

태풍에 의한 주암호복교지점의 식물플랑크톤 변화

조기안¹ · 이학영*

전남대학교 생물학과, ¹초당대학교 의약관리학과

Typhoon Induced Changes of the Phytoplankton at Bok-gyo Bridge Area in Juam Lake. Cho, Ki An¹ (0000-0001-5236-8905) and Hak Young Lee* (0000-0001-8561-7568) (Department of Biological Sciences, Chonnam National University, Gwangju, Republic of Korea; ¹Department of Medical Management, Chodang University, Muan, Republic of Korea)

Abstract Phytoplankton community was studied in relation to a typhoon at Bok-gyo Bridge area in Juam Lake, Korea. In August 31, 2000, a typhoon (Prapiroon) was passed by Juam Lake with great power enough to destroy summer stratification of Juam Lake. Destratification resulted in temporal mixing of the whole water column and changed the physical and chemical properties of water bodies, and caused the changes of the biological properties. The transparency decreased from 195 cm before the typhoon to 84 cm after the typhoon with the resuspension of the bottom sediment. In the vertical distribution of the phytoplankton population, the maximum population was measured at depth of 2 m before the typhoon. However, immediately after the typhoon, the population distributed evenly throughout the entire water layers. The carbon biomass of the phytoplankton was also highest at the depth of 2 m before the typhoon, but immediately after the typhoon, it was uniformly distributed throughout the whole water layers. The vertical profiles of the concentrations of chlorophyll *a*, however, did not show a significant difference before and after the typhoon. The typhoon induced destratification and restratification altered the taxa of the phytoplankton. The major dominant phytoplankton taxa before the typhoon was diatoms including *Aulacoseira granulata*, but the green algae overwhelmed the diatoms in cell number and biomass after the typhoon. The chlorophycean dominance was replaced by cyanophycean dominance with the heavy rain and descent of water temperature at the end of September.

Key words: phytoplankton, typhoon, stratification, biomass, Juam lake

서 론

수생태계의 일차생산자인 식물플랑크톤은 수중의 생물 군집뿐만 아니라 수환경에도 큰 영향을 미친다(Lampert and Sommer, 2007). 또한 식물플랑크톤은 수중의 생물군집뿐만 아니라 수체의 물리적, 화학적 요소들의 조건과 구성에 크게 영향을 받는다(Wetzel, 1999; Goldman and Horne,

2008).

광합성을 통해 에너지를 확보하는 식물플랑크톤은 광조건이 충분한 수층에서 영양염류가 충분할 때 가장 활발한 성장을 한다(Graham *et al.*, 2016). 그런데, 식물플랑크톤이 이용하는 광조건인 태양에너지는 수체로 유입될 때 그 에너지의 일부가 물분자와 반응하여 수온을 상승시키는데, 이 과정에서 물의 낮은 열전달 특성으로 인해 표층에서 저층까지 수심에 따른 차별적 온도경사가 조성된다(Reynolds, 1989). 수온이 충분히 높고 수심이 충분히 깊으면 온도경사에 의해 수체는 혼합이 이루어지는 표수층, 수온이 급격

Manuscript received 7 December 2018, revised 30 December 2018, revision accepted 31 December 2018

* Corresponding author: Tel: +82-62-530-3401, Fax: +82-62-530-3409, E-mail: haklee@jnu.ac.kr

© The Korean Society of Limnology. All rights reserved.

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 non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provide the original work is properly cited.

하게 감소하는 수온약층, 밀도가 높은 심수층의 3층으로 층화되는데 이것을 성층이라 한다. 성층은 수온의 차이에 따른 물의 밀도가 대류나 바람에 의한 혼합력을 초과하는 시점에 형성되기 시작하여 단위면적당 빛 에너지의 유입량이 가장 큰 여름철에 특히 안정화된다. 물의 밀도 차이가 심화되면서 강화되는 성층은 수체의 수직혼합을 제한하여 세계의 서로 다른 물리, 화학적 영역으로 수체를 분리하는 안정적인 계층화를 형성한다(Wetzel, 1999; Kalff, 2002).

성층의 지속은 수체내에서 영양염류와 기체의 수직혼합을 저해하여, 생물군의 성장과 활동에 강력한 물리적 장벽이 되는데, 심수층의 생물은 용존산소의 부족에 의한 생육 제한을 받게 되고, 표수층의 생물은 이용가능 영양염류의 공급 제한으로 인한 성장제한을 받게 된다(Lampert and Sommer, 2007). 따라서 여름성층이 흔한 기후대에서는 성층으로 인한 수환경의 교란이 주기적으로 발생하여 생물군집의 조성과 생물량의 크기를 변경시키므로 인위적인 성층파괴를 유도하기도 한다(Reynolds *et al.*, 1984; Wetzel, 1999). 부영양호소인 경우 심수층으로 낙하하는 표수층의 유기물 분해로 산소가 고갈되어 어류가 사멸하는 경우도 흔히 발생한다. 여기에 대응하여 심수층 생물의 일주기적 수직이동도 흔하다(Lampert and Sommer, 2007).

일반적으로 성층에 의해 안정화된 수체는 수온의 하강으로 심수층과 표수층의 수온이 비슷해지면 대류에 의해 섞인다. 그런데 강풍에 의해 전단응력(shear stress)을 초과하는 힘이 수체에 부과되는 경우에도 성층은 파괴될 수 있다(Lewis, 1973; Reynolds, 1989). 우리나라의 각 호소들은 대부분 여름에 성층을 형성하는데, 전단응력을 초과하는 강풍을 동반한 태풍이 내습하면 성층이 파괴되어 일시적인 수직혼합이 일어난다. 오랫동안 지속되었던 성층이 파괴되면서 수체의 수직혼합이 일어나면 심수층으로부터 표수층으로 영양물질이 공급되고, 표수층에서 심수층으로는 산소가 유입되어 수중 생물의 수직분포와 군집구조에 큰 변화가 유발된다. 따라서 성층이 형성되는 호소에서 생물군집의 분석을 위해서는 성층의 비주기적인 파괴가 서식 생물에 미치는 영향을 파악하는 것은 매우 중요하다. 그럼에도 불구하고 태풍 시기의 위험 때문에 태풍을 전후한 시기의 호소 생물에 대한 조사는 거의 없다(Johnson and Laws, 2018).

본 연구에서는 강한 태풍에 의한 성층이 파괴된 주암호에서 물리화학적 요인과 식물플랑크톤 군집의 변화를 관찰하고 그 결과를 보고한다.

연구 방법

본 연구는 섬진강의 지류인 보성강에 조성된 다목적 댐

인 주암호의 복교지점(Fig. 1)에서 2000년 8월 30일부터 9월 29일 사이에 이루어졌다.

강우량을 비롯한 기상자료는 기상청(<http://m.kma.go.kr/m/index.jsp>)의 자료를 이용하였다.

수온은 수질측정기(Hydrolab DS 5X, Campbell Sci.)를 이용하여 현장에서 측정하였고, Secchi Disc (25 cm)를 이용하여 투명도를 측정하였다.

Chl-*a* 농도를 측정하기 위한 시료는 500 mL를 Van-Dorn water sampler로 채집하여 식물플랑크톤의 밀도에 따라 300~500 mL를 0.45 μ m membrane filter로 여과하였다. 여과지는 냉동보관 하였다가 90% Acetone에서 클로로필을 용출시켜 5,000 rpm에서 5분간 원심분리시킨 후 상등액을 큐벳에 넣어 spectrophotometer로 흡광도를 측정한 후 Monochromatic Method (APHA, 1992; Wetzel and Likens, 2000)에 따라 농도를 측정하였다.

식물플랑크톤의 동정과 계수는 200배~1,000배의 현미경(Zeiss, Axiolab)하에서 이루어졌고, 탄소생물량(carbon biomass)은 식물플랑크톤 각 종 고유의 기하학적 형태로부터 체적을 계산한 후 각 분류군의 생물량지수를 토대로 계산하였다(Sournia, 1979; Wetzel and Likens, 2000).

결과 및 고찰

주암호의 복교지점에서 2000년의 성층은 5월초에 형성되기 시작하여 8월말에는 강한 안정성을 유지하고 있었다. 그런데 8월 31일 오전 2000년의 12번째 태풍인 Prapiroon이 주암호 서쪽 50 km를 지나면서 주암호는 태풍의 위험반경에 위치하게 되었고 복교지점의 성층은 파괴되었다. 주암

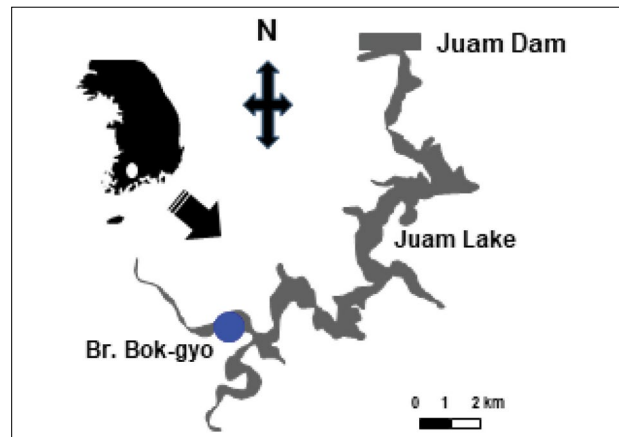


Fig. 1. A map showing the studied Bok-gyo Bridge area.

호의 위도선을 통과할 때 Prapiroon의 위력(965 hPa, 순간풍속 50 m/sec)은 호소의 여름성층을 약화시킬 만큼 충분히 강한 폭풍을 동반하였다(Fig. 2). 강한 바람에 의한 성층의 파괴는 혼한 현상이다(Livingstone, 2003; Locascio and Mann, 2005; Secor *et al.* 2018). 우리나라의 호소보다 강한 여름성층이 형성되는 필리핀의 Lake Lanao에서도 태풍이

성층을 교란하여 수온약층의 수심을 하강시킨 예가 많이 보고되었다(Lewis, 1973; Lagmay *et al.*, 2006; Sheela *et al.*, 2011). 1971년의 한 태풍은 Lake Lanao의 성층수심을 20 m 아래로 하강시켜 표수층의 혼합수심을 크게 증가시켰었다(Lewis, 1973, 1987). 성층의 교란은 수체의 물리, 화학적 성질을 바꾸고 생물상의 변화를 유발시킨다(Tavera and Martinez-Almeida, 2005). 주암호에서도 2000년의 태풍에 의한 일시적인 성층의 교란으로 수직혼합이 이루어졌고, 물의 혼합은 수체의 물리, 화학적 요소들의 수직분포를 변화시켰다(Fig. 3). 태풍이 오기 전 수온의 차이에 의한 밀도차로 뚜렷하게 구분되었던 수층은 태풍이 내습했을 때 수층의 강력한 교란으로 완전혼합이 이루어졌다. 태풍이 지나간 후 48시간이 지난 9월 2일 12시에 측정된 수온의 수직분포에서도 태풍 후의 무더운 날씨로 재성층화가 진행되는 양상을 보였지만 여전히 수직순환이 이루어지고 있었다(Fig. 3). 최저층의 수온 14.6°C와 표층의 수온 21.3°C 사이에는 차이가 있었지만 수체를 안정적으로 층화시키지는 못했다. 태풍 후 70시간이 경과한 9월 3일 12시경의 수온분포에서는 뚜렷한 성층이 관찰되었다. 이 성층은 9월 29일의 조사에서 교란된 것으로 나타났는데, 이는 9월 22일에 내린 182 mm의 강우(Fig. 4)와 기온하강으로 표수층과 심수층의 수온이 비슷해진 것에 기인한 것으로 보인다.

투명도는 태풍 전에는 195 cm였는데 태풍 후 84 cm로 줄었다(Fig. 5). 이것은 강한 바람에 의한 수체의 수직혼합으로 저층의 퇴적물이 부유되면서 투명도를 감소시킨 때문으로 추측된다(Kristensen, 1992). 호소의 투명도는 강우시의 부유물 유입으로 감소하기도 하지만 2000년의 Prapiroon은 비를 거의 동반하지 않았었기 때문에 주암호 복교지점

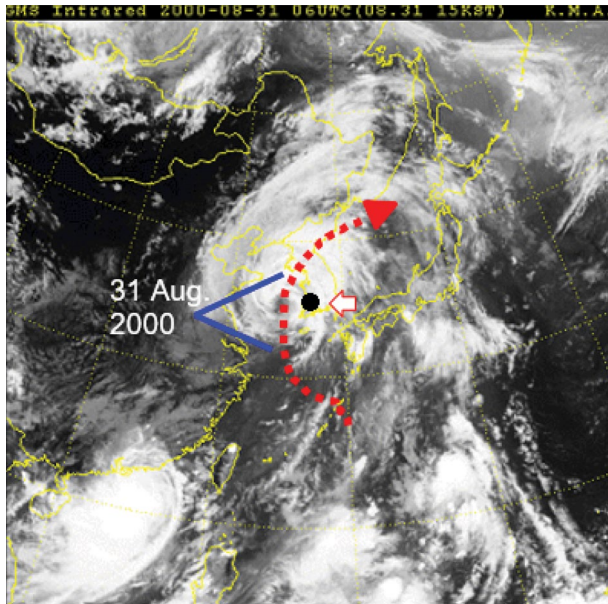


Fig. 2. The satellite images of Typhoon Prapiroon in 31 August, 2000 (from KMA).

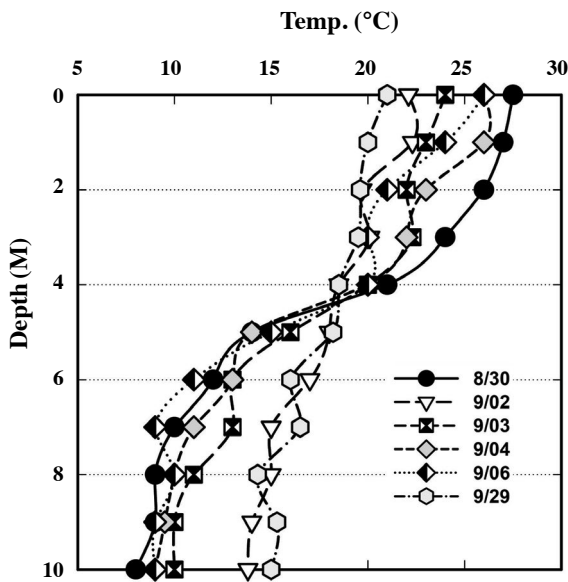


Fig. 3. Vertical profiles of water temperature during the studied period.

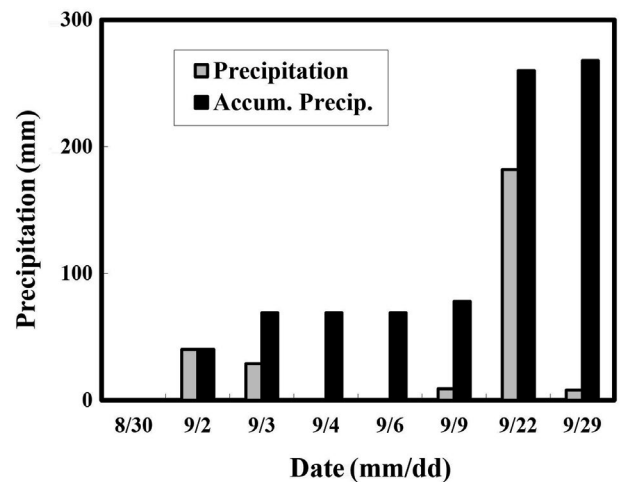


Fig. 4. Daily and accumulated precipitation during the studied period.

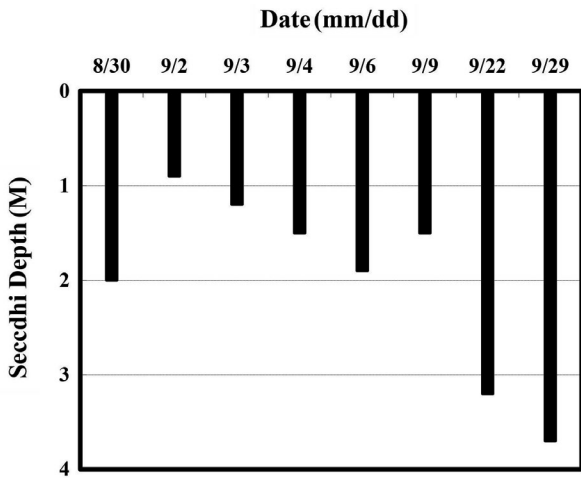


Fig. 5. Secchi depth during the studied period.

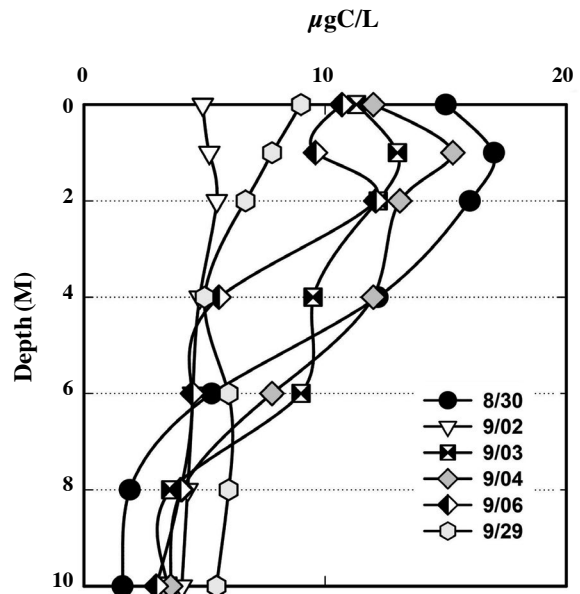


Fig. 7. Vertical profiles of Carbon biomass during the studied period.

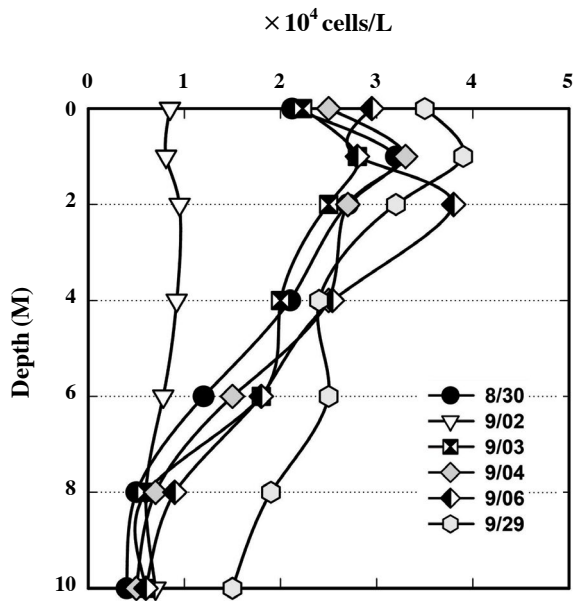


Fig. 6. Variations of cell number of phytoplankton during the studied period.

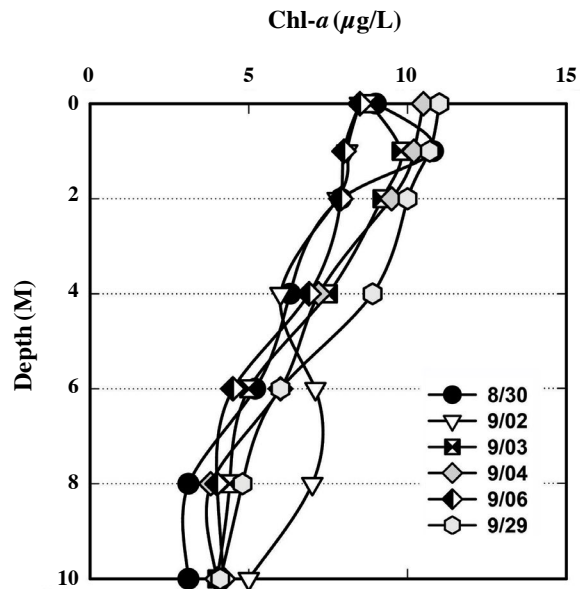


Fig. 8. Vertical profiles of chlorophyll a during the studied period.

의 투명도 감소는 강우요인 때문이 아니었던 것으로 판단된다. 투명도는 수체가 안정되고 부유물이 침전되면서 다시 증가하여 태풍 후 6일째에는 172 cm까지 증가하였다.

태풍 전후로 조사지점의 식물플랑크톤 군집도 변화되었다. 태풍 발생 후 각 식물플랑크톤의 개체수와 탄소생물량이 크게 변화하였다.

식물플랑크톤 개체수의 수직분포에서는 태풍 전에는 수심 2 m에서 최대의 개체수가 조사되었었지만 태풍 48시간 후에는 특정 수심의 peak가 없고 전 수층에 고른 분포를 하

여 수체의 혼합으로 식물플랑크톤이 전 수층에 고르게 분산되어진 것을 확인할 수 있었다(Fig. 6). 그러나 재성층이 이루어진 후 식물플랑크톤 개체수의 수직분포는 다시 표수층 > 수온약층 > 심수층의 분포를 보여주었고 최고의 개체수는 수심 1 m에서 관찰되면서 태풍 전과 유사한 수직분포를 보여주었다.

식물플랑크톤의 탄소생물량은 개체수와 유사한 수직분

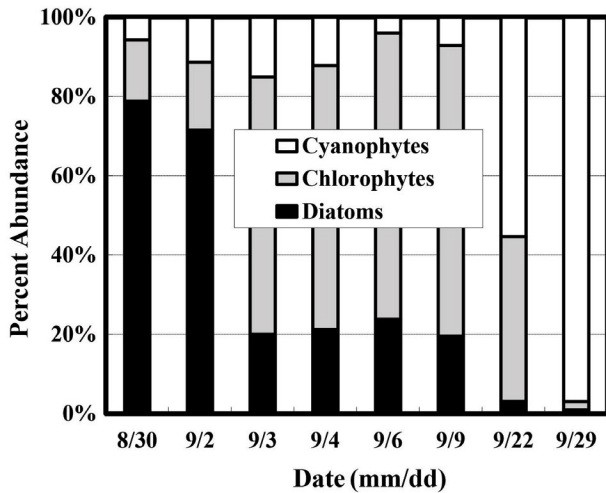


Fig. 9. Relative abundance of each taxonomic group during the studied period.

포를 나타냈으나 남조류 *Microcystis aeruginosa*가 크게 우점했던 9월 29일의 수직분포는 개체수의 곡선과 다르게 나타났다(Fig. 7). 이것은 9월 29일 표층에서 식물플랑크톤 개체수의 대부분을 차지한 *Microcystis aeruginosa*가 체적이 적어 세포당 생물량이 적었기 때문이었다.

클로로필 *a*의 수직분포는 태풍 전후에 큰 차이가 없는 것으로 나타났다(Fig. 8). 전 조사기간 동안 평균 농도에서도 큰 차이가 없었다. 이것은 출현분류군의 차이에 일부 기인한 것으로 추측된다(Takahashi and Hori, 1984; Montagnes, 1994). 즉 클로로필의 용량에 차이가 있는 종들이 수층에 분산되면서 특별한 패턴을 보이지 못한 것으로 보인다. 또 하나의 이유로는 수체의 혼합이 클로로필의 증감에 영향을 미치지 못한 때문으로 보인다. 부영양호수에서는 수체의 혼합이 클로로필의 증감에 영향을 주지 못하는 경우가 있다. Heo and Kim (2004)은 부영양호수에서의 인위적인 성층파괴 실험에서 성층이 파괴되어도 표수층에서 TP의 상승이나 클로로필 *a*의 증가가 일어나지 않았다고 했다. 그렇지만 대부분의 경우 성층의 파괴는 영양염류의 이동과 생물량 변화가 초래된다. Metillo and Garcia-Hansel (2016)은 필리핀의 Lanao에서 성층이 지속되는 중에 수온약층의 이동만으로도 표수층에 영양물질의 공급이 이루어져 비 순환기에도 생물의 성장을 유발한다고 했다. 성층의 파괴로 인한 생물의 성장여부에 관계없이 본 조사에서 나타난 식물플랑크톤의 생물량 지표인 탄소생물량과 클로로필의 수직분포 패턴의 차이는 후속 연구를 통해 밝혀야 할 것으로 보인다.

태풍에 의한 성층과 재성층은 식물플랑크톤의 분류군 조성도 변경시켰다. 태풍 전의 주요 우점 식물플랑크톤은 *Aulacoseira granulata*를 비롯한 규조류였다. 그러나 태풍이

지나간 후 3일 만에 *Scenedesmus quadricauda*, *Eudorina elegans*, *Staurastrum* sp.를 비롯한 녹조류가 세포수와 생물량에서 규조류를 압도하였다(Fig. 9). Steinberg (1983)도 성층의 파괴로 수층에서 물리, 화학적 성질이 바뀌면 종에 따른 유, 불리의 차이에 의한 천이가 유발될 수도 있다고 하였다. 녹조류 우점은 9월 22일의 많은 강우(182 mm)와 수온의 하강으로 성층이 교란되면서 *Microcystis aeruginosa* (3.2×10^5 cells/mL)의 대발생과 함께 남조류 우점으로 대체되었다. 9월말의 남조류 우점은 흔하지는 않지만 종종 관찰된다. Dantas *et al.* (2011)은 브라질의 부영양 저수지에서 성층이 파괴되고 난 후 남조류 대발생이 일어났다고 보고하였다. 그런데 필리핀의 부영양 저수지에서는 성층시기에 남조류가 우점하다가 강우 후 성층이 교란되면서 녹조류, 유글레나조류 등의 우점으로 변경되었다(Hawkins and Griffiths, 1993). 이것은 성층의 교란으로 수체의 성질이 변한 것 외에 저층의 영양물질을 표층으로 공급하는 태풍의 강도, 태풍의 지속시간, 강우의 양, 태풍의 진로, 호소의 지형 등이 복합적으로 작용하기 때문으로 추측된다. 그 밖에 Top-down control과 Bottom-up control도 작용했을 것으로 생각된다. 따라서 더 정확한 요인과 결과를 찾기 위해서는 추가적인 관찰이 필요한 것으로 판단된다.

요 약

주암호의 복교지점에서 2000년의 여름성층은 태풍 Prapiroon에 의해 파괴되었다. 성층의 파괴는 수체의 물리, 화학적 성질을 바꾸고 생물상의 변화를 유발시켰다. 투명도는 태풍 전에는 195 cm였는데 태풍 후 84 cm로 줄었는데, 이는 강한 바람에 의한 수체의 수직혼합으로 저층의 퇴적물이 부유되면서 투명도를 감소시킨 때문으로 추측된다.

식물플랑크톤 개체수의 수직분포에서는 태풍 전에는 수심 2 m에서 최대의 개체수가 조사되었었지만 태풍 직후에는 특정 수심의 peak가 없이 전 수층에 고른 분포를 하다가 재성층이 이루어진 후 다시 표수층 > 수온약층 > 심수층의 분포를 보여주었고 최고의 개체수는 수심 1 m에서 관찰되었다.

식물플랑크톤의 탄소생물량도 수심 2 m 부근에서 가장 많다가 태풍 직후에는 전 수층에 고루 분포하였고, 재성층 후 다시 표층에 가장 높은 생물량을 보여주었다. 클로로필 *a*의 농도는 태풍 전후에 큰 차이가 없는 것으로 나타났다.

태풍에 의한 성층과 재성층은 식물플랑크톤의 분류군 조성도 변경시켰는데, 태풍 전의 주요 우점 식물플랑크톤은 *Aulacoseira granulata*를 비롯한 규조류였으나 태풍이 지나

간 후 녹조류가 세포수와 생물량에서 규조류를 압도하였고, 이후 강우와 수온의 하강으로 성층이 교란되면서 *Microcystis aeruginosa*에 의한 남조류의 절대 우점으로 천이되었다.

REFERENCES

- APHA, AWWA, AEF. 1992. Standard methods for the examination of water and wastewater. 18th ed. APHA. Washington.
- Dantas, W., A.N. Moura, M.C. Bittencourt-Oliveira, J.D.T. Aruda-Neto and A.D.C. Cavalcanti. 2011. Temporal variation of the phytoplankton community at short sampling intervals in the Mundaú reservoir, Northeastern Brazil. *Acta Botanica Brasílica* **22**: 970-982.
- Goldman, C.R. and A.J. Horne. 2008. Limnology. 2nd Ed. McGraw-Hill.
- Graham, L.E., J.M. Graham, L.W. Wilcox and M.E. Cook. 2016. Algae. 3rd Ed. LJLM Press.
- Hawkins, P.R. and D.J. Griffiths. 1993. Artificial destratification of a small tropical reservoir: effects upon the phytoplankton. *Hydrobiologia* **254**: 169-181.
- Heo, W.-M. and B. Kim. 2004. The effect of artificial destratification on phytoplankton in a reservoir. *Hydrobiologia* **524**: 229-239.
- Johnson, T.C. and E.A. Laws. 2018. Impacts of Hurricanes on Wetland Phytoplankton Communities in the Gulf of Mexico. Research & Reviews: *Journal of Ecology and Environmental Sciences* **6**: 37-42.
- Kalff, K. 2002. Limnology. Prentice Hall. New Jersey. 592pp.
- Kristensen, P., M. Søndergaard and E. Jeppesen. 1992. Resuspension in a shallow eutrophic lake. *Hydrobiologia* **228**: 101-109.
- Lagmay, J., C.G. Hansel, P. Escudero, N. Autor, D. Dagot, R.V. Estoista, L. Lopez, D. Mero and S. Nacua. 2006. Hydrobiological assessment of Lake Lanao: subsequent to its unusual greening in 2006. *Mindanao Journal* **29**: 85-100.
- Lampert, W. and U. Sommer. 2007. Limnology. Oxford University Press.
- Lewis, W.M. Jr. 1973. The thermal regime of Lake Lanao (Philippines) and its theoretical implications for tropical lakes. *Limnology and Oceanography* **18**(2): 200-217.
- Lewis, W.M. Jr. 1987. Tropical Limnology. *Annual Review of Ecology and Systematics* **18**: 159-184.
- Livingstone, D.A. 2003. Global climate change strikes a tropical lake. *Science* **301**: 468-469.
- Locascio, J.V. and D.A. Mann DA. 2005. Effects of Hurricane Charley on fish chorusing. *Biology Letters* **1**: 362-365.
- Metillo, E.B. and C.O. Garcia-Hansel. 2016. A Review on the Ecology and Biodiversity of Lake Lanao (Mindanao Is., The Philippines). *IAMURE International Journal of Ecology and Conservation* **18**: 17-66.
- Montagnes, D.J.S., J.A. Berges, P.J. Harrison and F.J.R. Taylor. 1994. Estimating carbon, nitrogen, protein, and chlorophyll a from volume in marine phytoplankton. *Limnology and Oceanography* **39**: 1044-1060.
- Reynolds, C.S. 1989. Physical determinants of seasonal change in the species composition of phytoplankton. In Sommer, U. (ed.) Succession in plankton communities, pp. 9-56. Springer, Berlin.
- Reynolds, C.S., S.W. Wiseman and M.J.O. Clarke. 1984. Growth and loss rate responses of phytoplankton to intermittent artificial mixing and their potential application to the control of planktonic biomass. *Journal of Applied Ecology* **21**: 11-39.
- Secor, D.H., F. Zhang, M.H.P. O'Brien and M. Li. 2018. Ocean destratification and fish evacuation caused by a Mid-Atlantic tropical storm. *ICES Journal of Marine Science, fish* **241**: 1-12.
- Sheela, A.M., J. Letha and S. Joseph. 2011. Environmental status of a tropical lake system. *Environmental Monitoring and Assessment* **180**: 427-449.
- Sournia, A. 1978. Phytoplankton Manual. UNESCO. pp. 337.
- Steinberg, C. 1983. Effects of artificial destratification on the phytoplankton populations in a small lake. *Journal of Plankton Research* **5**: 855-864.
- Takahashi, M. and T. Hori. 1984. Abundance of picophytoplankton in the subsurface chlorophyll maximum layer in subtropical and tropical waters. *Marine Biology* **79**: 177-186.
- Tavera, R. and V. Martinez-Almeida. 2005. Atelomixis as a possible driving force in the phytoplankton composition of Zirahuén, a warm-monomictic tropical lake. *Hydrobiologia* **533**: 199-208.
- Wetzel, R.G. 1999. Limnology: Lake and River Ecosystems. 3rd Ed. Academic Press, San Diego.
- Wetzel, R.G. and G.E. Likens. 2000. Limnological Analyses. Springer. New York. pp. 429.