사(pH, DO)와 조류 생체량에 영향을 미치는 요인(Chl-a, $\text{PO}_4\text{-P}$)로 설명할 수 있다. 이는 광합성과 생물학적 활동이 DO와 조류의 번성에 미치는 영향을 나타낸다. 제 5요인은 고유치 2.498로 총 분산에서 9.4 %를 설명하며 온도 관련 인자(수온, 기온, 합계일사량)으로 구성되어 계절적 요인의 영향을 반영하며 조류의 성장과 계절적 온도 변화 간의 연관성을 나타낸다.

3.4. 수영강 수계의 적조 발생 현황

*Cryptomonads*는 크기는 2~50 μm 의 범위로 매우 다양하며, 비대칭적 모양으로 종에 따라 길이가 같거나 다른 2개의 운동성 편모를 가진 조류로서, 두 개의 편모를 이용해 수층의 위아래를 자유롭게 유영하며 수체 내에서 수직 이동하는 특성을 가지고 있어 해수 유동에 따라 발생 지점이 이동할 수 있다(Wright, 1964; Pechlaurall, 1971). 이들이 갖는 색소로는 chlorophyll-a, c2, xanthophyll이 있으며, 부가적으로 phycobiliprotein의 색소체인 phycocyanin과 phycoerythrin 두 가지 중 한 가지를 갖는다. 이에 따라 이들이 갖는 파장의 범위가 다양하게 되고 이러한 색소체들의 조화나 농도에 따라 갈색, 붉은색, 푸른색의 색깔을 갖게 된다(Butcher, 1967; Hill and Rowan, 1989). 또한 이들은 수생태계 내에서 자가영양, 타가영양, 혼합영양 등 다양한 영양 유형을 나타내며(Antia et al., 1973; Lee et al., 1999), 그 자신이 다양한 생물종의 먹이가 되기도 한다(Eriksen et al., 2002).

수영강 수계에서 주로 번성하는 *Cryptomonads*는 12월부터 개체수가 증가하기 시작하여 부분적으로 띠를 이루어 군집 이동하다가 번성에 적합한 환경(저수온, 풍부한 영양염, 정체된 흐름)이 조성되면 대량 번성하여 하천의 물빛을 붉게 만들며, 이후 환경이 변화하면서 적조가 소멸되는 현상이 매년 반복되고 있다(Fig. 9.). 현재 물환경보전법 시행령 [별표3] '수질오염경보의 종류별 경보단계 및 그 단계별 발령·해제기준'(제28조제3항관련) 나.에 따르면 남조류 세포수가 20,000 cells/mL 이상일 때 '관심'단계가 발령된다. 조사 수계에는 조류 발생과 관련한 법적 규정이 없으나, 수영강에서 육안상 적조가 뚜렷하게 관찰되었을 때 개체수가 20,000 cells/mL 이상인 사례가 확인되어, 본 연구에서도 이 기준을 적용하여 조류 발생을 평가해보고자 하였다. 지점별 동절기(12월 ~ 이듬해 4



Fig. 9. Seasonal characteristics of red tide occurrence at Wondong bridge(SY4) in Suyeong river.

월)의 적조 번성 현황을 보면(Fig. 10.), 동절기 총 26 회 동안 20,000 cells/mL 기준을 초과한 횟수는 OC2 지점 6회, OC3 지점 8회, OC4 지점 12회, OCSY 지점 12회, SY5 지점 11회, SY4 지점 14회, SY3 지점 6회로 나타났다. 연도별로 비교했을 때, 2022년의 현존량이 가장 높았으며, 특히 2022년 2월 11일에 조사한

OC1 지점과 OC4 지점에서 각각 375,500 cells/mL, 396,000 cells/mL로 최대 현존량을 기록하였으며 2023년과 2024년에 비해 높은 현존량을 유지하였다. 이는 기상학적 특성에서 언급했던 것과 같이, 2022년의 강우량이 적고 무강우일수가 길어 하천 흐름이 정체되면서 안정된 수체에서 조류가 대량 번성했기 때문

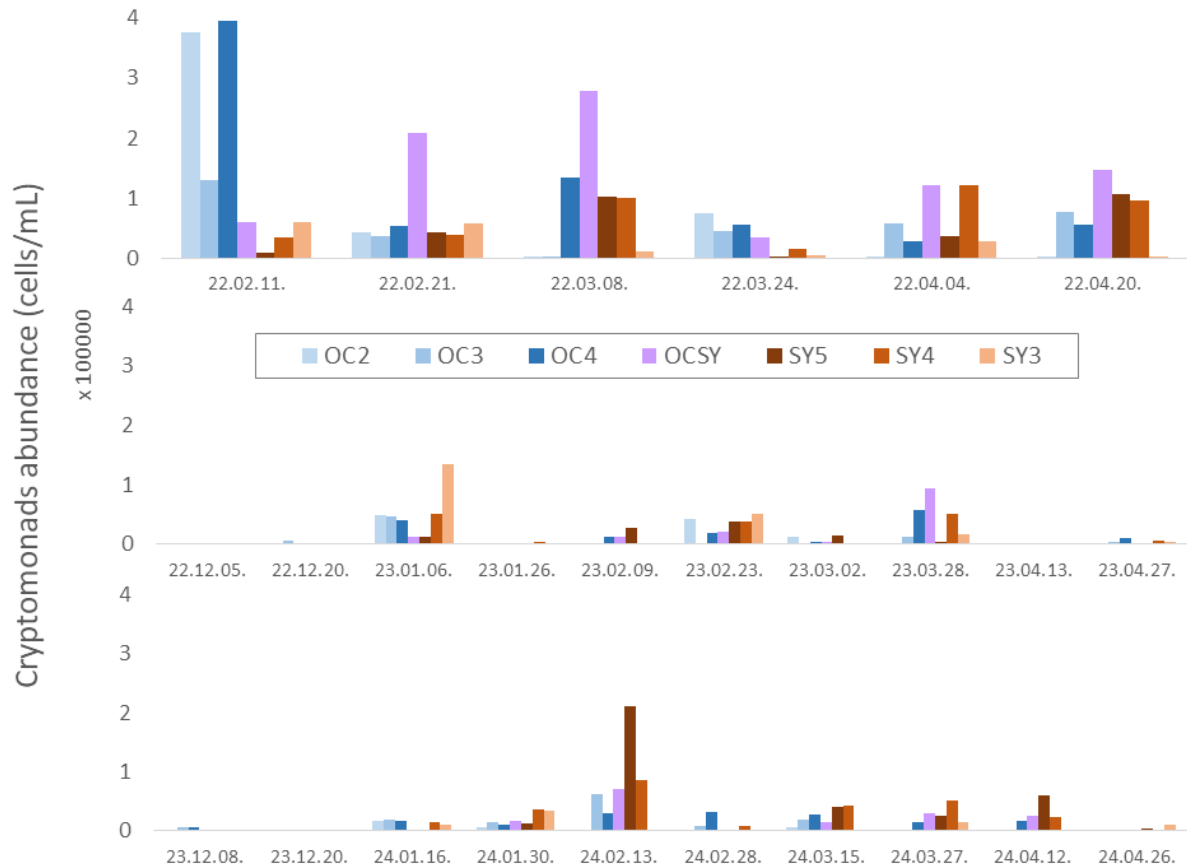


Fig. 10. Spatial distribution of *Cryptomonads* at sampling sites during the winter season in Suyeong river.

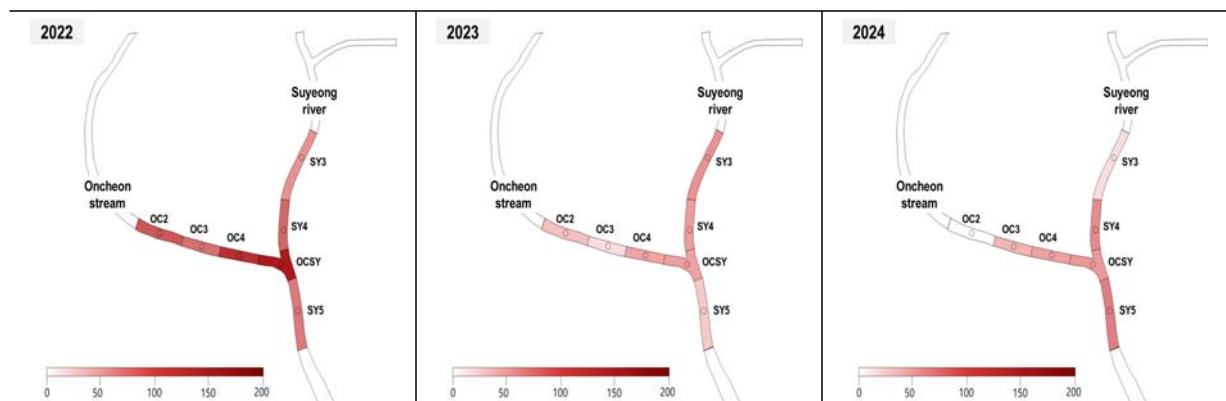


Fig. 11. Annual behavior characteristics of *Cryptomonads* in Suyeong river.

Table 5 Average abundance of *Cryptomonads* at sampling sites during the winter season in Suyeong river

Site	(cells/mL)						
	OC2	OC3	OC4	OCSY	SY5	SY4	SY3
2022	61,923	44,420	90,675	106,515	37,335	50,997	20,788
2023	10,874	7,779	14,883	14,889	9,789	15,300	20,669
2024	3,709	15,363	18,374	19,648	44,384	32,847	8,717
Average	25,502	22,521	41,311	47,017	30,502	33,048	16,734

으로 판단된다. 이러한 결과는 수영강 수계에서의 조류 번성은 하천 흐름에 크게 영향을 받으며, 하천 정체를 해소할 충분한 유속이 형성 될 경우 적조의 군집 번성이 감소할 가능성을 시사한다.

지점별 평균 개체수를 살펴보면(Fig. 11., Table 5), OCSY(47,017 cells/mL), OC4(41,311 cells/mL), SY4(33,048 cells/mL)로 분석되어 온천천과 수영강이 합류하는 정체 구간이 적조 번성에 유리한 환경이라 판단하였다. 이러한 정체수역은 강우유출에 큰 영향을 받으며 하천으로부터 유입되는 영양물질의 축적으로 인해 조류 증식에 용이할 수 있다(Chapra, 1997). 따라서, 수영강 수계에서의 적조 발생 특성은 하천 정체 구간에서 *Cryptomonads*가 해수 유동에 따라 상류로 이동하면서 하폭과 수심이 상대적으로 얇은 온천천과 하폭이 넓고 체류가 심한 수영강에 유입되고, 대량 증식하기 적합한 환경 조건이 조성되었을 때 번성하는 것으로 판단된다.

4. 요약 및 결론

수영강 수계의 물리·화학적, 생물학적 변화 특성과 *Cryptomonads*와 수질환경인자 간의 통계분석을 통해 *Cryptomonads*의 발생 특성을 파악하고 종합적인 하천 관리 대책 수립을 위한 기초 자료를 제공하자 연구를 진행하였으며 연구 결과는 다음과 같다.

1. 강수량이 적은 동절기에 *Cryptomonads*의 개체수가 급증하는 경향을 보였으며, 이는 유량 및 유속 감소로 인해 수역이 정체되어 조류 번식에 유리한 환경이 조성된 결과로 해석된다. 또한, 기온, 수온, 일사량 등 기상 인자들이 *Cryptomonads*의 성장과 번성에 중요한 영향을 미친다는 점을 확인할 수 있었다. 특히, 낮은 온도와 높은 일사량 조건에서 *Cryptomonads*가 다른 조류보다 경쟁적으로 우세한 군집을 형성할 수 있다는 기존 연구 결과와 일치

하는 경향이 보였다.

- 수영강 하류는 온천천 연안교(OC2)와 수영강 동천교(SY2) 지점까지 조석의 영향을 받으며, 질소(N)와 인(P) 농도는 하류로 갈수록 증가하는 경향을 보였다. 이는 하수처리장 방류수와 도시하수의 유입, 그리고 조석에 의한 퇴적물의 재부유가 주요 원인으로 작용한 것으로 판단된다. 특히, 석대천 반석2호교(SY1) 지점의 질소 농도가 높았으며, 이는 동부하수처리장 방류수와 상류 지역의 비료 유실 등의 영향을 받은 것으로 보인다.
- 수영강 하류의 Chl-a 농도는 원동교(SY4) 지점에서 평균 76.1 mg/m³로 가장 높게 나타났으며, 이는 하구에서 번성한 조류가 해수 유동에 의해 상류로 이동하면서 영양염 농도가 높은 정체 구간에서 밀도가 증가한 결과로 판단된다. 동절기 동안 *Cryptomonads*는 저수온 환경에서 경쟁적 우위를 차지하며 번성하였고, 하절기에도 소수의 개체가 생존하고 있어 적절한 환경이 조성되면 번성할 가능성을 보였다. 총대장균군과 분원성 대장균군은 각각 동천교(SY2) 지점과 좌수영교(SY6) 지점에서 가장 높은 농도를 보였으며, 이는 미차집된 생활오수 유입으로 인한 도시하수 오염의 영향을 반영한 결과로 분석되었다.
- Cryptomonads*와 수질환경인자 간의 상관분석 결과, 저온 환경에서 경쟁적 우위를 점하는 경향을 보였으며 질소(N) 및 인(P) 계열 영양염류가 *Cryptomonads* 성장에 중요한 영향을 미치는 것으로 확인되었다. 동절기(12월 ~ 이듬해 4월) 상관분석에서는 질소와 인의 상관성이 강하게 나타나, 영양염류 공급이 *Cryptomonads*의 급격한 증식에 기여함을 시사하였다. 주성분 분석을 통해 제1 요인은 질소 계열 오염요인, 제2 요인은 조석 및 퇴적물의 재부유와 관련된 인 계열 오염요인으로, 감소 구간 내 조석 작용이 영양염류의 재순환에 기여함을 시사하였다. 제3 요인은 빛 관련 기상인자와 조

위에 따른 수위 변화로 설명되며, *Cryptomonads*의 광합성 활동이 빛과 수리적 변화에 의해 영향을 받을 수 있음을 보여준다. 제4 요인은 pH, DO, Chl-a 등 물질대사 및 조류 생체량과 관련된 요인으로, 생물학적 활동이 DO와 조류의 번성에 미치는 영향을 반영하였다. 마지막으로 제5 요인은 온도 관련 인자로 계절적 요인의 영향으로 나타났다.

5. 수영강 수계에서 *Cryptomonads*는 12월부터 개체가 증가하여 특정 환경 조건(저수온, 풍부한 영양염, 흐름 정체)에서 대량 번성하였다. 특히 하천 정체 구간에서 적조가 번성하여 해수 유동에 따라 상류로 이동하는 특성을 보였다. 하천에 축적된 영양염류와 흐름이 정체된 수영강 수계의 적조는 자연 현상으로서 완전히 소멸시킬 수는 없지만, 하천 수계의 건강성을 유지하고 정체 구간의 흐름을 개선함으로써 적조 발생을 줄일 수 있다. 적조 번성 조건에는 충분한 일조량, 낮은 수온, 적절한 염분, 풍부한 영양염류 등 여러 환경적 요인이 복합적으로 작용하며 이 중 일조량, 수온, 염분은 인위적인 조절이 어려운 반면, 영양염류는 관리할 수 있는 주요 요소이다. 따라서 영양염류의 유입을 최소화하고 부영양화를 방지하는 것이 적조 발생 억제와 하천 환경 보호의 핵심이라고 할 수 있다.

동절기에는 하천 정체 현상이 두드러지기 때문에 정체된 구간에 흐름을 유도하여 *Cryptomonads*가 장기간 머무르지 않도록 하는 것이 중요하다. 이를 위해 유속 및 유량을 증대시켜 부영양화를 줄이고 정체수역에 흐름을 제공하는 구조적 개선 방안을 마련하기 위한 연구가 필요하다. 추가적으로, 하천 유지용수를 증가시켜 농도를 희석하는 단기적 방안과 하상 준설을 통해 퇴적된 오염물질 제거하고 비점오염원 관리와 하수처리장 방류수 기준 강화와 같은 중장기적 방안을 추진할 필요가 있다.

수영강은 부산시, 낙동강유역환경청, 그리고 관할 구청 등에 의해 관리되고 있으며, 이에 따라 일관된 관리체계 구축이 필요하다. 지역 간 협력을 강화하고, 통합적인 개발 및 정비 계획을 수립하여 영양염류 유입을 줄이는 다양한 환경개선 사업을 추진해야 한다. 또한, 구·군 차원의 적극적인 홍보를 통해 시민들에게 적조의 무해성을 알리고, 폐수 무단 방류와 같은 불필요한 오해를 방지하는 것이 중요하다.

참고문헌

1. Baek, S. H., Yoon, S. R., Lee, I. S., Hwang, D. W., Choi, M. K., Distribution of Fecal Sterols and Nonylphenolic Compounds in Sediments from Busan Suyeong Estuary, Impacted by Wastewater Treatment Plant Effluents, The Korean Society of Fisheries and Aquatic Science, 47(6), 1006-1013(2014).
2. Caraco, N., Tames, A., Boutros, O., Valiela, I., Nutrient limitation of phytoplankton growth in brackish coastal ponds, Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 44(2), 473-476(1987).
3. Chapra, S., Surface Water-Quality Modeling, Tufts University, 519-533(1997).
4. Cho, H. K., Kim, S. M., Water Quality Correlation Analysis between Sewage Treated Water and the Adjacent Downstream Water in Nakdong River Basin, Journal of Korean Society on Water Environment, 34(2), 202-209(2018).
5. Choi, I. C., Characteristics of Phytoplankton Distribution in Midstream of the Geum River(2013), Paichai University.
6. Harrison, P. J., Hu, H. H., Yang, Y. P., Lu, X., Phosphate limitation in estuarine and coastal waters of China, Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 140, 79-87(1990).
7. Hitao, P., Xuebo, Q., Honghua, S., Ran, Z., Mingxin, D., and Dewen, D., Distribution and Controlling Factors of Phytoplankton Assemblages in a Semi-enclosed Bay During Spring and Summer, Marine-Pollution Bulletin, 64, 941-948(2012).
8. Jang, G. G., Semi-weekly variation in phytoplankton community in water of the semi-enclosed Saemangeum seawall(2008), Korea, Kunsan National University.
9. Jeong, T. U., Jeong, S. Y., Kim, M. J., Choi, Y. J., Cho, E. J., Jeong, J. E., Seo, D. C., Park, J. H., Seasonal Variation of Water Quality and *Cryptomonads* Distribution in Oncheon River,

- Korean Journal of Environmental Agriculture, 41(3), 177-184(2022).
10. John, D. W., Robert, G. S., J. P. K., Freshwater Algae of North America: Ecology and Classification, 715-755(2003).
 11. Kim, H. S., Takamura, N., Diel Vertical Distribution of Phytoflagellates in a Small Artificial Pond, ALGAE, 17(1), 1-9(2002).
 12. Kim, K. S., Choi, S. H., Lee, S. M., Cho, E. J., Kim, Y. T., Cho, J. G., Multivariate Analysis of Chlorophyll-a and Water Quality in the Tidal River, The Annual Report of Busan Metropolitan city Institute of Health & Environment, 24(1), 101-109(2014).
 13. Kim, M. H., Ji, H. S., Cho, J. G., Cho, S. J., Identification of Red Tide-causing Organism and Characteristics of Red Tide Occurrence in the Oncheon Down Stream, Busan, Journal of Korean Society on Water Environment, 34(3), 285-292(2018).
 14. Kim, S. H., Kim, J. S., Kang, L. S., Characteristics of Changes in Water Quality in the Suyoung River During Rainfall Event, Journal of Korean Society on Water Environment, 35(1), 9-18(2019).
 15. Kwon, D. M., Yoo, E. H., Kwon, K. W., Bin, J. H., Evaluation of the Suyeong River by multivariate analysis, Busan Metropolitan City Institute of Health & Environment Rep 18, 98-107(2008).
 16. Lee, B. M., Yoon, S. R., Park, S. H., Lee, I. S., Choi, M. K., Distribution and Human Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Polychlorinated Biphenyls in Sediments and Fish from Suyoung Estuary of Busan, Korea, Journal of the Korean Society for Environmental Analysis, 21(4), 252-263(2018).
 17. Lee, M. A., Sung, I. W., Comparative Study on Detecting Methods for Total Coliform in Sewage Effluent, Korean Journal of Environmental Health, 33(5), 422-427(2007).
 18. Lee, S. H., Lee, H. S., Kim, J. J., Park, D. H., Investigation into the Range of Effect of the Tide Level of Oncheon River Using Delft-3D, Journal of Korea Water Resources Association, 45(5), 465-472(2012).
 19. Lee, Y. J., Kim, K. S., Park, J. O., Kim, Y. T., Cho, J. K., Yoo, P. J., Kim, K. G., Study on the red-tide formation at Oncheon stream, Busan, Proceedings of the Korean Environmental Sciences Society Conference, Daegu, 23, 595-597(2014).
 20. Lee, Y. H., Moon, C. H., Kang, H. J., Choi, S. R., Kim, S. H., Characteristics of Water and Sediment Qualities in the Oncheon Stream, Busan during Summer Rainy Season, Journal of Environmental Science International, 29(6), 659-672(2020).
 21. Lee, Y. H., Characteristics of Environmental Quality in the Oncheon Stream, Busan: Rainy Summer, Winter and Longterm Variation(2021), Pukyong National University.
 22. Litchman, E., Klausmeier, C. A., Schofield, O. M., Falkowski, P. G., The role of functional traits and trade-offs in structuring phytoplankton communities: Scaling from cellular to ecosystem level, Ecology Letters, 1170-1181(2007).
 23. Mann, K. H., John, R. N. L., Dynamics of Aquatic Ecosystems: Biological-Physical Interactions in the Oceans, 3rd Edition (2013).
 24. Menezes, M. Novarino, G. (2003), How diverse are planktonic *Cryptomonads* in Brazil Advantages and difficulties of a taxonomic biogeographical approach, Hydrobiologia, 502, 297-306.
 25. Paerl, H. W., Huisman, J., Blooms like it hot. Science, 320(5872), 57-58(2008).
 26. Park, S. S., Principles and Models of Water Quality Management, Korea. the production rate and biomass of phytoplankton in high-mountain lake, Limnologie, 19, 124-125 (2009).
 28. Sabrina, C. L., Tabea, M. A., Alexander, W., Elly, S., Nitrate or ammonium: Influences of

- nitrogen source on the physiology of a green algae, *Ecology and Evolution*, 9(3), 1070-1082(2019).
29. Sawyer, C. N., McCarty, P. L., Parkin, G. F., *Chemistry for Environmental Engineering and Science*, 5th Edition, McGraw-Hill Education, New York, 587-590(2003).
30. Sim, K. S., *Evaluation of Water Quality Using Statistic Analysis in the Seom-Jin River* (2011), Suncheon National University.
31. Smith, Y. H., Predictive models for the biomass of blue green algae in lakes, *Journal of the American Water Resources Association*, 21(3), 433-439(1985).
32. Sohn, E. R., Park, J. I., Lee, B. R., Lee, J. W., Kim, J. S., Winter Algal Bloom and Spatial Characteristics of Water Quality in the Lower Taewha River, Ulsan, Korea, *Korean Journal of Microbiology*, 49(1), 30-37(2013).
33. Wright, R. T. (1964), Dynamics of a Phytoplankton community in and ice-covered lake, *Limnology and Oceanography*, 9, 163-178.
34. Yoon, J. N., Lim, Y. K., Kim, D. S., Kim, Y. O., Baek, S. H., Seasonal changes in phytoplankton community related with environmental factors in the Busan coastal region in 2014, *Korean Journal of Environmental Biology*, 40(1), 112-123(2022).
35. Yu, J. J., Lee, H. J., Lee, K. L., Lee, I. J., Jung, G. Y., Cheon, S. U., Effects of Environmental Factors on Algal Communities in the Nakdong River, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 30(5), 539-548(2014).