

황해 중동부해역에서 박테리아의 시·공간적 분포의 특징

조병철* · 강연식** · 최중기**

*서울대학교 자연과학대학 해양학과

**인하대학교 자연과학대학 해양학과

Spatial and Temporal Characteristics of Distributions of Bacteria in the Mideast Part of the Yellow Sea

BYUNG-CHEOL CHO* YEON-SIK KANG** AND JOONG-KI CHOI**

*Department of Oceanography, Seoul National University, 151-741, Korea

**Department of Oceanography, Inha University, Incheon, 402, Korea

황해 중동부해역에서 “황해의 해양자원 개발연구”의 일환으로써 1991년 8월과 10월에 박테리아의 분포에 대해 조사가 시행되었다. 본 연구는 손 등(1989)에 의해 같은 해역에서 보고된 박테리아의 자료를 함께 이용하여, 황해 중동부해역에서 박테리아의 시·공간적 분포의 특징을 규명하고자 하였다. 전 기간을 통해 황해 중동부해역에서 나타난 박테리아의 개체수는 $0.5-19 \times 10^8 l^{-1}$ 이었다. 1991년 10월을 제외하면 황해 중동부해역의 각 정점에서 두 조사기간 및 봄, 여름, 가을의 계절 변화에 따른 박테리아의 개체수 변화는 크지 않음(3.5배 이내)을 나타냈다. 주목할 만한 결과로는 1991년 10월을 제외한 나머지 기간 동안에 관찰된 박테리아의 개체수는 해양에서 일반적으로 알려진 엽록소-박테리아 개체수 관계가 제시하는 분포보다 모두 낮게 나타난 것이었다. 1991년 10월에 관찰된 박테리아의 분포를 조절하는 주요 원인은 조사기간의 나머지 경우들과는 다른 것으로 생각된다. 1991년 8월에 박테리아 생산력은 $(0.1 \sim 2.9 \mu g C l^{-1} d^{-1})$ 단위 면적당 일차생산량의 $18 \pm 11\%$ 를 차지하였다. 제한된 자료이지만 전반적으로 황해 중동부해역은 엽록소 농도에 비해 낮은 박테리아 개체수와 박테리아 생산력 대 일차생산력의 비율이 낮은 현상을 나타내고 있으며, 이의 원인 규명이 황해 중동부해역의 박테리아 생태를 이해하는 관건으로 보인다.

Investigations on distributions of bacterial abundance and production in the mideast part of the Yellow Sea were made in August and October, 1991 as a part of study of “The Exploitation Research of Marine Resources on the Yellow Sea”. Here, we report spatial and temporal characteristics of distributions of bacteria in the mideast part of the Yellow Sea including data reported by Son (1989) for the same area. During the whole study period, bacterial abundance ranged from $0.5 \times 10^8 l^{-1}$ to $19 \times 10^8 l^{-1}$. Seasonal changes and the difference between two studies in bacterial abundance were less than 3.5 fold at each station in the study area, except October, 1991. An interesting result was that bacterial abundances except October, 1991 were generally lower than those expected from the established relationship between chlorophyll and bacterial abundance in the oceans. For the bacterial abundance observed in October 1991, controlling factor(s) of bacteria might be different from the rest of study period. Bacterial production ($0.1 \sim 2.9 \mu g C l^{-1} d^{-1}$) comprised a small fraction ($18 \pm 11\%$) of primary production. Though data are limited, low bacterial abundances compared to chlorophyll concentration and low values of bacterial production to primary production seemed to occur in the mideast part of the Yellow Sea. Unravelling the causes of these phenomena would be necessary to understand the ecology of bacteria in the region.

서 론

황해의 연안역에서 수행된 박테리아 생태에 관한 연구는(Cho and Shim, 1992; 심 등, 1993; Park et al., 1993) 다른 생물해양학적 연구에 비해 적은 상태이며, 황해의 외해역에서 수행된 박테리아에 대한 연구는 오직 손 등(1989)과 한 (1989)이 있다. 물질 순환과 에너지 흐름의 기초적 단계에 대한 이해의 중요한 관건으로서 박테리아의 생태적 역할에 대한 연구가 필수적임을(Azam et al., 1983; Cole et al., 1988; Ducklow and Carlson, 1992) 고려할 때, 황해 해역에서 박테리아에 대한 많은 연구가 시급하다. 본 연구는 이러한 필요성에 따라 “황해의 해양자원 개발연구”의 일환으로써, 1991년 8월과 10월에 황해 중동부해역에서 박테리아의 생체량과 생산력의 분포의 특징을 이해할 목적으로 시행되었다. 본 논문에선 손 등(1989)이 발표한 자료를 함께 이용하여 (1) 두 조사기간 동안 박테리아 개체수와 생산력이 황해 중동부해역에서 얼마나 큰 변화를 보이는가? (2) 계절별 변화의 특징이 있는가? (3) 황해 중동부해역에서 박테리아의 분포는 그 분포의 주요 결정요인으로 잘 알려진 엽록소(Bird and Kalf, 1984)와 어떤 관련성을 갖고 있는가? 나아가서 황해 중동부해역에서 박테리아의 분포에 영향을 주는 주요요인은 무엇인가를 분석하고자 하였다.

조사 내용 및 방법

연구 해역은 Fig. 1에서 보는 바와 같이 35°51'3" ~ 36°56'5"N, 124°22'3" ~ 126°14'7"E에 위치한 태안반도 부근을 포함하는 황해 중동부해역이다. 황해 중동부해역은 1991년 8월 초순과 10월 초순에 조사되었다. 본 연구기간 동안 황해 중동부해역에서의 박테리아의 생체량 측정은 1991년 8월과 10월에 시행되었고, 박테리아의 생산력 측정은 1991년 8월에 시행되었다. 박테리아의 개체수 측정은 현장에서 0.2 μm 여과지로 여과된 포르말린으로 고정된 시료를 실험실에서 DAPI로 염색한 뒤 epifluorescence microscopy 방법(Porter and Feig, 1980)으로 측정하였다. 박테리아 생산력 측정은 기본적으로 Fuhrman and Azam(1982)의 방법, 즉 박테리아의 DNA핵산으로 고정되는 ³H-thymidine을 측정하는

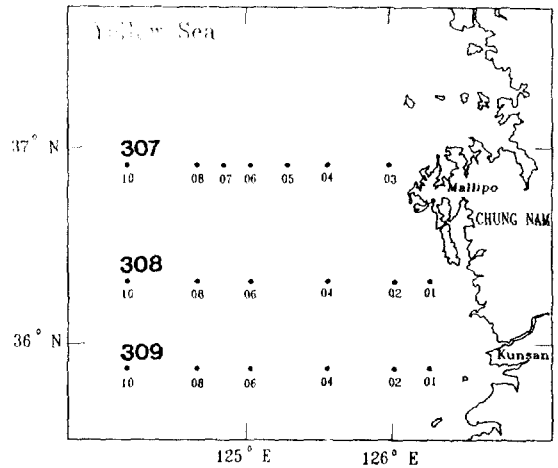


Fig. 1. A map showing sampling stations during the study period of August and October, 1991.

방법으로 이 방법은 thymidine이 DNA로 특이하게 고정되지 않는 문제점(Wicks and Robarts, 1987; Hallibaugh, 1988)이 있어, 이 연구에선 ³H-thymidine으로 표지된 DNA를 추출시 Wicks and Robarts의 방법(1987)이 사용되었다. 추출된 DNA로부터 방사능량을 liquid scintillation counter로 측정된 뒤, Riemann et al.(1987)의 전환상수(1.1×10^8 박테리아/mole of incorporated thymidine into DNA)를 이용하여, 생산된 박테리아의 개체수를 추정하였다. 박테리아의 생체량은 개체당 20 fgC(Lee and Fuhrman, 1987)을 이용하였다. 엽록소의 측정은 Parsons et al.(1984)를 따랐다.

결과 및 토의

황해 중동부해역에서 손(1989) 및 한 (1989)의 연구와 본 연구 동안 출현한 박테리아의 개체수는 $0.5-19 \times 10^6 \text{ l}^{-1}$ 이었다. 지역적 분포를 보면(Fig. 2) 1991년 8월에 박테리아 개체수는 수심 0 m에서 307선 전역에 걸쳐 $3 \sim 4 \times 10^6 \text{ l}^{-1}$ 을 나타냈다. 수심 10 m에서도 이와 유사하게 나타났다. 수심 20 m에선 307선 정점 10(표층보다 약간 많은 $5 \times 10^6 \text{ l}^{-1}$)을 제외하면 표층보다 약간 낮은 개체수를 나타냈다. 수심 50 m에서도 표층보다 단지 2배 이내의 낮은 박테리아 개체수를 나타냈다. 1991년 10월에 황해 중동부해역의 수심 0 m에서 전반적인 박테리아 개

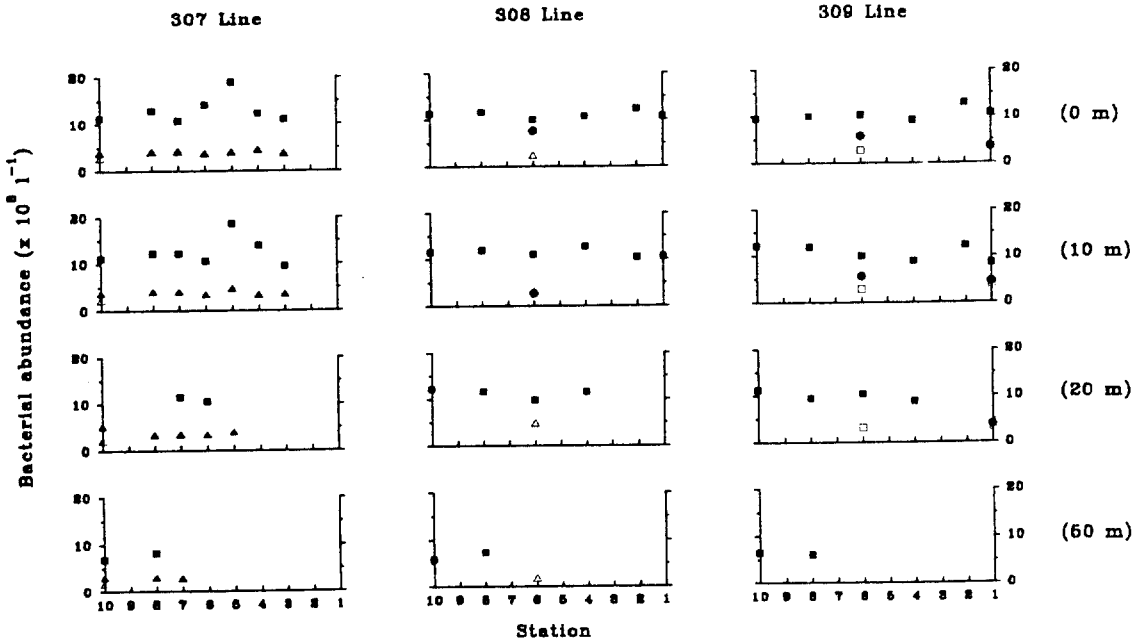


Fig 2. Distributions of bacterial abundance during the study period of August and October, 1991. Numbers represent locations of stations. Closed triangles represent August, 1991; open triangles August, 1987; closed squares October, 1991; open squares October, 1987; and closed circles April, 1988.

체수의 분포는 $10 \sim 13 \times 10^8 \text{ l}^{-1}$ 이었다. 그리고 307선 정점 05에서 높은 개체수를($18.9 \times 10^8 \text{ l}^{-1}$) 나타냈다. 1991년 10월에 수심 10 m에서는 307선과 308선에서 수심 0 m의 경우와 유사 했으나(즉, 박테리아 개체수는 대체로 $10 \sim 12 \times 10^8 \text{ l}^{-1}$ 이었고, 307선 정점 05에선 $18.6 \times 10^8 \text{ l}^{-1}$), 309선에선 연안에 인접한 정점들에서 약간 낮게 나타났다($8.5 \sim 10 \times 10^8 \text{ l}^{-1}$). 수심 20 m에서 박테리아 개체수와 그 분포는 수심 0 m의 경우와 전반적으로 유사했다. 수심 50 m에서 박테리아 개체수는 수심 0 m의 경우보다 단지 2배 이내로 낮았다.

황해 중동부 해역에서 박테리아 개체수의 다년간의 변화 폭은 본 연구와 손(1989)의 자료와의 비교를 통해 얻어졌다. 1991년 8월 표층에서 박테리아 개체수는 대개 $>2 - <5 \times 10^8 \text{ cells l}^{-1}$ 의 범위내에 분포하여, 1987년 손(1989)에 의해 얻어진 자료와 유사하였다(Fig. 3). 박테리아 개체수는 4년이란 기간이 존재함에도 불구하고, 8월에 2.5배 이내에서 변화를 나타내어(Fig. 3), 307선에서는 여름에 박테리아의 개체수의 변화가 적은 것으로 보여졌다. 그리고 황해

중동부 전해역의 각 정점에서 본 연구와 손(1989)의 비교에서 나타난 박테리아의 계절별 및 조사기간 동안의 변화는 대개 $3 - <5$ 배 이었다.

박테리아 개체수와 엽록소 관계에서 1987년과 1991년 8월의 박테리아 개체수 자료는 흥미로운 양상을 나타냈다(Fig. 3). 황해의 모든 8월 자료를 Cho and Azam(1990)의 자료와 함께 나타낸 결과 양(+)의 유의성 있는 상관관계가 나타났지만($r^2 = 0.49, p = 0.008$), 황해의 8월 자료는 Cho and Azam(1990)의 일반적인 분포의 아래에 위치하고 있었다. 이러한 8월의 박테리아의 분포는 박테리아의 생산력($0.2 \sim 2.1 \mu\text{g C l}^{-1} \text{ d}^{-1}$, Table 1)과는 무관하였다. 일반적으로 박테리아의 개체수는 박테리아 생산력과 유의성 있는 상관 관계를 나타내는 것으로 알려져 있다(Fuhrman and Azam, 1982; Cole et al., 1988). 본 연구의 박테리아 생산력이 10배 정도의 범위를 나타냄에도 박테리아 개체수가 일정한 수준의 낮은($2 \sim 5 \times 10^8 \text{ l}^{-1}$) 값을 나타냄은 박테리아의 개체수를 낮게 유지하는 조절 기작이 작용하고 있음을 제시하는 것으로 보여졌다. 즉, 8월의 비교적 높은 엽록소

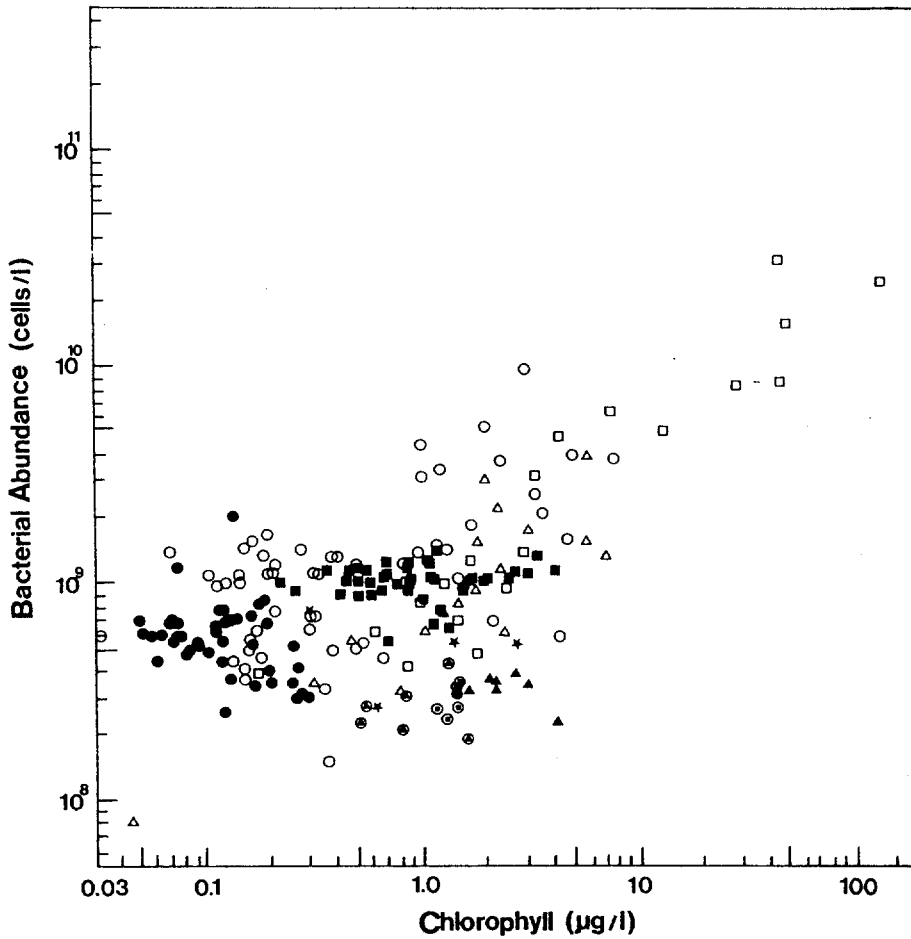


Fig. 3. Log-Log plot of bacterial abundance and chlorophyll *a* in the Yellow Sea overlapped with that of Cho and Azam (1990). Open symbols and closed circles are those in Cho and Azam. Closed triangles represent August, 1991; closed triangles within circles August, 1987; closed squares October, 1991; closed squares within circles October, 1987; and stars April, 1988.

농도($0.5 \sim 4 \mu\text{g l}^{-1}$)에 비해, 이러한 낮은 박테리아의 개체수의 존재는 박테리아에 대한 손실 기작 즉, 박테리아에 대한 포식(bacterivory) 또는 바이러스의 감염에 기인된 것으로 추측된다. 이러한 낮은 박테리아의 개체수는 빈영양의 북태평양에서 보고된 것과 유사하나(Cho and Azam, 1990), 황해 중동부해역이 엽록소의 농도를 기준하여 볼 때 중영양 해역임을 고려하면 흥미로운 현상이라고 하겠다. 1991년 8월에 엽록소의 자료가 표층에만 국한되어 있지만, 황해 중동부 해역에서 엽록소-박테리아 개체수에 대해 이러한 결론을 내림에는 별 지장이 없으리라고 본다: 여름에 황해 중동부 해역에서 엽록소

농도의 분포는 대개의 경우 표층하에서 엽록소 최대값을 나타내며, 엽록소의 농도는 수심 50 m에서도 표층보다 높다(한, 1989; 최, 1991). 일부의 경우 표층하에서 엽록소의 농도가 표층보다 적은 경우에도 0.6배 내에 해당하는 정도였다(최, 1991). 따라서 수층내에서 적은 범위를 보이는 박테리아 개체수는 엽록소가 증가한 경우 오히려 위의 결론을 강화시키고, 표층하에서 엽록소 농도가 약간 감소한 경우라도 위의 경향에서 큰 변이를 보이지 않기 때문이다.

한편 박테리아 개체수의 1991년 10월의 자료는 8월의 자료와는 상이하였다. 우선 1991년 10월의

Table 1. Bacterial abundance and production, and chlorophyll *a* in the mideast part of the Yellow Sea during August, 1991 along 307 line

| Station | Depth (m) | Bacterial abundance ($\times 10^8$ l ⁻¹) | Bacterial production (μ g C l ⁻¹ d ⁻¹) | Chlorophyll <i>a</i> (μ g l ⁻¹) |
|---------|-----------|---|--|--|
| 03 | 0 | 3.58 | 2.06 | 1.6 |
| | 10 | 3.38 | 1.24 | |
| 04 | 0 | 4.32 | 2.94 | 2.5 |
| | 10 | 3.14 | 0.86 | |
| 05 | 0 | 3.87 | 0.20 | 2.8 |
| | 10 | 4.53 | 0.54 | |
| | 20 | 3.77 | 0.15 | |
| 06 | 0 | 3.58 | 0.20 | 2.2 |
| | 10 | 3.28 | 0.49 | |
| | 20 | 3.27 | 0.66 | |
| 07 | 0 | 4.00 | 0.39 | 2.4 |
| | 10 | 3.85 | 0.42 | |
| | 20 | 3.29 | 0.53 | |
| | 50 | 2.62 | 0.78 | |
| 08 | 0 | 3.92 | 0.24 | 2.0 |
| | 10 | 3.87 | 0.18 | |
| | 20 | 3.20 | 0.81 | |
| | 50 | 2.82 | 0.48 | |
| 10 | 0 | 3.79 | 0.38 | 2.1 |
| | 10 | 3.62 | 0.11 | |
| | 20 | 5.00 | 0.16 | |
| | 50 | 2.87 | 0.06 | |

황해 자료는 Cho and Azam(1990)의 분포내에 위치하였으며, 약한 양의 유의성 있는 상관 관계를 나타냈다($r^2=0.21$, $p=0.001$). 그리고 1991년 10월의 박테리아 개체수는 1987년 10월보다 일반적으로 모든 정점 및 모든 수심의 시료에서 3~5배 더 많이 나타났다. 그러나 이 당시의 박테리아는 엽록소의 변화에 잘 상응하지 못하여, 엽록소의 농도 변화가

약 20배 정도이나 박테리아 개체수의 변화는 불과 2배 정도이었다. 특히 엽록소의 농도가 $1 \mu\text{g l}^{-1}$ 이하에서 박테리아 개체수는 거의 $1 \times 10^8 \text{ l}^{-1}$ 로 변화를 나타내지 않았다(Fig. 3). 이에 대한 소수의 예외(즉 $6 \sim 7 \times 10^8 \text{ l}^{-1}$)는 모두 수심 50 m의 시료에서 발견되었다. 1991년 10월에 관찰된 이러한 박테리아의 개체수 분포는 아마도 식물플랑크톤의 가을 대번식 후의 일시적 상황일 수 있다. 지금까지의 결과는 대체로 황해 중동부해역에서 계절 변화에 따른 박테리아 개체수의 변화는 작은 것임을 나타낸다. 또한 엽록소 농도에 비해 일반적으로 낮은 박테리아 개체수의 출현에 대한 규명이 필요함을 시사한다. 이와 관련하여 본 연구에서 박테리아의 개체수를 계수하는데 이용된 DAPI방법(Porter and Feig, 1980)이 acridine orange를 이용한 방법(Hobbie et al., 1977)보다 평균 30%를 적게 계수한다는 최근의 Suzuki et al.(1993)의 결과를 고려하더라도, 황해 중동부해역의 낮은 박테리아 개체수의 출현은 이 해역의 특징적인 현상으로 보여진다.

박테리아 개체수의 분포에 대한 온도의 영향을 전체 자료(1987년 8월, 10월, 1988년 4월, 1991년 8월, 그리고 10월)에 대해 분석한 결과는(Table 2) 낮은 그러나 유의성 있는 상관관계를 나타냈다($r^2=0.09$, $p=0.002$). 계절별로 유의성이 있는 상관관계를 나타낸 경우는 1987년 10월과 1991년 10월로 상관관계가 높았고 ($0.51 < r^2 < 0.61$, $p < 0.04$), 1991년 8월에는 낮았다 ($r^2=0.20$, $p=0.04$). 이러한 결과는 1991년 10월에는 온도가 엽록소보다도 박테리아 개체수에 더 중요한 영향력을 갖고 있음을 나타낸 반면에, 온도가 그 영향력이 감소되었던 1991년 8월에는 엽록소가 더 중요한 영향력을 갖고 있음을

Table 2. Relationships between bacterial abundance (Y, l⁻¹) and water temperature (X, °C) during the period of August, 1987 to October, 1991

| Mo of Year | Regression equation | n | r ² | P |
|------------------|---------------------|-----|----------------|-------|
| 1987, August | LogY=8.15+0.011X | 9 | 0.182 | 0.253 |
| 1987, October | LogY=7.78+0.040X | 7 | 0.608 | 0.039 |
| 1988, April | LogY=7.67+0.166X | 7 | 0.130 | 0.427 |
| 1991, August | LogY=8.43+0.006X | 22 | 0.195 | 0.040 |
| 1991, October | LogY=8.47+0.029X | 55 | 0.512 | 0.000 |
| All August data | LogY=8.28+0.011X | 31 | 0.169 | 0.022 |
| All October data | LogY=8.05+0.049X | 62 | 0.329 | 0.000 |
| All data | LogY=8.47+0.018X | 100 | 0.092 | 0.002 |

Table 3. Comparison of depth-integrated bacterial production (BP) with depth-integrated primary production (PP) for the euphotic zone in the mid-east part of the Yellow Sea

| Station | Date | BP (mg C m ⁻² d ⁻¹) | PP* (mg C m ⁻² d ⁻¹) | BP×100/PP (%) |
|---------|--------------|---|--|------------------|
| 307-03 | 1991, August | 11.87 | 67.84 | 17.5 |
| 307-05 | 1991, August | 9.65 | 33.32 | 29.0 |
| 307-07 | 1991, August | 14.96 | 192.63 | 7.8 |
| 307-03 | 1987, August | 81.50 | 666.00 | 12.2** |

*Unpublished data (Choi and Kang).

**Data from Son (1989).

나타낸다. 이 결과들은 황해 중동부 해역에서 8월과 10월에 박테리아의 분포를 결정하는 중요 요소들이 염류도와 온도임을 제시한다. 박테리아 개체수와 온도에 대한 본 연구의 결과는 심 등(1993)이 만경강 하구에서 보고한 결과(박테리아 개체수와 온도가 상관관계를 나타내지 않음)와는 대조를 보이나, 해양환경에서 일반적으로 나타나는 것으로 보인다(Turner and Borkman, 1993).

박테리아의 생산력은 1991년 8월에 연안의 307선 정점 03에서 1.2~2.1 $\mu\text{g C l}^{-1} \text{d}^{-1}$ 로 (Table 1) 1987년에 비해 약 10배 정도 낮게 나타나서(손 등, 1989), 변화의 폭이 매우 큼을 제시해주고 있다. 그러나 환경 변화가 연안보다 적을 것으로 예상되는 외해의 307선 정점 10에서 박테리아의 생산력이 0.1~0.4 $\mu\text{g C l}^{-1} \text{d}^{-1}$ 로, 1987년과 비교시 3배 이내에서 변이가 나타났다. 한편 박테리아 생산력은 염류도와 유의성 있는 상관관계를 나타내지 않았다 ($p < 0.37$). 박테리아의 유기물 이용의 생태적 중요성을 추정하기 위해 유광대내에서 단위 면적당 박테리아 생산력과 일차생산력을 비교한 결과(Table 3), 1991년 8월에 박테리아의 생산력은 일차 생산력의 적은 부분($18 \pm 11\%$, $n=3$)에 해당한 것으로 나타났다. 비교 가능한 정점이 비록 한 정점에 국한되어 있으나, 손(1989)이 1987년 307선 정점 03에서 보고한 12.2%와 유사하였다(Table 3). 여기서 주목할 점은 1991년의 일차 생산력이 1987년에 비해 약 10배 가량 낮았다는 것이다. 따라서 약 10배 정도의 낮은 박테리아 생산력이 관찰됨과, 박테리아 생산력과 일차생산력의 비율이 유사하게 유지된 사실은 박테리아 개체수의 경우에서와 같이 4년의

기간차이가 있음에도 일차생산과 박테리아의 생산이 균형을 유지하고 있는 것을 제시한다. 황해 중동부 해역에서 관찰된 박테리아 생산력과 일차생산력의 비율은 일반적으로 연근해역에서 보고되는 2~30%의(Hanson et al., 1988; Ducklow and Carlson, 1992) 범위에 있지만, Cole et al.(1988)이 보고한 평균 30%보다 낮았다. 또한 만경·동진강 하구에서도 낮은 부분($<5\%$; 심 등, 1993)의 일차생산력이 박테리아 생산력에 해당됨이 보고되어, 황해역에서 나타나는 이러한 현상의 원인이 환경의 물리·화학적 요인에, 또는 호흡의 특성에 기인하는지, 먹이 그물망 구조의 영향(Andersen, 1988)으로 인해 박테리아가 이용할 수 있는 용존 유기물의 생성이 낮아졌음에 기인하는지를 규명해야 할 것으로 본다.

종합하면 황해 중동부해역의 각 정점에서 그리고 전체 해역을 통해서 봄, 여름, 가을의 계절 및 다년간 변화에 따른 박테리아의 개체수 변화는 대체로 비교적 적은 범위임을 나타냈다. 황해 중동부해역에서 박테리아의 개체수 분포는 1991년 10월을 제외하면, 전반적으로 염류도의 변화에 따른 염류소-박테리아 개체수 관계에서 예상되는 것보다 낮은 것으로 나타났다. 또한 박테리아 생산력 대 일차생산력의 비율도 낮은 값을 나타냈다. 일차적인 조사를 통해 나타난 황해 중동부해역의 박테리아의 생태는 특징적인 것으로 보여지며, 앞으로 이에 대한 체계적인 연구가 필요하다고 본다.

감사의 글

이 연구는 1991년 과학기술처의 특정연구개발사업의 지원으로 시행되었습니다. 본 논문 내용의 향상에 도움을 주신 이상훈 박사(해양연구소), 강헌 교수(수원대학교), 그리고 박용철 교수(인하대학교) 감사드립니다. 박테리아 개체수 및 염류도의 기존 자료를 확인해 준 손승규씨와 그림을 준비해 준 박명길군과 최동한군께 감사의 뜻을 표합니다. 그리고 현장조사시 많은 협조를 해 주신 서해수산연구소 조사선의 선장님과 선원들께 감사드립니다. 끝으로 한(1989)의 자료는 확인이 되지 않아 본 논문에 이용하지 못하였음을 밝힙니다.

참고문헌

- 손승규, 1989. 한국서해중부의 영양염 분포 및 미생물 생산력에 관한 연구. 인하대학교 석사학위논문. 65pp.
- 손승규, 정경호, 조준성, 박용철, 1989. 황해 중부의 영양염과 용존 아미노산 및 미생물 분포의 계절변화. *황해연구*, 2: 1-12.
- 심재형, 신윤근, 조병철, 1993. 만경·동진강 하구에서의 박테리아 및 식물플랑크톤의 역할과 상호관계. *한국해양학회지*, 28: 107-113.
- 한범석, 1989. 서해중부해역 조석전선이 식물플랑크톤군집에 미치는 영향 연구. 인하대학교 석사학위논문. 145pp.
- 최중기, 1991. 황해 중동부 연안수역의 조석전선이 식물플랑크톤생산력과 분포에 미치는 영향. *한국해양학회지*, 26: 223-241.
- Andersen, P., 1988. The quantitative importance of the "microbial loop" in the marine pelagic: A case study from the North Bering/Chukchi seas. *Ergebn Limnol*, 31: 243-251.
- Azam, F., T. Fenchel, J.G. Field, J.S. Gray, L.A. Meyer-Reil and F. Thingstad, 1983. The ecological role of water-column microbes in the sea. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 10: 257-263.
- Bird, D.F. and J. Kalfi, 1984. Empirical relationships between bacterial abundance and chlorophyll concentration in fresh and marine waters. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 41: 1015-1023.
- 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.
- 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., S. Findlay and M.L. Pace, 1988. Bacterial production in fresh and saltwater ecosystems: a cross-system overview. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 43: 1-10.
- Ducklow, H.W. and C.A. Carlson, 1992. Oceanic bacterial production, p.113-181. In K. C. Marshall (ed.), *Advances in Microbial Ecology*. vol. 12. Plenum.
- Fuhrman, J.A. and F. Azam, 1982. Thymidine incorporation as a measure of heterotrophic bacterioplankton production in marine surface waters: evaluation and field results. *Mar. Biol.*, 66: 109-120.
- Hanson, R.B., L.R. Pomeroy, J.O. Blanton, B.A. Biddanda, S. Wainright, S. Bishop, J.A. Yoder and L.P. Atkinson, 1988. Climatological and hydrographic influences on nearshore food webs off the southeastern United States: bacterioplankton dynamics. *Cont. Shelf Res.*, 8: 1321-1344.
- Hobbie, J.E., R.J. Daley and S. Jasper, 1977. A method for counting bacteria on Nuclepore filters. *Appl. Environ. Microbiol.*, 33: 1225-1228.
- Hollibaugh, J.T. 1988. Limitations of the [³H]thymidine method for estimating bacterial productivity due to thymidine metabolism. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 43: 19-30.
- Lee, S-H. and J.A. Fuhrman, 1987. Relationships between biovolume and biomass of naturally derived marine bacterioplankton. *Appl. Environ. Microbiol.*, 53: 1298-1303.
- 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.R., Y. Maita and C.M. Lalli, 1984. A manual of chemical and biological methods for seawater analysis. Pergamon.
- Porter, K.G. and Y.S. Feig, 1980. The use of DAPI for identifying and counting aquatic microflora. *Limnol. Oceanogr.*, 25: 943-948.
- Riemann, B., P.K. Bjørnsen, S. Newell and R. Fallon, 1987. Calculation of cell production of coastal marine bacteria based on measured incorporation of [³H]thymidine. *Limnol. Oceanogr.*, 32: 471-476.
- Suzuki, M.E.B. Sherr and B.F. Sherr, 1993. DAPI direct counting underestimates bacterial abundance and average cell size compared to AO direct counting. *Limnol. Oceanogr.*, 38: 1566-1570.
- Turner, J.T. and D.G. Borkman, 1993. Plankton studies in Buzzards Bay, Massachusetts, USA. I. Hydrography and bacterioplankton, 1987 to 1990. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 100: 17-26.
- Wicks, R.J. and R.D. Robarts, 1987. The extraction and purification of DNA labeled with [methyl-³H]thymidine in aquatic bacterial production studies. *J. Plankton Res.*, 9: 1159-1166.