

만경·동진강 하구계에서 요소와 요소 분해속도의 분포*

심재형·조병철·박명길
서울대학교 자연과학대학 해양학과

Distributions of Urea and Urea Decomposition Rates in an Estuarine System of Mankyung and Dongjin Rivers, Korea

JAE HYUNG SHIM, BYUNG CHEOL CHO AND MYUNG GIL PARK
Department of Oceanography, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea

만경·동진강 하구계에서 일차생산자의 질소 요구량과 질소계 영양염의 pool에서 차지하는 요소의 중요성을 이해하기 위해, 1992년 6월부터 1994년 2월까지 5회에 걸쳐 요소 및 무기 질소계 영양염 농도와 요소의 분해 속도에 대한 측정을 실시하였다. 조사기간 동안 요소의 농도는 검출 이하의 농도에서 $12.5 \mu\text{g-at. N l}^{-1}$ 에 달하였다. 이는 전체 총 질소계 영양염의 0~96%(평균 11%)에 달하는 것으로, 총 질소계 영양염 농도가 낮은 경우에 요소는 그 상대적 중요성이 높았다. 요소의 분해 속도는 조사기간 동안 유광대와 무광대를 포함하여 $0.02 \sim 5.77 \text{ nM h}^{-1}$ 의 범위를 보였으며, 요소는 주로 netplankton에 의해 분해되었다. 수층내의 요소 분해속도의 수직 분포는 그 변이의 폭이 대개 3배 이내로 작았다. 이러한 요소의 분해 속도는 일차생산의 질소 요구량의 0.2~88.4%에 해당되는 것으로 추정되었으며, 특히 일차생산이 낮은($<50 \text{ mg C m}^{-2}\text{d}^{-1}$) 경우에 요소는 일차생산자에 대한 질소의 매우 중요한 공급원으로 나타났다.

To understand the significance of urea in the pool size of nitrogenous nutrients and in nitrogen (N) requirements of primary producers in an estuarine system of Mankyung and Dongjin rivers (MD-estuary), Korea, we investigated 5 times the distributions of urea and other inorganic nitrogenous nutrients, and urea decomposition rates between June 1992 and February 1994. Urea concentration during the study period ranged from undetectable to $12.5 \mu\text{g-at. N l}^{-1}$, contributing to 0-96% (mean of 11%) of the total nitrogenous nutrients in the study area. Urea comprised a major component of the total nitrogenous nutrients when concentration of total nitrogenous nutrients was low. Urea decomposition rates in the water column ranged from 0.02 to 5.77 nM h^{-1} , and netplankton was the major decomposer of urea. Vertical distributions of urea decomposition rates in the water column showed generally small variabilities (i.e. <3 fold). The decomposition rates of urea in the MD estuary would supply 0.2~88.4% of phytoplankton N requirements. The major contribution of urea to phytoplankton N requirements was found when phytoplankton production was low ($<50 \text{ mg C m}^{-2}\text{d}^{-1}$).

서 론

요소가 유광대에서 주로 식물플랑크톤에 의해 이용되는 잘 알려져 있다(McCarthy, 1972; Mitamura

and Saijo, 1975; Turley, 1985). 그 동안 다양한 해양 환경에서 많은 연구들이 수행된 결과, 해양에서 요소 농도의 분포와 요소의 분해에 영향을 주는 환경 요인들이 상세히 밝혀졌다(Remsen, 1971; Remsen

*본 연구는 교육부 학술진흥재단의 지원 (만경·동진강 하구역에 있어서 미소생물의 성장에 의한 유기물 이용과 저서 생물 군집의 생물량 및 생산성 연구, 과제번호:BSRI-93-552)에 의해 수행되었음.

et al., 1974; Turley, 1985; Sapozhnikov and Propp, 1988). 빛, 암모니아 농도 및 요소의 농도가 요소 분해 속도에 대한 주요 환경 요인으로 알려져 있으며, 만경·동진강 하구계에서도 이를 지지하는 연구 결과가 보고되었다(Park et al., 1993). 즉, 식물플랑크톤에 의한 요소의 분해는 빛을 요구하며, 높은 암모니아 농도에 의해 억제되며, 요소의 농도에 의존함이 보고되었다. 또한 식물플랑크톤에 의해 분해된 요소의 질소는 표영 환경(pelagic environments)에서 일차생산자의 질소 요구량에 중요한 부분을 차지하는 것으로 알려져 있다. 한 예로서 McCarthy(1972)는 남가주 연안역에서 요소가 일차생산력의 질소 요구량의 28%를 충족시킴을 보고하였다. 반면에 하구계에서 이러한 정보는 적게 알려져 있다(Webb and Haas, 1976). 특히 수심이 얇고, 항시 조석에 의한 혼합이 이뤄지는 만경·동진강 하구계에서(Shim et al., 1991; Cho and Shim, 1992) 요소 농도와 요소 분해 속도의 분포에 대한 연구는 처음 실시되어, 현장의 요소 농도와 요소 분해 속도의 분포, 그리고 일차생산자의 질소 요구에 요소가 갖는 중요성을 규명하는 흥미롭다고 하겠다.

본 연구의 주요 목적은 (1) 만경·동진강 하구계에서 질소계 영양염 pool에 있어서 요소가 차지하는 중요성, (2) 요소 분해 속도의 분포, (3) 일차생산자의 질소요구에 있어서 요소의 중요성, 그리고 (4) 요소의 중요성이 총 영양염 농도와 일차생산력 등의 환경변화와 관련하여 어떻게 변화하는가를 이해함에 있다.

재료 및 방법

만경·동진강 하구계에서 (126°30'E~126°45'E, 35°45'N~35°55'N, Fig. 1) 1992년 6월부터 1994년 2월까지 5회에 걸쳐 연구가 시행되었다. 요소의 농도 측정과 요소의 분해속도 측정 방법은 Park et al. (1993)에 상세하게 기술되어 있다. 간단히 기술하면, 요소 농도의 측정은 diacetyl monoxime법(Price and Harrison, 1987)을 따랐고, 요소 분해 속도의 측정은 ¹⁴C-요소를 이용한 respirometry를 사용하였다(Park et al., 1993). 식물플랑크톤의 크기에 따른 요소분해 속도의 측정(size-fractionation)을 위해 시료를 0.2 μm Nuclepore filter로 여과한 해수, 1.2 μm Milli-

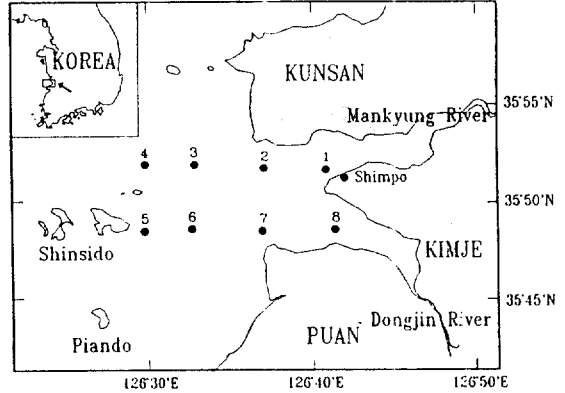


Fig. 1. Sampling stations in an estuarine system of Mankyung and Dongjin rivers during a study from June 1992 to February 1994.

pore filter로 여과한 해수, 20 μm mesh-size의 Nitex로 여과한 해수, 그리고 여과하지 않은 해수를 위와 같은 방법으로 현장의 빛 조건하에서 배양하였다. 배양후에 각각의 배양으로부터 요소분해 속도를 측정하고, 플랑크톤 크기에 따른 요소 분해 속도는 아래와 같이 구했다: 0.2 μm Nuclepore filter로 여과한 해수에 있는 요소 분해 속도는 용존 요소 분해 효소에 의한 요소의 분해로 간주하였다. picoplankton에 의한 요소분해 속도는 1.2 μm filtrate의 요소 분해 속도로부터 용존 요소 분해 효소에 의한 요소의 분해 속도를 뺀 값으로, nanoplankton에 의한 요소 분해 속도는 20 μm filtrate의 요소 분해 속도로부터 picoplankton에 의한 요소의 분해 속도를 뺀 값으로, netplankton에 의한 요소 분해 속도는 전체 해수의 요소분해 속도로부터 nanoplankton에 의한 요소의 분해 속도를 뺀 값으로 구했다. 박테리아에 의한 요소의 분해는 GF/C filter로 여과한 해수를 빛이 없는 상태에서 현장 배양하여 얻은 요소 분해 속도로부터 용존 요소 분해 효소에 의한 요소 분해 속도를 뺀 값으로 구했다. 질산염 및 아질산염 농도의 분석, 엽록소의 분석, 그리고 ¹⁴C-HCO₃⁻을 이용한 일차생산력의 측정은 Parsons et al.(1984)를 따랐다. 암모늄염 농도의 분석은 Grasshoff et al. (1983)의 방법을 따랐다. 해수는 니스킨 채수기로(5) 채수하였고, 수온과 염분은 T-S bridge(Hydro-Bios type MC5)로 측정하였으며, 투명도는 직경 30 cm의 Secchi disk로 측정하였으며, 유광대는 Secchi depth×2.7로 정의하였다.

결 과

1. 수온과 염분의 분포

전체 조사기간 동안 만경·동진강 하구계의 모든 정점에서 수온과 염분의 분포는 수직적으로 거의 균일함을 나타냈다(Fig. 2). 수온은 1992년 6월에 약 18~20°C 이었으며, 1992년 10월에는 이보다 낮은 10~16°C 이었고, 1993년 2월에는 4~5°C 이었다. 1993년 10월에는 1992년 10월보다 약 5°C 정도 높은 15~20°C 인 반면, 1994년 2월에는 1993년 2월과 유사한 4~5°C 이었다. 염분은 1992년 6월에 30~34‰이었고, 1992년 10월에 29~34‰, 1993년 2월에 27~32‰이었다. 1993년 10월에는 1992년 10월보다 약간 낮은 28~31‰이었으며, 1994년 2월에는 1993년 2월보다 많이 낮은 18~24‰이었다.

2. 요소 농도의 분포

요소의 농도는 수온과 염분처럼 수직적으로 균일한 분포를 나타내지 않았다(Table 1). 이는 요소의 생성이나 분해가 수층내에서 상당한 속도로 일어남을 제시한다(아래 참조). 요소는 조사기간 동안 미검출 수준에서 12.5 $\mu\text{g-at. N l}^{-1}$ 의 범위에 걸쳐 분포하였으며, 이는 총 질소계 영양염(요소+암모늄염+질산염+아질산염) 농도의 0~96%(총 평균 11%)를 차지하는 것이었다(Table 1). 요소가 총 질소계 영양염 농도의 40% 이상을 차지하는 경우는 1992년 6월의 정점 5와 7, 그리고 1993년 10월의 정점 5로서, 흥미롭게도 이 경우 총 질소계 영양염 농도의 수준(0.75~7.92 $\mu\text{g-at. N l}^{-1}$, Table 1)은 다른 경우와 비교시 낮았다. 요소가 총 질소계 영양염 농도의 25% 이하인 경우 총 질소계 영양염 농도는 4.3~97.9 $\mu\text{g-at. N l}^{-1}$ 에 달하였다.

조사기간 동안 만경·동진강 하구계에서 영양염 분포의 주요 특징으로는 첫째, 강 하구에 가까운 정점 1과 3에서 암모니아가 항상 총 질소계 영양염 농도에서 매우 우세한 영양염이며(Table 1), 1992년 5월에는 모든 조사 정점에서 요소 또는 암모니아가 총 질소계 영양염 농도에서 우세한 영양염이라는 사실이었다. 둘째로, 질산염이 총 질소계 영양염 농도에서 우세한 질소계 영양염인 경우는 1992년 10월 정점 3과 5, 1993년 2월 정점 5와 7, 1993년 10월의 정점 5, 그리고 1994년 2월의 정점 5이었다. 즉, 정점

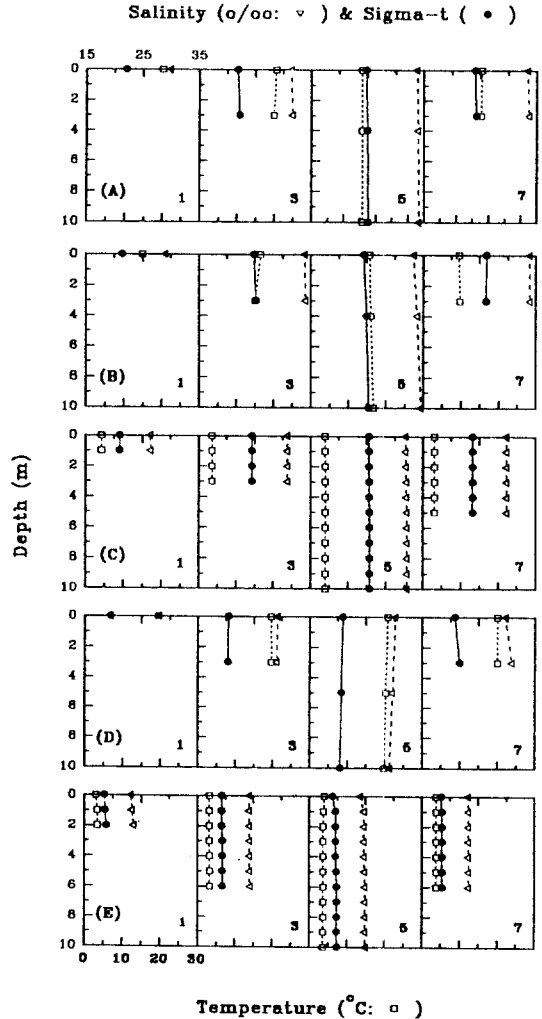


Fig. 2. Vertical profiles of salinity, seawater temperature, and density from June 1992 to February 1994. Open triangles represent salinity, open squares water temperature, and filled circles density. Numbers in the panels represent station numbers. Panel (A) represents June, 1992; (B) October, 1992; (C) February, 1993; (D) October, 1993; (E) February, 1994.

5에서는 10월과 2월에 질산염이 총 질소계 영양염 농도에서 우세하게 나타났다. 만경·동진강 하구계에서 총 질소계 영양염의 농도는 조사기간 중 1992년 6월에 제일 낮은 분포를 나타냈다(0.75~17.48 $\mu\text{g-at. N l}^{-1}$). 나머지 기간에는 대체로 유사한 범위의 총 질소계 영양염의 농도를 나타냈으며, 최소치와 최대치는 각각 4 $\mu\text{g-at. N l}^{-1}$ 과 98 $\mu\text{g-at. N l}^{-1}$ 이

Table 1. Concentrations of urea and other nitrogenous compounds in the estuarine system of Mankyung and Dongjin rivers. Values are expressed in $\mu\text{g-at N l}^{-1}$.

Station	Depth (m)	Urea-N		$\text{NH}_4^+\text{-N}$		$\text{NO}_2^-\text{-N}$		$\text{NO}_3^-\text{-N}$		Sum Conc.
		Conc.	%	Conc.	%	Conc.	%	Conc.	%*	
Jun. 5, 1992										
1	0	3.48	19.9	8.63	49.4	1.31	7.5	4.06	23.2	17.48
3	0	1.34	24.4	2.91	53.0	0.33	6.0	0.91	16.6	5.49
	3	0.96	19.5	2.73	55.5	0.34	6.9	0.89	18.1	4.92
5	0	0.72	96.0	n.d.	0	0.03	4.0	n.d.	0	0.75
	4	1.44	69.9	0.57	27.7	0.05	2.4	n.d.	0	2.06
	10	0.62	69.7	0.24	27.0	0.03	3.4	n.d.	0	0.89
7	0	1.54	95.7	n.d.*	0	0.07	4.3	n.d.	0	1.61
	3	1.66	77.9	n.d.	0	0.10	4.7	0.37	17.4	2.13
Oct. 31, 1992										
1	0	12.50	17.6	31.95	44.9	2.70	3.8	23.97	33.7	71.12
3	0	2.98	8.4	10.98	30.9	0.89	2.5	20.68	58.2	35.53
	3	5.02	12.5	13.55	33.8	0.84	2.1	20.64	51.5	40.05
5	0	2.24	8.8	4.01	15.8	0.40	1.6	18.69	73.8	25.34
	4	2.88	11.1	3.39	13.0	0.60	2.3	19.18	73.6	26.05
	10	2.24	8.9	2.93	11.6	0.49	1.9	19.53	77.5	25.19
7	0	3.20	17.6	9.12	50.2	0.64	3.5	5.21	28.7	18.17
	3	5.44	19.1	8.96	31.4	0.82	2.9	13.29	46.6	28.51
Feb. 27, 1993										
1	0	2.32	3.1	43.85	58.0	1.32	1.7	28.11	37.2	75.60
3	0	n.d.	0	6.42	60.6	0.21	2.0	3.94	37.2	10.57
	1	0.32	2.9	6.22	57.0	0.20	1.8	4.18	38.3	10.92
	3	0.94	13.0	5.59	77.5	0.05	0.7	0.63	8.7	7.21
5	0	0.16	2.6	0.67	10.9	0.09	1.5	5.21	85.0	6.13
	3	n.d.	0	2.49	46.5	0.11	2.1	2.75	51.4	5.35
	5	0.32	5.9	1.09	20.0	0.10	1.8	3.94	72.3	5.45
7	10	n.d.	0	1.10	25.8	0.08	1.9	3.07	71.9	4.25
	0	0.16	1.0	6.01	38.4	0.42	2.7	9.07	57.9	15.66
	1	0.16	1.1	5.05	34.5	0.44	3.0	8.97	61.4	14.62
	3	1.70	14.1	5.59	46.3	0.25	2.1	4.54	37.6	12.08
Oct. 9, 1993										
1	0	4.18	6.3	43.48	66.0	2.46	3.7	15.71	23.9	65.83
3	0	4.18	20.3	8.73	42.4	1.10	5.3	6.60	32.0	20.61
	3	0.94	5.0	10.39	55.8	0.90	4.8	6.39	34.3	18.62
5	0	1.96	40.8	n.d.	0	0.42	8.8	2.42	50.4	4.80
	5	4.18	52.8	n.d.	0	0.85	10.7	2.89	36.5	7.92
	10	4.00	51.0	n.d.	0	0.59	7.5	3.26	41.5	7.85
7	0	2.48	17.6	7.09	50.2	0.64	4.5	3.91	27.7	14.12
	3	4.34	23.7	7.00	38.2	0.93	5.1	6.05	33.0	18.32
Feb. 18, 1994										
1	0	2.12	2.2	75.93	77.6	1.06	1.1	18.80	19.2	97.91
3	0	1.34	4.6	17.08	58.5	0.44	1.5	10.36	35.5	29.22
	3	3.60	10.8	17.47	52.6	0.43	1.3	11.74	35.3	33.24
5	0	1.56	15.3	0.26	2.5	0.36	3.5	8.02	78.6	10.20
	5	—	—	0.36	—	0.33	—	6.79	—	—
	10	—	—	0.22	—	0.22	—	5.73	—	—
7	0	2.36	—	—	—	0.59	—	12.25	—	—
	3	2.06	—	—	—	0.56	—	11.14	—	—
Average		2.28	11.3	9.07	45.0	0.58	2.9	8.23	40.8	20.16

*The percentages represent the ratio of each nitrogen form to total dissolved nitrogen (i.e., Urea-N + $\text{NH}_4^+\text{-N}$ + $\text{NO}_2^-\text{-N}$ + $\text{NO}_3^-\text{-N}$).

#n.d.; not detectable

었다.

3. 요소 분해 속도의 분포

요소의 분해 속도는 조사기간 동안 유광대와 무광대를 포함하여 0.02 nM h⁻¹에서 5.77 nM h⁻¹에 달하였고, 대개 0.5 nM h⁻¹에서 3 nM h⁻¹에 분포하였다(Table 2). 유광대와 무광대에 분포하는 요소

의 분해 속도는 대체로 큰 차이가 나타나지 않았으며 (Fig. 3), 수층내에서 그 차이는 대개 3배 이내에 분포하였다. 극단적인 경우에는 29.5배(1993년 2월 정점 5)와 42배 (1993년 2월 정점3)의 범위도 나타났다 (Table 2, Fig. 3C). 유광대내에서 요소 분해 속도의 최대치는 1994년 2월 정점 7의 0 m 시료에서 4.6 nM h⁻¹을, 최소치는 1993년 2월 정점 3의 0 m 시료에서

Table 2. Urea decomposition rates in seawater, chlorophyll *a* (Chl *a*), urea decomposition index, the percentage of bacterial fraction in whole seawater activity, and turnover times (T.O.T.) of *in situ* urea in the estuarine system of Mankyung and Dongjin rivers. RSWD and BD are the decomposition of urea in whole seawater and bacterial fraction, respectively.

Station	Depth (m)	Urea decomposition (nM h ⁻¹)	Chl <i>a</i> (µg l ⁻¹)	Urea decomposition index (nmol µgChl <i>a</i> ⁻¹ h ⁻¹)	$\frac{BD}{RSWD}$ (%)	T.O.T. (d)
Jun. 5, 1992						
1	0	3.87	12.73	0.304	0	18.8
3	0	0.57	7.30	0.078	0	49.2
5	0	0.53	4.36	0.123	0	28.4
	4	1.33	4.32	0.308	—	22.7
	10*	1.06	4.01	0.265	—	12.2
Oct. 31, 1992						
1	0	1.80	9.56	0.188	—	145
3	0	1.25	9.10	0.130	5.7	49.6
	3*	0.50	9.75	0.031	40.6	209
5	0	0.98	5.33	0.183	0	47.8
	4*	0.18	4.42	0.041	0	332
	10*	0.19	3.90	0.047	0	253
7	0	1.00	8.45	0.119	0	67
	3*	0.86	11.70	0.060	18.4	133
Feb. 27, 1993						
1	0	3.94	22.80	0.161	6.7	12.3
3	0	—	9.50	0.013	0	—
	3*	5.05	23.60	0.214	0.1	3.9
5	0	0.59	9.75	0.060	0	5.7
	5*	0.52	5.00	0.103	0.8	12.8
	10*	—	13.65	0.002	0	—
7	0	0.95	33.10	0.029	0	3.5
	3*	3.43	32.95	0.104	0.6	10.3
Oct. 9, 1993						
3	0	0.98	3.83	0.255	—	41.8
	3*	0.80	11.39	0.071	—	113
5	0	1.92	5.01	0.383	—	21.3
	10*	1.13	4.60	0.245	—	73.9
7	0	2.22	6.87	0.323	—	23.3
	3*	2.57	7.88	0.326	—	35.2
Feb. 18, 1994						
1	0	1.91	1.95	0.953	2.8	34.0
3	0	0.96	1.33	0.691	3.9	29.2
	3*	0.32	1.33	0.239	0	236
5	0	1.51	1.95	0.776	0	21.5
7	0	4.64	1.62	2.428	15.3	10.6
	3*	5.77	1.24	4.656	0	7.4

*Samples from the aphotic zone.

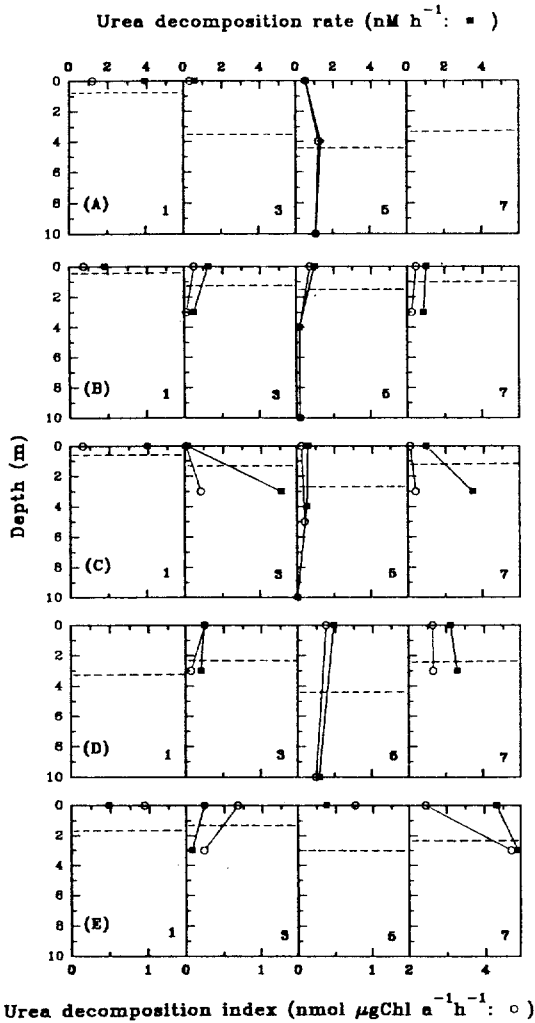


Fig. 3. Vertical profiles of urea decomposition (filled squares: total urea decomposition, open circles: urea decomposition index). Dotted line in the panel represents the bottom of the euphotic zone. Numbers in the panels represent station numbers. Panel (A) represents June, 1992; (B) October, 1992; (C) February, 1993; (D) October, 1993; (E) February, 1994.

0.1 nM h⁻¹을 각각 보였다. 무광대내에서 요소 분해의 최대치는 1994년 2월 정점 7의 3m 시료에서 5.8 nM h⁻¹을, 최소치는 1993년 2월 정점 5의 10m 시료에서 0.02 nM h⁻¹을 각각 나타냈다. 요소의 높은 분해 속도는(>2 nM h⁻¹) 대개 2월에 주로 연안에 가까운 정점인 1과 7에서 나타났다. 이러한 요소의 분해는 주로 식물플랑크톤에 의한 것으로 보인다

(Tables 2 & 3). 이에 대한 예외의 경우는 1992년 10월 정점 3의 수심 3m 시료와(Table 2), 1992년 11월 심포의 표층 시료에서 나타났다(Table 3). 이 경우 박테리아에 해당하는 size-fraction이 전체 요소 분해 속도의 40.6~64.4%를 나타냈다. 그러나 조사된 27개의 시료중에서 4 경우를 제외하면 박테리아는 대체로 전체 요소 분해 속도의 7% 이하를 기여하는 것으로 나타났다(Tables 2 & 3). 1993년 2월에 실시한 상세한 size-fractionation에 따른 요소의 분해 속도의 분포 조사는 정점 1과 7의 경우 netplankton이 우세한(93.3~96.9%) 요소의 분해자임을 나타냈다(Table 3). 박테리아가 전체 요소 분해의 64.4%를 차지한 1992년 11월 심포의 경우에도 식물플랑크톤에 의한 요소의 분해는 주로 netplankton이 상대적으로 우세함을 나타내고 있었다. 그러나 이러한 요소 분해의 크기 구배내의 분포는 엽록소의 크기 구배내의 분포와 반드시 일치하지 않음을 보인다(Table 3). 유광대에서 요소 분해에 의한 요소의 회전 시간은(turnover time) 1993년 2월이 가장 빨랐던 반면에(3~12일), 1992년 10월이 가장 느렸고(48~145일), 나머지 기간들은 그 중간의 범위를 나타냈다(11~49일, Table 2). 요소의 회전 시간은 수온과 유의성있는 상관관계를 나타내지 않았다($r^2 = 0.24, p = 0.18$).

요소 분해 지수(urea decomposition index)는 조사기간 동안 0.002~4.656 nmol μg Chl a⁻¹ h⁻¹의 범위를 나타내어 매우 넓은 변이를 나타냈다. 요소 분해의 지수는 1992년 6월에서 1993년 10월까지 대개 0.03~0.4 nmol μg Chl a⁻¹ h⁻¹의 범위였으나, 1994년 2월에는 이 보다 높은 0.24~4.66 nmol μg Chl a⁻¹ h⁻¹의 범위를 나타냈다. 한 정점내에서 요소 분해 지수의 수직적 분포는 요소의 분해 속도 분포와 유사한 경향을 보였으며(Fig. 3), 수층내에서 요소 분해 지수의 분포의 범위는 대개 1~5배 이내에 분포함을 보였다(Table 2). 극단적인 경우에는 수층내에서 요소 분해 지수의 수직적 분포의 범위가 30배(1993년 2월 정점 5)와 16.5배가(1993년 2월 정점 3) 되는 경우도 있었다(Table 2).

4. 요소의 분해 속도와 일차생산자의 질소요구량

요소의 분해에 의한 질소의 공급은 일차생산자의 질소 요구량의 0.2~88.4%에 달하였다(Table 4). 만

Table 3. Size-fractionated rates of urea decomposition. Samples were collected at the surface at Shimpo located in the vicinity of the mouth of the Mankyung River in November 1992, and at the surface at stations 1 and 4 in February 1993.

Location	Date & Time	Size-fractions	Urea ($\mu\text{g-at. N l}^{-1}$)	Urea decomposition rate ($\text{pmol l}^{-1} \text{h}^{-1}$)		Chlorophyll <i>a</i> ($\mu\text{g l}^{-1}$)		Urea decomposition index ($\text{pmol } \mu\text{gChl } a^{-1} \text{h}^{-1}$)
					% of total		% of total	
Shimpo	Nov. 1, 1992, 15:00 h	Total	4.80	397.0	—	10.7	—	37.1
		Netplankton		115.4	29.1	2.9	27.3	39.8
		Nanoplankton		26.0	6.5	4.3	39.6	6.0
		Picoplankton		n.d.	0	3.6	33.1	0.0
		Bacteria*		255.6	64.4	—	—	—
Strn 1	Feb. 27, 1993, 17:00 h	Total	2.32	3934.7	—	22.8	—	172.6
		Netplankton		3671.4	93.3	11.4	50.0	322.1
		Nanoplankton		n.d.	0	10.0	43.9	0.0
		Picoplankton		n.d.	0	1.4	6.1	0.0
		Bacteria*		263.3	6.7	—	—	—
Strn 7	Feb 27, 1993, 09:00 h	Total	0.16	950.7	—	33.1	—	28.7
		Netplankton		921.2	96.9	27.7	83.7	33.3
		Nanoplankton		20.4	2.1	4.9	14.8	4.2
		Picoplankton		9.2	1.0	0.5	1.5	18.4
		Bacteria*		n.d.	0	—	—	—
		<0.2 μm filtrate		n.d.	0	—	—	—

*Bacterial fractions including <0.2 μm fraction

Table 4. Contribution of urea-N to the N requirements of phytoplankton production. Nitrogen requirement in phytoplankton was calculated on the basis of Redfield C/N ratio of 6.6. $\int \text{NH}_4^+ dz$ represents the water column depth-integrated (Strn 3 & 7, 5 m deep; Strn 5, 20 m deep) ammonium production rates via urea decomposition. To calculate daily urea decomposition rates, light period was assumed as 14 h in summer, 12 h in autumn, and 8 h in winter, respectively. Pg and Pn represent gross and net primary production, respectively. Net production was calculated assuming that 5% of P_{max} was respired (Cole *et al.*, 1992)

Date/Station	$\int \text{NH}_4^+ dz$ ($\text{mgN m}^{-2}\text{d}^{-1}$)	Primary production ($\text{mgC m}^{-2}\text{d}^{-1}$)		N requirement ($\text{mgN m}^{-2}\text{d}^{-1}$)		Supply (%)	
		Pg	Pn	Pg	Pn	Pg	Pn
Jun. 1992							
5	8.46	207	193	37	34	23.1	24.8
Oct. 1992							
3	1.20	52	44	9	8	13.2	15.4
5	1.75	410	363	73	64	2.4	2.7
7	1.50	28	10	5	2	30.6	88.2
Feb. 1993							
5	0.97	1204	965	213	171	0.5	0.6
7	3.00	2471	1864	437	330	0.7	1.0
Oct. 1993							
3	1.45	5683	5399	1006	956	0.1	0.2
5	8.95	10847	10304	1920	1824	0.5	0.5
7	4.10	14392	13673	2547	2420	0.2	0.2
Feb. 1994							
3	0.57	195	185	35	33	1.7	1.7
7	6.10	41	39	7	7	83.6	88.4

경·동진강 하구계에서 요소가 일차생산의 질소 요구량의 15% 이상을 공급하는 경우는, 주로 일차생

산이 낮을 때(총 일차생산력이 약 $200 \text{ mg C m}^{-2}\text{d}^{-1}$ 이하) 나타났으며, 이러한 현상은 조사시기와는 무

관한 듯 하였다(Table 4). 이에 대한 예외적인 경우로 1994년 2월의 정점 3을 들 수 있으며(총 일차생산력이 $194.9 \text{ mg C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$), 이 경우 요소 분해에 의한 질소 공급은 질소 요구량의 오직 1.7%만을 충족하는 것으로 나타났는데, 이는 암모늄염의 농도($17 \text{ } \mu\text{g-at. N l}^{-1}$, Tables 1 & 2)가 요소 농도보다 4.9~12.7배 높았음과 관련이 있는 듯 하였다. 특기할만한 결과는 1992년 10월 정점 7과 1994년 2월 정점 7에서 질산염의 농도가 비교적 높은 경우임에도($5 \sim 13 \text{ } \mu\text{g-at. N l}^{-1}$) 요소 분해가 순일차생산의 질소요구량의 88%를 공급할 수 있다는 사실이었다.

고 찰

주목할만한 연구 결과로는 첫째, 요소가 총 질소계 영양염 중에서 그 상대적 중요성이 인정되는 경우는 총 질소계 영양염의 농도가 낮은 경우였다는 것과, 둘째, 총 일차생산력이 매우 낮은 ($<50 \text{ mg C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) 경우에 요소 분해에 의한 질소의 공급이 일차생산자의 질소 요구에 중요한 기여를 하였다는 점이다. 그리고 흥미로운 관찰로는 무광대내의 요소 분해의 속도가 유광대내에서와 유사하거나 또는 더 높은 경우도 존재했었다는 것이다. 아래에서 요소가 만경·동진강 하구계에서 갖는 생지화학적 의미에 대해 상세히 토의하고자 한다.

요소의 농도는 만경·동진강 하구계에서 조사기간 동안 미검출 수준에서 $12.5 \text{ } \mu\text{g-at. N l}^{-1}$ 의 범위에 걸쳐 분포하였으며, 이는 총 질소계 영양염 농도의 0~96%(총 평균 11%)를 차지하는 것이었다(Table 1). 이러한 수준의 요소 농도의 분포는 하구역에서 흔히 나타나는 것으로 보이며(Remsen *et al.*, 1972, 1974; Webb and Haas, 1976), 이러한 결과는 Steinmann(1976)이 Kiel만에서 보고한 요소 농도의 범위 ($0.02 \sim 9.04 \text{ } \mu\text{g-at. N l}^{-1}$)와 매우 유사하였다. 특히 요소가 Kiel만에서 총 질소계 영양염 농도의 0.4~79.2%를 차지하였다는 결과(Steinmann, 1976)와도 매우 유사하였다. 만경·동진강 하구계에서 나타난 결과를 이전에 보고된 다른 연구 결과들과 비교하기 위해 Fig. 4에 함께 나타내었다. Remsen *et al.*(1974)은 Cape Cod와 Cape May사이의 연안역에서 요소가 총 질소계 영양염 중의 평균 56%(범위: 10.6~72.2%)를, Savidge and Hutley(1977)는 북 아일랜드의

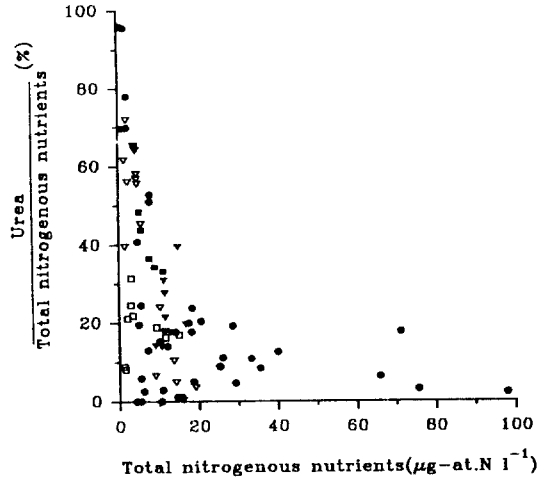


Fig. 4. A plot of total nitrogenous nutrients vs. percentage of urea in total nitrogenous nutrients. Open triangles represent data from Remsen *et al.* (1974); closed triangles Mitamura and Saijo (1975); open squares Savidge and Hutley (1977); closed squares Turley (1985); closed circles this study.

Strangford Lough에서 평균 18.5%(범위: 8.2~31.4%)를 차지함을 보고하였다. 또한 Turley(1985)는 서부 Irish해에서 요소가 총 질소계 영양염 중의 평균 31.7%(범위: 33.1~48.4%)를, Mitamura and Saijo(1975)는 Mikawa만에서 평균 22.7%(범위: 14.2~39.6%)를 차지함을 보고하였다. 이러한 기존의 연구 결과들은(Fig. 4) 만경·동진강 하구계에서 나타난 경향과 일치하였다. 즉, 요소가 총 질소계 영양염 농도의 높은 부분을 차지하는 경우는 총 질소계 영양염 농도의 수준이 낮았다(Table 1, Fig. 4). 한 예로서, 총 질소계 영양염의 농도가 조사기간 중 낮은($0.8 \sim 2.1 \text{ } \mu\text{g-at. N l}^{-1}$) 분포를 나타낸 1992년 6월에, 요소는 총 질소계 영양염 농도의 가장 높은 (70~96%) 부분을 나타냈다. 한편 퇴적물에 가까운 수심에서 요소의 농도가 현저히 증가한 경우가 1993년 2월 정점 3과 7에서 처럼 종종 발견되는데, Quoil estuary에서도 Savidge and Johnston(1987)는 이러한 현상을 보고하였다. 이는 퇴적층에서 요소의 배출 또는 퇴적물의 재부유시 퇴적물에 흡착된 요소가 탈착됨으로 설명될 수 있는 것 같다. 만경·동진강 하구계의 입구에 위치한 정점들에서는 각 조사시기 마다 가장 높은 요소의 농도가 나타났다. 이는 강을 통해 이 지역으로 인분 및 축산 폐수 또는

농업 및 생활 하수 등의 유입 가능성을 제시하는 것으로 보인다. 또한 정점 1과 3에서 관찰된 암모늄염은 2.7~75.9 $\mu\text{g-at. N l}^{-1}$ (평균 농도 19.1 $\mu\text{g-at. N l}^{-1}$)로 높은 농도를 나타냈으며, 정점 1과 3의 총 질소계 영양염 농도(평균 34.02 $\mu\text{g-at. N l}^{-1}$)중에서 암모늄염이 평균 56%를 차지함은(Table 1 참고) 이러한 추론을 뒷받침한다.

만경·동진강 하구계에서 연구기간 동안 관찰된 요소의 분해 속도는 대체로 0.5~3 nM h^{-1} 의 분포를 보였다(Table 2). 이러한 값은 유사한 계절에 서부 Irish해의 혼합수 환경에서 Turley(1985)가 관찰한 요소의 분해 속도 범위(0.2~12 nM h^{-1})와 비교시 낮은 값에 해당되는 것으로 나타났다. 또한 Webb and Haas(1976)가 York강 하구에서 측정된 값의 범위(2~87 nM h^{-1})와 비교시에도 낮았으며, Remsen *et al.*(1972)이 Savannah-Wilmington-Ogeechee 강 하구의 기수역에서 측정된 범위(2~56 nM h^{-1})와 비교시에도 낮았다. 그러나 Remsen *et al.*(1974)이 Mississippi강의 plume과 Louisiana 연안에서 측정된 요소의 분해 속도(0.48~5.08 nM h^{-1})와는 유사하였으며, Savidge and Hutley(1977)이 북아일랜드 Strangford Lough에서 보고한 요소의 분해속도(0.23~6.18 nM h^{-1})와도 유사하였다. 만경·동진강 하구계에서 측정된 요소 분해 속도의 값이 낮았던 것은 아마도 질소가 일차생산의 제한 인자로서의 압력이 낮았던 것에 기인한 것으로 생각된다(아래 참조). 한편 전반적으로 낮은 요소의 분해 속도에도 불구하고 요소 농도의 변화에 따라 요소의 회전 시간은 짧게는 3일에서 길게는 145일에 달하여, 일부 길게 나타난 경우를 제외하면 Mitamura and Saijo (1975, 1980)가 Sagami만과 Mikawa만의 유광대에서 보고한 요소의 회전 시간(5~30일)과 유사하였고 Remsen *et al.*(1972)이 Savannah-Wilmington-Ogeechee강 하구의 기수역에서 보고한 요소의 회전 시간(0.9~61.0일, 평균 10.3일)과도 유사하였다.

요소 분해 속도의 수직 분포상의 특징으로는 요소의 분해 속도가 수층내에서 그 변화의 폭이 대체로 크지 않았다는 점(3배 이내의 수직적 변이)과 무광대에서 요소 분해의 속도가 유광대보다 더 높은 경우도 존재한다는 것이었다(Fig. 3). 일반적으로 요소의 분해는 하구의 경우에도 빛의 영향을 받는 것으로 알려져 있으며(Webb and Haas, 1976), 본

연구의 결과도 많은 경우에 무광대에서 요소의 분해 속도가 감소한 경우가 나타났다. 빛이 유일한 요소 분해의 조절 요인이라면, 무광대에서 유광대에서의 유사한 요소의 분해 속도가 발견된 것은 매우 빠른 수층의 수직 혼합에 기인한 것으로 볼 수 있을 것이다. 그러나 무광대에서 더 높은 요소 분해의 속도가 4 경우에 발견된 바, 이는 다른 요인에 의해 설명되어야 할 것이다. 즉, 무광대에서 요소 농도의 증가로 인한 요소 분해 속도의 증가로 볼 수 있다. 예를 들면, 1993년 2월의 정점 3과 7의 무광대에서 요소의 분해 속도가 각각 0.12 nM h^{-1} 에서 5.05 nM h^{-1} 로 42.1배 증가, 0.95 nM h^{-1} 에서 3.43 nM h^{-1} 로 3.6배 증가하였는데(Fig. 3), 요소의 농도 또한 각각 미검출 수준에서 0.94 $\mu\text{g-at. N l}^{-1}$ 로, 0.16 $\mu\text{g-at. N l}^{-1}$ 에서 1.70 $\mu\text{g-at. N l}^{-1}$ 로 증가하였다(Table 1). 그리고 1993년 10월의 정점 7의 무광대에서도 요소의 분해 속도가 2.22 nM h^{-1} 에서 2.57 nM h^{-1} 로 1.2배 증가하였으며, 요소의 농도도 2.48 $\mu\text{g-at. N l}^{-1}$ 에서 4.34 $\mu\text{g-at. N l}^{-1}$ 로 1.8배 증가하였다. 이러한 경향은 요소의 분해 속도가 요소의 농도 변화에 영향을 받는다는(Park *et al.*, 1993) 결과와 잘 부합된다. 이 경우 모두 암모니아의 농도는 무광대에서 약간 낮거나 비슷하였다. 따라서 이러한 이례적인 요소의 분해 속도의 수직 분포는 수층내에서 암모니아 농도의 변화가 거의 없을 경우 빛과 요소의 농도에 의해 잘 설명될 수 있는 것으로 보인다. 이는 만경·동진강 하구계에서 식물플랑크톤에 의한 요소의 분해가 수층 혼합에 의한 영향을 받고 있으나, 동시에 어느 정도 식물플랑크톤이 주변 환경에 대해 적응하고 있음을 제시하는 것으로 보인다. 한편 1994년 2월 정점 7의 경우 무광대에서 요소 분해의 속도가 4.64 nM h^{-1} 에서 5.77 nM h^{-1} 로 1.2배 증가하였으나, 요소의 농도는 2.36 $\mu\text{g-at. N l}^{-1}$ 에서 2.06 $\mu\text{g-at. N l}^{-1}$ 로 1.1배 감소하여, 요소의 농도 변화만으로는 설명이 되지 않는다. 불행히도 이 경우에 암모니아의 농도 측정이 없어서 확인할 수는 없으나, 아마도 무광대내에서 암모니아 농도의 상당한 감소와 관련이 있는 것으로 보여진다.

만경·동진강 하구계에서 요소의 분해 결과로 생성된 질소는 식물플랑크톤의 질소 요구량의 0.2%에서 88.4%를 공급할 수 있는 것으로 나타났다(Table 4). 일차생산력의 질소 공급원으로서 요소의

중요한(15~88%) 기여는 주로 일차생산이 낮을 때 (총 일차생산력이 약 $200 \text{ mg C m}^{-2}\text{d}^{-1}$ 이하) 나타났으며, 이는 조사된 시기와는 무관하였다(Table 4). 여기서 일차생산력이 매우 낮았던($50 \text{ mg C m}^{-2}\text{d}^{-1}$ 이하) 1992년 10월(정점 7)과 1994년 2월(정점 7)에 요소의 분해가 일차생산자의 질소 요구량을 거의 충족시킬 수 있는 수준이었음은 특히 주목할 만하다. 반면에 총 일차생산력이 $400 \text{ mg C m}^{-2}\text{d}^{-1}$ 이상의 경우, 요소는 일차생산자의 질소 요구량에 3% 미만의 기여도를 보이고 있다. 만경·동진강 하구계에서 요소의 이러한 기여도는 이전의 다른 연구들과 비교시 유사하다(Fig. 5): 예를 들면, McCarthy(1972)는 일차생산이 대개 $516\sim 1754 \text{ mg C m}^{-2}\text{d}^{-1}$ 인 Southern California해에서 평균 28%, Harrison *et al.*(1985)은 일차생산이 대개 $189\sim 631 \text{ mg C m}^{-2}\text{d}^{-1}$ 인 동부 Arctic해에서 평균 32%, 그리고 Turley(1985)는 일차생산이 $32 \mu\text{g C l}^{-1}\text{d}^{-1}$ 인 서부 Irish 해에서 48%를 보고하였다. 또한 Webb and Haas(1976)에 의하면 York강 하구에서 7월과 8월에 식물플랑크톤 질소요구량의 14~45%를, 그리고 10월과 11월에는 5%를 요소가 기여하였다. 이러한 결과들은(Fig. 5) 일차생산이 낮은 경우에 요소가 질소원으로서 중요함을 시사하며, 일차생산력이 낮은 경우에 식물플랑크톤의 성장 유지에 중요한 것으로 보인다. 일차생산력이 낮았던($27.8\sim 41.1 \text{ mg C m}^{-2}\text{d}^{-1}$) 1992년 10월 정점 7과 1994년 2월 정점 7에서 질산염의 농도가 비교적 높은 경우에도 ($5\sim 13 \mu\text{g-at. N l}^{-1}$) 요소의 분해가 일차생산의 질소요구량의 88%를 공급할 수 있었다는 것은 이러한 추론을 뒷받침해 준다. 이에 대한 예외적인 경우는 1994년 2월 정점 3으로(총 일차생산력은 $194.9 \text{ mg C m}^{-2}\text{d}^{-1}$) 요소의 분해에 의한 질소 공급이 질소요구량의 오직 1.7%에 달하였다. 이는 암모늄염의 농도($17 \mu\text{g-at. N l}^{-1}$, Table 2)가 요소보다 4.9~12.7 배 높았음과 관련이 있는 듯하며, 이 경우 암모늄염을 선호하였거나, 또는 높은 농도의 암모늄염이 요소의 분해를 억제하였음에 기인한 듯하다.

요소의 분해에 참여하는 플랑크톤의 크기 구배에 대한 많은 연구가 있었으며, 그 결과 netplankton, nanoplankton, 또는 picoplankton의 상대적 중요성과 박테리아의 상대적 중요성이 밝혀졌다(Remsen *et al.*, 1972; Savidge and Hutley, 1977; Turley,

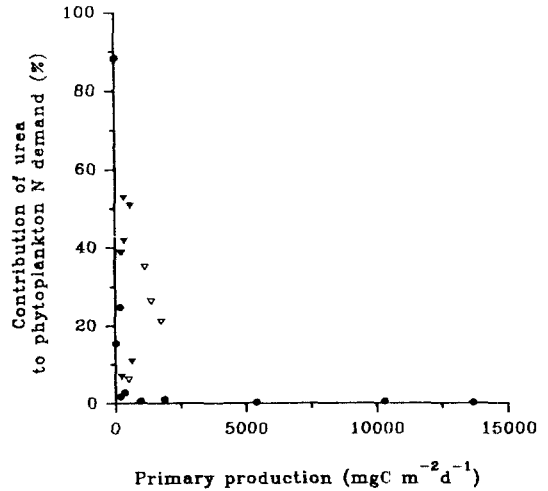


Fig. 5. A plot of primary production vs. contribution of urea (%) to phytoplankton nitrogen (N) demand. Closed triangles represent data from Harrison *et al.* (1985); open triangles McCarthy (1972); closed circles this study

1985). 즉, 연안 및 외양에서 요소 분해를 주로 담당하는 것은 식물플랑크톤임이 밝혀졌으며(Remsen *et al.*, 1972; Mitamura and Saijo, 1975; Turley, 1985), 본 연구는 이러한 연구 결과를 다시 입증하였다. Remsen *et al.*(1974)은 Georgia 근처 연안수와 북대서양에서 $10 \mu\text{m}$ 이상의 식물플랑크톤이 각각 요소 분해의 86%와 49%를 담당함을 보고하였다. Savidge and Hutley(1977)는 북 아일랜드 Strangford Lough에서 $3 \mu\text{m}$ 이하의 생물에 의해서는 단지 15%의 작은 부분을 담당한다고 한 반면, Savidge and Johnston(1987)은 북 아일랜드의 한 연하구에서 겨울에 $3 \mu\text{m}$ 이하(주로 박테리아로 구성)가 요소의 분해에 중요함을 밝혔다. 그러나 Turley(1985)는 $1 \mu\text{m}$ 크기 이하의 생물은 요소 분해의 활동도가 무시할만함을 보고하였다. 본 연구의 결과는 주로 $20 \mu\text{m}$ 이상의 식물플랑크톤이 주로 요소를 이용하는 것을 나타냈다(Table 3). 여기서 요소의 이용에 대한 종전의 연구 결과들을 본 연구 결과와 함께 종합하면, 부유물질이 비교적 많은 만경·동진강 하구에서도 netplankton 또는 nanoplankton이 연안 해양 환경에서 주로 요소를 이용하며, 앞서 논의한 바와 같이 예외적인 경우가(10% 이상의 기여도는 총 27회 측정 중에서 4번, Tables 2 & 3) 발견되긴 하나 picoplankton은 요소를 별로 이용하지 않는 것을 알

수 있다. 이러한 결론은 조사 지역의 부유물질에 부착한 박테리아를 고려하더라도(겨울철엔 박테리아의 19-90%가 부착 상태임, 겨울이 아닌 계절엔 총 박테리아의 <33% 이하임; 윤, 1994; 최 동한, 미발표 자료) 박테리아에 의한 요소의 분해가 전체에 기여함이 낮다는 결론에는 크게 영향을 주지 않는 것으로 보인다. 즉, 부착 상태의 박테리아가 19~90%까지 나타나는 1994년 2월의 경우에 부착박테리아의 요소 분해 속도가 자유 생활형 박테리아와 같다고(Table 3으로 부터 계산하면 $0.12 \sim 1.00 \text{ amol cell}^{-1} \text{ h}^{-1}$ 의 범위임) 가정하고 윤(1994)의 부착박테리아 자료를 이용하여 계산할 경우, 박테리아에 의한 기여는 2.8~15.3%의 범위에서 11.0~25.9%로 증가함을 추정할 수 있었다(not shown). 부착 박테리아의 성장은 대개 자유생활형 박테리아의 성장과 유사하거나 빠르므로(Griffith *et al.*, 1994) 질소의 제한이 자유생활형 박테리아 보다 적을 것으로 예상되며, 따라서 위의 추정치는 박테리아에 의한 요소의 분해에 있어서 최대의 기여로 추정된다. 한편 이러한 연구 결과는 일차생산자가 크기에 따라 질소계 영양염들의 이용에 있어서 구분이 된다는(즉, netplankton은 질산염을 주로 이용하고 nanoplankton과 picoplankton은 요소 또는 암모늄염을 이용한다는) 종전의 가설과 상반되는 것으로 보인다(Malone, 1980; Probyn *et al.*, 1990). 그러나 netplankton이 우점적으로 나타날 경우, 요소가 nanoplankton 또는 picoplankton 보다 netplankton에 의해 선호된 경우가 보고된 바도 있다(Probyn *et al.*, 1990). 또한 만경·동진강 하구계에서 우점적인 netplankton이 nanoplankton 또는 picoplankton 보다도 더 높은 요소 분해 지수의 값을 나타낸 것은(Table 3) Probyn *et al.*(1990)의 결과와도 일치한다.

본 연구의 결과에서 나타난 요소 분해 지수치의 범위는($0.002 \sim 4.7 \text{ nmol } \mu\text{g Chl } a^{-1} \text{ h}^{-1}$) 다른 연구 결과들과 비교시 낮은 수준임을 나타냈다: 예컨대 Turley(1985)에 의하면 서부 Irish 해에서 요소 분해 지수치의 범위는 $1.1 \sim 59.7 \text{ nmol } \mu\text{g Chl } a^{-1} \text{ h}^{-1}$, Remsen *et al.*(1972)은 Savannah-Wilmington-Ogeechee강 하구에서 $2.3 \sim 58.6 \text{ nmol } \mu\text{g Chl } a^{-1} \text{ h}^{-1}$, Silva(1985)는 Menai 해협에서 $3.5 \sim 8.1 \text{ nmol } \mu\text{g Chl } a^{-1} \text{ h}^{-1}$, 그리고 Savidge and Hutley(1977)은 Strangford Lough에서 $0.22 \sim 89.5 \text{ nmol } \mu\text{g Chl}$

$a^{-1} \text{ h}^{-1}$ 를 보고하였다. 이러한 차이는 부분적으로 만경·동진강 하구계에서 요소 분해의 속도가 낮았던 것과 엽록소의 농도가 비교적 높았던 것에 기인한 것으로 보인다. 만경 동진강 하구계에서 우점적인 netplankton이 요소를 이용하나, 그 이용 속도가 느린 사실은 다음과 같이 설명 될 수 있는 것으로 본다. 본 연구 해역은 요소의 농도가 비교적 높은 수준으로($>1 \mu\text{g-at. N l}^{-1}$) 유지되며 빛이 일차생산에 제한 요인인 혼탁한 하구로서(Alpine and Cloern, 1988), 우점적으로 나타나는 netplankton은 에너지 소비가 적게 요구되는 요소를 효과적으로 이용할 것으로 보인다. 그러나 암모늄염의 농도가 대체로 요소 농도보다 높게 존재하여(Table 1), 암모늄염에 의한 요소 분해의 억제가 일어나 요소의 분해 능력이 낮게 나타난 것으로 보여진다. 그리고 만경·동진강 하구계에서 관찰된 낮은 요소 분해의 지수치는 일차생산자의 성장에서 질소가 제한 영양염으로서 갖는 압력이 낮음을 시사하는 것으로 생각된다.

요약하면, 만경·동진강 하구계에서 요소가 식물플랑크톤의 영양염으로서 상대적 pool size가 큰 경우는 총 질소계 영양염의 농도가 낮은 경우이었다. 만경·동진강 하구계에서 식물플랑크톤이 주된 요소의 분해자이었으며, 특히 netplankton이 주로 분해하였다. 요소 분해에 의한 질소의 공급은 일차생산력이 낮은 경우에 일차생산자의 질소 요구량에 중요한 기여도를 나타냈다.

감사의 글

값진 논평을 주신 두 분의 심사위원들께 감사드리며, 현장에서 함께 작업을 하며 도와준 윤상선군, 최동한군과 오정순양에게 감사의 마음을 표한다.

참고문헌

- 윤상선. 1994. 수생환경의 영양상태에 따른 식물플랑크톤과 박테리아의 분포 및 상관관계. 서울대학교 석사 학위 논문. p.116.
- Alpine, A. E. and J. E. Cloern, 1988. Phytoplankton growth rates in a light-limited environment, San Francisco bay. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **44**: 167-173.
- Cho, B. C. and J. H. Shim, 1992. Significance of estuarine mixing in distribution of bacterial abundance and production in the estuarine system of the Mankyung River and Dongjin River, Korea. *J. Oceanol. Soc.*

- Kor.*, 27: 154-163.
- Cole, J.J., N.F. Caraco and B.L. Peierls, 1992. Can phytoplankton maintain a positive carbon balance in a turbid, freshwater, tidal estuary? *Limnol. Oceanogr.* 37: 1608-1617.
- Grasshoff, K., M. Ehrhardt and K. Kremling, 1983. Methods of Seawater Analysis. 2nd ed. Verlag. Chemie, Weinheim, Germany.
- Griffith, P., F.-K. Shiah, K. Gloersen, H.W. Ducklow, and M. Fletcher, 1994. Activity and distribution of attached bacteria in Chesapeake Bay. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 108: 1-10.
- Harrison, W.G., E.J.H. Head, R.J. Conover, A.R. Longhurst and D.D. Sameoto, 1985. The distribution and metabolism of urea in the eastern Canadian Arctic. *Deep-Sea Res.*, 32: 23-42.
- Malone, T.C. 1980. Size-fractionated primary production of marine phytoplankton. In: Primary Productivity in the Sea. Brookhaven Symp. Biol. 31. Plenum. p. 301-319.
- McCarthy, J.J., 1972. The uptake of urea by natural populations of marine phytoplankton. *Limnol. Oceanogr.*, 17: 738-748.
- Mitamura, O. and Y. Saijo, 1975. Decomposition of urea associated with photosynthesis of phytoplankton in coastal waters. *Mar. Biol.*, 30: 67-72.
- Mitamura, O. and Y. Saijo, 1980. In situ measurement of urea decomposition rate and its turnover rate in the Pacific Ocean. *Mar. Biol.*, 58: 147-152.
- Park, M.G., J.H. Shim and B.C. Cho, 1993. Adaptations of estuarine and freshwater phytoplankton to urea decomposition. *J. Oceanol. Soc. Kor.*, 28: 323-331.
- Parsons, T., Y. Maita and C.M. Lalli, 1984. A Manual of Chemical and Biological Methods for Seawater Analysis. Pergamon Press. Oxford, pp. 173.
- Price, N.M. and P.J. Harrison, 1987. A comparison of methods for the measurement of dissolved urea concentrations in seawater. *Mar. Biol.*, 92: 307-319.
- Probyn, T.A., H.N. Waldron and A.G. James, 1990. Size-fractionated measurements of nitrogen uptake in aged upwelled waters: implications for pelagic food webs. *Limnol. Oceanogr.* 35: 202-210.
- Remsen, C.C., E.J. Carpenter and B.W. Schroeder, 1972. Competition for urea among estuarine microorganisms. *Ecology*, 53: 921-926.
- Remsen, C.C., E.J. Carpenter and B.W. Schroeder, 1974. The role of urea in marine microbial ecology. In: Colwell, R.R., Morita, R.Y. (eds.) Effects of the Ocean Environment on Microbial Activities, Univ. Park press, Baltimore, p. 286-304.
- Remsen, C.C., 1971. The distribution of urea in coastal and oceanic waters. *Limnol. Oceanogr.*, 16: 732-740.
- Sapozhnikov, V.V. and L.M. Propp, 1988. General pattern of the vertical distribution of urea in Antarctic waters. *Mar. Biol. Vladivostok* N1: 60-63.
- Savidge, G. and H.T. Hutley, 1977. Rates of remineralization and assimilation of urea by fractionated plankton populations in coastal waters. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 28: 1-16.
- Savidge, G. and J.P. Johnston, 1987. Urea degradation rates by size-fractionated plankton populations in a temperate estuary. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 24: 433-447.
- Shim, J.H., Y.K. Shin and H.G. Yeo, 1991. Abiotic environment and primary producer of estuarine pelagic ecosystem in the lower water of the Mankyung river and the Dongjin river. I. Environmental characteristics and phytoplankton community structure. *J. Oceanogr. Soc. Kor.*, 26: 155-281.
- Silva, E.M., 1985. Microbial decomposition of urea in the Menai Straits. *Hydrobiologia*, 126: 245-251.
- Steinmann, J. 1976. Untersuchungen ber den bakteriellen Abbau von harnstoff und harnsäure in der westlichen Ostsee. *Botanica Marina*, 19: 47-58.
- Turley, C.M., 1985. Biological studies in the vicinity of a shallow-sea tidal mixing front. IV. Seasonal and spatial distribution of urea and its uptake by phytoplankton. *Phil. Trans. R. Soc. Lond.* B310: 471-500.
- Webb, K.L. and L.W. Haas, 1976. The significance of urea for phytoplankton nutrition in the York River, Virginia. In: Estuarine Processes, M. Wiley. (ed.), Academic Press. New York, pp. 90-102.