

만경·동진강 염하구에서 섬모충류에 의한 박테리아 섭식에 관하여

심재철·박수영·조병철·이원호¹

서울대학교 해양학과

¹군산대학교 해양학과

On the Bacterivory of Ciliates in the Estuarine System of the Mankyung and Dongjin rivers.

JAE HYUNG SHIM, SOO YOUNG PARK, BYUNG CHEOL CHO AND WONHO YIH¹

Department of Oceanography, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea

¹Department of Oceanography, Kunsan National University, Kunsan 573-701, Korea

In order to assess the significance of ciliate grazing on bacterial population in carbon flow of the estuarine pelagic ecosystem of the Mankyung and Dongjin rivers (MD estuary), abundance and biomass of ciliates and grazing rate on bacteria of small (<40 μm) ciliates were measured. Samplings were carried out four times from October 1993 to March 1995 in the estuarine system. Ciliates smaller than 40 μm occupied more than 49.5% of total ciliates abundance. Clearance rate of small ciliates ranged from 18.0 to 106.3 $\text{nl cell}^{-1} \text{h}^{-1}$. As bacterial abundance increased, ciliate's clearance rate decreased, suggesting that bacterial abundance effects on ciliate's grazing rate. Ciliate grazing rate was equal to 0.1 to 12.2% of bacterial productivity, and the ratio of ciliate ingestion over bacterial production increased exponentially with the increase of bacterial abundance ($r^2=0.62$, $p \leq 0.001$). It seems that the effect of ciliate grazing on bacteria would be small in coastal waters and large in more eutrophic waters of high bacterial abundance. Carbon supplied by ciliate grazing on bacteria was avg. 3.1% of carbon amount required for the ciliate maximum productivity. Thus, the ecological role of ciliate in microbial loop was probably more important as a final consumer than as a direct consumer of bacteria.

탄소순환에서 섬모충류에 의한 직접적인 박테리아 섭식의 중요성을 알아보기 위하여 만경 동진강 염하구에서 1993년 10월부터 1995년 3월까지 4회에 걸쳐 섬모충류의 수도(abundance)와 생물량 그리고 40 μm 이하의 작은 섬모충류의 박테리아 섭식률을 조사하였다. 40 μm 이하의 작은 크기 섬모충류 수도는 전체 섬모충류 수도의 평균 49.5% 이상을 차지하였다. 이러한 작은 크기 섬모충류의 박테리아 섭식률은 시간당 18.0~106.3 nl cell^{-1} 로 박테리아의 수도가 증가할수록 여과율은 감소하는 반면, 섭식률은 증가하는 경향을 보여 박테리아의 농도가 섭식률에 영향을 미치는 것으로 보인다. 섬모충류의 섭식이 박테리아 생산력중 차지하는 비율은 0.1~12.2%로 박테리아 수도가 증가함에 따라 박테리아 생산력중 섬모충류에 섭식되는 비가 지속적으로 증가하는 경향 ($r^2=0.62$, $p \leq 0.001$)을 보였다. 즉 섬모충류의 섭식이 박테리아에 미치는 영향은 전형적인 연안에서는 작으나 박테리아의 농도가 높은 부영양화 지역에서는 더 클 것으로 추측된다. 탄소순환에서 작은 섬모충류가 박테리아를 섭식하여 얻는 탄소량은 섬모충류가 최대 생산력을 나타낼 때 필요 탄소량의 평균 3.1%에 불과하여 미소순환고리에서 섬모충류는 박테리아의 직접적인 섭식자보다는 최종적인 섭식자로서의 역할이 큰 것으로 생각된다.

*본 연구는 교육부 학술연구조성비의 지원(한국 황해 연안·연근해역의 기초해양환경학적 연구, 과제번호: BSRI-94-5409)에 의해 수행되었음.

서 론

재료 및 방법

섬모충류는 표영생태계의 먹이 그물에서 picoplankton, nanoplankton과 대형동물플랑크톤간의 직접적인 연결자의 역할을 하는 것으로 알려져 있다 (Pierce and Turner, 1992). 더구나 최근에는 박테리아를 먹이원으로 하는 작은 크기의 섬모충류가 종속영양성 미세플랑크톤 생물량의 많은 부분을 차지하는 것으로 보고되었으며 (Sherr *et al.*, 1986) 박테리아 섭식에 있어 섬모충류의 역할이 과거에 알려진 바와 달리 크다는 연구결과들이 최근 보고되었다 (Albright *et al.*, 1987; Sherr *et al.*, 1989; Šimek and Straškrabová, 1992). 그러나 섬모충류가 박테리아의 섭식자로서 중요한 역할을 하기 위해서는 박테리아 수도가 10^6 cells ml^{-1} 내외인 전형적인 연안보다는 높아야 한다는 견해 (Sieburth, 1984; Verity, 1986; Fenchel and Jonsson, 1988)도 있다. 섬모충류에 의한 박테리아 섭식은 탄소전달단계의 전달효율을 증가시킨다는 점에서 중요한데 우리나라 해역에서는 아직까지 탄소순환에서 박테리아의 직접적인 섭식자로서 섬모충류의 역할을 규명하고자 한 연구는 없었다. 그러므로 본 연구에서는 전형적인 염하구의 물리적 환경 특징을 나타내는 만경·동진강 염하구(심등, 1993)에서 박테리아를 먹이원으로 하는 작은 크기($40 \mu m$ 이하) 섬모충류의 분포와 탄소순환에서 섬모충류에 의한 직접적인 박테리아 섭식의 중요성을 밝히고자 하였다.

연구 해역은 중서부 해안에 위치한 만경·동진강 하구로서 (Fig. 1) 1993년 10월부터 1995년 3월까지 총 4회 조사하였으며 관측시기는 소조의 2~3일 전에 실시되도록 하였다. 그외에 섭식률의 비교실험은 심포(정점 A)와 거전리(정점 B) 연안에서 1994년 10월과 1995년 2월에 시행하였다.

섬모충류의 수도 및 생물량은 채수된 시료를 Lugol 용액으로 고정시킨 후 Sedgwick-Rafter 계수판에서 측정하였다. 생물량은 먼저 각 세포의 크기를 현미경하에서 측정하여 형태에 따라 피각과 세포의 용적을 계산한 후 유충섬모충류(tintinnid)의 경우 Carbon (pg)= $44.5+0.053$ lorica volume (μm^3) (Verity and Langdon, 1984)의 식, 그외 피각이 없는 섬모충류는 $0.19 \text{ pg C } \mu m^{-3}$ (Putt and Stoeker, 1989)의 전환값을 사용하여 환산하였다.

섬모충류와의 상관관계는 편모류의 생물량의 경우는 윤(1995)의 자료를 인용하였으며 식물플랑크톤의 생물량에 대하여는 엽록소 *a*의 양을 측정후 (Parsons *et al.*, 1984) C/Chl-*a*=50의 전환값(Cho and Azam, 1990)을 사용하여 환산하였다. 섬모충류 섭식 영향과 상관관계 분석에 이용된 박테리아의 생산력 및 수도는 본 연구와 동시에 측정된 윤(1994)과 최(미간행)의 자료를 인용하였다.

탄소순환은 Fenchel (1987)에 의해 단순화된 먹이 그물을 기초로 하여 도식화하였으며 섬모충류의 이차 생산력은 Muller and Geller (1991)의 model을 이용하여 구하였다. 식물플랑크톤에 의한 일차 생산력은 ^{14}C 를 이용하여 측정하였으며 (Parsons *et al.*, 1984), 요각류의 이차 생산력은 Taguchi and Ishii (1972)의 방법으로 요각류의 산소 소비량을 측정후 여기에 Ikeda and Motoda (1978)의 변형식을 적용시켜 순생산력을 측정하였다. 단 1차시기의 일차 생산력과 1차에서 3차에 이르는 요각류의 생산력은 Nam (1994)의 자료를 인용하였다. 탄소요구량을 계산하기 위한 성장효율은 Leakey *et al.* (1992)의 가정 에 따라 섬모충류는 40%를, 요각류는 25%를 사용하였다.

섭식률 측정은 자연상태에서 섬모충류에 의한 박테리아의 포식율을 알아보기 위하여 채수된 해수를 1 l 폴리에틸렌 병에 담고 Børsheim (1984)의 방법에 의해 준비된 FM (Fluorescent Microsphere)이나

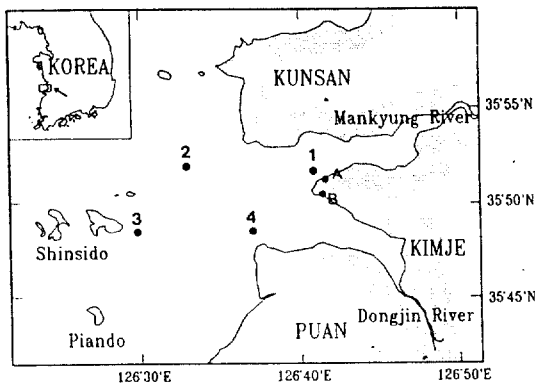


Fig. 1. A map showing sampling stations in the estuarine system of the Mankyung and Dongjin rivers.

Table 1. Abundance and biomass of ciliates (Total: total ciliates, <40 μm : <40 μm ciliates).

Date	STN	Depth (m)	Abundance(cells l^{-1})			Biomass ($\mu\text{g C } l^{-1}$)		
			Total	<40 μm	% of Total	Total	<40 μm	% of Total
93. 10	1	0	8370	2941	35.14	39.05	1.94	5.49
		2	27874	12925	46.36	60.32	7.69	12.76
	3	3	27072	8648	31.95	72.72	6.46	9.30
		0	19115	13043	68.23	29.36	6.95	23.56
		5	12697	8104	63.83	31.16	5.20	17.39
	4	10	11828	7591	64.17	29.87	4.82	16.23
		0	23639	8736	36.95	29.00	4.97	17.45
		3	25280	15837	62.66	51.13	5.15	10.56
93. 2	1	0	4722	3014	63.83	10.65	1.73	16.28
		2	4534	1236	27.27	18.21	0.91	4.99
	3	3	4251	750	17.64	24.18	0.77	3.55
		0	1422	1264	88.89	3.67	1.35	63.98
		5	2508	1881	75.00	7.85	1.90	24.24
	4	10	951	528	55.52	2.70	0.68	25.19
		0	8436	6643	78.75	21.47	7.45	34.73
		3	8773	7878	89.75	26.59	9.19	34.57
93. 6	1	0	9535	2641	26.16	94.01	1.94	2.06
		2	3204	3990	82.18	3.60	2.20	61.18
	3	3	4562	3150	60.71	23.42	1.89	8.07
		0	5176	4295	89.37	5.26	2.00	38.96
		5	5367	5419	77.15	16.80	2.67	15.90
	4	10	4742	3270	68.96	5.45	1.32	24.22
		0	6054	3459	45.25	29.20	2.74	9.38
		3	5588	1956	40.00	26.87	2.28	8.49
95. 3	1	0	8063	7039	87.30	17.55	9.11	51.88
		2	6401	6032	94.24	3.65	3.29	90.13
	3	3	6977	5508	84.20	27.82	4.17	14.98
		0	5204	5204	100.00	1.92	1.91	100.00
	4	5	5813	5813	100.00	3.31	3.31	100.00
		0	11817	10952	92.69	18.92	6.70	35.41

Sherr *et al.* (1987)의 방법에 의해 준비된 FLB (Fluorecetyly Labeled Bacteria)를 박테리아 현존량의 약 10%가 되게 넣어준 후 암배양하였다. 5, 10, 20, 40분 간격으로 subsample을 취하여 0.5%의 Lugol 용액과 3%의 formalin (Sherr *et al.*, 1987)으로 고정하여 냉장 보관하였다. 보관된 시료를 premulin으로 염색 (Caron, 1983)하여 이를 현광 현미경(Olympus BH2) 하에서 관찰하였다. 이때 UV filter set (Olympus filter set; UG-1 exiter filter, DM-40 dichroic mirror, L-420 barrier filter)하에서 40 μm 이하의 섬모충류를 구별하여 푸른색 filter set (Olympus filter set; BP-495 exiter filter, DM-505 dichroic mirror, O-515IF barrier filter)로 섬모충류 내에 있는 형광 입자의 수를 계수하였다. 시간에 따른 섭식된 FM 또는 FLB의 갯수를 도정한 후 섭식곡선에서 직선 부분만을 직선 회귀 분석시켜 기울기를 구한 다

음 이 값에 배양시의 형광입자의 농도를 곱하여 여과율($nl \text{ cell}^{-1} h^{-1}$)을, 그리고 여과율에 40 μm 이하인 섬모충류 현존량과 박테리아의 생물량을 곱하여 섭식률($\mu\text{g C } l^{-1} d^{-1}$)을 구하였다.

섭식실험에서 추적자로 FLB와 FM을 사용하였을 때 여과율의 차이는 동일한 시료를 담은 서로 다른 1 l 병에 각각 FLB와 FM을 넣은 후 앞에서 말한 여과율 측정방법과 동일한 방법으로 각각에 대한 여과율을 구하여 비교하였다.

섭식실험에서 subsample을 취한 후 넣어주는 고정액의 종류에 따른 영향에 대하여는 1995년 2월 심포와 거전리 앞바다에서 비교실험을 행하였다. 즉 동일한 시료의 subsample을 두 가지 방법(중화된 포르말린 용액(최종농도 3%)을 이용하는 방법과 Lugol 용액(최종농도 0.5%)과 포르말린 용액(최종농도 3%)을 함께 사용하는 방법에 대한 여과율을 구하여 비교하였다.

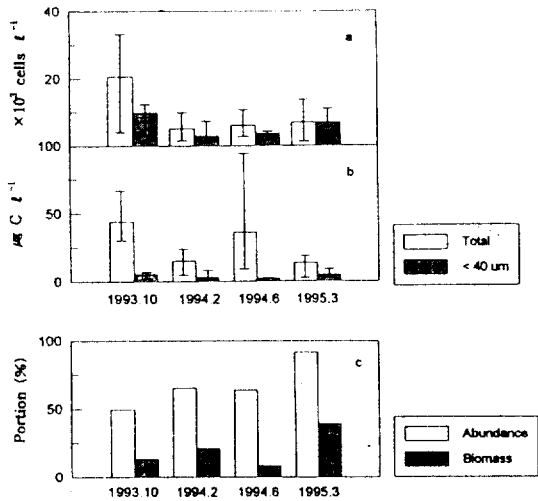


Fig. 2. Ciliate abundance, biomass and portion of small (<40 μm) ciliates to total ciliates in the estuarine system of the Mankyung and Dongjin rivers (a: abundance, b: biomass, c: portion of small ciliates).

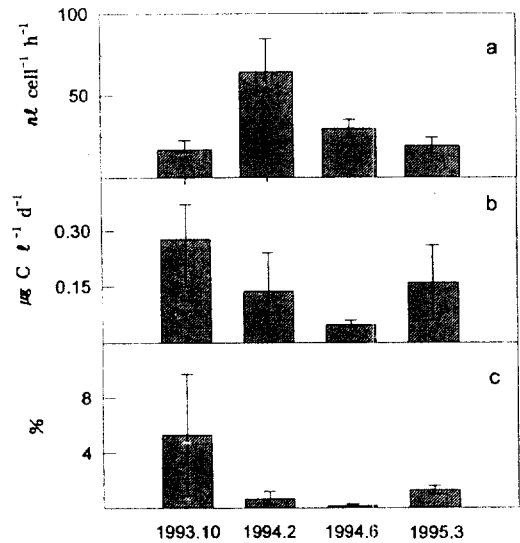


Fig. 4. Ciliate grazing on bacteria (a: clearance rate, b: ingestion rate, c: fraction of ciliate grazing rate in bacterial secondary productivity).

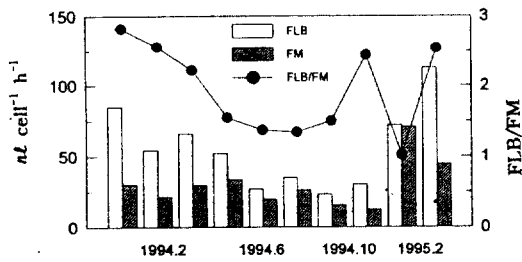


Fig. 3. Comparison of ciliate clearance rates on FLB and FM (FLB/FM: clearance rate on FLB over clearance rate on bead).

해양섬모충류의 박테리아 섭식률 측정에 있어 담수 박테리아로 만든 FLB를 사용함으로써 생기는 오차는 1995년 2월에 심포와 거전리 앞바다에서, 그리고 1995년 3월에 정점 3에서 해수 박테리아로 만들어진 FLB와 담수 박테리아로 만들어진 FLB에 대한 섬모충류의 여과율을 측정, 비교하여 알아보았다.

자료의 회귀 분석과 상관 관계 분석은 MINITAB Package (Version 7.1, Minitab, Inc. 1979)를 사용하였다.

결과 및 고찰

1. 수도(abundance) 및 생물량

박테리아의 포식자인 작은 크기 섬모충류를 Sherr

et al. (1988)의 기준에 따라 40 μm 이하로 가정하여 수도와 생물량 그리고 전체 섬모충류에서 차지하는 비율 측정하였다. 그 결과 전 연구기간 동안 총 부유성 섬모충류의 수도는 951 cells l^{-1} 에서 28,984 cells l^{-1} 이었으며, 그 중 작은 크기 섬모충류의 수도는 528~15,837 cells l^{-1} 로 관찰되었다(Table 1, Fig. 2a). 특히 전체 섬모충류에서 차지하는 비율은 시기별 평균이 49.5~91.6%로 전 시기에 걸쳐 49.5% 이상을 차지하였다(Fig. 2c). 생물량은 전체 부유성 섬모충류가 1.92 $\mu\text{g C } l^{-1}$ 에서 94.01 $\mu\text{g C } l^{-1}$ 이, 작은 섬모충류는 0.68~7.69 $\mu\text{g C } l^{-1}$ 이 관찰되었다 (Table 1, Fig. 2b). 작은 섬모충류가 전체 섬모충류에서 차지하는 비율은 평균 25%로 수도보다는 낮으나 섬모충류 생물량의 주요 구성원임을 알 수 있다(Fig. 2c).

2. 박테리아 섭식

본 연구에서는 섭식실험의 추적자로 1차 시기에 Fluorescent Microsphere (FM)를 사용한 반면 그외의 시기에는 Fluorescently Labeled Bacteria (FLB)를 사용하였다. 그러므로 모두 10차례에 걸쳐 FLB를 사용한 방법과 FM을 사용한 방법으로 측정된 섭식률을 비교하여 1차 측정치를 보정하였다.

비교 결과, 전 시기에 걸쳐 FLB를 사용한 경우의 clearance rate가 FM을 사용한 경우보다 더 높았다

Table 2. Ciliate grazing on bacteria in the estuarine system of the Mankyung and Dongjin rivers (IGR: ingestion rate, BSP: bacterial secondary productivity).

Date	STN	Depth	Clearance rate (n/ ind ¹ h ⁻¹)	Ingestion rate (µg C l ⁻¹ d ⁻¹)	IGR BSP × 100
93. 10	3	0	15.38	0.27	1.33
		5	15.50	0.15	0.84
	4	0	22.78	0.37	9.38
		5	14.36	0.32	9.73
94. 2	3	0	85.03	0.06	0.63
		5	54.53	0.05	0.20
	4	0	66.15	0.24	1.16
		5	52.27	0.20	0.38
94. 6	3	0	26.90	0.05	0.14
		5	23.90	0.06	0.24
	4	0	33.10	0.04	0.06
		5	35.17	0.04	0.06
95. 3	3	0	24.40	0.06	0.85
	4	0	14.38	0.26	1.57

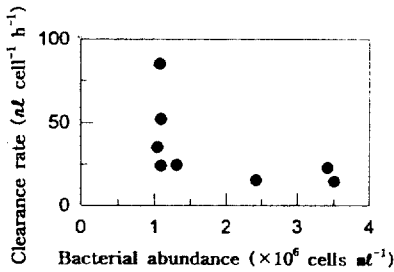


Fig. 5. Plots of bacterial abundance vs. ciliate clearance rate on bacteria.

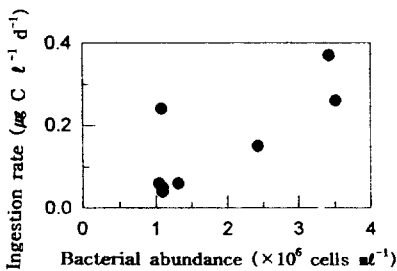


Fig. 6. Plots of bacterial abundance vs. ingestion clearance rate on bacteria.

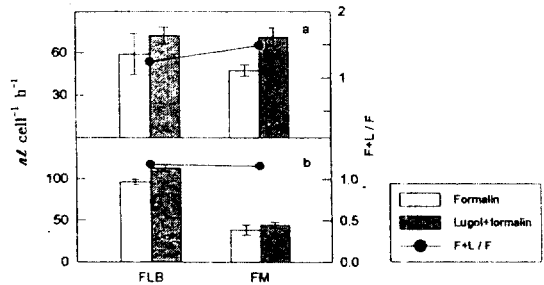


Fig. 7. Comparison of ciliate clearance rates using 2 different fixing methods (F+L/L: clearance rate using Lugol and formalin over clearance rate using formalin, a: Station A, b: Station B).

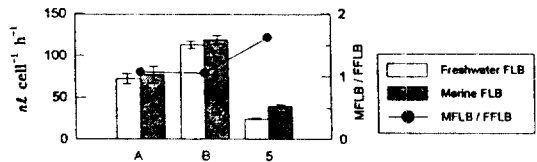


Fig. 8. Comparison of ciliate clearance rates on freshwater FLB and marine FLB(MFLB/FFLB: clearance rate on marine FLB over clearance rate on freshwater FLB).

(Fig. 3). 또한 두 방법에 의해 측정된 여과율의 차이는 1.02~2.82배로 Šimek and Straškrabová(1992)의 1.26~1.86배 보다는 최대값이 높으나 Sherr *et al.* (1987)의 약 4~10배보다는 낮은 값이다. 이러한 결과는 섬모충류의 종류에 따라 여과율의 차이가 다르게

나타나는 것으로 보고된 바 있어(Sherr *et al.*, 1987) 종조성에 따라 다르게 나타나는 것으로 추측된다. 그런데 시기에 따라 종조성이 다르게 나타날 수 있으므로 1차 측정시기의 여과율에 대한 보정은 가장 유사한 종조성을 나타낼 것으로 추측되는 다음해 10월에 이루어진 비교실험의 평균차이인 1.97배를 사용

Table 3. Ciliate grazing rates on bacteria in other regions

Sources	Species	Regions & Methods	Clearance rate (nl cell ⁻¹ h ⁻¹)
Sherr et al. (1988)	<i>Strombidium sulcatum</i>	FLB	57-413
Gonzalez et al (1990)		Butron River & La Salvaje beach FLB	0.6-268
Sherr et al. (1987)	Scuticociliates & Oligotrichs	Duplain River tidal creek FLB	140-260
Sherr et al. (1989)	naked Choreotrichs	NW Mediterancean Sea	14-285
Bloem et al. (1989)		FLB	ND-17.57
Bernard & Rassoulzadegan (1990)	<i>Strombidium sulcatum</i>	Lake Vechten FLB	400-600
Šimek & Straškvabová (1992)		FLB	42-330
Børshim (1984)	<i>Strombidium</i> sp.	Rimov Reservoir FLB	258-529

Table 4. Comparison of size and shape of freshwater FLB and marine FLB (TFN: total FLB number, RFN: FLB number of rod shape).

	Size (μm ³)	RFN/TFN (%)
Freshwater FLB	0.026±0.015	30.5
	0.031±0.008	27.1
Marine FLB	0.022±0.010	16.2

하였다.

이러한 보정 결과 박테리아에 대한 섬모충류의 여과율은 전 연구기간에 걸쳐 14.4~85.0 nl cell⁻¹ h⁻¹ (Table 2, Fig. 4a)로 다른 지역에서 연구된 섬모충류의 여과율(0.6~600 nl cell⁻¹ h⁻¹; Table 3)의 범위에 있으나 그중 낮은 값을 보인다. 그런데 여과율은 그 대상 섬모류의 종에 따라 차이가 커서 박테리아를 주 먹이원으로 하는 종 (e.g. *Strombidium sulcatum*)의 경우 높은 여과율을 보이는 반면 식물 플랑크톤을 우선적으로 섭식하는 종(e.g. *Uronema* sp.)은 섭식률이 낮다(McManus and Fuhrman, 1988). 그런데 Børshim (1984), Sherr et al. (1988), Bernard and Rassoulzadegan (1990)의 연구는 *Strombidium sulcatum* 과 *Strombidium* sp.를 대상으로 하였으므로 전체군집을 대상으로 한 본 연구결과에 비해 여과율이 월등히 높은 것으로 추측된다.

박테리아 수도 변화에 대한 섭식률의 변화를 도시하여 본 결과(Fig. 5) 박테리아 수도가 증가함에 따라 여과율은 감소하였으며 특히 박테리아 수도가 1.2×10⁶ cells ml⁻¹ 이상에서는 여과율이 급격하게 감소하고 있다. 반면 섭취되는 탄소량인 섭식률은 박테리아의 수도가 높을수록 증가하였다(Fig. 6).

박테리아 생산력중 작은 크기 섬모충류의 섭식률이 차지하는 비는 0.1~9.7%로 낮았다(Table 2, Fig.

4c). 이러한 낮은 값에 대한 원인으로는 실험방법상의 오차를 생각해 볼 수 있는데 그 첫번째가 고정액에 의한 영향이다. 즉 고정액은 세포를 수축시키며 섭식된 먹이입자를 배출시키는데 관여하기도 한다 (Sierachi et al., 1987). 그러므로 섭식 실험에서 subsample을 고정하는 고정액의 영향으로 섭식률이 실제보다 더 낮게 측정되었을 가능성을 배제할 수 없다.

본 연구에서는 섭식실험에서 일반적으로 쓰이는 formalin만을 쓰는 방법과 Lugol과 formalin을 함께 쓰는 방법을 비교하였다. 그 결과 후자의 경우가 formalin만을 사용한 경우보다 1.16~1.49배 여과율이 더 높아(Fig. 7) 그 영향이 작았다. 또한 Sherr et al.(1989)은 이러한 두가지 고정액을 함께 사용하는 방법으로 측정된 여과율은 살아 있는 원생생물의 실제 여과율에 근접한 것으로 보고하였다. 그러므로 본 연구에서는 고정액에 의한 영향은 작은 것으로 사료된다.

두번째로 담수 박테리아로 FLB를 만들었으므로 이로 인해 해양섬모충류의 여과율이 낮게 측정되었을 가능성을 생각할 수 있다. 즉 해양 섬모충류는 박테리아 섭식에 있어 종류에 따라 여과율이 다르며 특히 해양박테리아에 대하여 높은 선호도를 갖고 있다(Gonzalez et al., 1990). 본 연구에서는 해양 섬모충류의 여과율을 측정하는 데 추적자로서 담수박테리아로 만들어진 FLB를 사용하였으므로, 이에 의한 오차를 알아보기 위하여 3회에 걸쳐 담수 FLB와 해수 FLB간의 여과율의 차이를 비교해 보았다.

그 결과 해수 FLB의 섭식률이 담수 FLB의 섭식률보다 1.05~1.62배 더 높았다. 그러나 이러한 차이는 FLB의 형태와 크기의 차이에 의해 나타날 수 있다. 그러므로 실험에 사용한 FLB의 크기와 형태를 비교해 보았다. 그 결과 섬모충류가 선호하는 간균 형태

Table 5. Corrected values of ciliate grazing on bacteria (IGR: ingestion rate, BSP: bacterial secondary productivity).

Date	STN	Depth	Clearance rate (nl ind ⁻¹ h ⁻¹)	Ingestion rate (µg C l ⁻¹ d ⁻¹)	IGR/BSP × 100
93. 10. 9	3	0	19.23	0.34	1.67
		5	19.38	0.19	1.08
	4	0	28.48	0.46	11.65
		5	17.95	0.40	12.16
94. 2. 18	3	0	106.29	0.08	0.84
		5	68.16	0.06	0.24
	4	0	82.69	0.30	1.45
		5	65.34	0.25	0.48
94. 6. 15	3	0	33.63	0.06	0.16
		5	29.88	0.08	0.32
	4	0	41.48	0.05	0.07
		5	43.96	0.05	0.07
95. 3. 24	3	0	30.50	0.08	1.27
	4	0	17.98	0.33	1.99

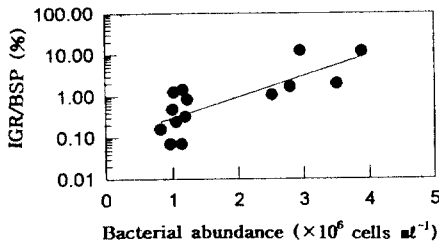


Fig. 9. Plots of total bacterial abundance and IGR/BSP (IGR: ciliate ingestion rate on bacteria, BSP: bacterial secondary production)

와 큰 크기의 박테리아(Gonzalez *et al.*, 1990)는 오히려 담수 FLB에 더 많이 존재하였으며 그 차이도 크지 않았다(Table 4). 즉, 형태와 크기 차이에 의한 영향을 고려하여도 해양 섬모충류는 해양박테리아를 더 선호하는 것으로 추측된다. 이러한 섬모충류의 먹이 선택성에 의한 오차를 보정하기 위하여 담수 FLB를 이용하여 측정된 섭식률에 담수와 해양 FLB에 대한 섭식률의 평균 오차인 1.25배를 적용시켜 보정하였다. 그 결과 여과율은 18.0~106.3 nl cell⁻¹ h⁻¹로 증가하였으며 박테리아 이차생산에서 섬모충류가 섭식하는 양의 비도 0.1~12.2%를 차지하였다(Table 5).

본 연구에서 실험방법상 생길 수 있는 오차의 가능성을 고려하더라도 박테리아의 직접적인 섭식자로서 섬모충류의 역할은 미약한 것으로 나타났다. 즉 일반적인 염하구의 생태적 특징을 나타내는 만경·동진강 염하구에서는 직접적인 박테리아 섭식자로

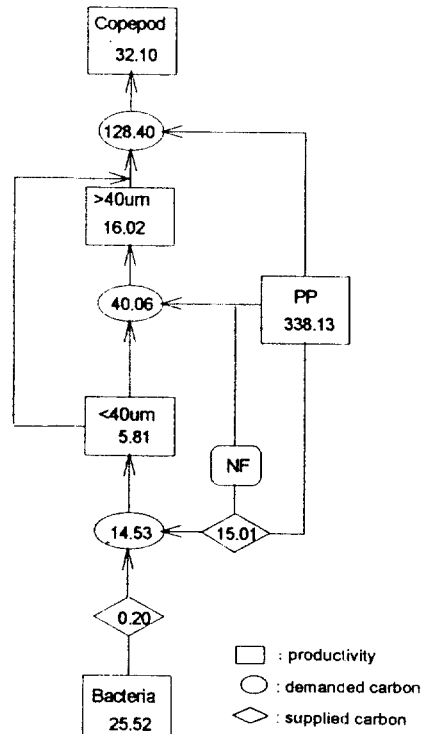


Fig. 10. Carbon flow (mg C m⁻³ d⁻¹) through components of planktonic community at the estuarine system of the Mankyung and Dongjin rivers (NF: nano-flagellates).

서 섬모충류의 영향은 작은 것으로 추측된다. 이는 작은 크기 섬모충류가 박테리아의 주요 섭식자로 작용한다는 주장(Sherr and Sherr, 1987; Sherr *et al.*,

Table 6. Correlation matrices of each parameter based on carbon biomass in the estuarine system of the Mankyung and Dongjin rivers (<40 Cil: <40 μm ciliate, >40 cil: >40 μm ciliate, Nano: Nano-phytoplankton, Pico: Pico-phytoplankton, Fla: nano-flagellate, Bac: bacteria, *: $p < 0.05$, **: $p < 0.01$).

	<40 Cil.	Nano	Pico.	Fla.	Bac.
<40 Cil	-				
Nano.	0.752*	-			
Pico.	0.023*	0.425**	-		
Fla.	0.484*	0.578*	0.094**	-	
Bac.	0.537*	0.168**	0.571*	0.278*	-

1989; Šimek and Straškrabová, 1992)과는 다른 결과이다. 특히 Sherr *et al.* (1989)은 섬모충류의 섭식이 박테리아 생산량의 최대 74%까지 차지한다고 보고한 바 있어 본 연구결과와는 상이한 데 이에 대한 원인으로서는 먼저 대상지역의 차이를 들 수 있다. 즉 Sherr *et al.* (1986)과 Sherr *et al.* (1989)의 경우는 조석만(tidal creek)지역에서의 연구 결과로서 조석만 지역은 염하구보다 섬모충류의 영향이 더 크며 Sherr *et al.* (1989)의 경우 염하구 지역에서는 조석만 지역보다 낮은 값인 최대 약 26%를 보이고 있다. 또한 박테리아 생산량의 10~28%를 섭식하는 것으로 보고한 Šimek and Straškrabová(1992)는 섬모충류의 수도가 본 연구지역보다 높은 $95 \times 10^6 \text{ cells l}^{-1}$ 로서 이러한 높은 섬모충류의 수도에 따른 높은 섭식량이 박테리아에 대한 영향을 증가시킨 것으로 추측된다.

또 하나는 박테리아 수도에 있어서의 차이이다. Sherr and Sherr (1987)의 경우 연구 당시의 박테리아 수도는 $3.8\text{--}8.4 \times 10^6 \text{ cells ml}^{-1}$ 로 본 연구지역의 박테리아 수도($0.8\text{--}4.3 \times 10^6 \text{ cells ml}^{-1}$)나 전형적인 연안보다도 높은 수도를 보였다. 그런데 앞에서 본 바와 같이 섭식률은 박테리아 수도가 높을수록 증가하므로 전형적인 연안 해역에서의 섬모충류의 영향보다 높게 측정되었을 가능성이 존재한다. 특히 박테리아 수도가 낮았던 2월과 6월에는 박테리아 생산력 중 섬모충류의 섭식이 차지하는 비가 매우 낮은 반면 박테리아 수도가 가장 높았던 10월에는 최대 12.2%로 가장 높은 비를 보여 이러한 추측을 뒷받침해 주고 있다. 실제로 본 연구에서 박테리아 생산력 중 섬모충류의 섭식이 차지하는 비는 박테리아 수도가 증가함에 따라 지수적으로 증가하는 경향($r^2 = 0.62, p \leq 0.001$)을 보여주었다(Fig. 9). 이러한 결과는 박테리아의 수도가 연안보다 높은 곳에서 박테리아

섭식자로서 섬모충류가 중요한 역할을 한다는 Sieburth(1984), Verity (1986), Fenchel and Jossou (1988)의 주장과 일치한다. 즉 전형적인 연안에서 박테리아의 직접적인 섭식자로서 섬모충류의 역할은 작으나 박테리아가 높은 밀도로 존재하는 부영양화된 오염된 수역에서는 그 역할이 클 것으로 사료된다.

각 생물군의 생산력과 생산력을 이루기 위한 탄소 요구량을 토대로 탄소순환을 도식화하여 섬모충류의 필요탄소량 중 박테리아에 의해 공급되는 탄소량을 추정하였다. 이때 섬모충류의 생산력은 Muller and Geller (1991)의 model을 이용하여 얻은 이론적인 최대 생산력이다. 그 결과 40 μm 이하의 섬모충류가 필요로 하는 최대 탄소량 중 평균 3.1%만이 박테리아에 의해 공급되는 것으로 나타나(Fig. 10) 섬모충류의 성장을 위해서는 다른 먹이원에 의한 유기탄소의 공급이 필요할 것으로 추측된다. 즉 미소순환고리에서 섬모충류는 박테리아의 직접적인 섭식자로서 보다는 최종적인 섭식자로서의 역할이 큰 것으로 사료된다. 특히 Bernard and Rassoulzadegan (1990)에 따르면 30~50 μm 크기의 섬모충류는 $\leq 3\text{--}4 \mu\text{m}$ 의 식물플랑크톤을 주먹이원으로 한다. 본 연구에서는 40 μm 이하의 섬모충류를 대상으로 하였으므로 먹이원으로서의 nanoplankton의 역할이 클 것으로 추측된다. 실제로 40 μm 이하의 섬모충류와 다른 생물군간의 상관관계를 살펴보았을 때(Table 6) 미세 식물플랑크톤과 밀접한 상관관계(correlation coefficient = 0.75, $p < 0.05$)를 보였다. 또한 같은 미세 편모류와도 0.48의 상관관계($p < 0.05$)를 보인다. 반면 2 μm 이하의 식물플랑크톤과는 상관관계가 매우 약하게 나타나(correlation coefficient = 0.023, $p < 0.05$) pico 크기 보다는 2~20 μm 크기의 식물플랑크톤이 40 μm 이하 섬모충류의 주요 먹이원으로 작용할 것이라는 앞서의 주장을 뒷받침하여 주고 있다. 그러나 식물플랑크톤의 생물량이 감소한 2월에는 실제 섭식률은 최저이나 섬모충류의 생산력이 급격하게 감소하여 섬모충류 최대 필요탄소량의 7.8%를 박테리아가 공급하고 있어 식물플랑크톤의 생물량이 적은 겨울철에 박테리아에 의한 탄소공급의 중요도가 증가함을 알 수 있다. 특히 섬모충류의 생산력은 최대 생산력이므로 실제 섬모충류의 생산력은 이보다 더 작은 것으로 짐작되어 겨울철 박테리아에 의한 탄소공급의 중요도가 더욱 증가할 것으로 생각된다.

결론

만경 · 동진강 염하구에서 <40 μm 이하의 작은 섬모충류는 전 조사시기에 전체 섬모충류 수도의 평균 49.5% 이상을 차지하고 있어 섬모충류의 주요 구성원임을 짐작할 수 있다.

이러한 <40 μm 이하의 섬모충류가 직접적으로 섭식하는 박테리아의 양을 측정하여 본 결과 섭식물은 박테리아 수도 변화에 영향을 받는 것으로 나타났다. 즉 여과율은 $18.0\text{--}106.3 \text{ nl cell}^{-1} \text{ h}^{-1}$ 로 박테리아 수도가 증가할수록 감소하였으며 특히 $1.2 \times 10^6 \text{ cells ml}^{-1}$ 이하에서 급격한 증가를 보였다. 반면 섭식물은 박테리아의 수도가 증가할수록 증가하고 있다. 박테리아 이차 생산력에 대한 섬모충류의 섭식물의 비는 박테리아의 수도가 가장 높은 10월에 최대 12.2%로 다른 시기에 비해 높았으나 그외의 시기에는 그 비가 매우 낮아 섬모충류의 섭식에 의한 영향이 작은 것으로 나타났다. 또한 박테리아 생산력 중 섬모충류 섭식이 차지하는 비는 박테리아 수도와 높은 상관관계를 보이며 수도가 증가할수록 지수적으로 증가하였다. 즉 일반적인 연안에서는 박테리아 섭식자로서 섬모충류의 역할이 미약하나 박테리아가 높은 농도로 존재하는 부영양화된 지역에서는 그 역할이 증가할 가능성을 보여준다.

또한 생산력을 기초로 먹이그물을 단순화시켜 탄소순환을 도시하여 본 결과 미소순환고리에서 섬모충류는 박테리아의 직접적인 섭식자로서보다는 최종적인 섭식자로서의 역할이 더욱 큰 것으로 나타났으며 식물플랑크톤의 직접적인 섭식자로서의 역할 또한 클 것으로 사료된다. 그러나 2월에는 박테리아에서 작은 크기 섬모충류로의 탄소흐름이 섬모충류 최대 탄소 요구량의 7.8%까지 증가하고 있어 탄소흐름에 있어 계절에 따른 변화가 예상된다. 특히 이러한 값은 이론적인 최대값이라는 점에서 실제 생태계에서는 박테리아에 의한 탄소 공급은 더욱 증가할 것으로 추측된다.

참고문헌

- 심재형, 신윤근, 조병철, 1993. 만경 동진강 하구에서의 박테리아 및 식물플랑크톤의 역할과 상호관계. 한국 해양학회지, 28(2): 107-113
- 윤상선, 1994. 수생 환경의 영양 상태에 따른 식물 플랑크톤과 박테리아의 분포 및 상관관계. 서울대학교 석사학위논문, 116pp.
- 윤성화, 1995. 염하구 동 식물성 미소 편모류의 분포 및 박테리아 섭식에 관한 연구. 서울대학교 석사학위논문, 90pp.
- Albright, L.J., E.B. Sherr, B.F. Sherr, and R.D. Fallon, 1987. Grazing of ciliated protozoa on free and particle attached bacteria. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 38: 125-129
- Bernard, C., and F. Rassoulzadeger, 1990. Bacteria or Microflagellates as a major food source for marine ciliates; possible implications for the microzooplankton. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 64: 147-155.
- Bloem, J., F.M. Ellenbroek, M.B. Bär-gilissen, and T.E. Cappenberg, 1989. Protozoan grazing and bacterial production in stratified Lake Venchten estimated with fluorescently labeled bacteria and by thymidine in coporation. *Appl. Envir. Microbiol.* 55: 1787-1795
- Børshheim, K.Y., 1984. Clearance rates of bacteria-sized particles by freshwater ciliate, measured with monodisperse fluorescent latex beads. *Oecologia*, 63: 286-288
- Caron, D.A., 1983. Technique for enumeration of heterotrophic and phototrophic nanoplankton, use epifluorescence microscopy, and comparison with other procedures. *Appl. Environ. Microbiol.*, 4: 491-498
- 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
- Fenchel, T., 1987. Ecology of protozoa: The biology of free-living phagotrophic protists. Science Tech Pub, 197pp.
- Fenchel, T. and P. Jonsson, 1988. The functional biology of *Strombidium sulcatum*, a marine oligotrich ciliate (Ciliophora, Oligotrichina). *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 48:1-15
- Gonzalez, J.M., J. Iriberry, L. Egea, and I. Barcina, 1990. Differential rates of digestion of bacteria by freshwater and Marine phagotrophic protozoa. *Appl. Envir. Microbiol.*, 56: 1851-1857
- Ikeda, T., and S. Motoda, 1978. Estimated zooplankton production and their ammonia excretion in the Kuroshio and adjacent seas. *Fishery Bulletin.*, 76: 357-367
- Leakey, R.J.G., Burkill, P.H., and M.A. Sleight, 1992. Plankton ciliates in Southampton Water : abundance, biomass, production and role in pelagic carbon flow. *Mar. Biol.* 114: 67-83
- McManus, G.B., and J.A. Fuhrman, 1988. Clearance of bacteria-sized populations of nanoplankton in the Chesapeake Bay outflow plume. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 42: 199-206
- Muller, H., and W. Geller, 1991. Maximum growth rates of aquatic ciliated protozoa: the dependence on body size and temperature reconsidered. *Arch. Hydrobiol.*, 126: 315-327
- Nam, J. H. 1994. Nutrient regeneration, respiration, feeding and distribution of zooplankton in the Mankyung-Dongjin Estuary and Shiwha Coastal Area.

- Korea. MS thesis in Seoul Nat. Univ. 14pp.
- Parsons, T.R., Y. Maita, and C. Lalli, 1984. A manual of chemical and biological method for seawater analysis. Pergamon Press, 173pp.
- Pierce, R.W., and J.T. Turner, 1992. Ecology of planktonic ciliates in Marine Food webs. Review in *Aquatic Sciences*, **6**: 139-181
- Putt, M., and D.K. Stocker, 1989. An experimentally determined carbon:volume ratio for marine "oligotrichous" ciliates from estuarine and coastal waters. *Limnol. Oceanogr.*, **34**: 1097-1103
- Sherr, E.B., and B.F. Sherr, 1987. High rates of consumption of bacteria by pelagic ciliates. *Nature*, **325**: 710-711.
- Sherr, E.B., B.F. Sherr, R.D. Fallon, and S.Y. Newell, 1986. Small aloricates as a major component of the marine heterotrophic nanoplankton. *Limnol. Oceanogr.*, **31**: 177-183.
- 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.
- Sherr, B.F., E.B. Sherr, and F. Rassoulzadegan, 1988. Rates of digestion of bacteria by marine phagotrophic protozoa: temperature dependence. *Appl. Environ. Microbiol.* **54**: 1091-1095
- Sherr, B.F., E.B. Sherr, and C. Pedros-Ali, 1989. Simultaneous measurement of bacterioplankton production and protozoan bacterivory in estuarine water. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **54**: 209-219
- Sherr, E.B., F. Rassouladegan, and B.F. Sherr, 1989. Bacterivory by pelagic choreotrichous ciliates in coastal waters of the NW Mediterranean Sea. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **55**: 235-240.
- Sieburth, J. McN., 1984. Protozoan bacterivory in pelagic marine waters. In *Heterotrophic activity in the sea*. (Ed.) Hobbie, J.E., and P.J. Williams. Plenum Press., 569pp
- Sierachi, M.E., L.W. Haas, D.A. Caron, and E.J. Lessard, 1987. Effects of fixation on particle retention by microflagellates: underestimation of grazing rates. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **38**: 251-258
- Šimek, K., and V. Straškrabová, 1992. Bacterioplankton production and protozoan bacterivory in mesotrophic reservoir. *J. Plankton Res.*, **14**: 773-787
- Taguchi, S., and H. Ishii, 1972. Shipboard experiments on respiration, excretion and grazing of *Calanus cristatus* and *C. plumchrus* (Copepoda) in the Northern North Pacific. In *Biological Oceanography of the North Pacific Ocean*. (Ed.) Takenouti, A. Y. Idemitsu Shoten.
- Verity, P.G., 1986. Grazing on phototrophic nanoplankton by microzooplankton in Narragansett Bay, Rhode Island. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **29**: 105-115.
- Verity, P.G., and C. Langdon, 1984. Relationships between lorica volume, carbon, nitrogen, and ATP content of tintinnids in Narragansett Bay. *J. Plankton Res.*, **6**: 859-868.