

낙동강 하류지역에서 식물 플랑크톤 생체량 및 수질의 장기변동 특성 Long-Term Variations of Phytoplankton Biomass and Water Quality in the Downstream of Nakdong River

손 희 종
Hee-Jong Son

부산시 상수도사업본부 수질연구소
Water Quality Institute, Busan Water Authority

(2013년 3월 25일 접수, 2013년 4월 9일 채택)

Abstract : Long-term (from 1995 to 2012) data of phytoplankton biomass (chlorophyll-a, Chl-a) and water quality were analyzed to investigate trends of eutrophication in downstream of Nakdong River (Mulgum). Long-term annual average concentration of water quality parameters and phytoplankton biomass at Mulgum showed an decreasing trends for 18 years. Phytoplankton biomass was high from annually December to March. Trophic state was evaluated as the eutrophic state annually from 1995 to 2012 by TSI (trophic state index) by Aizaki. From the results of simple regression analysis, correlation coefficient between Chl-a concentration and BOD concentration was high ($r^2 = 0.82$).

Key Words : Phytoplankton Biomass, Water Quality Parameter, Long-Term Variation, Downstream of Nakdong River, Trophic State Index (TSI)

요약 : 낙동강 하류 물금지역의 장기적인 부영양화 경향을 평가하기 위해 1995년부터 2012년까지 수질인자들 및 식물 플랑크톤 생체량(클로로필-a 농도)들의 변화경향을 조사하였다. 18년간의 장기적인 연평균 수질인자들 농도 및 식물 플랑크톤 생체량 변화에서 연평균 수질인자들 농도 및 식물 플랑크톤 생체량은 점차 감소하는 추세였다. 연중 식물 플랑크톤의 농도변화에서는 매년 12월부터 3월까지 높은 식물 플랑크톤의 농도를 나타내었다. Aizaki의 부영양화 지수(Trophic State Index, TSI) 평가에서 낙동강 하류 물금지역의 경우 1995년부터 2012년까지 매년 그리고 연중 부영양화 상태인 것으로 나타났다. 각각의 수질인자들과 식물 플랑크톤 생체량과의 단순 상관관계 분석에서 BOD와 식물 플랑크톤 생체량과의 상관성($r^2 = 0.82$)이 가장 높게 나타났다.

주제어 : 식물 플랑크톤 생체량, 수질인자, 장기 변동, 낙동강 하류, 부영양화 지수(TSI)

1. 서론

낙동강 수계는 대구·경북과 부산·경남지역의 대도시를 경유하여 흐르는 인구 1천만의 식수원으로 국내 최대 수자원의 하나이다. 낙동강 본류의 총 연장은 약 520 km에 이르며, 유역면적은 전체 국토의 약 25%에 해당되고, 낙동강 하구언의 건설(1987년 10월 완공) 이후에는 갈수기에 물 흐름이 정체현상이 일어나고 있으며, 낙동강 중상류의 대도시에서 유출되고 있는 공장폐수 및 생활오수 등 다량의 영양염의 유입에 의한 부영양화 현상의 가속화로 식물플랑크톤 현존량의 증가와 종조성의 변화를 초래하였으며, 매년 하절기에는 남조류, 동절기에는 규조류의 대번식으로 인하여 수자원의 이용에 많은 어려움이 있다.¹⁾

일반적으로 강의 하류는 상류에 비해 영양염류가 풍부하기 때문에 일차 생산량이 때에 따라서 급증할 수 있고, 이러한 양적 변화에 동물 플랑크톤이나 다른 소비자들의 포식이 늦을 경우 포식되지 않은 식물 플랑크톤(phytoplankton)들은 수중이나 강바닥에 축적된다. 이러한 축적은 식물 플랑크톤, 동물 플랑크톤 그리고 어류로 이어지는 먹이사슬에서, 식

물 플랑크톤에서 분비되는 용존 유기탄소(dissolved organic carbon, DOC), 박테리아, 원생동물, 동물 플랑크톤 및 어류로 이어지는 미생물이 다량 존재하는 먹이사슬 구조로 바뀌게 된다. 이러한 전환은 미생물 분해의 활성을 촉진시키게 되고 결국 수중의 용존산소를 고갈시켜 생태계 내의 수질을 악화시킨다.^{2,3)} 특히, 수질변화에 따른 수중의 식물 플랑크톤 농도 변화에 대한 연구는 대부분이 단편적이며, 단기적인 연구결과들로 장기적인 수질변화에 따른 수중의 식물 플랑크톤 농도에 대한 거동평가는 거의 없다.⁴⁾

따라서 본 연구에서는 낙동강 하류의 물금지역의 1995년 이후부터 2012년까지의 장기적인 수질 변화와 연계하여 식물 플랑크톤의 농도변화를 고찰하여 낙동강 하류지역의 장기적인 수질 및 식물 플랑크톤 농도와 같은 환경 생태학적인 변화 경향을 평가하였다.

2. 실험재료 및 방법

수리·수문 현황은 낙동강 홍수통제소의 진동 지점의 유량(discharge)과 기상청의 대구 지역의 강우량을 수리학적 인

† Corresponding author E-mail: menuturk@hanmail.net Tel: 051-669-4635 Fax: 051-669-4669

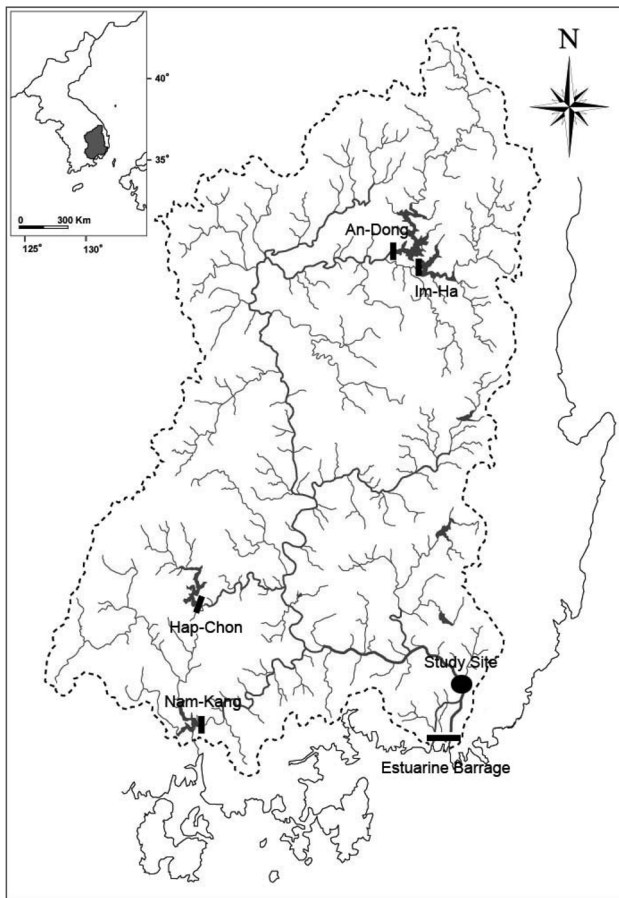


Fig. 1. Map of the Nakdong River basin and study site (■: dam, ●: Mulgum study site).

자료 이용하여 낙동강 하류지역의 수질특성 변화요인을 분석하였다.

낙동강 하류의 수질조사 지점(Fig. 1)은 부산시 H 60만 톤/일의 처리용량을 가진 정수장의 취수구이며, 1995년 1월부터 2012년 12월까지 주 1회 시료를 채수하여 이화학적 수질 특성 및 클로로필-a 농도를 측정하였다. 수질 조사항목은

수온, pH, BOD, COD, NH₃-N, NO₃-N, T-N, T-P 및 클로로필-a 농도를 측정하였으며, 분석방법은 수질오염 공정시험법에 준하여 분석하였다. N/P 비율은 측정된 T-N 및 T-P 결과를 이용하여 계산하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 낙동강 하류지역의 장기적인 수리학적 인자 변화

낙동강 하류지역의 장기적인 환경생태학적 변화 특성을 조사하기 위해 낙동강 하류지역에 직접적인 영향을 미치는 대구지역의 강우량과 진동 지점의 유량에 대해 1995년부터 2012년까지의 연 평균 및 월 평균값의 변화경향을 나타내었다. 대구지역의 강우량 및 진동지점 유량의 월 평균 변화(Fig. 2(a), (b))를 살펴보면 강우량의 경우 6월부터 9월까지 149~256 mm로 나타나 4달간의 강우량이 연간 강우량의 71%를 차지하였으며, 유량의 경우도 7월~9월에 1,103~1,301 m³/sec로 나타나 대구 지역의 강우가 낙동강 하류의 유량에 직접적인 영향을 미치는 것으로 나타나고 있다.

또한, 대구지역의 연간 강우량 변화(Fig. 2(c))와 진동지점의 연 평균 유량변화(Fig. 2(d))를 살펴보면 대구지역의 18년간 강우량의 평균은 1,116 mm로 1998년, 1999년, 2002~2004년 및 2010~2012년에는 18년간의 강우량 평균보다 높았으며, 2003년에 1,754 mm의 최대 강우량을 나타내었으며, 진동지점의 연 평균 유량의 경우도 2002~2004년, 2011년 및 2012년에 다른 해에 비해 많은 유량을 나타내었으며, 2012년도에는 2,039 m³/sec로 다른 해에 비해 월등히 많은 유량을 나타내었다.

3.2. 낙동강 하류지역의 장기적인 수질 인자들의 변화

낙동강 하류지역(물금)의 1995년부터 2012년까지의 장기적인 이화학적 수질 인자들의 변화를 Fig. 3(a)~(f) 및 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 3(a)~(f)에 나타난 수질 인자들의 경우

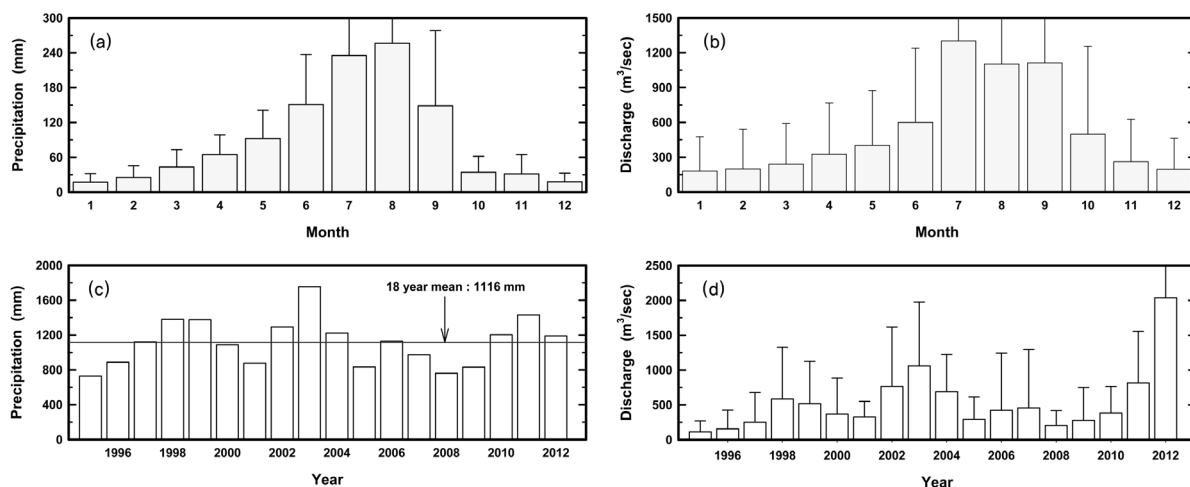


Fig. 2. Annual and monthly change of precipitation and discharge at Nakdong River from 1995 to 2012 ((a), (c)) precipitation data from Daegu Meteorology office, ((b), (d)) discharge data from Jindong Gauging Station).

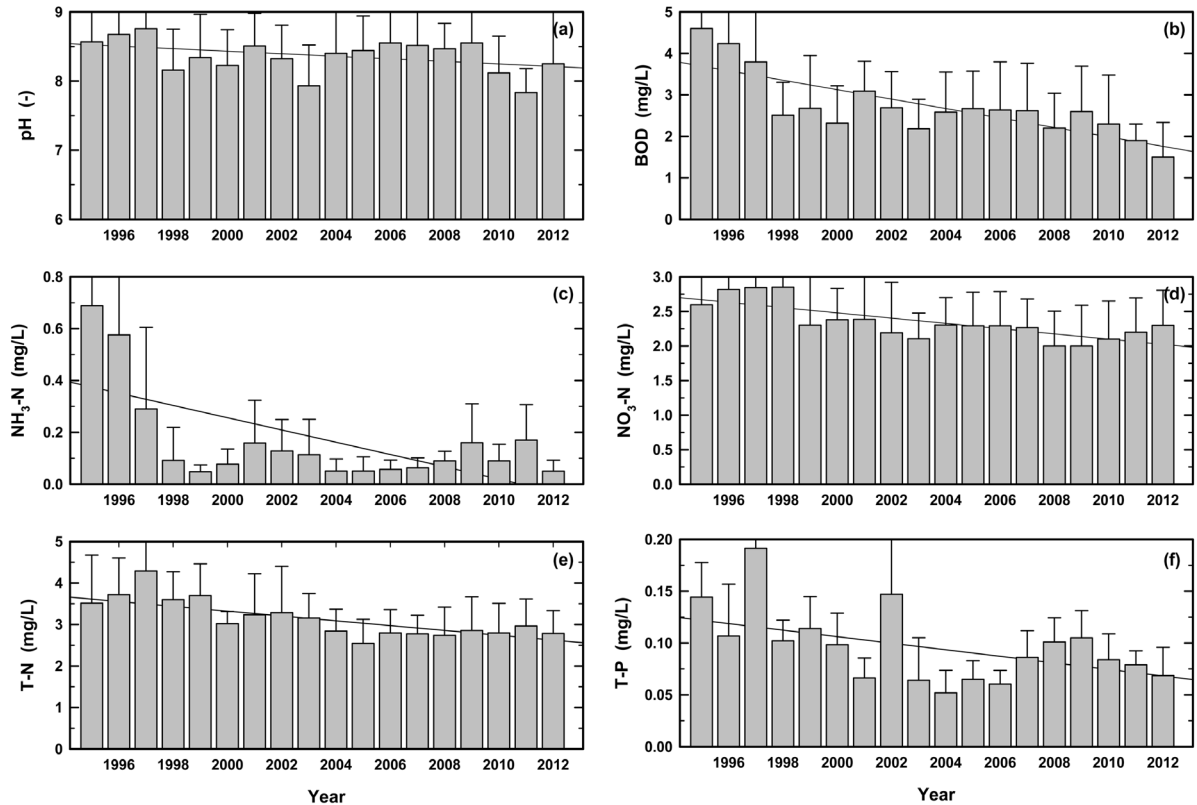


Fig. 3. Long term changes of pH, BOD, NH₃-N, NO₃-N, T-N and T-P at Mulgum (mean±s.d.).

연 평균 농도들이 점점 낮아지는 추세에 있으며, 특히 BOD, NO₃-N 및 T-P의 경우는 다른 수질인자들에 비해 연 평균 농도들의 변화에서 감소폭이 크게 나타나고 있다. 이러한 특징은 낙동강 중·상류에 위치한 하수처리장들의 질소·인 제거를 위한 고도처리 시설이 도입·운전의 영향으로 판단된다. 1982년부터 1998년까지 17년간 낙동강 하류지역의 부영양화 경향을 평가한 Joo 등의 연구결과⁵⁾에서는 pH, BOD, COD, NO₃-N 및 전기전도도 등의 수질 인자들의 연 평균값의 추세가 상승하는 것으로 나타나 낙동강 하류지역에서 부영양화가 심화되는 것으로 보고하고 있으나 본 연구결과에서 보면 90년대 말 이후부터 낙동강 하류의 수질이 점차 개선된 것으로 나타나고 있다.

낙동강 하류지역(물금)의 1995년부터 2012년까지의 장기적인 N/P 비율(ratio)의 연 평균 변화를 Fig. 4에 나타내었다. N/P 비율의 18년간의 평균은 47.8로 1995년, 2002~2004년,

2006년 및 2012년에 18년간 평균값 보다 높은 N/P 비율을 나타내었으며, 1995년에 105.3으로 가장 높게 나타났다. 2009년 이후부터는 N/P 비율이 점점 증가하는 것으로 나타나고 있다. 이는 Fig. 3(e)와 (f)의 T-N과 T-P의 연 평균 변화에서 T-N의 경우 2009~2012년까지 2.86 mg/L~2.97 mg/L의 연 평균농도를 나타낸 반면 T-P의 경우 2009년에 0.11 mg/L에서 2012년에는 0.07 mg/L로 연 평균농도가 감소하여 N/P 비율이 증가된 것으로 나타났다.

호소나 강에서 식물 플랑크톤의 생체량은 무기인과 무기질소와 같은 영양염의 농도에 비례하여 나타나며 제한 영양염의 영향이 절대적인 것으로 알려져 있으며,⁶⁾ 식물 플랑크톤 성장에 대한 영양염 제한을 나타내는 간접적인 지표로 활용되고 있다. 일반적으로 부영양화의 영양염 비율을 토대로 잠재적 영양염 평가에서 T-N/T-P가 10~17의 범위에서 인과 질소가 동시에 제한 영양염이 될 수 있고, 이 이하에서는 질

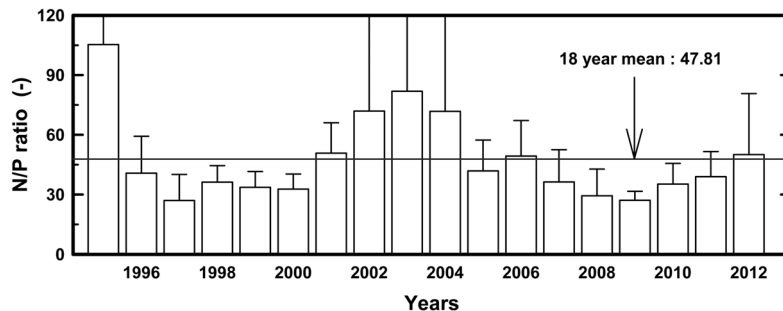


Fig. 4. Long term changes of N/P ratio at Mulgum (mean±s.d.).

소에 의한 식물 플랑크톤의 성장이 제한될 수 있으며, 17을 초과할 경우에는 인에 의한 식물 플랑크톤의 성장이 제한될 수 있다.⁷⁾ 따라서 낙동강 하류지역의 경우는 질소 농도가 높기 때문에 인이 식물 플랑크톤 성장에 제한인자로 작용한다고 할 수 있다.

낙동강 하류 물금지역의 클로로필-a 농도를 1995년부터 2012년까지의 장기적으로 평가한 것을 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5(a)는 1995년부터 2012년까지의 월 평균을 나타낸 것이며, Fig. 5(b)는 1995년부터 2012년까지의 연평균을 나타낸 것이다. Fig. 5(a)의 월별 클로로필-a 농도변화를 살펴보면 12월부터 3월까지 80 mg/m³ 이상의 클로로필-a 농도를 나타내고 있으며, Fig. 2에서 볼 수 있듯이 이 시기는 하천 유량 및 강우량이 급격히 감소하는 갈수기이기 때문에 영양염류 및 식물 플랑크톤농도의 농축효과로 인하여 나타난 결과로 판단된다. 또한, Fig. 5(b)의 1995년부터 2012년까지의 연도별 평균 클로로필-a 농도변화를 살펴보면 점차적으로 클로로필-a 농도가 감소하는 경향을 나타내고 있으며, 1995년과 1996년도에 86 mg/m³과 96 mg/m³에서 2011년도와 2012년도에는 18 mg/m³와 34 mg/m³의 농도를 나타내었다. 이것은 Fig. 3(b)~(f)에 나타낸 다양한 수질 오염물질들의 농도가 감소함에 따라 나타난 결과이며, 무엇보다 제한 영양염으로 작용하는 인(T-P) 농도의 감소가 많은 영향을 미친 것으로 판단한다.

낙동강 하류 물금지역의 영양상태 지수를 평가하기 위해 Aizaki 등⁸⁾이 제시한 영양상태 지수와 등급기준을 이용하여 클로로필-a 농도만을 선택하여 영양상태를 평가하였다. Ai-

zaki 등⁸⁾이 제시한 영양상태 지수와 등급 기준을 보면 클로로필-a 농도가 4.1 mg/m³ 미만인 경우에는 빈영양(oligotrophic) 상태, 4.11~10.25 mg/m³는 중영양(mesotrophic) 상태, 그리고 10.25 mg/m³를 초과하면 부영양(eutrophic) 상태로 구분된다. 낙동강 하류의 물금지역은 1995년 이후부터 클로로필-a의 농도가 감소하고 있는 추세지만 연중 부영양(eutrophic) 상태를 나타내고 있기 때문에 장기적인 수질개선 대책이 필요한 것으로 나타났다.

낙동강 하류 물금지역의 1995년부터 2012년까지의 연평균 클로로필-a 농도와 다른 수질인자들의 연평균 농도와와의 단순 상관분석을 실시한 결과를 Table 1에 나타내었다. 물금지역의 클로로필-a 농도는 BOD와 상관성($r^2=0.82$)이 다른 수질인자들에 비해 높게 나타나고 있다. 이것은 단순히 식물 플랑크톤이 인위적 오염물질 중 생물학적으로 분해 가능한 유기물질이 식물 플랑크톤의 성장에 유리하게 작용하였거나 식물 플랑크톤이 다량 발생하면서 비교적 생분해 가능한 유기물질이 배출되었기 때문으로 추정되나 이에 대한 이해는 좀 더 연구되어야 할 과제이다. 질소와 인 농도와 클로로필-a 농도와의 상관성은 NH₃-N이 0.58로 비교적 양호한 상관성을 나타내었고, NO₃-N, T-N, T-P 및 N/P ratio의 경우는 r^2 값이 0.07~0.39 정도로 나타나 낮은 상관성을 나타내었다. 일반적으로 식물 플랑크톤의 성장에 따라 용존성 T-N과 T-P가 감소하여 수중의 T-N 및 T-P 농도가 감소하기 때문에 일반적으로 부의 상관관계를 나타낸다.⁹⁾ 그러나 Table 1에 나타낸 클로로필-a 농도와 T-N 및 T-P 농도와의 상관관계는 약한 정의 상관관계를 나타내어 이전의 연구결과와 상

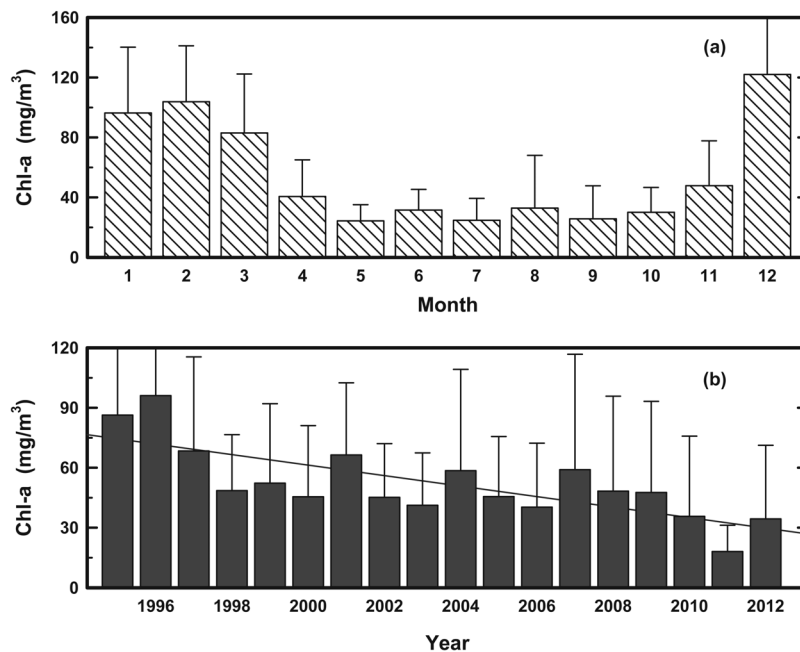


Fig. 5. Annual and monthly change of chl-a at Mulgum from 1995 to 2012 (mean±s.d.).

Table 1. Regression coefficients between Chl-a and analytical parameters (n = 18)

	pH	BOD	COD	NH ₃ -N	NO ₃ -N	T-N	T-P	N/P	Rainfall	Discharge
Chl-a	0.54	0.82	0.42	0.58	0.39	0.31	0.17	0.07	-0.27	-0.27

이한 결과를 보였다. 또한, 물금지역의 유량에 많은 영향을 미치는 대구지역의 강우량과 진동지점의 유량과의 클로로필-a 농도와와의 상관성은 강우량과 유량 모두 약한 부의 상관관계($r^2 = -0.27$)를 나타내었다.

4. 결론

1995년부터 2012년까지 낙동강 하류 물금지역에서의 장기적인 수질인자와 식물 플랑크톤 농도 변화와의 관계를 살펴본 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 수질 항목들의 연 평균 농도변화를 살펴본 결과, 1995년부터 2012년까지 점점 낮아져 낙동강 하류의 수질이 점점 개선되는 것으로 나타났으며, 특히 BOD, $\text{NO}_3\text{-N}$ 및 T-P의 경우는 다른 수질항목들에 비해 연 평균 농도들의 감소폭이 크게 나타났다.

2) 1995년부터 2012년까지의 장기적인 N/P 비율(ratio)의 연 평균 변화를 살펴본 결과, 2009년 이후부터는 T-P 농도의 감소로 인해 N/P 비율이 점점 증가하는 것으로 나타났으며, T-N/T-P 비율이 47.8로 나타나 낙동강 하류지역의 경우는 인이 식물 플랑크톤 성장에 제한인자로 작용하였다.

3) 클로로필-a 농도를 1995년부터 2012년까지의 장기적으로 평가한 결과를 살펴보면 월별 평균농도 변화의 경우는 12월부터 3월까지 80 mg/m^3 이상의 높은 클로로필-a 농도를 나타내었고, 연도별 평균농도 변화에서는 점진적으로 감소하는 추세를 나타내어 2011년도와 2012년도에는 18 mg/m^3 와 34 mg/m^3 의 농도를 나타내었다.

4) 낙동강 하류 물금지역의 Aizaki가 제안한 영양상태 지수 평가에서는 클로로필-a 농도가 연중 10.25 mg/m^3 를 초과하여 부영양(eutrophic) 상태를 유지하는 것으로 나타나 장기적인 수질개선 대책이 필요한 것으로 나타났다.

5) 낙동강 하류 물금지역의 1995년부터 2012년까지의 연 평균 클로로필-a 농도와 다른 수질인자들의 연평균 농도와의 단순 상관분석을 실시한 결과 클로로필-a 농도는 BOD와 상관성($r^2 = 0.82$)이 다른 수질인자들에 비해 높게 나타났고, 다음으로 $\text{NH}_3\text{-N}$ ($r^2 = 0.58$)이 비교적 양호한 상관성을 나타내었으며, $\text{NO}_3\text{-N}$, T-N, T-P 및 N/P ratio의 경우는 낮은 상관성을 나타내었다. 또한, 강우량 및 유량과 클로로필-a 농도와의 상관성은 강우량과 유량 모두 약한 부의 상관관계($r^2 = -0.27$)를 나타내었다.

KSEE

참고문헌

1. Sin, Y., Lee, C., Cho, K. and Song, E., "Trends of phytoplankton community and water quality and implications for management in estuarine river systems," *Kor. J. Limnol.*, **38**(2), 160~180(2005).
2. Sundbaeck, K. B., Joensseon, P., Nilsson, P. and Lindstrom, I., "Impact of accumulating drifting macroalgae on a shallow-water sediment system: an experimental study," *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **58**(3), 261~274(1990).
3. Jonas, R., "Microbial Processes, Organic Matter and Oxygen Demand in the Water Column," *Oxygen Dynamics in the Chesapeake Bay*, Smith, D. E., Leffler, M. and Mackiernan, G. (Eds) Maryland Sea Grant College, College Park, pp. 113~148(1992).
4. Suh, M. Y., Kim, B. H., Bae, K. S. and Han, M. S., "Annual fluctuation (2000~2003) of water quality and cyanobacterial abundance in the lower part of Han River," *Kor. J. Limnol.*, **38**(2), 181~187(2005).
5. Joo, G. J., Kim, H. W., Ha, K. and Kim, J. K., "Long-term trend of the eutrophication of the lower Nakdong River," *Kor. J. Limnol.*, **30**, 472~480(1997).
6. Heck, R. E. and Kilham, P., "Nutrient limitation of phytoplankton in fresh water and marine environments: a view of recent evidence on the effects enrichment," *Limnol. Oceanogr.*, **33**, 796~822(1988).
7. Smith, V. H., "The nitrogen and phosphorus dependence of algal biomass in lake: an empirical and theoretical analysis," *Limnol. Oceanogr.*, **27**, 1101~1112(1982).
8. Aizaki, M., Iwakuma, T. and Takamura, N., "Application of modified Carlson's trophic index to Japanese lakes and relationships to other parameters related to trophic state," *Res. Rep. Natl. Inst. Environ. Stud.*, **23**, 13~31(1981).
9. Yu, S. J., Chae, M. H., Hwang, J. Y., Lee, J. A., Park, J. G. and Choi, T. B., "Analysis of trophic state variation of lake Yongdam in dam construction," *Kor. Soc. Water Environ.*, **21**(4), 360~367(2005).