

소양호에서 동물 플랑크톤의 섭식작용에 관한 연구

심두섭 · 안태석

강원대학교 자연과학대학 환경학과

소양호에서 여름에 출현하는 동물 플랑크톤의 포식 작용을 형광 현미경으로 관찰하였다. 형광 bead 와 형광 염색한 세균을 섭취한 것은 bacterivore 로 보았으며, 장내에서 엽록소의 auto-fluorescence 가 발견되는 것은 algavore 로 보았다. Copepoda의 유충과, *Thermocyclops*, *Pleusoma* 등은 algavore 였으며, *Daphnia*, *Bosmina*, *Keratella*, *Hexathra* 등은 bacterivore 였다. 개체수로는 65.7% 가 algavore 였으며, 34.3%가 bacterivore 였다. Bacterivore 인 동물 플랑크톤은 직경이 $0.5\ \mu\text{m}$ 이상인 입자를 선호 하였으며, 형광 bead 와 형광 염색 세균은 섭취율에 큰 차이가 없었다.

KEY WORDS □ Feeding, grazing, bacterivory, autofluorescence, Lake Soyang.

수환경에서 생물군집 사이에는 다양한 상호작용이 존재하고, 이러한 상호작용 중의 한 가지로 포식작용 (grazing) 이 있다. 동물플랑크톤은 세균을 포식함으로써 직접적으로, 또한 식물 플랑크톤을 포식함으로써 간접적으로 세균의 개체군에 영향을 줄 수 있다 (7).

이러한 포식작용은 두가지 측면에서 생태학적 의미를 갖는다. 그 하나는, 탄소 순환에서 포식작용의 영향이다. 세균은 유기물 농도가 낮은 환경에서 효과적으로 영양염류를 흡수하여 고농도의 유기물을 합성하고, 또한 동물플랑크톤과 원생동물의 먹이로 포식 됨으로써 더 높은 영양단계(trophic level)로 유기물을 이동시킨다 (8). 또 다른 포식작용의 의미는 생태학적 관리기능이다. 초식성 동물플랑크톤 (herbivorous zooplankton)은 호수의 조류 증식에 큰 영향을 미친다. 중영양호와 부영양호에서 관찰되는 청수단계 (clear-water phase)는 초식성 동물플랑크톤에 의한 포식작용의 결과로 보고 있으며 (10), 호수 수질 개선에 이용 가능 할 것으로 보고 있다.

소양호는 현재 부영양화 상태가 많이 진행되어 엽록소 a의 증가와 심층 무산소층의 형성 등이 나타나고 있다 (2). 이러한 부영양화 결과 소양호에서 연간 외부에서 유입되는 유기물량(allochthonous organic materials)과 호수내에서 생성되는 유기물량 (autochthonous organic materials)을 비교하여 본 결과 자가생성 유기물이 전체 유입 또는 생성 유기물량의 84.3%로 호수내의 식물플랑크톤에 의한 유기물 생성이 훨씬 많은 것으로 나타났다 (2). 따라서 소양호 수질악화방지는 자가생성 유기물을 줄이는 방법이 주가 되어야 하며, 그 방법으로는 부영양화의 원인물질인 인(P)을 제어하는 방안과 또 호수내의 관리 방안으로 자가생성 유기물을 억제하는 방안이 있다.

소양호에서는 인산염의 농도가 높은 심층수의 물을 방류할 수가 없어, 인의 농도를 줄일 수 있는 방안은 현재로서는 없으며, 희석에 의한 농도 감소 방법도 발전수로 방류되는 수심에서는 유입수량이 많은 여름의 경우 유입수가 그대로 방류되어 물의 희석율 (flushing rate) 를 높일 수가 없다. 따라서 현재의 소양호 구조로서는 인의 농도를 낮추는 데에는 장기간의 시간을 필요로 하므로, 이 기간에 유기물량의 생성을 억제하는 방안도 병행되어야 한다. 소양호에서 8월 한달 동안의 유기물생산량이 연간생산량의 48.4 %를 차지하므로 (2), 소양호에서 8월 중 유기물생산을 억제하는 것이 연간 유기물 생산의 상당량을 줄이게 된다.

이 연구는 호수내에서 생성되는 유기물이 많고, 특히 계절적인 식물 플랑크톤의 발생 (blooming) 이 일어나는 호수에서 식물플랑크톤의 억제방안으로 포식압 (grazing pressure) 을 이용하는 기본적인 연구로써 동물플랑크톤의 섭식 행태를 알아보았다.

재료 및 방법

FLB 제작

FLB(Fluorescently Labeled Bacteria)는 Sherr *et al.* (17)의 방법에 따라 형광물질인 DTAF (5-[4,6-dichlorotriazin-2-yl]aminofluorescein) 을 이용하여 E.C medium에서 배양한 *Escherichia coli* 을 농축시킨 후 염색하여 사용하였다. *E. coli*를 배양하여 만든 FLB의 농도는 2.1×10^9 cells/ml로써 소양호에서 관찰된 총세균수($0.5 \times 10^6 \times 2.8 \times 10^6$ cells/ml)보다 1,000배~10,000배가량 농축되었다. FLB가 농축되어 덩어리지는 것은 0.02 M tetrasodium pyrophosphate 용액으로 방지하거나 (13), 10-15초 간 soni-

cation 시켰다. FLB는 -20°C 에서 저장하여 보존하였고, 사용시에는 멸균 호수물에 희석하여 최종 농도가 1.0×10^6 cells/ml 가 되도록 하여 사용하였다. 이 FLB 는 형광현미경아래에서 황록색으로 나타났다.

형광 Latex bead

동물 플랑크톤의 크기 선택을 파악하기 위하여 사용한 형광 latex bead (polybead fluorescent microspheres: Polysciences Inc.)는 평균 직경은 0.2, 0.5, 1.0, 2.0 mm 이었고, 최종농도는 1.0×10^6 cells/ml로 맞추어 사용하였다(6, 12). 이 bead 들은 형광 현미경 아래에서 녹색을 띤다.

동물플랑크톤 채집

식물플랑크톤이 많은 시기인 1991년 8월 19일에 소양호의 호수수산 구역에서 Müller gauze No. NXX 18 정량 Net (mesh size = $64 \mu\text{m}$)을 이용하여 수심 0-10 m 사이의 동물 플랑크톤을 수직으로 채집하였다. 채집된 시료는 시험관 (triplicate) 에 넣고 즉시 FLB 또는 형광 bead (평균직경 $0.5 \mu\text{m}$)를 첨가하여 10 분간 배양한 후에 formalin (최종농도 2%) 으로 고정한 후에 형광현미경으로 관찰하였다.

형광 bead와 FLB의 섭취율

실온에서 시료를 채취한 후 현장에서 형광 bead (평균직경 $0.5 \mu\text{m}$)와 FLB 를 각각 준 후 2분 간격으로 시료를 회수하여, formalin (최종농도 2%)으로 고정한 후 형광현미경으로 관찰하였다.

형광 현미경 관찰

Formalin 으로 고정된 시료는 Epifluorescence Microscope (Olympus BH2, Exciter Filter: U, Barrier Filter: L420, Mercury lamp HBO100) 를 사용하여 관찰하였다.

결과 및 고찰

동물플랑크톤의 섭식 행태

동물플랑크톤의 현미경 아래에서의 모습은 Fig. 1의 A-G 에 나타나 있다. Algae feeder 는 장내 (gut) 에서 엽록소의 autofluorescence 인 빨간색으로 확인할 수 있었으며 (Fig. 1A-C), bacteria feeder 는 장내에 bead 또는 FLB 가 채워져 있는 것 (Fig. 1D-G) 으로 확인 할 수 있었다. 동물 플랑크톤은 algae 나 bacteria 중 하나만을 선택하여 섭취하고, 두개를 동시에 섭취하는 것은 확인되지 않았다.

동물 플랑크톤 중 *Thermocyclops*, *Culeurella*, *Pleusoma*, *Trichocerca* 는 전형적인 algae feeder 로 나타나. 장내 (gut) 에 붉은 색의 엽록소가 관찰되었다. *Thermocyclops*에는 장내에 빨간색외에도 노란 색이 나타났다 (Fig. 1A).

엽록소는 형광 현미경 아래에서 그 화학적 구조에 따라 빨간 색 과 노란 색의 autofluorescence 를 나타낸다 (11). 소양호에서 나타나는 *Anabaena*의 형광 현미경에서의 모습과 autofluorescence 는 Fig. 1B 상단에 나타나 있는 것과 같이 빨간 색을 띠고 있고 *Peridinium*의 경우도 Fig. 1C의 오른쪽과 같이 빨간

색을 나타내고 있다.

엽록소의 fluorometry 는 종에 따라 달라지고, excitation 파장에 따라서도 달라지고 있다 (18). 또, 동물 플랑크톤의 장내 pH 조건에 따라서도 형광이 달라 질 수도 있어 장내에 섭취된 엽록소의 근원과 식물 플랑크톤의 종류에 대한 연구는 더 진행되어야 할 사항이다.

Diaphanosoma, *Bosmina*, *Daphnia* 등은 장 (gut) 를 따라 형광 bead 또는 FLB 가 채워져 있음을 확인할 수 있었다 (Fig. 1D, E, F, G). 또 이들은 장내에 엽록소가 발견되지 않아 식물 플랑크톤을 전혀 섭취하지 않는 bacteria feeder로 확인 되었다. 그 외에 *Keratella*, *Hexathra* 도 bacteria feeder로 확인 되었다. Crustacean 에 속하는 *Diaphanosoma*, *Bosmina*, *Daphnia* 등과, Rotifer에 속하는 *Keratella*, *Hexathra*도 bacterivore로 보고되었고 (4, 14, 16), 본 연구에서도 같은 결과를 얻었다.

조사지역에서 동물 플랑크톤의 개체수를 조사한 결과 Copepodids가 27.7%로 가장 많았고, *Daphnia*가 20.4% 그리고 *Thermocyclops*가 16.6%등이었다. 이들을 다시 bacteria feeder와 algae feeder를 분류한 결과 개체수 비율로 보면 algae feeder가 전체 65.7%이고 bacteria feeder가 34.3%로 나타났다. Algae feeder로써 우점종은 Copepodids와 *Thermocyclops*로, 각각 전체 개체수의 27.7%와 16.6% 이었고, bacteria feeder로써 우점종은 *Daphnia*로 전체 개체수의 20.4% 를 차지하고 있었다 (Table 1).

먹이선택 실험

소양호에서 동물플랑크톤의 크기에 따른 섭취율을 10분간 측정한 결과, 직경 $0.2 \mu\text{m}$ 의 bead 는 15 % 개체가 bead 를 섭취하였으나, 그외의 큰 bead ($0.5, 1.0, 2.0 \mu\text{m}$) 는 78% - 87%의 개체가 섭취하였다. *Daphnia ambigua*의 경우 bacteria 종류에 따라 섭취율이 달라지지 않고 피식자의 크기에 의하여 섭취율이 달라진다고 하였으며 (9), 호수의 동물 플랑크톤의 세균 포식은 세균의 크기가 큰 것을 선호한다고 하였다 (3, 15). 소양호에서도 동물 플랑크톤은 $0.5 \mu\text{m}$ 이상의 입자를 선호하는 것으로 나타나. 이러한 경향과 일치하였다.

생물체가 대사할 수 없는 형광 bead(평균직경: $0.5 \mu\text{m}$)와 대사가 가능한 FLB를 포식한 *Daphnia* 개체수의 비율을 비교한 결과 8분 까지는 bead 를 섭취한 것이 약 11 - 17% 더 많았고 10분 후에는 큰 차이가 없었다 (Table 2). 형광현미경 아래에서도 *Bosmina*의 경우 FLB나 형광 bead를 먹은것의 차이가 나지 않았다 (Fig. 1D, F 참조). 즉, 세균 포식 작용에는 FLB 나 형광 bead 가 큰 차이를 나타내지 않았다. Sanders *et al.* (16) 는 직경 $0.57 \mu\text{m}$ 의 bead와 FLB 는 동물 플랑크톤의 세균 포식작용에 큰 차이가 없다고 하였으나, Nygaard *et al.* (13) 은 해양 micorflagellate의 경우 latex bead 보다는 FLB 가 더 좋은 bacterivory 재료라고 하여 본 결과와는 다르게 나타났는데, 이는 포식자의 종류와 서식지에

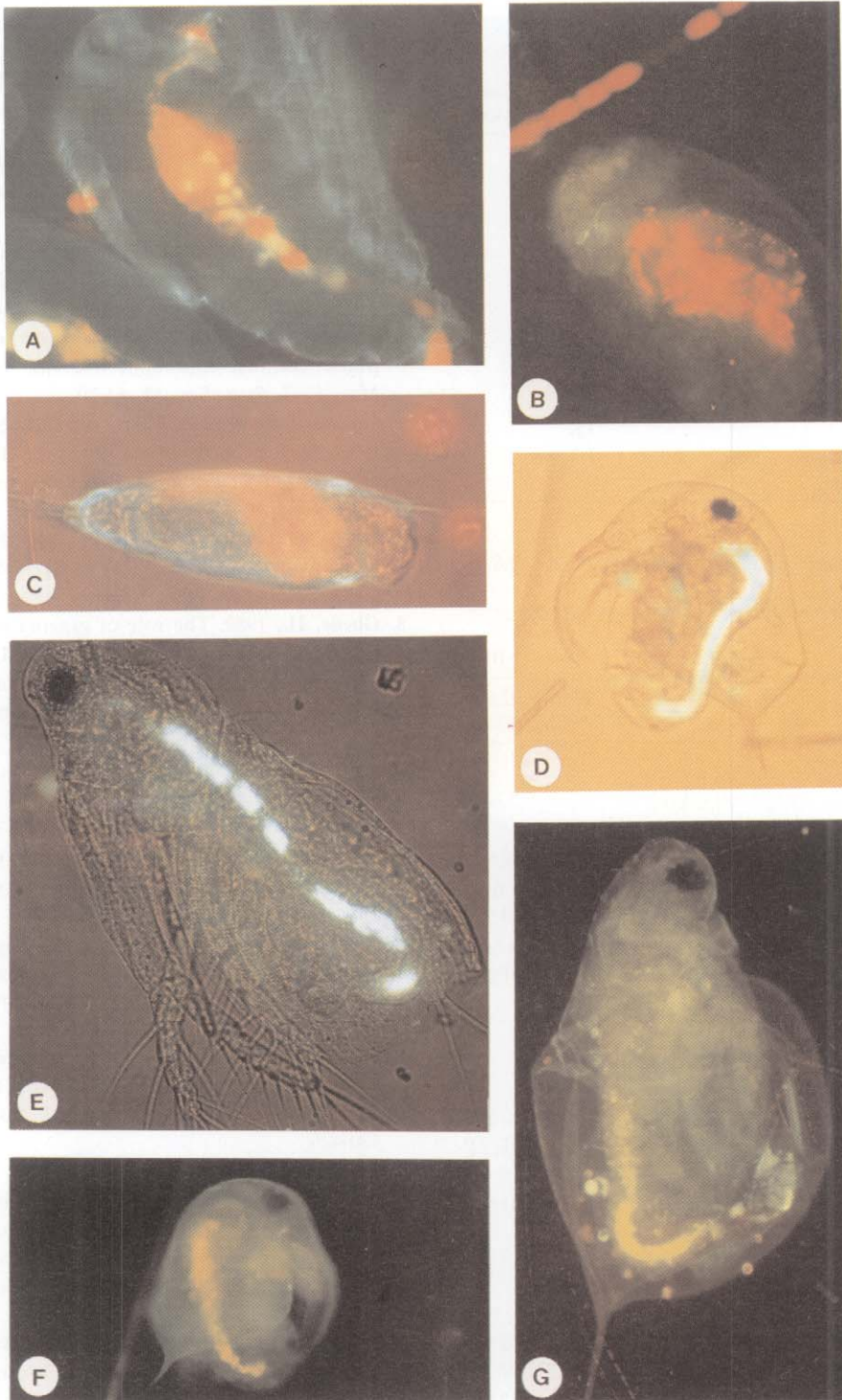


Fig. 1. A-C. Epifluorescence photomicrographs of zooplankton fed on phytoplankton (A. *Thermocyclops* sp., B. *Colurella* sp., C. *Trichocerca* sp.). D-E. Epifluorescence photomicrographs of zooplankton fed on latex bead (D. *Bosmina* sp., E. *Diaphanosoma* sp.). F-G. Epifluorescence photomicrographs of zooplankton fed on FLB (F. *Bosmina* sp., G. *Daphnia* sp.). (magnification; A,B,D,E,F. x 110, C. x 220, G. x 44).

Table 1. The percentage of composition of zooplankton at fishfarm site of Lake Soyang, in 19. Aug. 1991.

Zooplanktons	% of total zooplankton
Algae	65.7
Copepodids	27.7
Thermocyclops	16.6
Copepoda Nauplius	7.6
Ploesoma	6.3
Brachionus	4.2
Polyarthra	2.6
Trichocerca	0.7
Bacterivores	34.3
Daphnia	20.4
Keratella	8.6
Hexathra	3.6
Bosmina	1.2
Diaphanosoma	0.5

Table 2. Short-term uptake of Latex Bead and FLB by *Daphnia*.

Incubation time (min)	2	4	6	8	10
Bead	63±3	90±4	89±4	90±5	92±2
FLB	46±	83±6	76±4	79±6	88±

따라 달라 지는 것으로 사료된다.

그리고 시간에 따른 섭취율을 보면 배양후 4분 까지는 서서히 증가하다가 그 이후 거의 일정한 변화를 보이는 것은 동물플랑크톤의 섭취방식인 filter feeding에 의하여 짧은 시간에 모두 섭취한 것으로 보이며, 대부분의 세균 포식 작용 (bacterivory)은 5-20분의 짧은 시간에 일어 난다는 보고와도 일치하였다 (5).

사 사

이 논문은 한국과학재단 목적기초 연구비 (관리번호 89-07-06-14)의 일부로 수행되었으며, 동물 플랑크톤의 분석을 도와준 강원대학교 생물학과 조 규송 교수님과 한양대학교 생물학과 임병진 군에게 감사드린다.

참 고 문 헌

1. 김범철, 조규송, 허우명, 김동섭, 1989. 소양호 부영양화의 연변화 추이. 한국 육수학회지. **22**, 151-158.
2. 조규송, 김범철, 안태석, 1991. 내수면 양식장이 수질오염에 미치는 영향에 관한 연구 보고서. 한국수자원공사. PP. 174-181.
3. Bjornsen, P.K., J. B. Larsen, O. Geertz-Hansen, and M. Olesen, 1986. A field technique for the determination of zooplankton grazing on natural bacterioplankton. *Freshwater Biol.* **16**, 245-253.
4. Bogdan, K.G., and J.J. Gilbert, 1982. Seasonal patterns of feeding by natural populations of *Keratella*, *Polyarthra*, and *Bosmina*: Clearance rates, selectivities and contributions to community grazing. *Limnol. Oceanogr.* **27**, 918-934.
5. Cynar, F.J., and J.M. Sieburth, 1986. Unambiguous detection and improved quantification of phagotrophy in apochlorotic nanoflagellates using fluorescent microspheres and concomitant phase contrast and epifluorescence microscopy. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **32**, 61-70.
6. Gonzalez, J.M., E. B. Sherr, and B. F. Sherr, 1990. Size-selective grazing on bacteria by natural assemblages of estuarine flagellates and ciliates. *Appl. Environ. Microbiol.* **56**, 583-589.
7. Guede, H., 1988. Direct and indirect influence of crustacean zooplankton on bacterioplankton of Lake Constance. *Hydrobiologia.* **159**, 63-73.
8. Guede, H., 1989. The role of grazing on Bacteria in plankton succession. p.337-364. In U. Sommer (ed.), *Plankton ecology*. Springer-Verlag, Berlin.
9. King, C.H., R.W. Sanders, E.B. Shotts Jr., and K.G. Porter, 1991. Differential survival of bacteria ingested by zooplankton from a stratified eutrophic lake. *Limnol. Oceanogr.* **36**, 829-845.
10. Lampert, W., W. Fleckner, H. Rai, and B. E. Taylor, 1986. Phytoplankton control by grazing zooplankton : A study on the spring clear-water phase. *Limnol. Oceanogr.* **31**, 478-490.
11. Laval-Peuto, L., and F. Rassoulzadegan, 1988. Autofluorescence of marine planktonic Oligotrichina and other ciliates. *Hydrobiologia.* **159**, 99-110.
12. McManus, G.B., and J. A. Fuhrman, 1986. Bacterivory in seawater studied with the use of inert fluorescent particles. *Limnol. Oceanogr.* **31**, 420-426.
13. Nygaard, K., K.Y. Borsheim, and T. F. Thingstad, 1988. Grazing rates on bacteria by marine heterotrophic microflagellates compared to uptake rates of bacterial-sized monodisperse fluorescent Latex beads. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **44**, 159-165.
14. Peterson, B.J., J.E. Hobbie, and J.F. Haney, 1978. *Daphnia* grazing on natural bacteria. *Limnol. Oceanogr.* **23**, 1039-1044.
15. Riemann, B., 1985. Potential importance of fish predation and zooplankton grazing on natural populations of fresh water bacteria. *Appl. Environ. Microbiol.* **50**, 187-193.

16. Sanders, R.W., K.G. Porter, S.J. Bennett, and A.E. DeBiase, 1989. Seasonal patterns of bacterivory by flagellates, ciliates, rotifers, and cladocerans in a freshwater planktonic community. *Limnol. Oceanogr.* **34**, 673-687.
17. Sherr, B.F., E. B. Sherr, and R. D. Fallon, 1987. Use of monodispersed, fluorescently labeled bacteria to estimate *in situ* protozoan bacterivory. *Appl. Environ. Microbiol.* **53**, 958-965.
18. Watras, C.J., and A. L. Baker, 1988. Detection of planktonic cyanobacteria by tandem *in vivo* fluorometry. *Hydrobiologia*, **169**, 77-84.

(Received February 11, 1992)

(Accepted March 3, 1992)

ABSTRACT: On the Feeding Behavior of Zooplankton in Lake Soyang.

Sim, Doo-Suep and Tae-Seok Ahn (Department of Environmental Science, Kangweon National University, Cunccheon 200-701, Korea)

Zooplankton feeding was investigated with epifluorescence microscope in Lake Soyang in August 1991. Zooplankton, which ingested fluorescence bead or fluorescently labeled bacteria (FLB), was regarded as bacterivore. The algavores were easily distinguished with autofluorescence of chlorophyll in gut. Copepoda nauplius and Copepodids, *Thermocyclops* spp, *Pleosoma* spp, *Brachionus* spp were algavores, and *Daphnia* spp, *Bosmina* spp, *Keratella* spp and *Hexathra* spp were identified as bacterivores. The mixovory was not detected. The percentages of algavores and bacterivores in Lake Soyang were 65.7% and 34.3%, respectively. The bacterivorous zooplankton had trend to ingest the beads bigger than 0.5 μ m. Use of 0.5 μ m bead as grazing tracer gave similar estimates of ingestion to FLB.