

통영 지역의 암반 조간대에서 배출수 유입으로 인한 해조 군집 구조와 엽체 내 질소 함량의 변화

강윤희^{1,2}·박상률³·육정현¹·이진애⁴·정익교^{2*}

¹부산대학교 해양연구소, ²부산대학교 지구환경시스템학부,

³부산대학교 생명과학과, ⁴인제대학교 환경공학부

Changes of Tissue N Content and Community Structure of Macroalgae on Intertidal Rocky Shores in Tongyeong Area due to Sewage Discharge

Yun Hee KANG^{1,2}, Sang Rul PARK³, Jung Hyun OAK¹, Jin Ae LEE⁴
and Ik Kyo CHUNG^{2*}

¹Marine Research Institute, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

²Division of Earth Environmental System, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

³Department of Biological Science, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

⁴School of Environmental Science and Engineering, Inje University, Gimhae 621-749, Korea

Enrichment in nutrients coming from urban sewage outfalls can lead to eutrophication in coastal areas, which can also change the species composition and community structure of macroalgal communities. We investigated the structure of the macroalgal community within three rocky shores in order to assess any possible differences in their characteristics. Site 1 was located near Tongyeong city's sewage outfall, Site 2 was located near a public beach area, and Site 3 faced open channel of the Ocean. All three sites were located within the same stretch of the coast, where Site 2 was located between sites 1 and 3. We measured the nutrient concentration in water and the tissue nitrogen content in macroalgae samples. Nutrients in the water column surrounding site 1 were high in ammonium ($30.2 \pm 1.8 \mu\text{M}$), nitrate ($26.2 \pm 0.1 \mu\text{M}$), and phosphate ($2.7 \pm 0.1 \mu\text{M}$) content, and were characterized by low numbers of macroalgal species and species and a low species diversity index. In contrast, site 3 exhibited relatively low nutrient concentration levels and a high number of macroalgal species and a high species diversity index. Comparative analysis showed that the tissue nitrogen content of macroalgae were significantly ($P < 0.05$) affected by the nutrient concentration in the water column. The tissue nitrogen content of green algae within site 1 was higher than the others sites. However, the tissue nitrogen content of brown algae was similar at all three sites. Thus, the tissue nitrogen content of macroalgae and the macroalgal community structure of intertidal rocky shores were dependent on location and the performance of macroalgal communities was dependent on water quality.

Key words: Sewage, Nutrient enrichment, Macroalgal community structure, Species diversity, Tissue nitrogen content, Intertidal rocky shore

서 론

해조류는 연안 및 하구 생태계에서 중요한 일차 생산자로서 다양한 생물들한테 먹이원으로서 역할을 수행한다 (Alongi, 1998). 해조류 생태계는 전체 해양에서 약 2%내의 면적을 차지하고 있지만, 그들의 생산량은 전체 해양의 일차생산량의 10% 이상을 담당하고 있다 (Duarte and Cebrián, 1996). 또한, 해조류는 육상에서 유입되는 과도한 질소와 인 등의 영양물질을 흡수하는 생물 여과자의 역할을 수행하고 있다 (Mann, 1982). 이외에도 해조류는 해양생태계에 있어서 연안에 서식하는 어패류의 산란장 및 서식처를 제공하며, 이외에도 식용, 공업용 원료, 사료, 비료, 의약품 원료와 바이오에너지원 등

로 이용되고 있다 (Dawes, 1998). 따라서 해조류는 연안 및 해양 생태계에서 매우 중요한 구성요소이다.

그러나 연안 지역의 산업개발과 인구증가로 인해 과도한 영양분이 바다로 유입되고 있으며, 이로 인해 부영양화 현상 (eutrophication)이 과거에 비해 빈번하게 발생하고 있다. 연안의 부영양화 현상은 적조 현상 (red tide) 및 녹조대발생 (green tide)을 유발하여, 서식지의 물리화학적 환경 요인을 변화시키며, 다른 해조류의 생육에 영향을 미친다 (Fletcher, 1996). 따라서 부영양화 현상은 군집 내 종 다양성에 부정적인 영향을 미쳐 해조류 군집 구조를 변화시킨다.

많은 연구자들은 연안에 시설된 하수처리장에서 배출되는 영양염이 풍부한 오폐수에 의해서 해양 저서식물 (marine benthic vegetation) 군집에 변화를 일으킨다고 보고하였다 (Littler and Murray, 1975; May, 1985; Diez et al., 1999; Arévalo

*Corresponding author: ikchung@pusan.ac.kr

et al., 2007). Bellgrove et al. (1997)은 배출수에 의해서 해양 저서식물 군집에 차지하는 일년생과 다년생 해조류의 구성비율이 변화한다고 보고하였다. 또한, 해수 내 영양염 농도에 민감한 대형 갈조류는 높은 농도를 지닌 배출수에 노출되는 지역부터 생물량 및 생육 면적에서 급격한 변화를 일으킨다고 알려져 있다 (Munda, 1982; May, 1985). 이러한 배출수에 의한 영향은 다른 지역의 해조류 군집보다 암반 조건대 지역이 더 많은 영향을 받는 것으로 나타났는데, 이것은 배출수가 해수표면으로 흐르기 때문이다 (Bellan and Bellan-Santini, 1972). 최근 배출수가 유입되는 지역에서 해수의 수질과 영향을 판단하는데 있어서 암반 조건대의 해조류 군집 구조를 연구하는 것이 매우 유용한 방법으로 평가받고 있다 (Fairweather, 1990).

해조류는 해수 내 녹아있는 무기영양염류를 흡수하여 성장 및 생존에 필요한 에너지로 사용하거나 엽체 내 축적되어 구조나 골격을 형성하는데 이용한다 (Lobben and Harrison, 1994). 일반적으로 해조류의 영양염 흡수율은 해수 내 무기영양염류의 농도에 반응하며 (Harrison and Hurd, 2001), 해수 내 질소 (nitrogen)나 인 (phosphate)의 농도가 높은 지역에서 생육하는 해조류는 엽체 내 질소나 인 함량이 증가하는 것을 볼 수 있다 (Lin and Fong, 2008). Fong et al. (1994)는 이러한 해조류의 생리적 특성을 이용하여 해수 내 무기영양염류의 농도를 평가 또는 판단하는데 유용하다고 보고하였다. 또한, 하수처리장이나 양식장에서 배출되는 오폐수의 분포와 주변 생태계에 미치는 영향을 조사하는데 해조류의 엽체 내 질소 함량을 이용하였다 (Jones et al., 2001). 따라서 주변 해수의 영양염 농도에 영향을 받는 해조류의 엽체 내 질소 함량에 대한 연구는 고농도의 배출수에 노출된 지역의 생태계를 평가하는데 매우 유용한 것으로 사료된다.

본 연구의 목적은 하수처리장과 연안 지역에서 배출된 오폐수에 의해 노출된 지역의 해조 군집 구조와 엽체 내 영양분 함량에 어떠한 영향을 받고 변화하는지를 파악하는데 있다. 따라서 우리는 하수처리장과 근접한 지역의 해조 군집 구조는 단순화되어, 고농도의 영양염에 내성을 지닌 1-2종에 의해서 우점할 것이며, 엽체 내 질소 함량 변화는 종에 따라 달라질 것이라든가 가설을 설정하였다. 본 연구의 가설을 검증하기 위해서 하수처리장과 근접한 지역과 청정 해역에 해당하는 지역을 설정하여 해조 군집 구조, 종 다양성 지수 및 해조류의 엽체 내 질소 함량을 조사하였다.

재료 및 방법

연구 장소

본 연구는 경상남도 통영시 마라도의 암반조건대로 이루어진 세 조사정점에서 진행되었다 (Fig. 1). 조사정점 1 (site 1)은 주변에 통영시 하수종말처리장과 인구가 밀집되어 있어서 많은 양의 영양염이 포함된 배출수 유입이 예상되며, 주변의 여러 섬들로 둘러싸여 외해로부터 직접적인 영향을 받지 않는

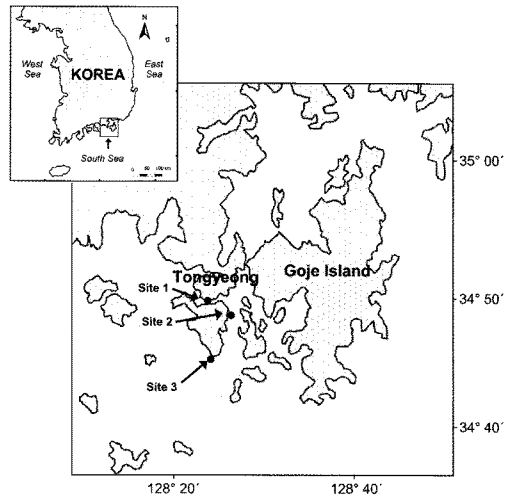


Fig. 1. Location of study area and sites in Tongyeong area, Korea.

다. 통영시에 위치한 하수종말처리장의 일일 처리용량은 약 54,000톤에 이른다. 설계방류수질에서 총 질소의 허용기준은 10 mg/L이며 총 인은 0.8 mg/L이다. 만의 형태를 띠고 있는 조사정점 2 (site 2)는 주변에 해수욕장이 근접해 있으며 조사정점 1과 약 10 km 정도 떨어져 있다. 조사정점 3 (site 3)은 외해에 노출되어 직접적인 영향을 받고 있으며, 육지로부터 영양염류의 유입 가능성이 매우 낮은 지역으로 비교적 청정해역을 유지하고 있다. 또한 이 지역은 한려해상국립공원으로서 보호구역으로 설정되어 있다. 통영 지역의 2002년 월 평균 표면광량 (surface irradiance)은 63 $\mu\text{mol photons m}^{-2} \text{d}^{-1}$ 이었으며, 수온은 8-9월 평균 21.3°C로 가장 높았고, 1-2월에 평균 7.2°C로 가장 낮았다 (통영기상대, http://www.kma.go.kr/sfc/sfc_02_03.jsp). 강수량은 장마와 태풍으로 인해 7-8월에 매우 높았다. 세 지역의 해수 내 영양염류, 해조상과 주요 해조 엽체 내 질소 함량은 2002년 1월부터 12월까지 매월 조사하였다.

해수 내 영양염류

해수 내 무기영양염류 (NH_4^+ , $\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-$, PO_4^{3-}) 농도를 측정하기 위해서 매달 각 조사 정점에서 해수 시료를 4개씩 채취하였다. 채취된 해수시료는 현장에서 GF/C를 이용하여 여과시킨 후 이시스박스를 이용해 실험실로 옮겨와 분석하였다. $\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-$ 농도는 구리로 코팅된 카드뮴 환원관을 이용해 NO_3^- 를 NO_2^- 로 환원시켜 측정하였다. 무기영양염류 (NH_4^+ , $\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-$, PO_4^{3-}) 농도는 standard colorimetric techniques에 의해 분석하였다 (Parsons et al., 1984).

해조상 및 피도

세 조사정점의 암반조건대에서 진행된 해조군락의 분석은 각 조사정점의 식생을 대표할 수 있는 곳을 선정하여 매월 조사하였다. 해조군락의 분석을 위한 정량조사는 소방형구로

나닌 0.5 m×0.5 m 크기의 방형구를 임의적으로 설치하고, 방형구 내의 모든 해조류를 끝이나 칼을 이용해 완전히 수거하였다. 수거된 샘플은 엽체 내 질소 함량을 위한 일부의 샘플을 제외하고 10% 포르말린-해수 용액을 이용해 고정된 후 실험실로 운반하였으며, 현미경을 사용하여 동정하였다. 동정된 해조류의 학명과 목록은 한국 해조목록의 분류체제 (Lee and Kang, 2002)를 기준으로 하였다.

현장에서 측정된 해조류의 피도는 5×5 cm 방형구 (sub plot)를 기준으로 해조류가 sub plot의 50%이상 차지하는 수를 세었고, 50%미만시 측정의 오류를 막기 위해서 합산하지 않았다. 이 방법은 일반적으로 random-point-quadrat 방법보다 더 정확한 것으로 알려졌으며, 이전의 여러 연구에서 사용되었다 (Dethier et al., 1993; Kim and DeWreede, 1996). 상대피도 (relative coverage)는 방형구내의 전 출현종의 피도 합에 대한 대상종의 피도 백분율로 나타내었다.

군집 구조 분석

세 정점에서 해조류의 군집구조를 파악하기 위해서 종 다양성 지수 (Shannon and Weaver, 1949)를 측정하였다. 종 다양성 지수 (Shannon-Weaver index: H')는 다음과 같은 식에 의해서 계산되었다.

$$H' = -\sum_{i=1}^S P_i (\ln P_i)$$

S는 전체 종수를 말하며, P_i 는 군집에서 i 번째에 속하는 종의 피도가 전체 피도에서 차지하는 비율을 말한다. 종 다양성 지수는 월별로 계산으로 연평균으로 나타내었으며, 해조류가 관찰되지 않은 시기의 종 다양성 지수는 0으로 처리하였다. 이 모든 분석은 PRIMER-E (version 5.3) 프로그램을 이용하여 계산하였다.

엽체 내 질소 함량

해조류 엽체 내 질소 함량은 해조군집 조사를 통해 세 조사 정점에 모두 출현된 종중에서 각 분류군별로 1종을 선정하여 측정하였다. 각 분류별로 선정된 종은 녹조류는 구멍갈파래 (*Ulva pertusa*), 갈조류는 미역 (*Undaria pinnatifida*)와 홍조류는 마디갈락이 (*Lomentaria catenata*)이다. 해조군집 조사를 통해 채집된 해조류는 실험실에서 담수로 이용해 부착생물과 불순물을 제거한 후, 60°C의 건조기에서 무게가 일정할 때까지 건조시켰다. 건조된 샘플은 막자사발을 이용해 곱게 마쇄하여 CNHS/O elemental analyzer (Perkin Elmer 2400 Ser. II)를 이용하여 엽체 내 질소 함량을 측정하였다.

통계 분석

모든 분석은 SPSS (version 15.0) 통계프로그램을 이용하였다. 통계 분석 전 모든 자료의 정규성 (normality)과 등분산성 (homogeneity of variance)을 검정하였다. 그러나 위의 가정을 위반하였을때, log와 arcsine을 통해서 자료를 변환하였다. 해수 내 영양염류의 조사장소 및 조사시기별 유의한 차이는

two-way ANOVA를 이용하여 분석하였다. 세 지역의 종 다양성 지수 (H')와 주요 우점종의 엽체 내 질소 함량은 one-way ANOVA를 이용하여 분석하였다. 분석 값이 유의할 경우, SNK-test 검정법을 이용하여 각 자료의 유의성을 검정하였다.

결 과

해수 내 영양염류

세 지역에서 해수 내 무기영양염류 (NH_4^+ , $\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-$ 와 PO_4^{3-})의 농도는 시간적으로 변동이 매우 컸으며 ($P < 0.001$), 지역적으로 유의한 차이 ($P < 0.001$)를 나타내었다 (Fig. 2). 하

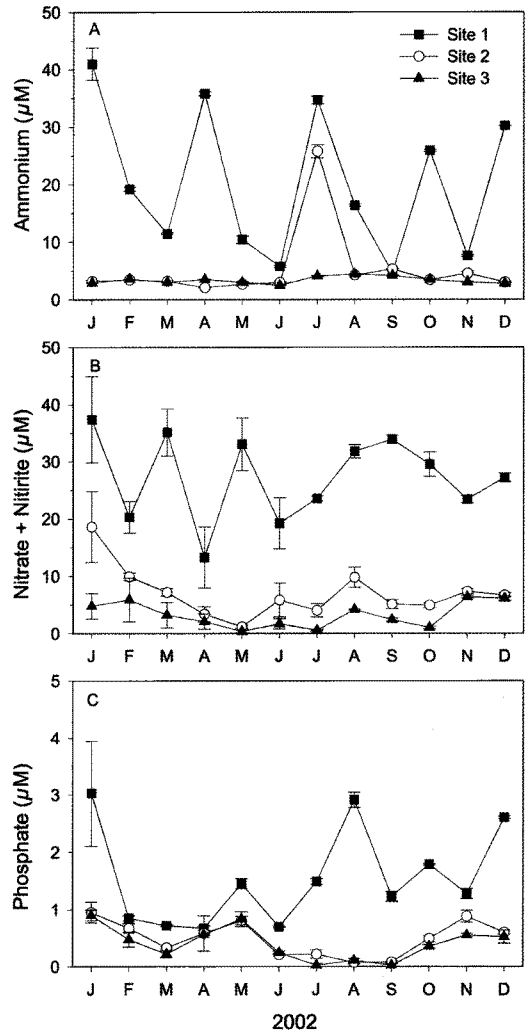


Fig. 2. Seasonal variations in water column ammonium (NH_4^+), nitrate+nitrite ($\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-$)와 phosphate (PO_4^{3-}) at each sampling sites in Tongyeong area from January to December 2002. Values represent mean±SE (n=4).

수중말처리장이 인접한 조사정점 1에서 해수 내 NH_4^+ 농도는 4.6-41.0 μM 이었고, 조사정점 1과 근접한 조사정점 2의 해수 내 NH_4^+ 농도는 2.1-25.8 μM 이었다. 한려해상국립공원에 위치한 조사정점 3의 해수 내 NH_4^+ 농도는 연구기간동안 차이가 2.5-4.4 μM 로 비교적 크지 않았다. 조사정점 1의 NH_4^+ 의 평균 농도 ($30.2 \pm 1.8 \mu\text{M}$)는 다른 두 지역의 평균 농도에 비해 가장 높았으며, 조사정점 3이 평균적으로 가장 낮은 농도 ($3.3 \pm 0.1 \mu\text{M}$)를 나타내었다. 조사정점 2에서 NH_4^+ 농도는 $6.0 \pm 1.2 \mu\text{M}$ 이었으나, 7월 자료를 제외하면 조사정점 3의 농도와 거의 유사하였다 ($3.4 \pm 0.1 \mu\text{M}$). 해수 내 $\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-$ 농도도 NH_4^+ 농도와 유사한 경향을 보였으며, 특히 조사정점 1의 평균 농도 ($26.2 \mu\text{M}$)는 다른 지역의 평균 농도에 비해 월등히 높았다 (Fig. 2B). 또한, 조사정점 2의 평균 $\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-$ 농도 ($7.0 \pm 0.9 \mu\text{M}$)는 조사정점 3의 평균 농도 ($3.1 \pm 0.6 \mu\text{M}$)보다 2배이상 높았다. 해수 내 PO_4^{3-} 농도는 조사정점 1에서 가장 높았으며, 조사정점 3에서 가장 낮은 값을 나타내었다 (Fig. 2C). 조사정점 1에서 평균 PO_4^{3-} 농도는 $2.7 \pm 0.1 \mu\text{M}$ 이었으며, 조사정점 2와 3에서 평균 PO_4^{3-} 농도는 $1 \mu\text{M}$ 미만이었다.

해조류 군집 구조 및 피도

본 연구기간동안 세 조사정점에서 출현한 해조류는 총 35종이었다 (Table 1). 출현한 해조류 중에 홍조류 (Rhodophyta)의 출현종수가 다른 분류군의 종수보다 2.4배이상 높게 나왔으며, 총 21종 (60.0%)이 관찰되었다. 갈조류 (Phaeophyta)는 9종 (25.7%)이 출현하였으며, 녹조류 (Chlorophyta)는 불과 5종 (14.3%)만이 발견되었다. 조사정점 1의 총 출현종수는 13종에 불과하였으며, 이 중 홍조류가 8종 (녹조류 2종, 갈조류 3종)으로 가장 높게 출현하였고 분류군 구성의 61.5%를 차지하였다 (Table 1). 매월 조사된 분류군별 구성비를 살펴보면 녹조류가 실험기간동안 우점하였으며, 갈조류는 1-3월, 홍조류는 1-4월과 10월에만 관찰되었다 (Fig. 3A). 조사정점 1과 조사정점 3사이에 위치한 조사정점 2의 총 출현종수는 27종이었다 (Table 1). 분류군별 출현비율은 홍조류가 가장 높은 55.6%를 차지하였고, 갈조류와 녹조류가 각각 25.9%와 18.5%를 차지하였다. 조사정점 2의 매월 분류군 구성비는 계절에 따라서 달라졌는데, 주로 녹조류와 갈조류가 관찰되었다 (Fig. 3B). 특히, 조사정점 1에서 해조류가 매월 관찰된데 반해, 조사정점 2는 7월과 9월에 어떤 해조류도 관찰되지 않았으며, 8월에도 모든 해조류의 총 피도가 5%미만이었다 (Fig. 3B). 한려해상국립공원중 통영-한산지구에 속해 있는 조사정점 3은 연구기간

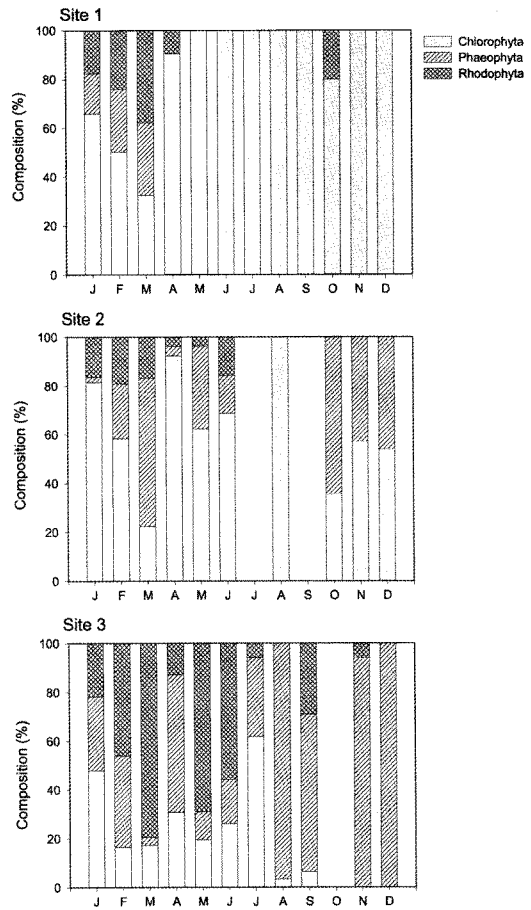


Fig. 3. Seasonal changes of algal group composition at each sampling sites in Tongyeong area from January to December 2002.

동안 33종의 해조류가 출현하였다 (Table 1). 녹조류는 3종으로 정점 2보다 낮았으나, 갈조류 (9종)와 녹조류 (21종)는 가장 높은 출현 종수를 보여주었다. 조사정점 3에서 홍조류 (63.6%)의 구성 비율은 다른 두 정점과 같이 가장 높았다. 그러나 녹조류의 구성 비율은 세 지역 중 가장 낮은 값 (9.1%)을 나타내었다. 이 지역에서 매월 분류군별 구성 비율은 계절에 따라서 다양했다 (Fig. 3C). 1월과 7월에는 녹조류가 주로 출현하였으나, 봄 (3월, 5월)과 초여름 (6월)에는 홍조류가 주로 관찰되었다. 또한, 갈조류가 8-12월까지 가장 높은 구성 비율을 보여주었다.

각 조사정점별 해조류의 피도와 상대피도에 대한 결과는 Table 2와 같다. 조사정점 1에서 구멍갈파래 (*Ulva pertusa*)는 연중 관찰되었으며, 연평균 피도와 상대피도는 각각 60.0%와 80.1%에 이르렀다. 미역 (*Undaria pinnatifida*)의 피도는 6.4%이었으며, 상대피도는 8.5%이었다. 그 외에 참도박 (*Grateloupia*

Table 1. Total number of species collected for each algal group at each site in Tongyeong area

	Site 1	Site 2	Site 3
Chlorophyta	2	5	3
Phaeophyta	3	7	9
Rhodophyta	8	15	21
Total	13	27	33

Table 2. Annual mean of coverage and relative coverage of dominant species at each study site in Tongyeong area from January to December 2002

Station / Species	Percentage (%)	Relative coverage (%)
Site 1		
<i>Ulva pertusa</i>	60.0	80.1
<i>Undaria pinnatifida</i>	6.4	8.5
<i>Grateloupia elliptica</i>	4.6	6.1
<i>Lomentaria catenata</i>	2.6	3.5
Site 2		
<i>Ulva pertusa</i>	35.9	57.8
<i>Sargassum horneri</i>	10.8	17.4
<i>Undaria pinnatifida</i>	6.6	10.6
<i>Grateloupia elliptica</i>	3.1	5.0
Site 3		
<i>Ulva pertusa</i>	21.2	23.2
<i>Hizikia fusiformis</i>	18.8	20.6
<i>Gelidium amansii</i>	14.2	15.6
<i>Grateloupia elliptica</i>	11.8	12.9
<i>Sargassum horneri</i>	7.6	8.3
<i>Sargassum thunbergii</i>	5.3	5.8
<i>Grateloupia divaricata</i>	4.4	4.8

elliptica)과 마디잘록이 (*Lomentaria catenata*)는 5%이내의 피도를 보였으며, 상대피도도 각각 6.1%와 3.5%이었다. 조사정점 2에서도 구멍갈파래가 가장 높은 피도(35.9%)와 상대 피도(57.8%)를 보였다. 그러나 조사정점 1에서 구멍갈파래가 차지하는 비율보다는 낮은 수치를 보였다. 팽생이모자반 (*Sargassum horneri*)은 두 번째로 높은 피도(10.8%)를 보였으며, 상대 피도도 17.4%나 되었다. 조사정점 1과 같이 미역과 참도박도 주요 우점종에 해당되었다. 조사정점 3은 다른 두 조사정점과 달리 특정 종이 우점하지 않고 여러 종이 골고루 분포하는 형태로 나타났다. 연평균 10%가 넘는 피도를 보인 해조류는 총 4종으로 구멍갈파래, 툯 (*Hizikia fusiformis*), 우뚝가사리 (*Gelidium amansii*)와 참도박이었고, 이들 종의 상대 피도도 10%이상이었다. 이 외에 팽생이모자반, 지층이 (*Sargassum thunbergii*)와 빠지누아리 (*Grateloupia divaricata*)도 5%내외의 피도와 상대 피도를 보였다.

종 다양성 지수 및 엽체 내 질소 함량

세 조사지역의 종 다양성 지수 (H')는 지역적으로 유의한 차이 ($P < 0.001$)를 나타내었으며, 조사정점 3이 다른 두 정점보다 가장 높은 종 다양성 지수를 보였다 (Fig. 4). 조사정점 3의 연평균 H' 는 1.27 ± 0.12 이었다. 이에 반해 조사정점 1과 2의 H' 는 사후검정결과 유의한 차이를 보이지 않았으며 ($P = 0.302$), 연평균 H' 는 각각 0.66 ± 0.14 과 0.84 ± 0.12 이었다.

해조류 엽체 내 질소 함량은 대상 종에 따라 지역적인 차이를 나타내었다 (Fig. 5). 구멍갈파래와 마디잘록이의 엽체 내 질소 함량은 조사정점 1에서 가장 높았으며, 조사정점 3에서 가장 낮게 측정되었다 (Figs. 5A, C). 구멍갈파래의 엽체 내

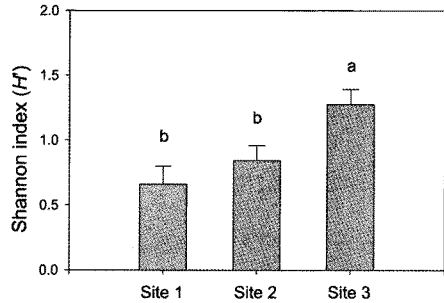


Fig. 4. Mean annual Shannon index (H') at each sampling sites in Tongyeong area. Different letters indicate significant group at means found with SNK tests ($P < 0.05$).

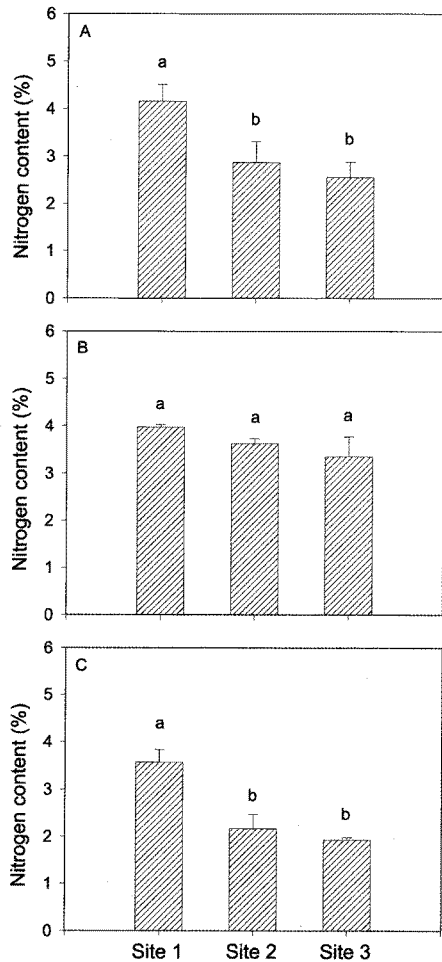


Fig. 5. Tissue nitrogen content of *Ulva pertusa* (A), *Undaria pinnatifida* (B) and *Lomentaria catenata* (C) at each sampling sites in Tongyeong area. Values represent mean \pm SE (n=6). Different letters indicate significant group at means found with SNK tests ($P < 0.05$).

질소 함량은 조사정점 1에서 4.16%이었으며, 조사정점 2와 3에서 각각 2.87%와 2.55%로 나타났다. 마디잘록이의 경우, 조사정점 1에서 측정된 질소 함량 ($3.57 \pm 0.26\%$)이 다른 두 지역의 질소 함량 (조사정점 2- $2.17 \pm 0.31\%$, 조사정점 3- $1.93 \pm 0.05\%$)보다 60-86%정도 높았다. 그러나 미역의 질소 함량은 세 지역 모두 유사한 것으로 관찰되었다 ($P=0.279$). 세 조사정점에서 미역의 질소 함량은 3.35-3.97%이었다.

고 찰

세 조사정점에서 관찰된 해조 군집 구조 분석 결과, 해수 내 질소와 인의 농도가 높은 조사정점 1에서 해조류 출현 종수는 가장 낮았으며, 해수 내 영양염 농도가 비교적 낮은 조사정점 3에서 가장 높은 해조류 출현 종수를 보였다. 이러한 결과는 본 연구의 가설을 강력하게 뒷받침하는 것으로, 다른 지역에서 진행된 연구에서도 이번 결과와 유사하게 관찰되었다 (Gorostiaga and Díez, 1996; Soltan et al., 2001). Díez et al. (1999)는 해수 내 영양염의 농도에 따라서 해조류의 종 풍부도 (species richness)가 3배까지 차이가 난다고 하였다. 또한, 영양염이 높은 배출수가 유입되는 지중해 연안에 위치한 5개 지역에서 해조 군집을 조사한 결과, 배출수가 유입되는 지역과 거리가 근접할수록 출현 종수가 최대 70%까지 감소하였다 (Arévalo et al., 2007). 본 연구에서도 조사정점 1의 출현 종수는 정점 2와 정점 3에서 출현한 종수보다 각각 52%와 61%정도 낮았다. 또한, 정점 1의 연평균 H^+ 도 다른 두 정점의 H^+ 보다 낮은 값을 보였다. 따라서 이번 연구 결과는 해조 군집 구조에 대한 연구가 해수의 수질을 평가하는데 좋은 지표 (indicator)가 될 수 있다는 것을 제시한다.

해양 저서식물 군집은 배출수의 영향에 의해서 일년생과 다년생 해조류의 구성 비율이 변화하며, 특히 다년생 해조류에서 스트레스에 강한 내성을 지닌 기회종으로 변화한다 (Brown et al., 1990). 하수처리장에서 처리된 배출수에 노출된 지역의 해조 군집은 수명이 매우 짧고 강한 내성을 지닌 유절 산호말형 (jointed calcareous form)과 turf 형태를 지닌 *Gelidium pusillum*, *Caulacanthus ustulatus*와 *Corallina elongata*가 우점한다 (Kindig and Littler, 1980; Díez et al., 1999). 또한, 부피 대비 표면적의 비 (surface area/volume ratio)가 커서 영양염 흡수에 적합한 형태적 특징을 지니고 (Duke et al., 1987), 고농도의 해수에서 높은 성장률을 보이는 갈파래류 (*Uva*)의 종들이 우점 한다 (Arévalo et al., 2007). 이번 연구에서 녹조류 중 구멍갈파래는 세 조사정점에서 모두 우점하였지만, 구멍갈파래의 피도와 상대피도는 조사정점에 따라서 많은 차이를 나타내었다. 다른 두 정점보다 매우 높은 영양염 농도를 보인 조사정점 1은 조사기간 동안 구멍갈파래 한 종이 우점하였으며, 상대피도도 80%이상이었다. 부영양화가 진행된 지역에서 갈파래류가 우점한다는 것은 많은 연구에서 보고되었다 (Fletcher, 1996). 이는 녹조류의 형태적 및 생리적 특성에 기인하는데, 일반적으로 갈파래류는 고농도에서 높은 성장률과

빠른 영양염 흡수를 나타낸다 (Raffaelli et al., 1998). 이번 연구 결과에서 해조 군집 구조의 변화는 Díaz et al. (2002)의 결과와 일치하는 것으로, 조간대 지역에서 구멍갈파래의 우점현상 및 대발생은 해수 내 농도를 판단하는 좋은 자료가 될 것으로 사료된다.

대형 갈조류는 높은 농도의 해수에서 감소한다는 많은 연구 결과가 보고되었다 (Littler and Murray, 1975; Brown et al., 1990; Munda, 1993). 대형 갈조류는 영양염이 높은 해수에 매우 민감하여 배출수에 노출되는 지역부터 점차적으로 생물량 및 생육 면적이 감소한다 (Munda, 1982; May, 1985). Bellgrove et al. (1997)는 Bogas Rocks 지역에서 하수 처리된 배출수에 의해 조간대 지역에서 우점하던 2종의 대형 갈조류 (*Hormosira banksii*와 *Durvillaea potatorum*)가 완전히 사라졌다고 보고했다. 이번 연구에서도 동일한 연구 결과가 도출되었는데, 다년생인 대형 갈조류는 영양염 농도가 가장 높은 조사정점 1에서 가장 낮은 피도를 보였으며, 영양염 농도가 낮은 조사정점 3에서 가장 높은 피도를 보였다. 또한, 5%이상의 상대 피도를 나타낸 종도 3종 (*Hizikia fusiformis*, *Sargassum horneri*와 *S. thunbergii*)이나 되었다. 해수 내 높은 영양염 농도는 갈조류의 zygote 발아와 embryo의 성장을 억제하는 것으로 알려져 있으며, 또한 기회종의 대발생으로 인해 심각한 공간 경쟁을 유발하여, 착생 기회를 잃어버릴 수도 있다 (Doblin and Clayton, 1995). 따라서 배출수의 유입으로 인한 해수 내 고농도 현상은 대형 갈조류의 생존과 분포에 중대한 영향을 미치며, 녹조류뿐만 아니라 갈조류 또한 배출수에 의해서 영향을 받는 주변 지역의 해수 내 농도를 판단하는데 중요한 근거가 될 것이다.

해조류의 엽체 내 질소 함량은 해수의 수질을 평가하는데 있어서 노동력과 비용을 절감할 수 있는 방법으로 해수 내 영양염 농도를 측정하는 것보다 매우 간편한 방법으로 인식되어 왔다 (Wheeler and Björnåster, 1992; Cohen and Fong, 2006). Lin and Fong (2008)는 새우 양식장 주변에서 해조류의 엽체 내 질소 함량을 분석한 결과, 양식장에서 거리가 멀어짐에 따라 주변의 생육하는 해조류의 질소 함량은 감소한다고 하였다. 또한, 양식장으로부터 배출되는 고농도의 오폐수에 의해서 영향을 받는 주변 생태계를 평가하기 위해서 잘피와 해조류를 이용하기도 하였다 (Jones et al., 2001). 이번 연구에서 해조류의 엽체 내 질소 함량은 세 조사정점에서 공통적으로 출현한 해조 종중에서 분류군별로 선별해서 측정하였는데, 해조 종과 지역에 따라 유의한 차이를 나타내었다. 구멍갈파래 (녹조류)와 마디잘록이 (홍조류)는 정점 1에서 가장 높은 질소 함량을 보여주었다. 반면에 주변에 오염원이 거의 없고, 하수종말처리장과 가장 거리가 먼 조사정점 3은 가장 낮은 질소 함량을 보여주었다. 이러한 결과는 해수 내 영양염 농도와 해조류 엽체 내 질소 함량이 밀접한 관계에 있다는 것을 의미한다.

해조류가 해수 내 높은 영양염 농도에 반응하여 나타나는

엽체 내 질소 함량에 관한 연구는 인위적으로 영양염을 첨가하는 실험을 통해서 진행되었다. 최근의 Thomsen and McGlathery (2007)의 결과에 따르면, 영양염 첨가에 의한 해조류의 엽체 내 질소 함량의 변화는 분류군별로 뚜렷한 차이를 보였는데, 녹조류(*U. curvata*와 *Codium fragile*)와 홍조류(*Gracilaria vermiculophylla*와 *Hypnea musciformis*)는 질소 함량이 증가하였으나, 갈조류(*Fucus vesiculosus*)는 별다른 차이를 보이지 않았다. 조간대에 생육하는 대형 갈조류인 *Hedophyllum sessile*의 성장과 엽체 내 질소 함량도 영양분 첨가에 의해서 거의 영향을 받지 않았다 (Pfister and Van Alstyne, 2003). 본 연구에서도 위의 두 연구 결과와 동일하였는데, 미역의 엽체 내 질소 함량은 지역적인 차이를 보이지 않았다. 이러한 현상은 엽체 내 질소 축적 능력과 관련 있는 것으로 추측된다 (Fujita et al., 1989). Germanne et al. (1987)는 대형 갈조류가 해수 내 영양염 농도에 민감하지 않는 이유는 이전에 축적된 질소 함량 때문이라고 했으며, 엽체 내 영양분 축적 능력이 높을수록 이러한 현상이 두드러진다고 하였다. 따라서 해조류의 엽체 내 질소 함량을 이용해서 해수의 수질을 평가할 경우, 영양분 축적 능력이 상대적으로 뛰어난 대형 갈조류는 적합하지 않는 것으로 판단된다.

결론적으로 하수종말처리장과 연안 지역에 인구가 밀집되어 있는 조사정점 1은 다른 두 조사정점의 조간대 지역에 비해 해조 군집 구조는 매우 단순하였으며 해조 종 다양성도 가장 낮게 평가되었다. 해수 내 높은 영양염 농도를 보인 조사정점 1은 녹조류의 비율이 가장 높았으며, 갈조류가 가장 낮은 비율을 보였다. 그러나, 비교적 청정해역에 속한 조사정점 3은 여러 분류군이 계절에 따라서 우점하는 경향을 보였으며 가장 많은 해조 종이 출현하였다. 해조류 엽체 내 질소 함량은 해수 내 영양염 농도에 의해 유의한 영향을 받았으나, 갈조류는 거의 영향을 받지 않았다. 따라서 해조 군집 구조와 엽체 내 질소 함량에 대한 연구는 생육하는 지역의 해수 수질을 평가하는데 매우 유익한 정보를 제공할 것으로 기대한다.

사 사

본 연구는 교육과학기술부 국제 공동 연구 개발 사업 “환경친화적 복합양식 시스템 개발” (KISTEP: M6-0203-00-0041-02)의 지원으로 이루어 졌습니다.

참 고 문 헌

- Alongi, D.M. 1998. Coastal ecosystem processes. New York: CRC Press.
- Arévalo, R., S. Pinedo and E. Ballesteros. 2007. Changes in the composition and structure of Mediterranean rocky-shore communities following a gradient of nutrient enrichment: Descriptive study and test of proposed methods to assess water quality regarding macroalgae. *Mar. Pollut. Bull.*, 55, 104-113.
- Bellan, G. and D. Bellan-Santini. 1972. Influence de la pollution sur les peuplements marins de la region de Marseille. In: *Marine pollution and Sea Life*. M. Ruivo ed. FAO Publication, London. pp. 396-401.
- Bellgrove, A., M.N. Clayton and G.P. Quinn. 1997. Effects of secondarily treated sewage effluent on intertidal macroalgal recruitment processes. *Mar. Freshwater Res.*, 48, 137-146.
- Brown, V.B., S.A. Davies and R.N. Synnot. 1990. Long-term monitoring of effects of treated sewage effluent on the intertidal macroalgal community near Cape Schanck, Victoria, Australia. *Bot. Mar.*, 33, 85-98.
- Cohen, R.A. and P. Fong. 2006. Using opportunistic green macroalgae as indicators of nitrogen supply and sources to estuaries. *Ecol. Appl.*, 16, 1405-1420.
- Dawes, C.J. 1998. *Marine Botany* (2nd ed.). John Wiley and Sons, New York, 498 pp.
- Dethier, M.N., E.S. Graham, S. Cohen and L.M. Tear. 1993. Visual versus random-point percent cover estimation: 'objective' is not always better. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 96, 93-100.
- Díaz, P., J.J. López Gappa and M.L. Piriz. 2002. Symptoms of eutrophication in intertidal macroalgal assemblages of Nuevo Gulf (Patagonia, Argentina). *Bot. Mar.*, 45, 267-273.
- Díez, I., A. Secilla, A. Santolaria and J.M. Gorostiaga. 1999. Phytobenthic intertidal community structure along an environmental pollution gradient. *Mar. Pollut. Bull.* 38: 463-472.
- Doblin, M. and M.M. Clayton. 1995. The effects of secondarily treated sewage effluent on the early life history stages of two species of brown macroalgae: *Hormosira banksii* and *Durvillaea potatorum*. *Mar. Biol.* 44, 315-324.
- Duke, C.S., W. Litaker and J. Ramus. 1987. Seasonal variation in RuBPCase activity and N allocation in the chlorophyta seaweeds *Ulva curvata* (Kütz.) De Toni and *Codium decortatum* (Woodw.) Howe. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, 112, 145-164.
- Duarte, C.M. and J. Cebrían. 1996. The fate of marine autotrophic production. *Limnol. Oceanogr.*, 41, 1758-1766.
- Fairweather, P.G. 1990. Sewage and the biota on seashores: assessment of impact in relation to natural variability. *Environmental Monit. Asses.*, 14, 197-210.
- Fletcher, R.L. 1996. The occurrence of "Green Tides"-a Review. In: *Marine Benthic Vegetation*. Schramm, W. and P.H. Nienhuis eds. Springer, Berlin, pp. 7-43.

- Fong, P., R.M. Donohoe and J.B. Zedler. 1994. Nutrient concentration in the tissue of the macroalga *Enteromorpha* as a function of nutrient history: an experimental evaluation using field microcosm. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 106, 273-281.
- Fujita, R.M., P.A. Wheeler and R.L. Edwards. 1989. Assessment of macroalgal nitrogen limitation in a seasonal upwelling region. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 53, 293-303.
- Germanne, L., L.D. Druehl and U. Hoeger. 1987. Seasonal variation in total and soluble tissue nitrogen of *Pleurophyucus gardneri* (Phaeophyceae, Laminariales) in relation to environmental nitrate. *Mar. Biol.*, 96, 413-424.
- Gorostiaga, J.M. and I. Díez. 1996. Changes in the sublittoral benthic marine macroalgae in the polluted area of Abra de Bilbao and proximal coast (Northern Spain). *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 130, 157-167.
- Harrison, P.J. and C.L. Hurd. 2001. Nutrient physiology of seaweeds: application of concepts to aquaculture. *Cah. Biol. Mar.*, 41, 71-82.
- Jones, A.B., M.J. O'Donohue, J. Udy and W.C. Dennison. 2001. Assessing ecological impacts of shrimp and sewage effluent: biological indicators with standard water quality analyses. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 52, 91-109.
- Kim, J.H. and R.E. DeWreede. 1996. Effects of size and season of disturbance on algal patch recovery in a rocky intertidal community. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 133, 217-228.
- Kindig, A.C. and M.M. Littler. 1980. Growth and primary productivity of marine macrophytes exposed to domestic sewage effluents. *Mar. Environ. Res.*, 3, 81-100.
- Lee, Y.P. and S.Y. Kang. 2002. A catalogue of the seaweeds in Korea. Cheju National University Press. Cheju 662 pp.
- Lin, D.T. and P. Fong. 2008. Macroalgal bioindicators (growth, tissue N, $\delta^{15}\text{N}$) detect nutrient enrichment from shrimp farm effluent entering Opunohu Bay, Moorea, French Polynesia. *Mar. Pollut. Bull.*, 56, 245-249.
- Littler, M.M. and S.N. Murray. 1975. Impact of sewage on the distribution, abundance and community structure of rocky intertidal macro-organisms. *Mar. Biol.*, 30, 277-291.
- Lobben, C.S. and P.J. Harrison. 1994. Seaweed ecology and physiology. Cambridge University Press, New York. 366 pp.
- Mann, K.H. 1982. Ecology of coastal waters: a systems approach. Blackwell scientific publications, Oxford, 322 pp.
- May, V. 1985. Observations on algal floras close to two sewage outlets. *Cunninghamia*, 1, 385-394.
- Munda, I.M. 1982. The effects of organic pollution on the distribution of furoid algae from the Istrian coast (vicinity of Rovinj). *Acta Adriat.*, 23, 329-337.
- Munda, I.M. 1993. Changes and degradation of seaweed stands in the Northern Adriatic. *Hydrobiologia*, 260/261, 239-253.
- Parsons, T.R., Y. Maita and C.M. Lalli. 1984. A manual of chemical and biological methods for seawater analysis. Pergamon Press, New York, 173 pp.
- Pfister, C.A. and K.L. Van Alstyne. 2003. An experimental assessment of the effects of nutrient enhancement on the intertidal kelp *Hedophyllum sessile* (Laminariales, Phaeophyceae). *J. Phycol.*, 39, 285-290.
- Raffaelli, D. 1998. The community ecology of the Ythan estuary. In: *The Ythan*, vol 40. Gorman, M.L. ed. University of Aberdeen, Aberdeen, pp. 10-13.
- Shannon, C.E. and W. Weaver, 1949. The mathematical theory of communication Univ. Illinois Press, Urbana, Illinois, 125 pp.
- Soltan, D., M. Verlaque, C.F. Boudouresque and P. Francour. 2001. Changes in macroalgal communities in the vicinity of a Mediterranean sewage outfall after the setting up of a treatment plant. *Mar. Pollut. Bull.*, 42, 59-70.
- Thomsen, M.S. and K.J. McGlathery. 2007. Stress tolerance of the invasive macroalgae *Codium fragile* and *Gracilaria vermiculophylla* in a soft-bottom turbid lagoon. *Biol. Invasions.*, 9, 499-513.
- Wheeler, P.A. and B.R. Björnåster. 1992. Seasonal fluctuations in tissue nitrogen, phosphorus, and nitrogen to phosphorus ratio for five macroalgal species common to the Pacific Northwest coast. *J. Phycol.*, 28, 1-6.

2009년 5월 6일 접수

2009년 5월 30일 수정

2009년 6월 10일 수리