

仁川 沿岸 미세 생물 먹이망 내에서 浮游 原生動物의 포식율에 관한 연구

崔仲基 · 金時均* · 盧在勳 · 朴慶哲
仁荷大學校 海洋學科

The Study on the Grazing Rate of Protozooplankton in the Microbial Food Web of Incheon Coastal Waters

JOONG KI CHOI, SI KYOON KIM*, JAE HOON NOH AND KYUNG CHUL PARK
Dept. of Oceanography, INHA University, Incheon 402-751, Korea
*Biological Engineering Dept., Seo Kyung Univ., Seung Buk Gu, Seoul, 136-704, Korea

인천 연안 표영생태계의 미세생물 먹이 망에서 부유원생동물의 역할을 파악하기 위하여 미세생물의 현존량과 성장률을 측정하고, 종속영양 편모충류와 섬모충류의 포식능력을 연구하였다. 종속영양 편모충류와 섬모충류의 여과율과 먹이섭취율은 형광표지 박테리아(FLB)를 이용한 방법과 자연해수 시료를 분리 배양하는 방법에 의하여 구하였다.

본 조사시에 인천 연안수역의 박테리아 현존량은 $0.7\sim 1.5 \times 10^6$ cells·ml⁻¹, 종속영양 편모충류의 현존량은 1,680~2,180 cells·ml⁻¹, 독립영양 편모류의 현존량은 1,090~2,180 cells·ml⁻¹, 섬모충류의 현존량은 3,600~5,700 cells·l⁻¹였다. 박테리아의 평균 성장률은 0.039 h⁻¹, 종속영양 편모충류의 평균성장률은 0.032~0.033 h⁻¹, 독립영양 편모류의 평균 성장률은 0.015~0.025 h⁻¹, 섬모충류의 성장률은 0.021 h⁻¹로 전반적으로 느린 편이었다. 종속영양편모충류의 박테리아에 대한 포식률은 평균 0.055 h⁻¹로 높게 나타나고, 섬모충류의 종속영양 편모류에 대한 포식률도 0.057 h⁻¹로 높게 나타났으나 독립영양 편모류에 대한 포식률은 0.019 h⁻¹로 낮게 나타났다. 종속영양 편모충류의 박테리아에 대한 여과율과 섭취율은 각각 3.6~61.8 nl·HFL·h⁻¹, 6~52 BAC·HFL·h⁻¹로 FLB를 이용하였을때 낮게 나타나고 자연 개체군을 이용하였을 때 높게 나타나며 박테리아 군집에 큰 영향을 주었다. 우점 부유섬모충류인 *Tintinnopsis* sp.의 평균 여과율은 3.2~4.6 μl·CIL⁻¹·h⁻¹, 섭취율은 5~6 cells·CIL⁻¹·h⁻¹로 인천연안수역 편모류 현존량의 17~20%를 섭취하는 것으로 나타나고, 간조 시보다 만조 시에 다소 높게 나타났다.

To clarify the role of protozooplankton in the microbial food web of Incheon coastal ecosystem, the grazing capacities and growth rates of heterotrophic flagellates (HFL) and ciliates were investigated. We measured the growth rates of bacteria, HFL, autotrophic flagellates (AFL) and ciliates using reverse flow (RF) filter set and obtained the clearance rates and ingestion rates of HFL and ciliates by fluorescent labelled bacteria (FLB) method and isolation culture method from natural seawater of Incheon coastal area.

The standing crops of bacteria, HFL, AFL and ciliates in this study area were $0.7\sim 1.5 \times 10^6$ cells·ml⁻¹, 1,680~2,180 cells·ml⁻¹, 1,090~2,180 cells·ml, and 3,600~5,700 cells·l⁻¹, respectively. The mean growth rates of bacteria, HFL, AFL and ciliates were 0.039 h⁻¹, 0.032~0.033 h⁻¹, 0.015~0.025 h⁻¹ and 0.021 h⁻¹, respectively. The growth rates of protozooplankton of Incheon coastal waters were relatively low. Mean grazing rate of HFL on bacteria was 0.055 h⁻¹. Mean grazing rates of ciliates on HFL was relatively high of 0.057 h⁻¹, while the grazing rate of ciliates on AFL was low of 0.019 h⁻¹.

The clearance rates and ingestion rates of HFL on bacteria were 3.6~61.8 nl·HFL·h⁻¹ and 6~52 BAC·HFL·h⁻¹ respectively. FLB grazing experiment showed low values, while natural bacteria experiment showed high value meaning high grazing pressure on total bacteria. The clearance rates and ingestion rates of *Tintinnopsis* sp., dominant ciliates in Incheon coastal waters, were 3.2~4.6 μl·CIL⁻¹·h⁻¹ and 5~6 cells·CIL⁻¹·h⁻¹ respectively, showing higher values in the high tide than low tide. The ingestion rates of ciliates implies that *ciliate* took up 17~20% of total nanoflagellates of Incheon coastal waters.

서론

표영 생태계의 에너지 흐름에 있어 식물플랑크톤으로부터 유래된 용존 유기물을 이용하는 박테리아와 원생동물의 관계에 중점을 둔 미세생물 먹이 고리의 개념(Pomeroy, 1974 ; Azam *et al.*, 1983)은 이 먹이고리가 중형 동물플랑크톤의 먹이로 연결되면서 상호간에 복잡한 먹이관계를 이루고 있다는 미세생물 먹이망의 개념으로 발전되었다(Sherr and Sherr, 1988). 이 미세생물 먹이망 내에서 종속영양 편모충류와 섬모충류는 주로 박테리아를 포식하는 것으로 알려져 왔으나 섬모충류는 크기에 따라 박테리아뿐만 아니라 미소형 및 소형 식물플랑크톤까지 포식할 수 있으므로 미세생물 먹이 망에서 중요한 역할을 하는 것으로 보고되고 있다(Rassoulzadegan *et al.*, 1988).

종속영양 편모충류는 극소형의 박테리아를 포식하고, 섬모충류는 미소형 식물플랑크톤을 주로 포식하는 것으로 연구되었으나(Fenchel, 1982 ; Sheldon *et al.*, 1986), 미소형 섬모충류는 높은 박테리아 포식율을 보이고(Sherr and Sherr, 1987a), 소형 섬모충류는 미소형 플랑크톤이나 소형 플랑크톤을 포식하는 것으로 보고되었다(Rassoulzadegan *et al.*, 1988).

섬모충류를 포함한 소형 동물플랑크톤들은 이와 같이 미세생물 먹이고리를 통하여 올라온 에너지를 효과적으로 이용하며 윗단계의 중형 동물플랑크톤의 중요 에너지 공급원이 되고 있다(Stoecker and Capuzzo, 1990). 중형 동물플랑크톤은 극소형 플랑크톤이나 미소형 플랑크톤을 직접 포식하는 것은 효율이 너무 낮아(Nival and Nival, 1976) 주로 소형 동·식물플랑크톤을 이용한다. 따라서 섬모충류는 미세생물 먹이 망의 에너지를 기존의 먹이연쇄로 연결시켜 주는 중요한 역할을 하며, 편모충류는 섬모충류의 먹이로서 또한 박테리아의 포식자로서 중요한 역할을 한다.

미세생물 먹이망내에서 섬모충류와 편모충류의 역할을 정확히 이해하기 위하여는 이들의 성장 관계와 포식율을 파악하는 것이 필요하다. 박테리아에 대한 포식율을 측정하는데 초기에 채택된 방법은 자연해수에서 박테리아의 현존량 변화를 이용하여 측정하는 방법이 있었고(Fuhrman and McManus, 1984; Landry *et al.*, 1984), 방사성 동위원소를 이용한 방법(Lessard and Swift, 1984)과 박테리아 크기의 형광소

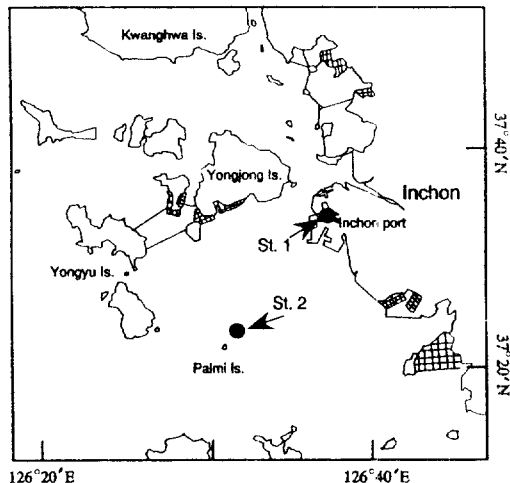


Fig. 1. Map showing sampling stations in this study.

립자를 이용하여 측정하는 방법(Borsheim, 1984)이 개발되었다. 그러나 부유원생동물은 먹이를 선택하는 능력이 있기 때문에 소립자보다는 실제 박테리아를 선호하는 것으로 밝혀지면서, 형광으로 표지된 박테리아(Fluorescently Labeled Bacteria ; FLB)를 이용하는 방법이 개발되었다(Sherr *et al.*, 1987b). 최근에는 이들 FLB를 이용하여 박테리아의 생리조건에 따른 먹이 선호 실험들이 다양하게 시도되고 있다(Gonzalez *et al.*, 1993).

섬모충류의 포식 실험에서는 배양실험을 통하여 먹이량의 변화를 이용하는 방법(Stoecker, 1984)과 먹이의 형광특성을 이용하여 측정하는 방법 등이 이용되고 있다.

본 연구는 인천 연안 미세생물 먹이망에서 종속영양 편모충류와 부유섬모충류의 역할을 이해하기 위하여 박테리아와 편모충류, 섬모충류의 성장률을 측정하고 편모충류와 섬모충류의 포식율을 구하여 미세생물에 미치는 영향을 조사하고자 수행되었다.

재료 및 방법

1) 조사수역 및 실험기간: 부유원생동물의 먹이·포식 실험을 위하여 북위 37° 20' ~ 37° 30', 동경 126° 30' ~ 126° 45' 에 위치한(Fig. 1) 인천연안의 연안부두(정점 1)와 담수 및 오패수의 영향을 적게 받는 팔미도 부근(정점 2) 수역에서 1993년 8월부터 1994년 1월까지 4회에 걸쳐 10~20 l씩 표층수를 채수하여

Table 1. The distribution of bacterioplankton and protozooplankton in this study area.

Month	Water temp. (°C)	Salinity (‰)	Plankton	Abundance (cells · ml ⁻¹)	Station
93.8	25.0	26.0	BAC	0.9 × 10 ⁶	St. 2
			AFL	1,240	
			HFL	1,680	
			CIL	5.7	
93.10	20.0	29.4	BAC	1.5 × 10 ⁶	St. 1
			AFL	2,180	
			HFL	2,080	
			CIL	3.6	
93.12	12.0		BAC	1.2 × 10 ⁶	St. 1
			AFL	1,090	
			HFL	1,490	
94.1	5.2	30.1	BAC	1.7 × 10 ⁶	St. 1
			AFL	1,240	
			HFL	2,200	
			CIL	4.8	

BAC: Bacteria, AFL: Autotrophic flagellates, HFL: Heterotrophic flagellates, CIL: Ciliates

박테리아, 편모충류, 섬모충류의 현존량을 조사하고 먹이 배양을 통하여 포식실험을 수행하였다.

2) 박테리아 현존량은 0.22 μm로 여과한 중성 포르말린으로 0.2%되게 고정하여 DAPI(Porter and Feig, 1980)로 염색한 후 0.2 μm 뉴클리어포어 검은 여과지로 여과하여 형광현미경(Nkon Type 104)하에서 계수 하였다. 편모충류는 글루타르알데하이드로 1%되게 고정한 후 DAPI 또는 Proflavin(Haas, 1982)으로 염색 후 형광현미경 하에서 계수 하였다. 섬모충류는 루골액으로 1%되게 고정한 후 광학현미경 하에서 계수 하였다.

3) 미세생물의 배양: 미세 생물의 성장률을 측정하기 위하여 크기별로 분리 여과할 수 있는 역흐름 여과기(Reverse flow filter set: Sheldon and Rasoulzadegan, 1987)를 제작하여 1 μm 뉴클리어포어와 20 μm, 50 μm, 100 μm의 나일론 여과 천을 이용하여 자연 해수를 여과하여 실험실에서 배양하였다. 각각의 시료는 18시간 경과 후 3시간 간격으로 3번 채수하여 현미경하에서 검정하였다. 이때 배양은 대기의 온도 변화를 줄이기 위하여 증탕법을 사용하였다. 박테리아의 분리 여과를 위하여는 역흐름여과기를 이용하여 뉴클리어포어 여과지 0.5 μm와 1 μm를 사용 여과하여 20°C에서 7일간 배양하였다. 각각의 시료는 24시간 간격으로 채수하여 현미경 하에서 검정하였다.

4) 박테리아에 대한 종속영양 편모충류의 포식율을 측정하기 위하여 Sherr 등(1987b)에 의해 개발된

형광표지 박테리아(FLB) 방법을 이용하였다. FLB는 해수 10 l를 GF/C여과지로 여과한 후 0.2 μm의 뉴클리어포어 여과지로 재 여과하여 박테리아 농도가 1~2 × 10⁸ cells · ml⁻¹ 되게 농축한 후 중성해수 10 ml에 부유시킨 다음 DTAF(S-[4,6-dichlorotriazin-2-Yl] amino fluorescein) 2 mg을 첨가하여 만들었다.

5) 종속영양 편모충류의 여과율과 섭취율을 측정하기 위하여 역흐름 여과기를 이용하여 3~10 μm 크기의 종속 영양 편모충류를 분리하여 20°C에서 배양하였다. 먹이로는 자연해수의 박테리아를 GF/C 여과지와 0.2 μm 뉴클리어포어 여과지로 농축하여 제공하였다. 자연해수에서의 종속영양 편모충류의 여과율과 섭취율은 종속영양 편모충류와 박테리아의 현존량 변화를 계수한 후 Frost(1972) 방법에 따라 구하였다.

6) 섬모충류의 포식실험을 위한 먹이는 채수한 자연해수를 역흐름 여과기를 이용하여 20 μm와 10 μm공극의 뉴클리어포어 여과지로 여과하여 포식자를 제거하고, 3 μm 공극의 여과지로 박테리아를 제거한 후 농축하여 사용하였다. 포식자인 섬모충류는 56 μm 망목의 키타하라형 플랑크톤 네트로 채집한 후 가장 우점종인 *Tintinnopsis* sp.를 100개체 이상 분리하여 배양하였다. 포식실험도 20 ml 유리병에 0.22 μm 공극의 여과지로 여과한 해수로 세척한 *Tintinnopsis* sp. 30~53 개체와 여과해수 5~6 ml⁻¹를 넣고 자연해수 농도와 유사한 먹이를 넣고 실험 병의 부유물질의 농도를 구분하여 실험하였다. 동일한 크

기의 대조 실험 병에는 동일한 먹이를 넣어 대조 실험하였다.

7) 포식율, 성장률, 여과율, 섭취율의 계산은 Frost (1972)의 계산식에 따라 구하였다.

결과 및 고찰

1. 미세생물의 현존량

조사수역의 박테리아 현존량은 $0.7 \times 10^6 \sim 1.5 \times 10^6$ cells·ml⁻¹ 분포로 평균 1.1×10^6 cells·ml⁻¹의 현존량이 출현하였다(Table 1). 이 결과는 연안수역에 출현하는 박테리아 현존량의 일반적인 분포 범위에 속하나 다소 낮은 편이다(Ducklow, 1982; Cho and Azam, 1990). 그러나 본 조사시 현존량은 1992년 인천연안에서 계절별로 조사된 박테리아 평균 현존량 0.5×10^6 cells·ml⁻¹(Lee, 1993)보다는 두 배의 높은 농도이다. 많은 연구에서 박테리아 현존량 변화는 종속영양 편모충류에 직접적인 영향을 받는 것으로 보고되고 있다(Fenchel, 1982; Sherr *et al.*, 1983; Andersen and Fenchel, 1985).

본 조사시 종속영양 편모충류의 현존량은 1,680~2,200 cells·ml⁻¹의 분포로, 1992년 인천연안에서 출현한 1,000~17,000 cells·ml⁻¹ 분포보다 적은 현존량을 보였다. 이 결과로 볼 때 1992년에 비해 본 조사시 박테리아 현존량이 크게 증가된 것은 주포식자인 종속영양 편모류가 소량 출현하였기 때문인 것으로 사료된다. 본 조사시 출현한 종속영양 편모충류는 5~8 μm 크기의 미소형으로 극소형 박테리아를 주로 포식한 것으로 보인다. 이와 같은 경향은 계절별 분포에서도 94년 1월에 종속영양 편모충류의 증가에 따라 박테리아의 농도가 크게 감소된 것으로 알 수 있다.

독립영양 편모류는 1,090~2,180 cells·ml⁻¹ 분포로 종속영양 편모충류의 분포보다도 적은 현존량을 보였다. 독립영양 편모류는 4~7 μm 크기의 미소형 편모류가 주로 우점하였다.

본 조사시에 출현한 섬모충류는 3,600~5,700 cells·l⁻¹의 분포로 *Tintinnopsis* 종류가 우점하였다. 이는 1992년에 출현한 섬모충 평균 현존량 5,300 cells·l⁻¹(Lee, 1993)보다 다소 감소된 상태이다.

2. 미세생물의 성장률과 포식률

박테리아의 성장률은 0.020~0.059 h⁻¹의 범위로 평균 0.039 h⁻¹를 보여(Table 2) 여러 해역에서 측정된

Table 2. The growth rates of bacterioplankton and protozooplankton in this study area. (/h)

Date	BAC	HPF	HNF	APF	ANF	CIL
93. 8.19	0.041	0.021	0.033	0.025	0.015	0.021
93.10.30	0.020	0.027	0.025			
93.12.10	0.059	0.058	0.050			
94. 1.25	0.034	0.021	0.022			
Mean	0.039	0.032	0.033	0.025	0.015	0.021
±SD	0.016	0.018	0.013	(0.006)	(0.005)	(0.07)

BAC: Bacteria, HPF: Heterotrophic picoflagellates, HNF: Heterotrophic nanoflagellates, APF: Autotrophic picoflagellates, ANF: Autotrophic nanoflagellates, CIL: Ciliates, () : ± SD in August

박테리아 성장률 0.021~0.208 h⁻¹범위에 속하였으나 다소 낮은 성장률을 보이고 있다(Andersen and Fenchel, 1985; Sheldon and Rassoulzadegan, 1987). 또한 조사시기에 따라 큰 변화를 보여 추계 조사시에 가장 낮게 나타나고 12월에 높은 성장률을 보여 겨울철에 낮은 성장율을 보이는 일반적인 양상과는 크게 다르게 나타났다. 종속영양 편모충류의 성장률은 극소형(HPF)이 0.022~0.050 h⁻¹범위로 평균 0.032 h⁻¹의 성장률을 보였고, 미소형(HNF)이 0.022~0.050 h⁻¹ 분포로 평균 0.033 h⁻¹의 성장률을 보여 21~22 시간에 한번씩 분열하여 박테리아의 평균 분열속도보다 다소 느렸다. 이러한 성장률도 여러수역에서 측정된 종속영양 편모충류의 성장률 0.046~0.098 h⁻¹보다 낮은 성장률이다(Banse, 1982; Sherr *et al.*, 1986; Andersen and Fenchel, 1985; Lochte and Turley, 1988; Marra *et al.*, 1988; Kim, 1992).

종속영양 편모충류의 경우 동계인 12월과 94년 1월에 각각 최대 성장률과 최소 성장률을 보여 수온 조건외에 다른 요인이 성장에 영향을 미친 것으로 보인다. 독립영양 편모류의 성장률은 8월에 한번 측정되었으나 극미소형(APF)에서 0.025 h⁻¹, 미소형(ANF)에서 0.015 h⁻¹의 성장률을 보여 종속영양 편모충류보다도 낮은 성장률을 보였다.

섬모충류의 성장률은 전체 미세 생물 종류중 가장 느린 0.021 h⁻¹로 33시간에 한 번씩 분열하였다. 이 측정이 한 계절에만 측정하였기 때문에 계절에 따른 성장률의 일반적인 범위를 파악하기는 어려우나 tintinnids 종류의 일반적인 성장률 0.017~0.087 h⁻¹ 범위에 속하였다(Banse, 1982; Heinbokel, 1978, 1987; Stoecker *et al.*, 1983). 그러나 이 수역의 섬모충류가 다른 수역에 비해 다소 느린 성장을 하는 것으로 보

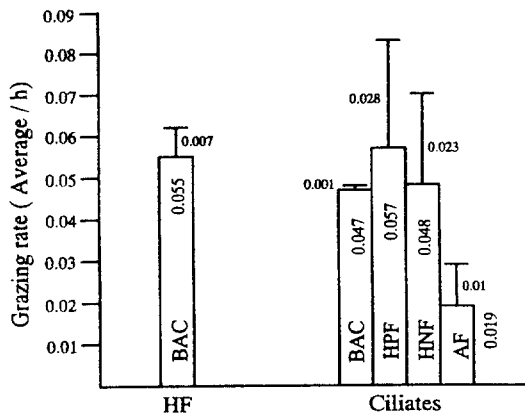
이다(Heinbokel, 1978; Stoecker *et al.*, 1983).

이와 같이 본 조사수역의 박테리아, 편모충류, 섬모충류의 성장률이 전반적으로 낮은 것은 이 수역의 큰 조석변화에 따른 극심한 물리적 환경변화에 기인되거나 높은 탁도에 의한 영향이 연관될 것으로 사료되나 이에 대한 조사는 보다 정밀하게 이루어져야 할 것으로 본다.

중속영양 편모충류의 박테리아에 대한 시간당 포식율은 Fig. 2와 같이 평균 0.055 ± 0.007 로 다소 높은 포식율을 보였다(Andersen and Sorensen, 1986). 이는

중속영양 편모충류의 현존량이 증가할 때 박테리아의 현존량이 먹이로서 충분하지 못할 가능성이 있음을 보여주는 것이다.

섬모충류의 박테리아에 대한 포식율은 평균 0.047 ± 0.001 로 중속영양 편모충류의 포식율보다 다소 낮게 나타나 인천연안의 박테리아에 대한 주포식자는 중속영양 편모충류인 것으로 보인다. 섬모충류의 중속영양 편모충류에 대한 시간당 포식율은 극소형 편모충류에 대해 0.057 ± 0.028 로 높게 나타났다. 미소형 편모충류에 대한 포식율은 0.048 ± 0.023 으로 다소 높게 나타났으나, 독립영양 편모류에 대한 포식율은 0.019로 낮게 나타나 섬모충류가 독립영양 편모류나 박테리아보다 중속영양 편모충류를 선호하는 것으로 보인다.



HF : Heterotrophic flagellates
 BAC : Bacteria AF : Autotrophic flagellates
 HPF : Heterotrophic picoflagellates
 HNF : Heterotrophic nanoflagellates

Fig. 2. The average grazing rates of protozooplankton in August and October, 1993.

3. 중속영양 편모충류의 여과율(Clearance rate) 및 섭취율(Ingestion rate)

1993년 8월과 12월에 역흐름 여과기를 이용하여

Table 3. The clearance rates and ingestion rates of heterotrophic flagellates.

	Bacteria conc.	FLB conc.	HFL	C.R	I.R
1993. 8	1.53		1,680	33.4 ± 7.2	52 ± 11
1993.12	0.52		2,000	61.8 ± 12.6	33 ± 6
Lab.		1.58	61,400	3.6 ± 11	6 ± 2

Bacteria, FLB conc : $\times 10^6$ cells · ml⁻¹; HFL: x cells · ml⁻¹; C.R: Clearance rate (nl HFL⁻¹ · h⁻¹); I.R: Ingestion rate (BAC · HFL⁻¹ · h⁻¹)

Table 4. Comparison of clearance rates of bacterivory for heterotrophic flagellates using various methods

Method	Protozoan	Clearance rates (nl · HFL ⁻¹ · h ⁻¹)	Ingestion rates (Bac · HFL ⁻¹ · h ⁻¹)	Source
Disappearance of cultured bacterial	Monospecific flagellate culture	1.4~79	27~254	Fenchel, 1982
Disappearance of cultured bacteria	Monospecific flagellate culture	15~17	57	Andersen & Fenchel, 1985
Disappearance of cultured bacteria	<i>Monas</i> sp.	0.2~0.95	10~75	Sherr <i>et al.</i> , 1983
FDDC Method	Monospecific	17~336	0~300	Davis & Sieburth, 1984
Uptake of inhibition	Natural assemblage	0.6~1.9	2~25	McManus & Fuhrman, 1986
Selective inhibition	Natural assemblage	2~10	20~80	Sherr <i>et al.</i> , 1986
FLB	Mixed culture	3.2		Sherr <i>et al.</i> , 1987b
AODC	Clonal culture	4.6~11	11~26	Caron <i>et al.</i> , 1991

Table 5. The clearance rates and ingestion rates of *Tintinnopsis* sp. in this study area (M±SD).

Tide	Prey	Average cont. (cells·ml ⁻¹)	Clearance rate (μl·CIL ⁻¹ ·h ⁻¹)	Ingestion rate (cells·CIL ⁻¹ ·h ⁻¹)	SS (mg l ⁻¹)
High tide	HFL	530	6.6±2.8		
	AFL	490	4.4±0.3		
	Cyano.	150	2.3±0.9		
	Total	1,170	4.6±0.6	6±1	20±5
Low tide	HFL	220	5.8±0.7		
	AFL	980	2.8±0.4		
	Cyano.	380	2.2±0.5		
	Total	1,580	3.2±0.3	5±1	50±12
High tide	Diatom	130	2.3		

측정한 자연해수에서의 종속영양 편모충류의 여과율은 Table 3에서 보는 바와 같이 각각 33.4 nL·HFL⁻¹·h⁻¹과 61.8 nL·HFL⁻¹·h⁻¹로 비교적 높게 나타났다. 이는 Fenchel(1982)이 자연해수를 이용하여 측정한 1.4~79 nL·HFL⁻¹·h⁻¹ 범위, Davis and Sieburth(1984)의 자연해수를 이용한 단종 배양방법에서 측정된 17~336 nL·HFL⁻¹·h⁻¹의 범위에는 들어가나 Sherr 등(1986)의 selective inhibition method를 이용하여 측정한 2~10 nL·HFL⁻¹·h⁻¹ 범위나, Sherr 등(1987b)의 박테리아 형광표지(FLB)를 이용한 포식 실험에서 측정된 3.2 nL·HFL⁻¹·h⁻¹, Caron 등(1991)의 4.6~11 nL·HFL⁻¹·h⁻¹보다는 높게 나타났다(Table 4). 이와 같이 자연해수의 개체군 변동을 이용하는 방법은 포식자들의 먹이 이용을 직접 측정하는 방법이 아니고, 먹이 개체군수의 감소를 이용하여 간접적으로 측정하기 때문에 대부분 먹이의 자연 감소 요인이 작용하므로 높게 나타나고 있다. 반면에 FLB를 이용하는 방법은 직접 먹이의 포식상태를 측정하기 때문에 비교적 정확하나 극소형 박테리아나 미소형 편모류가 형광현미경 관찰 시에 일부 누락되어 다소 낮게 나타난다(Sherr et al., 1987b).

본 조사에서도 Table 3에서 보는 바와 같이 FLB를 이용한 먹이 실험에서 여과율이 3.6 nL·HFL⁻¹·h⁻¹로 자연해수에서 측정한 여과율의 10분의 1에 가까이 낮게 나타났다. 이와 같이 자연해수를 이용한 여과율 측정방법은 다소 높은 편이고, FLB를 이용한 측정방법은 다소 낮은 편이어서 최근에 이를 보완하는 소화효소를 이용하는 방법이 개발되고 있다(Sherr and Sherr., 1995).

본 조사수역에서 측정된 종속영양 편모충류의 먹이 섭취율(ingestion rate)은 FLB를 이용하여 측정하였을 때는 6 BAC HFL⁻¹·h⁻¹로 낮았으나, 자연개체

군 감소를 이용하여 측정하였을 때는 33~52 BAC HFL⁻¹·h⁻¹로 비교적 높은 섭취율을 보였다(Table 3). 이 값은 Andersen and Fenchel(1985)의 57 BAC HFL⁻¹·h⁻¹과 Sherr 등(1983)의 10~75 BAC·HFL⁻¹·h⁻¹ 범주에 들어가나 Davis and Sieburth(1984)의 80~125 BAC HFL⁻¹·h⁻¹보다는 낮은 값을 보였다(Table 3). FLB를 이용한 먹이 섭취율은 낮은 편이나 McManus and Fuhrman(1986)의 2~25 BAC HFL⁻¹·h⁻¹ 범주에 들어간다. 이와 같이 FLB를 이용하였을 때 섭취율이 낮은 값을 보이는 것은 FLB를 이용하여 측정할 때 여과율이 낮게 측정되기 때문이다.

4. 부유섬모충류의 여과율과 섭취율

인천연안의 부유섬모충류의 먹이 여과율과 섭취율을 파악하기 위하여 우점그룹인 *Tintinnopsis* sp.를 배양하여 먹이 조성별 구분 실험과 조성 변화에 따른 포식 실험을 수행하였다(Table 5). Table 5에서 보는 바와 같이 인천연안의 부유섬모충 중 우점종인 *Tintinnopsis* sp.는 평균 3.2~4.6 μl·CIL⁻¹·h⁻¹ 범위의 여과율을 보였다. 이는 미국 동부 연안의 부유섬모충류의 여과율 3.1~4.3 μl·CIL⁻¹·h⁻¹ (Stoecker et al., 1988)과 유사한 결과이고, River 등(1985)의 부유섬모충류 여과율 0.6~70 μl·CIL⁻¹·h⁻¹의 폭넓은 범위에 속한다.

먹이 조성별로 보면 종속영양 편모충류에 대하여 5.8~6.6 μl·CIL⁻¹·h⁻¹ 범위의 여과율로 *Tintinnopsis* sp.가 가장 선호하고 있으며, 독립영양 편모류에 대하여는 2.8~4.4 μl·CIL⁻¹·h⁻¹의 여과율을 보여 종속영양 편모충류보다는 다소 낮은 선호도를 보였다. 부유 남조류에 대하여는 2.2~2.3 μl·CIL⁻¹·h⁻¹의 낮은 여과율을 보여 *Tintinnopsis* sp.가 비교적 선호하지 않는 것으로 나타났다. 이는 남조류가 극소형에 가까

운 크기이기 때문에 소형의 부유섬모충류의 먹이로는 미소형의 편모류에 비해 에너지 섭취 효율이 떨어짐을 의미한다. 유사한 크기의 편모류에서도 종속영양 편모충류와 독립영양 편모류의 여과율이 다소 차이를 보였다. 이는 종속영양 편모충류가 독립영양 편모류보다 에너지 섭취 효율에서 유리함을 의미한다. 이들 외에 만조시 행한 돌말류에 대한 한번의 먹이실험에서도 돌말류에 대한 여과율은 $2.3 \mu\text{l} \cdot \text{CIL}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 로 측정되어, 측정 자료는 부족하나, 돌말류에 대해서도 비교적 선호도가 낮은 경향을 보였다.

인천연안의 조석변화가 크기 때문에 조석변화에 따른 여과율의 변화를 보기 위하여 만조 시와 간조 시에 채수된 시료를 구분하여 여과율을 측정하였다. 만조 시에는 *Tintinnopsis* sp.의 여과율이 $4.6 \mu\text{l} \cdot \text{CIL}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 로, 간조 시의 여과율 $3.2 \mu\text{l} \cdot \text{CIL}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 보다 다소 높게 나타났다. 이는 만조 시에 부유입자(SS)의 농도가 다소 낮고, 간조 시에는 부유입자의 농도가 증가된 결과로 사료된다. 본 조사시에서 간조 시에 채수한 시료의 부유입자를 침전시킨 후 측정된 여과율은 $3.0 \mu\text{l} \cdot \text{CIL}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 에서 $3.4 \mu\text{l} \cdot \text{CIL}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 로 다소 증가되는 경향이였다.

이는 동물플랑크톤의 여과율이 부유입자의 농도가 증가됨에 따라 감소되는 일반적인 경향(Mullin, 1963)인 것과 유사한 결과로 부유입자의 농도가 부유 섬모충류의 여과율에 영향을 미치는 것으로 보인다. 그러나 조석간만의 차이에 따른 여과율의 변화나 농도에 따른 여과율의 변화와는 달리 *Tintinnopsis* sp.의 개체당 섭취율은 시간당 5~6개체로 만조와 간조 시에 큰 차이를 보이지 않았다. 이는 동일한 부유 섬모충류의 경우 단위시간 동안에 섭취하는 에너지의 양은 일정함을 의미한다.

결 론

인천 연안 수역에서 1993년 8월~1994년 1월 사이에 출현한 미세생물의 현존량은 박테리아 $0.7\sim 1.5 \times 10^6 \text{ cells} \cdot \text{ml}^{-1}$, 종속영양 편모충류 $1,680\sim 2,200 \text{ cells} \cdot \text{ml}^{-1}$, 독립영양 편모류 $1,090\sim 2,180 \text{ cells} \cdot \text{ml}^{-1}$, 섬모충류 $3,600\sim 5,700 \text{ cells} \cdot \text{l}^{-1}$ 의 분포였다. 이들 미세생물의 평균 성장률은 박테리아 0.039 h^{-1} , 종속영양 편모충류 $0.032\sim 0.033 \text{ h}^{-1}$, 독립영양 편모류 $0.051\sim 0.025 \text{ h}^{-1}$, 섬모충류 0.021 h^{-1} 로 섬모충류가 가장 느리고 박테리아가 가장 빠른 편이나 전반적으로 다른 수역

에 비해 인천 연안 수역의 미세생물들은 성장이 다소 느린 것으로 보인다. 종속영양 편모충류의 박테리아에 대한 포식율은 평균 0.055 h^{-1} 로 다소 높게 나타났다. 섬모충류의 종속영양 편모충류에 대한 포식율도 $0.048\sim 0.057 \text{ h}^{-1}$ 로 다소 높게 나타났다. 그러나 독립영양 편모류에 대한 섬모충류의 포식율은 0.019 h^{-1} 로 낮게 나타나 부유섬모충류가 독립영양 편모류나 박테리아보다 종속영양 편모류를 선호하는 것으로 보인다. 종속영양 편모충류의 박테리아에 대한 여과율은 측정방법에 따라 $3.6\sim 61.8 \text{ nl HFL}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 의 폭넓은 여과범위를 보이고, 섭취율도 측정방법에 따라 $6\sim 52 \text{ BAC HFL}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 의 큰 변화 폭을 보였다. 본 조사수역의 종속영양 편모류의 평균농도를 $1,860 \text{ cells} \cdot \text{ml}^{-1}$ 라면 하루에 종속영양 편모류의 먹이로서 필요한 박테리아는 $0.3\sim 2.3 \times 10^6 \text{ cells} \cdot \text{ml}^{-1}$ 이다. 그러나 인천연안 수역의 박테리아 현존량은 $1.5 \times 10^6 \text{ cells} \cdot \text{ml}^{-1}$ 이하로 종속영양 편모충류의 섭취율은 본 조사시 측정된 최대 섭취율보다는 다소 낮은 섭취율을 보일 것으로 예상된다.

인천 연안 수역의 우점 부유섬모충류인 *Tintinnopsis* sp.의 평균 여과율은 $3.2\sim 4.6 \mu\text{l} \cdot \text{CIL}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 로 본 조사시 부유 섬모충류가 이와 유사한 여과율을 보였다면 부유 섬모충류는 인천 연안 해수의 1.5~2.2% 정도를 여과한 것으로 추정된다.

Tintinnopsis sp.는 시간당 5~6개체의 먹이를 섭취해 하루에 편모충류를 비롯한 미소플랑크톤 $560\sim 680 \text{ cells/ml}$ 를 섭취한다. 이 정도의 섭취량은 전체 편모류 현존량의 17~20%로 편모류 현존량 유지에 큰 영향은 미치지 않는 것으로 보인다.

사 사

본 연구는 1992년 한국과학재단 핵심전문연구과제(과제번호 : 921-0500-010-2)의 일환으로 수행되어졌다. 연구자들은 이를 지원하여준 한국과학재단에 심심한 감사를 표한다. 또한 원고를 세세히 심사하여준 두분의 심사자에게도 크게 감사를 드린다.

참고문헌

- Andersen, P. and T. Fenchel, 1985. Bacterivory by microheterotrophic flagellates in seawater samples. *Limnol. Oceanogr.*, **30**: 198-202.
Andersen, P. and H. Sorensen, 1986. Population dy-

- namics and trophic coupling in pelagic microorganisms in eutrophic coastal waters. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **33**: 99-109.
- Azam, F., T. Fenchel, J.G. Field, J.S. Meyer-Reil and F. Thingstad, 1983. The ecological role of water column microbes in the sea. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **10**: 257-263.
- Banase, K., 1982. Cell volumes, maximal growth rates of unicellular algae and ciliates, and the role of ciliates in the marine pelagial. *Limnol. Oceanogr.*, **27**: 1059-1071.
- Borsheim, K.Y., 1984. Clearance rates of bacteria sized particles by freshwater ciliates, measured with monodisperse fluorescent latex beads. *Oecologia.*, **63**: 286-288.
- Caron, D.A., E.L. Lim, G. Miceli, J.B. Waterbury and F. W. Valois, 1991. Grazing and utilization of chroococoid cyanobacteria and heterotrophic bacteria by protozoa in laboratory cultures and a coastal plankton community. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **76**: 205-217.
- Cho, B.C. and F. Azam, 1990. Biogeochemical significance of bacterial biomass in the ocean's euphotic zone. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **63**: 253-259.
- Davis, P.G. and J.M. Sieburth, 1984. Estuarine and oceanic microflagellate predation of actively growing bacteria: estimation by frequency of dividing divided bacteria. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **19**: 237-246.
- Ducklow, H.W., 1982. Chesapeake bay nutrient and plankton dynamics. I. Bacterial biomass and production during spring tidal destratification in the York river, Virginia estuary. *Limnol. Oceanogr.*, **27**: 651-659.
- Fenchel, T., 1982. Ecology of heterotrophic microflagellates some important forms and their functional morphology. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **8**: 211-223.
- Frost, B.W., 1972. Effect of size concentration of food particles on the feeding behavior of the marine planktonic copepod *Calanus pacificus*. *Limnol. Oceanogr.*, **17**: 805-815.
- Fuhrman, J.A. and G.B. McManus, 1984. Do bacteria sized marine eukaryotes consume significant bacterial production?. *Science.*, **224**: 1257-1260
- Gonzalez, J.M., E.B. Sherr and B.F. Sherr, 1993. Differential feeding by marine flagellates on growing versus starving and on motile versus nonmotile, bacteria prey. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **102**: 257-267.
- Haas, L.W., 1982. Improved epifluorescence microscopy for observing planktonic microorganisms. *Ann. Riv. Inst. Oceanogr.*, Paris, **58**(5): 261-266.
- Heinbokel, J.F., 1978. Studies on the functional role of Tintinnids in the Southern California bight. I. Grazing and growth rates in laboratory cultures. *Mar. Biol.*, **47**: 177-189.
- Heinbokel, J.F., 1987. Diel periodicities and rates of reproduction in natural populations of Tintinnids in the oligotrophic waters off Hawaii, September 1982. *Mar. Microb. Food Webs.*, **2**(1): 1-14.
- Kim, S.K., 1992. Contribution l'étude du flux de matière à la base du réseau trophique dans une mer oligotrophe (Mer Ligurienne Méditerranée). The ph D. Univ. Paris VI. 131 pp.
- Landry, M.R., L.W. Haas and V.L. Fagerness, 1984. Dynamics of microbial plankton communities : experiments in Kaneohe Bay, Hawaii. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **16**: 127-133.
- Lee, W.J., 1993. The study on the role of planktonic protozoa in the pelagic ecosystem of Kyunggi Bay, Korea. MS thesis of Inha Univ. 81pp.(in Korean).
- Lessard, E.J. and E. Swift, 1985. Species specific grazing rates of heterotrophic dinoflagellates in oceanic waters measured with a dual-label radioisotope technique. *Mar. Biol.* **87**: 289-296.
- Lochte, K., and C. M. Turley, 1988. Bacterial and Cyanobacteria associated with phytodetritus in the deep sea. *Nature.*, **333**: 67-69.
- Marra, J., L.W. Haas and K.R. Heinemann, 1988. Time course of C assimilation and microbial food webs. *J. Exp. Mar. Ecol.*, **115**: 263-280.
- McManus, G.B. and J.A. Fuhrman, 1986. Bacterivory in seawater studied with the use of inert fluorescent particles. *Limnol. Oceanogr.*, **31**: 420-426.
- Mullin, M.M., 1963. Some factors affecting the feeding of marine copepods of the genus *Calanus*. *Limnol. Oceanogr.* **8**: 239-250.
- Nielsen, T.G. and T. Kiorboe, 1991. Effects of stream event on the structure of the pelagic food web with special emphasis on planktonic ciliates. *J. Plank. Res.*, **13**: 35-51.
- Nival, P. and S. Nival, 1976. Particle retention efficiencies of an herbivorous copepod, *Acartia clausi* (adult and copepodite stages) : effects on grazing. *Limnol. Oceanogr.*, **21**: 25-49.
- Pomeroy, L.R., 1974. The Ocean's food web, a changing paradigm. *BioScience*, **24**: 499-504.
- Porter, K. and Y.S. Feig, 1980. The use of DAPI for identification and enumeration of bacteria and blue green algae. *Limnol. Oceanogr.*, **25**: 943-948.
- Rassoulzadegan, F., M. Laval-Peuto and R.W. Sheldon, 1988. Partitioning of the food ration of marine ciliates between picoplankton and nanoplankton. *Hydrobiologia*, **159**: 75-88.
- River, A., D.C. BrownLee, R.W. Sheldon and F. Rassoulzadegan, 1985. Growth of microzooplankton a comparative study of bacterivorous zooflagellates and ciliates. *Mar. Microbiol. Food Webs*, **1**: 51-60.
- Sheldon, R. and F. Rassoulzadegan, 1987. A method measuring plankton production by particle counting. *Mar. Microbial. Food Webs*, **2**: 29-44.
- Sheldon, R.W., P. Nival and F. Rassoulzadegan, 1986. An experimental investigation of a flagellate-ciliate-copepod food chain with some observation relevant to the linear biomass hypothesis. *Limnol. Oceanogr.*, **1**: 184-188.
- Sherr, B.F., E.B. Sherr, and T. Berman, 1983. Grazing

- growth and ammonium excretion rates of a heterotrophic microflagellate fed with four species of bacteria. *Appl. Environ. Microbiol.*, **45**: 1196-1201.
- Sherr, B.F., E.B. Sherr, T.L. Andrew, R.D. Fallon and Y. Newell, 1986. Trophic interactions between heterotrophic protozoa and bacterioplankton in estuarine waters analyzed with selective metabolic inhibitions. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **32**: 169-179.
- Sherr, E.B. and B.F. Sherr, 1987a. High rates of consumption of bacteria by pelagic ciliates. *Nature.*, **325**: 710-711.
- Sherr, E.B., E.B. Sherr and R.D. Fallon, 1987b. Use of monodispersed, fluorescently labeled bacteria to estimate in situ protozoan bacterivory. *Appl. Environ. Microb.*, **53**(5): 958-965.
- Sherr, E.B. and B.F. Sherr, 1988. Role of microbes in pelagic food webs : A revised concept. *Limnol. Oceanogr.*, **33**(5): 1225-1227.
- Sherr, B.F., and E.B. Sherr, 1995. Methods for elucidating trophic links within microbial food webs. 4th Inter. Conf. *On Aqu. Ecos. Heal.*, Abstracts, c-3.
- Stoecker, D.K., L.H. Davis and A. Provan, 1983. Growth of *Favella* sp.(Ciliata: Tintinnida) and other microzooplankton in cages incubated in situ and comparison to growth *in vitro*. *Mar. Biol.*, **75**: 293-302.
- Stoecker, D.K., 1984. Particle production by planktonic ciliates. *Limnol. Oceanogr.*, **29**: 930-940.
- Stoecker, D.K. and J. McD. Capuzzo, 1990. Predation on protozoa: its importance to zooplankton. *J. Plank. Res.*, **12**: 891-908.
- Stoecker, D.K., M.W. Silver, A.E. Michaels and L.H. Davis, 1988. Obligate mixotrophy in *Laboea strobila*, a ciliate which retains chloroplasts. *Mar. Biol.*, **99**: 415-423.

Accepted November 28, 1995