

마산만과 행암만 수층의 종속영양세균과 엽록소 a 함량 분포에 미치는 환경요인

손재학⁽¹⁾, 안태영⁽²⁾, 김상진⁽³⁾

Environmental Factors Affecting Distribution of Heterotrophic Bacteria and Chlorophyll a Content in The Water Column of Masan and Haengam Bays, Korea

by

Jae-Hak Sohn⁽¹⁾, Tae-Young Ahn⁽²⁾ and Sang-Jin Kim⁽³⁾

요 약

1996년 6월부터 11월까지 적조가 빈번히 발생하는 해역인 행암만과 마산만을 대상으로 종속영양세균과 엽록소 a 함량에 미치는 환경요인의 역할에 대하여 조사하였다. 본 연구결과에 따르면 마산만과 행암만의 수계환경은 무기영양염의 함량이 뚜렷한 한 차이를 나타내었다. 행암만은 질소영양염이 제한된 수계환경이고, 마산만은 담수의 유입이 많은 초여름과 가을에 인에 비하여 질소의 농도가 높게 나타나 행암만에 비해 인 영양염이 제한되는 수계환경특성을 갖고 있다. 단순회귀분석의 결과에 의하면, 엽록소 a는 행암만에서 강수량 ($r=0.813$, $P<0.05$), 인 ($r=0.846$, $P<0.05$)과 유의한 상관관계를 나타내었으나 마산만에서는 다른 환경변수와 유의한 상관관계를 나타내지 않았다. 종속영양세균은 행암만 (규산염 규소, $r=0.960$, $P<0.01$) 보다 마산만 (강수량, $r=0.990$, $P<0.01$; $\text{NO}_3\text{-N}$, $r=0.901$, $P<0.05$; 용존성 무기질소, $r=0.899$, $P<0.05$; N/P mole 비, $r=0.952$, $P<0.05$; 염분, $r=-0.934$, $P<0.05$)에서 많은 환경변수와 유의한 상관관계를 나타냈다. 또한 중회귀분석에 의하면, 엽록소 a는 마산만에서 규산염 규소에 의해 67.8%의 중요도를 나타내었으며 행암만에서 N/P 비에 의해 37.6%의 중요도를 나타내었다. 종속영양세균의 분포는 마산만에서 규산염 규소와 염분에 의해 각각 42.3%와 32.1%의 중요도를 나타내었으며, 행암만에서 규산염 규소에 의해 76.3%의 중요도를 나타내었다. 결론적으로 초여름과 가을 사이에 행암만과 마산만에서 담수의 유입은 풍부한 영양원, 유기물과 용존성 무기질소의 증가를 유도하였으며 종속영양세균과 엽록소 a 함량의 변화를 지배하는 주된 환경요인으로 작용하였음을 알 수 있었다.

Abstract

The roles of environmental factors affecting on heterotrophic bacterial distribution at Hangam Bay and Masan Bay in which occurred frequently red tide, during June to November 1996 were investigated. The aquatic environment of Masan Bay and Haengam

(1) 한국해양연구소 미생물연구실, jhsohn@kordi.re.kr

(2) 단국대학교 미생물학과, ahnty@anseo.dankook.ac.kr

(3) 정회원, 한국해양연구소 미생물연구실, s-jkim@kordi.re.kr

Bay showed difference in the contents of inorganic nutrients. Haengam Bay may be defined as nitrogen limited aquatic environment. On the other hand, Masan Bay appeared to the appropriate N/P molar ratio of mean 15.9 during the periods of study. By the results of simple regression, chlorophyll a showed significant correlation with precipitation ($r=0.813$, $P<0.05$) and phosphorus ($r=0.846$, $P<0.05$) at Haengam Bay, but not showed significant correlation with parameters at Masan Bay. The heterotrophic bacteria showed significant correlation with many environmental parameters at Masan Bay (Precipitation, $r=0.990$, $P<0.01$; $\text{NO}_3\text{-N}$, $r=0.901$, $P<0.05$; Dissolved inorganic nitrogen, $r=0.899$, $P<0.05$; N/P molar ratio, $r=0.952$, $P<0.05$; Salinity, $r=-0.934$, $P<0.05$) than Haengam Bay ($\text{SiO}_3\text{-Si}$, $r=0.960$, $P<0.01$). By the results of multiple regression, the chlorophyll a was varied with only 2 factors in Masan Bay ($R^2=0.100$) and 3 factor in Haengam Bay ($R^2=0.903$). The major factor which affected to chlorophyll a was $\text{SiO}_3\text{-Si}$ ($R^2\%=67.8$) in Masan Bay, and $-\text{N/P}$ ($R^2\%=37.6$) in Haengam Bay. The heterotrophic bacteria were varied with 4 factors in Masan Bay ($R^2=100$) and 2 factor in Haengam Bay ($R^2\%=0.878$). The major factor, which affected to heterotrophic bacteria, was $\text{SiO}_3\text{-Si}$ ($R^2\%=42.3$) and salinity ($R^2\%=32.1$) in Masan Bay, and $\text{SiO}_3\text{-Si}$ ($R^2\%=76.3$) in Haengam Bay. Resultingly, the influx of freshwater in Masan and Haengam Bay was enriched in inorganic nutrients, and plays an important role in the change of heterotrophic bacteria and chlorophyll a during early summer to autumn.

Keywords : Heterotrophic Bacteria, Chlorophyll a, Masan Bay, Haengam Bay, Correlation, Multiple regression

1. 서 론

수계생태계에서 다양한 형태의 유기물을 분해하는 분해자로서 광물화작용을 통한 물질순환에 있어 중요한 역할을 담당하고 있는 미생물의 구조와 기능은 주변환경과 그를 둘러싸고 있는 환경조건과 밀접한 상호관계를 가지고 있다. 특히 연안생태계에서 미생물은 기본적으로 해양환경특성에 영향을 받고 있지만 육상으로부터 부하되는 유입물의 정도에 크게 영향을 받는다 (Rheinheimer[1977]; 안[1984]; 안 등[1991]). 일반적으로 해양생태계는 담수생태계보다 영양원이 빈약한 환경으로 미생물은 식물 플랑크톤으로부터 생성되는 배설물 (exudates)과 유기사체 (detritus)에 대한 의존도가 높다. 그러나 연안생태계는 담수의 유입 정도에 따라 영양상태가 결정되기 때문에, 오염된 담수의 유입이 빈번한 환경일수록 수계의 영양물질의 함량이 증가하게되어 수계의 미생물은 식물 플랑크톤으로부터 유래된 영양원보다 담수로부터 유입된 영양원에 의존도가 높아

세균과 엽록소 a 함량의 상관관계가 uncoupling 된다 (Griffith *et al.*[1990]; 심 등[1993]).

연구대상수역인 마산만과 행암만은 생활하수 및 공업단지로부터 오염된 담수의 유입으로 인해 부영양화된 대표적인 폐쇄성 연안생태계이다 (Chang *et al.*[1995]). 이러한 부영양화는 일차생산력을 증가시키며 결과적으로 식물 플랑크톤의 대발생 (phytoplanktonic bloom)을 유도하는 주된 요인으로 작용하고 있어 1969년 이후 현재까지 지속적이며 빈번한 적조발생의 원인을 제공하고 있다 (박과 김[1967]; 김 등[1993]; [1997]). 많은 연구자들은 마산만과 행암만을 포함한 진해만에서 적조발생과 관련된 종의 분포와 다양한 환경인자에 대한 연구를 수행하였다 (김[1989]; Cho [1978]; Yang *et al.*[1983]; Lee and Yoo [1990]). 또한 적조발생을 유도하는 물리 화학적인 변화와 영양염류의 변동에 대한 연구가 수행되었다 (Hong *et al.*[1991]; Yang [1992]; Lee *et al.*[1994]; Kang *et al.*[1999]).

그러나 마산만과 행암만을 포함한 진해만에서

미생물생태학에 대한 연구보고는 극히 미약한 형편이다. 안 [1984]은 진해만에서 미생물의 분포에 영향을 미치는 환경인자에 대하여 연구하여 오염된 담수의 유입보다는 계절적인 변화에 따른 온도가 미생물분포를 결정하는 주된 인자로 보고하였다. 또한 이 등 [1986]은 마산만내에서 해양세균의 분포와 우점종에 대한 비교연구를 그리고 이 등 [1990]은 마산만을 포함한 진해만에서 해양세균과 쌍편모조류의 분포에 관한 연구를 수행하였을 뿐이다. 그러나 적조발생이 진행되는 하계기간동안 미생물의 분포에 미치는 환경인자에 대한 집중적인 연구는 별로 수행되지 않았다.

그러므로 본 연구는 적조발생해역인 마산만과 행암만을 대상으로 1996년 6월부터 11월까지 6회에 걸쳐 물리화학적인 요인과 엽록소 a 함량 및 종속영양세균을 포함한 13가지의 환경요인을 대

상으로 조사하였다. 조사된 결과는 통계분석을 수행하여 엽록소 a 함량과 종속영양세균의 분포에 미치는 환경인자에 대하여 분석하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 연구지역 및 시료 채취

시료의 채취는 행암만(정점 1)의 소죽도와 대죽도 사이의 중앙부분(수심, 10 m)과 마산만(정점 2)의 수로인 톨섬지역(수심, 15 m)으로 2개의 정점에서 수행하였다(Fig. 1). 시료의 채취시기는 적조가 빈번히 발생하는 하계와 추계인 6월부터 11월 사이에 6회에 걸쳐 매달 수행하였다. 해수 시료는 수면하 1 m에서 Niskin 형 채수기를 이용하여 채수하였다. 미생물 분석을 위한 시료는

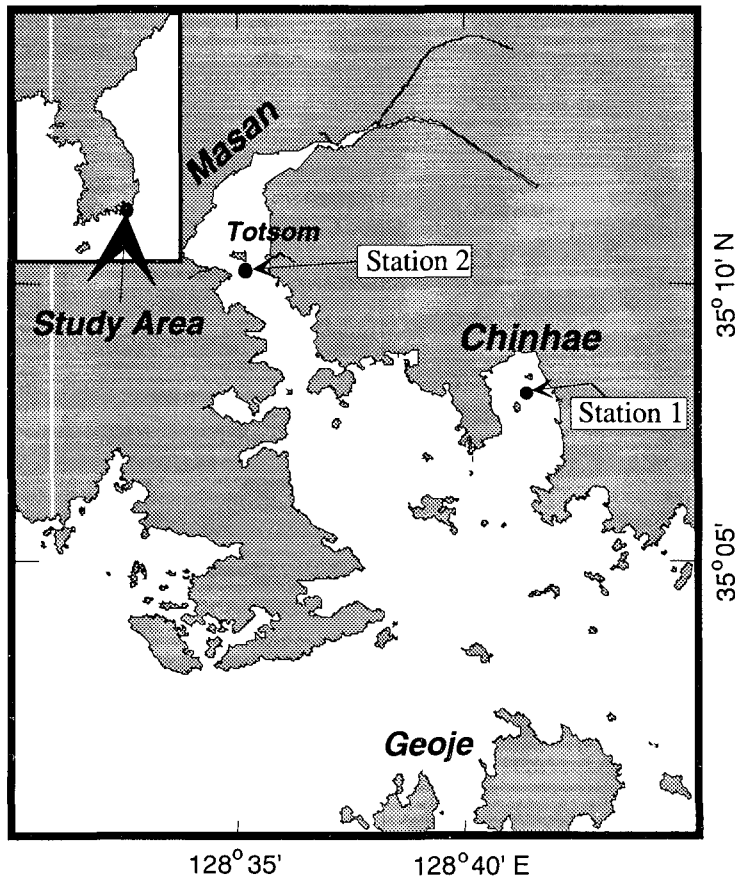


Fig. 1 Map of sampling stations(Station 1, Haengam Bay ; Station 2, Masan Bay)

멸균된 100 ml 용량의 유리병에 담아 저온 상태로 보관하였다. 그리고 용존 무기영양염 및 엽록소 a 분석을 위한 시료는 1L 용량의 plastic 병 (Nalgen)에 담아 저온 상태로 보관하여 4시간이 내에 현장에서 여과지 (Seoul Scin. 0.45 μm pore size)를 이용하여 여과하였으며 엽록소 a 분석시료는 현장에서 200-500 ml의 시료를 여과지를 이용하여 여과하여 여과된 여과지를 냉동상태로 실험실로 운반하였다.

2.2 환경요인의 분석

2.2.1 물리화학적 환경요인

수온 및 염분은 Conductivity Temperature Depth 측정기 (Seabird, USA)를 이용하였으며 pH는 휴대용 pH 측정기 (Orion, USA)를 이용하여 현장에서 측정하였다. 용존성 무기영양염 (NH₄-N, NO₂-N, NO₃-N, PO₄-P 및 SiO₃-Si)은 Standard method (APHA, [1992])에 의거하여 측정하였다.

2.2.2 생물학적 환경요인

엽록소 a 함량 해수중 엽록소 a를 acetone으로 추출한 후 spectrophotometer (Spectronic 21, Miltonroy, USA)를 이용하여 664, 647 및 630 nm에서 흡광도를 측정하였으며 Standard method (APHA[1992])에 제시된 아래식에 의해 농도로 계산하였다.

$$\text{Chlorophyll } a \text{ } (\mu\text{g L}^{-1}) = \frac{(11.85 \times (\text{OD } 664 \text{ nm}) - 1.54 \times (\text{OD } 647 \text{ nm}) - 0.08 \times (\text{OD } 630 \text{ nm})) \times \text{Extract volume (ml)}}{\text{Volume of sample (L)}} \quad (1)$$

중속영양세균 중속영양세균의 검출을 위하여, 채수된 해수시료는 멸균해수를 이용하여 적절한 배수로 희석하였다. 희석된 시료는 ZoBell 2216e 한천 배지 (ZoBell[1946])에 도말하여 25°C 배양기에서 7일간 배양한 후 성장된 집락 (colony)을 계수하였다. ZoBell 2216e 한천 배지의 조성은 peptone 5 g, yeast extract 1g, FePO₄ 10 mg, agar 15 g, 숙성해수 750 ml, 증류수 250 ml, pH 7.2 이다.

2.3 통계분석

통계분석은 SPSS package (V5.0)를 이용하여 단순회귀와 중회귀분석을 수행하였다.

3. 결 과

3.1 물리 화학적인 환경요인

조사된 물리화학적 환경요인은 Table 1에 요약하였다. 두 정점의 수심 1m에서 측정된 수온은 조사기간동안 19.0°C에서 28.0°C사이의 범위로 나타났으며 평균수온은 22.7±3.2°C로 나타났다. pH는 두 정점에서 평균 8.0±0.15로 조사되었다. 염분은 두 정점에서 26.4~31.2‰의 범위로 나타났으며 30%이하의 염분은 행암만 (정점 1)에서 6월과 9월에, 정점 2에서 6, 7, 8월에 나타났다.

용존 무기질소 (dissolved inorganic nitrogen; DIN)의 농도는 행암만 (정점 1)에서 14.3~613.3 μg-N L⁻¹ 그리고 마산만 (정점 2)에서 116.7~903.5 μg-N L⁻¹의 범위로 조사되었다. 평균 DIN 농도는 마산만 (정점 2, 293±305.5 μg-N L⁻¹)이 행암만 (정점 1, 167.8 ±222.4 μg-N L⁻¹)에서보다 약 1.8배 높았다. 가장 낮은 DIN 농도는 7월에 행암만 (정점 1)과 마산만 (정점 2)에서 각각 14.3 μg-N L⁻¹과 116.7 μg-N L⁻¹로 조사되었다. 또한 DIN의 주된 질소형태는 암모니아성 질소와 아질산염 질소보다 질산염 질소 (NO₃-N)가 높은 비율로 존재하였다. 용존 무기인 (dissolved inorganic phosphate; DIP)의 농도는 행암만 (정점 1)에서 20.4~389.1 μg-P L⁻¹ 그리고 마산만 (정점 2)에서 14.8~73.3 μg-P L⁻¹의 범위를 나타내었다. 평균 DIP 농도는 마산만 (정점 2, 41.8±23.1 μg-P L⁻¹)에서보다 행암만 (정점 1, 113.0±139.2 μg-P L⁻¹)에서 높게 나타났다.

N/P molar 비는 두 정점간에 차이를 나타내었다. 행암만 (정점 1)의 N/P molar 비는 0.2~7.4 범위로 평균 N/P molar 비가 4.1±2.4로 조사되었으며 7월에 가장 낮은 값을 나타내었다. 또한 마산만 (정점 2)의 N/P molar 비는 5.7~27.3의 범위로 평균 15.9±9.5로 조사되었으며 우기인 6월에서 8월 사이에 상대적으로 높은 값을 나타내었다. 규산 염 규소 (SiO₃-Si)의 농도는 행암만 (정점 1)에서 79.3~386.2 μg-Si L⁻¹ 그리고 마산만 (정점 2)에서 86.2~193.1 μg-Si L⁻¹의 범위를 나타내었으며, 평균농도는 마산만 (133.9±45.9 μg-Si L⁻¹)보다 행암만 (156.0±121.4 μg-Si L⁻¹)에

서 다소 높게 나타났다. 분포양상을 월별로 살펴 보면 우기인 6월과 7월에 상대적으로 높은 농도를 그리고 8, 9, 10월에 낮은 농도를 나타내었다.

3.2 엽록소 a 및 증속영양세균

엽록소 a 함량은 행암만 (정점 1)에서 12.7~88.5 $\mu\text{g L}^{-1}$ 그리고 마산만 (정점 2)에서 4.8~134.8 $\mu\text{g L}^{-1}$ 의 범위를 나타내었으며 두 정점의 평균 엽록소 a 함량은 정점 1보다 2에서 다소 높게 나타났다. 정점별 비교에서 마산만 (정점 2)은 행암만 (정점 1)에 비하여 변화 폭이 넓게 나타났으나 월별로는 유사한 경향을 보였다. 특히 행암만 (정점 1)에서, 엽록소 a 함량은 6, 7, 11월에 평균농도 보다 높게 나타났으며 10월 ($12.7 \mu\text{g L}^{-1}$)에 가장 낮은 농도를 나타내었다. 또한 마산만 (정점 2)에서 엽록소 a 함량은 7월과 11월에 월 평균값 보다 높게 나타난 반면, 9월에 가장 낮은 값을 나타내었다.

증속영양세균의 수는 행암만 (정점 1)에서 $4.3 \times 10^3 \sim 1.2 \times 10^6 \text{ CFU ml}^{-1}$ 을 그리고 마산만 (정점 2)에서 $7.0 \times 10^3 \sim 1.2 \times 10^6 \text{ CFU ml}^{-1}$ 의 범위를 나타내었으며 평균 증속영양세균의 수는 마산만 (정점 2, $3.77 \times 10^5 \text{ CFU ml}^{-1}$) 보다 행암만 (정점 1, $4.56 \times 10^5 \text{ CFU ml}^{-1}$)이 다소 높게 나타났으나 뚜렷한 차이는 나타나지 않았다 (Table 1). 두 정점에서 월별 증속영양세균의 분포는 유사한 경향을 나타냈으며 월 평균값 보다 높은 증속영양세균의 수는 행암만 (정점 1)에서 6, 7, 11월에 그리고 마산만 (정점 2)에서 6월과 7월에 각각 나타났다. 반면에 가장 낮은 증속영양세균 수는 두 정점 모두 9월에 나타났으며 가장 높은 증속영양세균의 수는 행암만 (정점 1)의 경우 7월에 $1.19 \times 10^6 \text{ CFU ml}^{-1}$ 로, 마산만 (정점 2)의 경우 6월에 $1.20 \times 10^6 \text{ CFU ml}^{-1}$ 로 나타났다.

3.3 통계분석

행암만과 마산만에서 수행된 연구결과를 이용하여 상관관계 분석을 수행하였으며, 그 결과를 Table 2에 수록하였다. 물리화학적인 변수들의 상관관계 분석결과, 두 정점에서 용존성 무기영양염은 강수량과 밀접한 상관 관계를 관찰할 수 있었다. 강수량은 행암만 (정점 1)에서 DIP ($r=0.924, P<0.01$)와 그리고 마산만 (정점 2)에서 $\text{NO}_2\text{-N}$ ($r=0.814, P<0.05$), $\text{NO}_3\text{-N}$ ($r=0.851,$

$P<0.05$), DIN ($r=0.850, P<0.05$)과 양의 상관관계를 나타내었다. 또한 마산만 (정점 2)에서 질소원은 염분이 감소할수록 N/P 비가 증가하는 경향을 나타내었다 (Fig. 2).

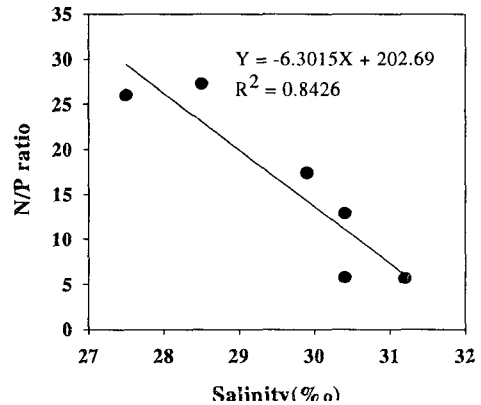


Fig. 2 Relationship between N/P ratio and salinity in the surface water of Masan Bay from June to November, 1996.

생물학적인 변수 또한 물리화학적인 변수와 유의한 상관관계를 나타내었다. 광합성의 생물량 지표로 이용되는 엽록소 a 함량은 행암만 (정점 1)에서 인 ($r=0.847, P<0.05$), 강수량 ($r=0.813, P<0.05$)와 양의 상관관계를 나타내었으나, 마산만 (정점 2)에서 다른 변수들과 유의한 상관관계를 나타내지 못하였다. 증속영양세균은 행암만 (정점 1)에서 규산염 규소 ($r=0.960, P<0.01$)와 유의한 양의 상관관계를 나타내었다. 또한 마산만 (정점 2)에서 증속영양세균은 강수량 ($r=0.990, P<0.01$), $\text{NO}_3\text{-N}$ ($r=0.901, P<0.05$), DIN ($r=0.899, P<0.05$), N/P molar 비 ($r=0.952, P<0.01$)와 밀접한 양의 상관관계를 그리고 염분 ($r=-0.934, P<0.01$)과 음의 상관관계를 나타내었다 (Table 2).

이러한 상관관계 분석의 결과를 바탕으로 증속영양세균을 증속변수 (independent variable)로 하고 그 외의 변수들을 독립변수 (dependent variable)로 하여 중회귀분석 (multiple regression)을 수행하였다 (Table 3). 정점 1 인 행암만에서 증속변수인 증속영양세균은 2 종의 독립변수 (규산염 규소, pH)에 의해 약 88% 설명되며 있으며 규산염 규소가 76%를 설명하고 있어 가

Table 1 Summary of environmental and biological parameters in Haengam Bay(Station 1) and Masan Bay(Station 2) from June to November, 1996.

Station no.	Date	Pre ^a	WT ^b	pH	Sal ^c	NH ₃ -N NO ₂ -N NO ₃ -N DIN ^d DIP ^e SiO ₃ -Si N/P					CHL ^f	HB ^g		
		(mm)	(°C)		(‰)	(μg/L)					(μg/L)	(CFU/ml)		
1	Jun. 27	325.4	20.0	ND	26.4	53.9	3.11	556.3	613.3	389.1	194.8	3.5	88.5	5.60x10 ⁵
	Jul. 28	183.2	28.0	ND	30.6	6.3	0.80	7.2	14.3	108.5	386.2	0.7	58.2	1.19x10 ⁶
	Aug. 20	121.0	24.5	8.02	30.5	20.6	2.07	90.7	113.4	43.5	79.3	5.8	34.0	ND ^h
	Sep. 10	33.5	23.5	7.83	27.8	20.6	3.40	37.8	61.8	33.6	79.3	4.1	29.2	4.33x10 ³
	Oct. 7	26.0	20.8	8.02	31.2	15.8	0.22	52.0	68.0	20.4	79.3	7.4	12.7	4.40x10 ⁴
	Nov. 5	64.0	19.0	8.02	30.5	20.6	1.61	113.5	135.7	83.1	117.2	3.6	65.6	4.83x10 ⁵
Mean		125.5	22.6	7.97	29.5	23.0	1.87	142.9	167.8	113.0	156.0	4.1	48.0	4.56x10 ⁵
STD		114.4	3.4	0.10	1.9	16.1	1.25	206.0	222.4	139.2	121.4	2.4	27.7	4.81x10 ⁵
Min		26.0	19.0	7.83	26.4	6.3	0.22	7.2	14.3	20.4	79.3	0.2	12.7	4.33x10 ³
Max		325.4	28.0	8.02	31.2	53.9	3.40	556.3	613.3	389.1	386.2	7.4	88.5	1.19x10 ⁶
2	Jun. 27	325.4	20.4	ND	28.5	73.6	4.70	825.2	903.5	73.3	175.9	27.3	13.4	1.20x10 ⁶
	Jul. 28	183.2	27.3	ND	29.9	6.3	5.40	105.0	116.7	14.8	193.1	17.4	134.8	5.20x10 ⁵
	Aug. 20	121.0	24.7	7.96	27.5	15.8	3.50	272.0	291.3	24.8	86.2	26.0	52.3	ND
	Sep. 10	33.5	23.7	7.94	30.4	15.8	2.40	113.1	131.3	50.1	89.7	5.8	4.8	7.00x10 ³
	Oct. 7	26.0	21.9	8.30	30.4	15.8	0.63	141.6	158.1	27.0	106.9	12.9	36.4	8.20x10 ⁴
	Nov. 5	64.0	19.2	8.05	31.2	15.8	1.70	139.6	157.1	61.0	151.7	5.7	122.4	7.65x10 ⁴
Mean		125.5	22.9	8.06	29.7	23.9	3.06	266.1	293.0	41.8	133.9	15.9	60.7	3.77x10 ⁵
STD		114.4	3.0	0.17	1.4	24.7	1.82	280.5	305.5	23.1	45.9	9.5	55.4	5.03x10 ⁵
Min		26.0	19.2	7.94	27.5	6.3	0.63	105.0	116.7	14.8	86.2	5.7	4.8	7.00x10 ³
Max		325.4	27.3	8.30	31.2	73.6	5.40	825.2	903.5	73.3	193.1	27.3	134.8	1.20x10 ⁶

^a Precipitation data from Korea Meteorological Administration (KMA) and data indicate the me of sampling months

^b Water temperature

^c Salinity

^d Dissolved inorganic nitrogen (NH₃-N+NO₂-N+NO₃-N)

^e Dissolved inorganic phosphate (PO₄-P)

^f Chlorophyll a

^g Heterotrophic bacteria

^h Not determined

Table 2 Correlation coefficients between biological and environmental parameters (P<0.05).

Station no	Parameter	Pre ^a	Sal ^b	pH	NH ₃	NO ₂	NO ₃	DIN ^c	DIP ^d	N/P	SiO ₃ - Si
1	Sal			0.976	-0.817	-0.868					
	NO ₃ -N				0.971*						
	DIN				0.976*		0.999*				
	DIP	0.924*			0.864		0.949*	0.944*			
	N/P										-0.872
	Chl- a ^e	0.813							0.846		
HB ^f										0.960*	
2	NO ₂	0.814									
	NO ₃	0.852			0.978*						
	DIN	0.850			0.981*		0.999*				
	N/P		-0.918								
	HB	0.990*	-0.934				0.901	0.899		0.952	

* P<0.01

^a Precipitation data from Korea Meteorological Administration (KMA)

^b Salinity

^c Dissolved inorganic nitrogen

^d Dissolved inorganic phosphate

^e Chlorophyll a

^f Heterotrophic bacteria

Table 3 Significant independent variables in the regression models for the parameter of chlorophyll a and heterotrophic bacteria based on data from studied area.

Station no	Dependent variable	R ² (%)	Independent variables
1	Heterotrophic Bacteria	87.8	SiO ₃ - Si (76.3); pH (23.5)
	Chlorophyll- a	90.3	- N/P (37.6) ; DIP ^c (31.0) ; - WT ^a (21.7)
2	Heterotrophic Bacteria	100	SiO ₃ - Si (42.3); - Sal ^b (32.1); - Chl- a ^d (17.7); DIP (7.0)
	Chlorophyll- a	100	SiO ₃ - Si (67.8) ; - Sal (32.2)

^a Water temperature

^b Salinity

^c Dissolved inorganic phosphate

^d Chlorophyll a

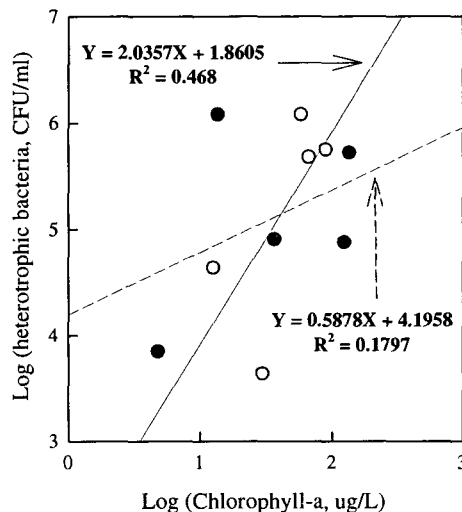
장 높은 중요도를 나타내었다. 반면에 정점 2인 마산만에서 종속변수인 종속영양세균은 4종의 독립변수 (규산염 규소, -염분, -엽록소 a, 인산염 인)에 의해 100%를 설명하고 있으며, 규산염 규소가 40.3%를 설명하고 있어 가장 높은 중요도를 나타내었다. 또한 다른 생물변수인 엽록소 a 함량을 종속변수로 하여 중회귀분석을 수행하였을 때, 엽록소 a 함량은 행암만 (정점 1)에서 3종의 독립변수 (-N/P 비, 인산염 인, 수온)에 의해 그리고 마산만 (정점 2)에서 2종의 독립변수 (규산염 규소, -염분)에 의해 각각 90.3%와 100%를 설명하고 있다. 두 정점에서 엽록소 a 함량을 설명하는 가장 높은 중요도는 행암만 (정점 1)에서 N/P mole 비 그리고 마산만 (정점 2)에서 규산염 규소로 나타났다.

4. 고 찰

본 연구대상지역인 마산만 (정점 2)과 행암만 (정점 1)은 수계내 용존성 무기영양염의 함량에서 DIN은 마산만이 행암만보다 높고 DIP는 마산만이 행암만 보다 낮은 경향을 나타내 뚜렷한 차이를 보였다 (Table 1, 2). 마산만에서 높은 DIN의 농도는 마산과 창원시의 생활하수, 공업폐수, 분료를 포함하고 있는 담수의 유입이 주된 영향을 미친다는 기존의 보고와 일치하는 것으로 사료된다 (Yang and Lee [1983]; Yang *et al.*[1983]; Yang[1992]; Hong *et al.*[1991]; Lee *et al.*[1994]; Kang *et al.*[1999]). 본 연구기간이 우기인 초여름에서 가을사이에 수행되어 강우에 의한 담수유입의 영향이 큼을 알 수 있다. 특히, 암모니아, 아질산염 질소와 질산염 질소를 포함하는 용존성 무기질소 (DIN)는 강수량, 염분과 밀접한 상관관계를 보여주었으며, 염분의 감소에 따른 N/P molar 비의 증가는 인에 비해 상대적으로 풍부한 질소원이 담수로부터 유래되었음을 보여주고 있다 (Fig. 2; Yang[1984]; [1992]). 반면에 마산만과 비교하여 2.7배정도 높게 나타난 행암만의 인 농도 역시 강수량과 밀접한 상관관계를 나타내었으며 강수량이 많았던 6, 7, 11월에 N/P molar 비가 상대적으로 낮게 나타나 인의 함량이 질소 함량보다 상대적으로 높음을 알 수 있다 (Table 1). 이와 같이 행암만의 높은 인은 진해시와 진해공단으로부터 유입된 생활하수 및 공업폐수가 주

된 원인으로 사료되고 (이 등[1974]; Chang *et al.*[1995]), 특히 진해시의 구이동천이 주된 인의 유입원으로 보고된바 있다 (이[1991]). 이러한 불균형적인 질소와 인의 공급은 조사기간동안 두 수역의 평균 N/P molar비에 있어 뚜렷한 차이를 보였다 (Table 1). 특히, 행암만의 N/P molar 비는 평균 4.1 ± 2.4 로 나타나 질소-제한 환경으로 구분될 수 있다. 이러한 낮은 N/P molar 비는 식물 플랑크톤의 성장을 위한 C : N : P인 106 : 16 : 1 (Redfield *et al.*[1963])과 세균의 성장에 필요한 C : N : P인 100 : 10 : 1 (Mitchell, [1976])과 비교하여 생물의 성장에 있어 제한 인자로 작용할 가능성을 시사하고 있다.

일반적으로, 세균의 개체수와 엽록소 a 함량은 유사한 경향을 나타내는데, 이는 일차생산자인 식물 플랑크톤으로부터 기인되는 유기물이 세균의 개체수 및 생산성을 증가시키기 때문이다 (Cole[1982]). 본 연구에서 종속영양세균의 개체수는 엽록소 a 함량과 낮은 상관관계를 나타내었으며 마산만 보다 행암만에서 상대적으로 낮았다 (Fig. 3). 이러한 낮은 상관관계는 해양생태계에서 보다 많은 양의 유기물이 유입되는 하구역에



서 나타나는 것으로 보고되어있다 (Griffith *et al.*[1990]; 심 등[1993]). 그러므로 하계동안 적조의 발생이 빈번한 마산만에서 식물 플랑크톤으로부터 유래된 체외 배설물 및 유기사체의 공급이 중속영양세균에게 상대적으로 중요하지 않을 것으로 사료된다. 본 연구에서 단순회귀분석의 결과에 따르면, 중속영양세균은 행암만과 비교하여 마산만에서 많은 환경변수들과 높은 상관성을 보여주었으며 주된 변수들은 강수량, 염분, 용존성 질소로 나타나 담수의 유입이 주된 요인임을 알 수 있다 (Table 2). 또한 중회귀분석의 결과, 마산만에서 중속영양세균의 변화는 규산염 규소와 염분에 의해 각각 42.3%와 32.1%가 설명되고 있다 (Table 3). 그러나 가장 높은 중요도를 나타낸 규산염 규소가 담수의 유입에 의한 공급으로 설명되고 (안[1984]), 음의 상관관계를 나타내는 염분 또한 담수의 유입에 의한 영향으로 본다면 마산만에서 중속영양세균의 분포는 담수의 유입에 의해 지배되는 것으로 판단된다.

반면에 행암만의 중속영양세균은 단순회귀분석에서 규산염 규소 ($r=0.960, P<0.01$)만이 밀접한 상관관계를 나타내었을 뿐 그 외 다른 변수와 유의수준의 상관관계를 나타내지 않았다 (Table 2). 중회귀분석에서 중속영양세균은 규산염 규소에 의해 76.3%의 중요도를 나타내어 반 폐쇄적인 환경을 구성하고 있는 행암만은 강우에 의한 담수의 유입이 가장 중요한 환경인자로 볼 수 있다 (Table 3). 특히 우기인 6월에 용존성 무기인과 질산염 질소의 함량이 급격히 증가한 반면 7월에 중속영양세균과 식물 플랑크톤이 증가함으로써 질산성 질소가 현저히 소비되어 N/P molar 비가 연구기간 최저치인 0.7로 감소하였다 (Table 1). 결과적으로 질소-제한환경인 행암만은 담수의 유입이 증가하는 우기동안을 제외하고 중속영양세균은 제한된 질소에 의해 생장이 제한되는 것으로 사료된다. 담수의 영향을 많이 받는 내만의 해양생태계에서 세균의 분포는 수온, 염분, 담수의 유입이 중요한 결정인자로 알려져 있다. Finland 연안에서 Vääänen [1980]은 세균의 분포가 수온, 영양염류, pH의 변화에 의하여 65%가 설명되며, 진해만에서 안 [1984]은 질소의 증가가 생태계를 지배하는 주된 요인으로 나타났으나 질소원은 세균의 분포에 영향을 미치지 않고 수온에 의해서 87.1%가 설명된다고 하였다. 이들의 결과는 연중변화를 조사하여 분석한 결과이기

때문에 세균의 성장인자중의 하나인 온도가 가장 중요한 환경인자로 판정하였다. 그러나 본 연구는 비교적 높은 수온분포를 보이는 6월에서 11월의 기간동안 수행되어 중속영양세균의 분포에 있어 온도는 중요한 인자로 나타나지 않았으며 담수의 유입과 염분이 더 중요한 요인으로 나타났다 (Table 2, 3). 낙동강하구에서 안 등 [1991]은 중속영양세균의 분포가 염분에 의해 36%가 설명되며 담수의 유입이 빈번한 하구언에서 염분의 증가는 세균의 포도당 전환율을 감소시켜 결과적으로 세균의 활성을 감소시키는 것으로 보고하였다. 특히 마산만의 경우 중속영양세균과 염분이 서로 밀접한 상관관계는 강수량의 증가로 육상으로부터 기원된 담수유래 세균의 유입과 영양원의 유입으로 중속영양 세균의 활성 및 성장을 촉진함으로써 나타난 결과로 판단된다. 그러나 담수의 유입이 감소하여 염분이 증가할 경우에는 해양토착 세균이 중속영양세균의 대부분을 차지할 것으로 사료된다.

마산만의 엽록소 a 함량은 담수의 유입과 저염분이 주요한 변수로 분석되었으며 (Table 3) 이러한 인자는 마산만내 질소공급의 주된 원인으로 사료된다.(Fig. 2) 담수의 유입이 증가하는 초여름기간동안 마산만과 진해만에 인접한 마산만의 수로에서 엽록소 a 함량에 영향을 미치는 주된 환경요인은 용존성 무기질소라는 기존의 보고와 일치하고 있다 (Yang and Lee [1983]; Yang *et al.*[1983]; Yang, [1992]; Hong *et al.*, [1991]; Lee *et al.*[1994]; Kang *et al.*[1999]). 그러므로 마산만 내로 풍부한 질소원의 유입은 식물 플랑크톤의 활성을 증가시켜 빈번한 적조현상의 원인으로 작용하였을 것으로 사료된다. 그러나 9월 이후 마산만은 N/P molar 비의 감소 (Table 1), 특히 인 함량에 비해 질소원의 함량이 낮아 질소원이 식물 플랑크톤의 생장에 제한요인으로 작용할 가능성이 높다. 11월에 적조현상이 진행되는 동안 N/P molar 비가 5.7로 나타났으며 표층수의 염분이 31.2‰로 증가하여 담수의 유입이 감소함으로써 식물 플랑크톤의 발생으로 질소의 소비량에 비하여 공급량이 둔화됨으로서 적조현상을 제한하는 인자로 작용할 가능성이 높다. 그러므로 엽록소 a 함량은 담수의 유입과 용존성 무기질소의 공급에 의존하는 것으로 판단되며 결과적으로 인에 비해 질소가 엽록소 a 함량을 결정하는 환경인자로 볼 수 있다. Lee와 Yoo[1990]는 중회귀분

석에서 마산만의 와편모조류의 변화에 pH와 염분이 각각 19.6%, 12.7%의 중요도를 그리고 안 [1984]은 엽록소 a 함량의 변화가 pH에 의해 38.5%의 중요도를 나타낸다고 보고하였다. 본 연구결과는 Lee와 Yoo [1990]의 결과와 다소 일치한다.

행암만의 경우 엽록소 a 함량은 강수량과 유의한 상관관계를 나타내었고 (Table 2) 중회귀분석의 결과 마산만과 달리 인의 영향이 더 큰 비중을 차지하는 것으로 나타났다 (Table 3). 그러나 행암만은 풍부한 인에 비하여 질소가 제한된 질소제한환경으로 나타났으며 연구기간동안 N/P molar 비가 8을 넘지 못하였다 (Table 1). 그럼에도 불구하고 엽록소 a 함량은 마산만과 구별되는 차이를 나타내고 있지 않아 질소에 의한 성장제한이 나타나는 것으로 판단된다. 그러므로 강수량이 증가하는 시기에 육상으로부터 질소원의 공급은 엽록소 a 함량 뿐만 아니라 중속영양세균의 변화를 결정하는 중요한 인자로 사료되며 통계분석결과는 중회귀분석보다 상관관계를 조사하는 단순회귀분석이 엽록소 a 함량의 변화를 잘 설명하여 주었다.

연구수역인 마산만과 행암만에서 육상으로부터 유입물의 증가는 무기 영양염의 과부하를 초래함으로써 수계생태계의 부영양화를 가중시키는 주된 원인으로 작용하였음을 알 수 있었다 (Yang and Lee[1983]; Yang *et al.*[1983]; Yang[1992]; Hong *et al.*[1991]). 두 연구수역에서 중속영양세균의 수와 엽록소 a 함량사이의 상관관계를 나타내는 coupling reaction은 낮게 나타나 (Fig. 3) 중속영양세균은 식물 플랑크톤으로부터 생성된 유기물보다는 육상으로부터 기인된 유기물질에 의존함을 알 수 있다 (Griffith *et al.*[1990]; 심 등 [1993]). 또한 통계분석에서 중속영양세균은 담수의 유입이 중요한 환경인자로 나타나 (Table 2, 3) 상기의 결과와 일치하고 있다. 이러한 환경인자는 연안역에서 염분의 변화에 중요한 요인으로 작용하여 담수의 유입이 증가하는 우기동안에 중속영양세균은 해양토착세균보다 담수유래 세균의 성장에 유리한 영향을 미칠 것으로 사료된다 (안 등[1991]). 식물 플랑크톤의 생물량을 추정하는 엽록소 a 함량은 담수의 유입에 의존하며 (Table 2, 3) 담수의 유입을 통하여 공급되는 용존성 무기질소는 마산만과 행암만에서 빈번한 적조현상의 원인을 제공한 것으로 판단된다. 이러한 결과

로부터 연안생태계인 행암만과 마산만에서 중속영양세균과 엽록소 a 함량의 변화는 육상으로부터 유입되는 영양물질에 의해 지배됨을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 수산특정과제인 “적조피해대책연구”의 재원을 받아 수행되었음을 밝힙니다.

참 고 문 헌

- [1] 김학균, 1989, 마산만의 편모조적조의 발생과 환경특성, 수산진흥원 연구보고, Vol.43, 1-40.
- [2] 김학균, 박주석, 이삼근, 안경호, 1993, 한국연안의 적조생물, 국립수산진흥원, 97.
- [3] 김학균, 이삼근, 안경호, 윤성화, 이필용, 이창규, 조은섭, 김정배, 최희구, 김평중, 1997, 한국연안의 적조; 최근적조의 발생원인과 대책, 국립수산진흥원, 280.
- [4] 박주석, 김종두, 1967, 진해만의 적조현상에 관한 연구, 국립수산진흥원 연구보고, Vol.41, 1-26.
- [5] 심재형, 신윤근, 조병철, 1993, 만경강·동진강 하구에서 박테리아 및 식물플랑크톤의 역할과 상호관계, 한국해양학회지, Vol.28, 107-113.
- [6] 안태석, 1984, 진해항 생태계에 있어서 미생물분포에 영향을 미치는 환경요인의 분석, 서울대학교 대학원 박사학위논문.
- [7] 안태영, 조기성, 하영철, 1991, 낙동강 하구의 세균분포와 활성에 미치는 환경요인, 한국미생물학회지, Vol.29, 329-338.
- [8] 이원재, 정희동, 강창근, 박희열, 1986, 부영양화해역의 해양세균의 분리 및 분류군의 생리적 성장에 관하여, 한국수산학회지, Vol.19, 586-592.
- [9] 이원재, 김학균, 박영태, 성희경, 1990, 해양세균이 적조형성생물에 미치는 역할, 한국수산학회지, Vol.23, 303-309.
- [10] 이종화, 김춘수, 광희상, 1974, 동계진해항 일대해수의 화학적 성분함량분포, 한국해양학회지, Vol.9, 39-51.
- [11] 이찬원, 1991, 진해만 일원 오염실태 조사 보고서, 환경처, 502.
- [12] 중앙기상대, 1996, 기상월보, 중앙기상대.

- [13] APHA, 1992, Standard methods for the examination of water and wastewater, 18th ed., APAH, New York, 374-872.
- [14] Atlas, R.M. and R. Batha, 1981, Microbial ecology; fundamentals and applications, Addison-wesley.
- [15] Chang, M., W.S. Kim and J.H. Lee, 1995, Phytoplankton blooms in the coastal waters of Korea ; red tides in Masan and Chinhae Bays, *Ocean Research*, Vol.17, 137-156.
- [16] Cho, C.H, 1978, On the *Gonyaulax* red tide in Jinhae Bay, *Bull Korean Fish Soc.*, Vol.11, 111-114.
- [17] Cole, J.J., 1982, Interaction between bacteria and algae in aquatic ecosystems, *A. Rev. Ecol. Syst.*, Vol.13, 291-314.
- [18] Griffith, P.C., D.J. Douglas and S.C. Wainright, 1990, Metabolic activity of size-fractionated microbial plankton in estuarine nearshore and continental self waters of Georgia, *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, Vol.59, 263-270.
- [19] Hong, G.H., K.T. Kim, S.J. Pae, S.H. Kim, and S.H. Lee, 1991, Annual cycles of nutrients and dissolved oxygen in a nutrient-rich temperate coastal bay, Chinhae Bay, Korea, *J. Oceanol. Soc. Korea*, Vol.26, 204-222.
- [20] Kang, C.K., P.J. Kim, W.C. Lee, and P.Y. Lee, 1999, Nutrients and phytoplankton blooms in the southern coastal waters of Korea : I. the elemental composition of C, N, and P in particulate matter in the coastal Bay systems, *J. Oceanol. Soc. Korea*, Vol.34, 86-94.
- [21] Lee, J.B. and K.I. Yoo, 1990, Dynamics and seasonal succession of dinoflagellate community in Masan Bay, Korea, *J. Oceanol. Soc. Korea*, Vol.25, 106-116.
- [22] Lee, P.Y., C.K. Kang, J.S. Park, and J.S. Park, 1994, Annual change and C : N : P ratio in particulate organic matter in Chinhae Bay, Korea, *J. Oceanol. Soc. Korea*, Vol.29, 107-118.
- [23] Michell, R. 1976, Environmental microbiology, Prentice Hall, N.Y.
- [24] Redfield, A.C., B.H. Ketchum and F.A. Richards, 1963, The influence of organism on the composition of sea-water, In : *The Sea*, edited by M.N. Hill, Vol.2, Wiley Interscience, New York, 26-79.
- [25] Rheinheimer, G. 1977, Regional and seasonal distribution of saprophytic and coliform bacteria. In : *Microbial ecology brackish water environment*, edited by G. Rheinheimer, Springer-Verlag, Berlin, 121-137.
- [26] Väätänen, P., 1980, Effects of environmental factors on microbial populations in Brackish water off the Southern Coast of Finland, *Appl. Environ. Microbiol.*, Vol.40, 48-54.
- [27] Yang, D.B. and K.W. Lee, 1983, Vertical distribution and diurnal variations of dissolved nutrients and chlorophyll a in Masan Bay, *Bull. KORDI*, Vol.5, 15-20.
- [28] Yang, D.B., E.S. Kim and K.W. Lee, 1983, Seawater quality and red tides in Jinhae Bay in 1979-1982, *Bull. KORDI*, Vol.5, 9-13.
- [29] Yang, D.B., 1992, Distribution of various nitrogenous compounds and respiratory oxygen consumption rate inn Bay, Korea during summer 1986, *J. Oceanol. Soc. Korea*, Vol.27, 303-310.
- [30] ZoBell, C.E., 1946, Marine microbiology, Chronica Botanica Co., Waltham. Mass.