

수질환경과 식물플랑크톤 군집 변화에 의한 압해도 김 양식장의 해양환경과 생산

윤 양 호*

전남대학교 해양기술학부

Marine Environments and Production of Laver Farm at Aphae-do Based on Water Quality and Phytoplankton Community

Yang Ho Yoon*

Faculty of Marine Technology, Chonnam National University, Yeosu 550-749, Korea

Abstract - In this study, I examined the water quality and phytoplankton community in aquaculture laver farm in the southwest part of Aphae-do, South Korea, based on the young leaf stage, middle leaf stage, and adult leaf stage of laver thallus from October, 2013 to January, 2014. It was observed that the Aphae laver farm, as located in shallow waters, was found to have a serious resuspension of the surface sediments due to physical disturbance caused by winds and tidal mixing. Such a resuspension of surface sediments coupled with nutrients supply obstructs light penetration into the sea for its huge amount of total suspended matters. As a result for this reason, it was viewed to impede the growth of phytoplankton was impeded as it also competes with laver to absorb the same kinds of nutrients as laver does during the laver growth period in winter. Such elements of the marine environment in Aphae laver farm are in contrast with the environment of Japan, where nutrients including dissolved inorganic nitrogen, in particular, are insufficient to cause the recent laver bad harvest, discoloration and quality degradation while large diatoms, with their higher nutrients absorption efficiency than laver, generate winter red tide. In other words, an important factor to maintain the high laver production in the southern parts of West Sea of Korea was found to be the marine environment of its laver farms where large diatoms are prevented from growing due to nutrients supply and dense seston weights from resuspended matters by physical disturbances.

Key words : aquaculture laver farm, marine environments, production, water quality, phytoplankton community, growth steps, dissolved inorganic nitrogen, Aphae-do

서 론

김은 우리나라 대표적인 해조류 양식 품종으로 삼국

유사에 기록이 있을 정도로 식용으로 오래전부터 이용되었고, 조선시대는 진상품으로 사용되었다. 김 양식은 1640년 광양만 태인도에서 대나무나 참나무 가지들 간 석지에 세워 김이 붙어 성장하게 하는 썰 양식이 처음 성공하였다고 알려지나, 정확한 역사적 기록은 발견되지 않는다(Sohn 1996). 이후 1840년대는 대나무 쪽으로 밭을 엮어 한쪽은 바닥에 고정시키고 다른 한쪽은 물에

* Corresponding author: Yang Ho Yoon, Tel. 061-659-7142, Fax. 061-659-7149, E-mail. yoonyh@jnu.ac.kr

뜨도록 한 때발 양식이 개발되었고, 1920년에 때발 양식을 개량한 뜬발 양식이 개발되면서 우리나라 전해역에서 활발한 근대 김 양식이 시작되었다. 지금도 뜬발 양식은 사용되고 있으며, 더욱 기술이 진보하여 사상체를 배양하여 인공적으로 채묘하면서 부류식 냉동망을 교체하는 방법이 개발되어 있다 (<http://ko.wikipedia.org>).

이러한 김 양식도 1960년대 이후 경제개발에 따른 연안매립 및 간척 등으로 양식장 면적은 축소되고, 인간활동에 따른 육상 오염 부하량 증가, 영양염류 농도 및 기초생물량 증가 등 환경변화로 갯벌 등에 의한 생산량 감소, 변색에 의한 상품가 하락 등 국제적으로도 많은 문제를 발생시키고 있다. 그러나 국내 김 생산량은 매년 증가하여, 2013년의 생산량은 약 14,000만 속(마른김 1속 260g)으로 김 최대 생산국이었던 일본을 추월하여 세계 1위 생산량을 나타내고 있다. 이러한 결과 현재 국내 김 산업은 성장기를 넘어 안정기에 접어든 것으로 평가하고 있다 (Ock 2011).

국내의 지속적인 김 생산 증가에 비해 일본의 김 생산량은 1990년 중반 이후 완만하게 감소하고 있지만, 생산을 담당하는 경영체수는 급격한 감소를 보인다. 이에 따라 일본 김 산업은 1983년 이후부터 쇠퇴기에 접어든 것으로 평가하고 있다 (Ock 2011). 일본의 김 생산량 감소 배경에는 정책과 경제적인 부분 이외에 육상 오염배출량 감소에 따라 육상기인의 무기영양염류, 특히 질소원 감소에 의한 흉작과 변색, 그리고 오염배출 감소에 따라 투명도가 증가하여 김 보다 영양염류 흡수가 유리한 대형 규조류의에 의한 겨울적조 발생이 주된 원인으로 알려지고 있다 (Sato 2004; Kumagai and Naitoh 2007; Ishii *et al.* 2008; Tada *et al.* 2010; Yoon 2010; Aoki and Kajitori 2011; Oyama *et al.* 2012).

그러나 국내 지속적인 김 생산량 증가로 더욱 중요한 해산양식산업으로 발전되고 있음에도 불구하고 김 양식장의 지속적 생산과 이용 및 관리에 필요한 어장환경 관련 연구는 매우 빈약하다. 현재까지 보고가 확인되는 어장환경 조사결과로는 광양만 김 양식어장에 대한 기초 수질환경 조사 (Hong *et al.* 1987), 서해 자연산 돌김 어장의 환경조사 (Song and Chung 1999) 및 낙동강 하구의 김 생산량 변화에 미치는 주변 해역의 수질환경 등 해양환경 (Choe and Chung 1972)과 기상요인의 영향 (Kwon *et al.* 2013) 등이 있다.

따라서 여기서는 한국 서해 남부해역인 압해도 서남부에 위치하는 신안지역의 김 양식장을 대상으로 김 엽상체 성장에 따른 수질환경 및 기타 해양환경 인자는 물론 식물플랑크톤 군집과의 관련성을 비교, 분석하여,

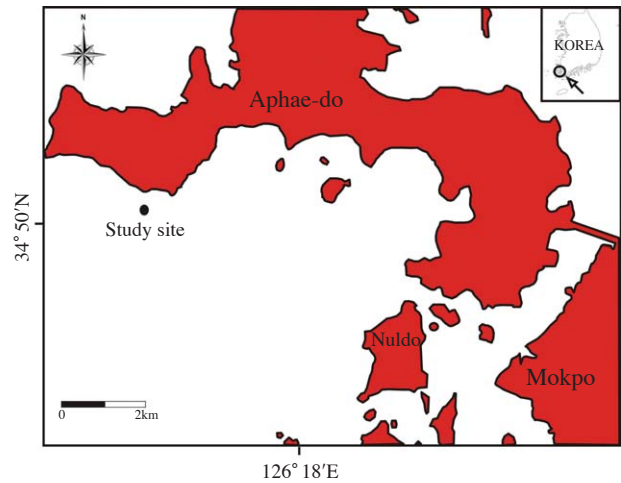


Fig. 1. Map show to sampling area in Aphae-do, West Sea of Korea.

신안군 압해도에 위치하는 김 양식장 해양환경 특성은 물론 최근 일본의 김 흉작 및 변색에 따른 품질 저하를 발생하는 영양염류 공급 제한 문제 및 겨울 대형 규조류 적조발생 가능성에 대해 고찰한다.

재료 및 방법

김 성장 단계에 따른 수질환경 및 식물플랑크톤 군집의 변화 및 해양환경 특성을 파악하기 위한 현장조사는 전남 신안군 압해도에 시설된 양식장을 대상으로 실시하였다 (Fig. 1). 현장조사는 유엽기(엽장 1 cm 이하; 2013. 10), 중엽기(엽장 5 ~ 10 cm; 2013. 11) 및 성엽기(엽장 10 cm 이상; 2014. 01)로 구분하여 김 양식 단지 중간부에 위치하는 어장을 중심으로 약 100 m 간격으로 5개의 정점을 선정하여 실시하였다. 대상 김 양식장은 수심의 2 m 내외의 얕은 해역이기에 표본은 표층해수만을 대상으로 하였다. 항목별 측정 및 분석방법은 다음과 같고, 결과의 표시는 5개 표본의 측정값에 대한 평균값과 표준편차를 병기하여 나타내었다.

1. 수온과 염분

수온과 염분은 현장에서 현장 잠수형 형광광도계 (JFE Advantech Co., Ltd, ASTD 102)에 부착된 수온과 염분센서를 이용하여 측정하였고, 중엽기는 형광광도계 트러블로 YSI 수질분석기로 측정된 값을 보정하여 사용하였다.

2. 수질환경

1) pH와 용존산소

수소이온농도 (pH)와 용존산소는 현장에서 pH meter (YSI professional plus) 및 현장 잠수형 형광광도계 (JFE Advantech Co., Ltd, ASTD 102)에 부착된 용존산소 센서를 이용하여 측정하였다.

2) 용존 무기 영양염류

용존 무기형태의 영양염류는 표층 해수를 채수하였다. 채수된 해수는 실험실에서 박막여과지 (pore size: 0.45 μm , ϕ : 47 mm)를 이용하여 흡인 여과한 여액을 이용하여 발색시킨 다음 UV분광광도계 (Mecasys Co., Optizen 2120 UV)를 이용하여, 비색 측정하여 계산하였다. 대상 영양염류는 질소원으로 암모니아염, 아질산염, 질산염 및 이들 3개 형태를 합한 용존무기질소 (DIN)를, 인산원으로는 인산염 (DIP)을 분석하였고, 김 양식에 크게 관여하지 않지만, 무기영양염류의 동태를 비교하기 위한 규산염을 MOF (2010) 및 JWA (1985)에 준하여 분석하였다.

3) 기타 영양물질

총 질소는 표층 해수표본을 알칼리성 과황산칼륨과 붕소산을 산화제로 이용하여 고온 (120°C)에서 산화시켜, 질산으로 변환시켜 분석하였다. 총 질소는 여과하지 않은 해수 표본을 대상으로 하였고, 용존 총 질소는 여과한 해수를 대상으로 하였다 (MOF 2010). DIN와 총 질소 (TN) 그리고 용존 총 질소 (DTN)의 연산에 의해 계산하였다. 즉 생물체 및 유기체설물에 포함하는 입자성 질소 (PN)/인 (PP)는 총 질소/인에서 용존 총 질소/인을 뺀 값인 $\text{PN/P} = \text{TN/P} - \text{DTN/P}$ 으로 계산하였고, 용존 유기질 (인) 소 (DON(P))는 $\text{DTN(P)} - \text{DIN(P)}$ 를 뺀 값인 $\text{DON/P} = \text{DTN/P} - \text{DIN/P}$ 로 계산하였다 (JWA 1985).

4) 화학적 산소요구량과 부유물질 총량

해수 표본에 산화제로 과망간산칼륨을 첨가하여 유기물을 중탕으로 분해시켜 산화제의 소비량을 측정하여 산출하였다 (JWA 1985; MOF 2010). 부유물질 총량은 해수 500 mL를 유리섬유 여과지 (GF/C)로 여과하여 건조시킨 다음 건조 전후의 무게 차이를 이용하여 분석하였다 (MOF 2010).

3. 식물플랑크톤 군집

김 엽상체의 성장에 따른 식물플랑크톤 군집의 변화 양상은 식물플랑크톤 생물량 (Chl-*a*)과 식물플랑크톤 군집으로 구분하여 분석하였다.

1) 식물플랑크톤 생물량 (Chlorophyll *a*, Chl-*a*)

김 양식장의 잠재생물 생산성을 평가하기 위한 식물플랑크톤 생물량은 각 정점에서 반돈 채수기를 이용하여 표층해수 500 mL 채취하였다. 채수된 표본은 실험실에서 박막여과지 (pore size: 0.45 μm , diameter: 47 mm)가 장착된 플라스틱 여과기를 이용하여 흡인 여과시킨 다음, 여과 포집된 박막여과지를 90%의 아세톤을 용매로 엽록소를 추출하였다. 색소가 추출된 용매는 원심분리기로 용매와 불순물을 분리 (3,000 rpm, 15 min.) 시킨 다음, 분리된 상등액 일정량을 원심관에 취하여 분광광도계 (Mecasys Co. Ltd., Optizen 2120 UV)에 의해 복수과장에서 비색을 측정하여, 경험식에 의해 Chl-*a* 농도를 계산하였다 (SCOR-Unesco 1966). 일부는 현장 잠수형 형광광도계 (JFE Advantech Co., Ltd, ASTD 102)도 병행하여 측정하였다.

2) 식물플랑크톤 군집

식물플랑크톤 군집은 각 정점의 표층해수를 폴리에틸렌 표본병에 채수하여 중성 포르마린으로 최종농도가 0.4%되게 고정하였다 (Thronsdon 1978). 실험실에서 고정해수 500 mL를 24시간 이상 정치시켜 2~3단계의 농축과정을 통하여 최종농도가 5 mL되도록 하였다. 검경은 농축된 시료 0.1 mL를 pipetman을 이용하여 정확히 계수판에 취하고, DIC가 장착된 광학 현미경 (Nikons, Eclipse 80i)을 이용하여 100X~400X에서 종 동정과 계수를 실시하여, 종조성, 종별 현존량 및 우점종을 파악하였다. 종 동정은 Cupp (1943), Dodge (1982), Chihara and Murano (1997), Tomas (1997), Hallegraeff *et al.* (2010) 및 Omura *et al.* (2012) 등의 문헌을 참고하였고, 분류체계 및 학명은 World Register of Marine Species (WoRMS, www.marinespecies.org)에 준하여 정리하였다.

결 과

김 엽상체 성장 단계에 따른 해황, 수질, 식물플랑크톤 생물량 등에 대한 측정값은 Table 1에 총괄적으로 정리하여 나타내었다. 표의 값은 5개 표본에 대한 평균값과 표준편차이다.

1. 수온과 염분

김 포자 착생이후 양식 시설을 하여 현장에서 성장하기 시작할 유엽기 수온은 15°C 전후였지만, 성장함에 따라 수온은 점차 하강하여 수확기 직전인 성엽기에는 4.5°C 전후로 하강하였다. 염분은 수온과는 달리 점차 상승하는

Table 1. A values for average and standard deviation of environmental parameters measures at Aphae aquaculture laver farm in Shinan area, West Sea of Korea

Parameters	Young Leaf	Middle Leaf	Adult Leaf
	Oct. 28, 2013	Nov. 23, 2013	Jan. 13, 2014
Water Temperature (°C)	15.1 ± 0.19	11.7 ± 0.23	4.5 ± 0
Salinity (psu)	31.75 ± 0.06	32.01 ± 0.05	32.20 ± 0.02
pH	8.14 ± 0.02	7.82 ± 0.11	7.78 ± 0.01
Dissolved Oxygen (DO, mg L ⁻¹)	8.30 ± 0.03	8.27 ± 0.05	10.75 ± 0.19
Ammonia-Nitrogen (NH ₄ -N, μM)	2.79 ± 1.14	1.44 ± 0.74	1.46 ± 0.17
Nitrite-Nitrogen (NO ₂ -N, μM)	0.82 ± 0.06	0.50 ± 0.05	0.25 ± 0.02
Nitrate-Nitrogen (NO ₃ -N, μM)	12.19 ± 0.52	11.36 ± 0.29	11.20 ± 0.57
Dissolved Inorganic Nitrogen (DIN, μM)	15.89 ± 1.68	13.30 ± 1.02	12.90 ± 0.73
DIN/TN × 100 (%)	54.2 ± 7.20	52.3 ± 3.07	51.3 ± 4.12
Dissolved Organic Nitrogen (DON, μM)	10.50 ± 1.85	9.91 ± 1.42	9.74 ± 0.57
DON/TN × 100 (%)	35.5 ± 3.24	38.9 ± 4.34	38.7 ± 2.71
Dissolved Total Nitrogen (DTN, μM)	26.50 ± 2.14	23.21 ± 1.68	22.65 ± 0.76
Particulate Nitrogen (PN, μM)	2.98 ± 1.26	2.25 ± 0.30	2.58 ± 1.52
PN/TN × 100%	9.9 ± 3.54	8.9 ± 1.15	9.8 ± 5.2
Total Nitrogen (TN, mg L ⁻¹)	0.41 ± 0.04	0.36 ± 0.02	0.35 ± 0.03
Phosphorus-Phosphate (PO ₄ -P/DIP, μM)	0.76 ± 0.04	0.64 ± 0.17	0.84 ± 0.02
DIP/TP × 100 (%)	44.5 ± 6.52	38.1 ± 12.8	35.4 ± 2.53
Dissolved Organic Phosphate (DOP, μM)	0.35 ± 0.06	0.55 ± 0.15	0.82 ± 0.29
DOP/TP × 100 (%)	20.5 ± 4.83	31.2 ± 5.58	34.4 ± 11.1
Dissolved Total Phosphate (DTP, μM)	1.11 ± 0.09	1.20 ± 0.08	1.56 ± 0.15
Particulate Phosphate (PP, μM)	0.65 ± 0.27	0.57 ± 0.11	0.80 ± 0.22
PP/TP × 100%	36.1 ± 9.29	32.8 ± 5.03	33.2 ± 7.67
Total Phosphate (TP, mg L ⁻¹)	0.054 ± 0.008	0.054 ± 0.005	0.074 ± 0.005
N/P rate	20.7 ± 1.12	22.2 ± 6.28	15.4 ± 0.93
Silicate-Silicon (Si(OH) ₄ -Si, μM)	11.81 ± 0.62	10.04 ± 0.73	12.24 ± 0.57
Chemical Oxygen Demend (COD, mg L ⁻¹)	0.65 ± 0.23	0.41 ± 0.15	1.22 ± 0.37
Suspended Solid (SS, mg L ⁻¹)	20.52 ± 0.99	20.44 ± 2.77	46.88 ± 3.09
Chlorophyll <i>a</i> (Chl- <i>a</i> , mg m ⁻³)	2.09 ± 0.11	0.81 ± 0.13	1.46 ± 0.17

경향을 나타내었다 (Table 1).

2. 수질환경

1) pH와 용존산소

pH는 유엽기 8.14에서 성엽기 7.78로 김 성장과 함께 다소 낮아지는 결과를 보이지만, 김 성장보다는 해역에서 일반적으로 변화되는 범위의 변동 폭을 나타내었다 (Parsons *et al.* 1984). 용존산소도 유엽기와 중엽기는 유사한 농도를 보이지만, 성엽기에 높은 농도를 나타내었다. 이는 성엽기 김 양식장에서 김이 광합성에 의한 산소배출도 고려할 수 있지만, 낮은 수온으로 해수가 높은 용존산소를 포함하고 있다고 판단된다 (Table 1).

2) 영양물질

김 엽상체 성장단계에 따른 암모니아염 변화는 유엽기 2.79 μM에서 성엽기 1.46 μM로 김 성장에 따라 감소하는 양상을 보였다. 아질산염 역시 유엽기 0.82 μM에서 성엽기 0.25 μM로 성장에 따라 급격한 감소양상을 보였고, 질산염 역시 유엽기 12.19 μM에서 성엽기 11.20 μM

으로 감소하였다. 그리고 이들 3태 무기질소의 합인 DIN은 유엽기 15.89 μM에서 성엽기 12.90 μM로 김 엽상체 성장에 따라 감소하였다. DIP는 유엽기 0.76 μM에서 성엽기 0.84 μM로 김 성장에 따라 일정한 변화 없이 비교적 높은 농도를 보였다. 김 성장과 직접적 영향은 없지만 규산염은 유엽기 11.81 μM에서 성엽기 12.24 μM로 성엽기에 높고, 유엽기와 중엽기 다소 낮은 농도를 보이지만, 그 변동 폭은 크지 않았다 (Table 1).

TN 변화는 유엽기 0.41 mg L⁻¹에서 성엽기 0.35 mg L⁻¹로 김 성장에 따라 다소 감소하였고, DTN은 유엽기 26.50 μM에서 성엽기 22.65 μM로 TN과 유사한 양상을 보였다. 그러나 TP는 유엽기 0.054 mg L⁻¹에서 성엽기 0.074 mg L⁻¹로 성엽기에 높았고, DTP도 유엽기 1.11 μM에서 성엽기 1.56 μM로 성장에 따라 다소 증가하였다. DON 변화는 유엽기 10.50 μM에서 성엽기 9.74 μM로 김 엽상체 성장에 따라 감소 양상을, PN은 유엽기 2.98 μM 성엽기 2.58 μM로 유엽기에 높았다. DOP 변화는 유엽기 0.35 μM에서 성엽기 0.82 μM로 성장 단계에 따라 증가하였고, PP는 유엽기 0.65 μM에서 성엽기 0.80 μM로 성엽기에

Table 2. Phytoplankton species composition and cell density during laver growth steps

Species name	Phytoplankton cell density (cells L ⁻¹)		
	Young Leaf	Middle Leaf	Adult Leaf
TOTAL	63,480 ± 7,770	4,360 ± 2,003	52,200 ± 16,014
DINOFLAGELLATES	120	280	80
<i>Heterocapsa triquetra</i>	—	—	40
<i>Neoceratium furca</i>	—	80	—
<i>Protoperdinium</i> spp.	40	—	—
Other dinoflagellates	80	200	40
PHYTOFLAGELLATES	200	40	40
<i>Eutreptiella</i> sp. cf. <i>gymnastica</i>	200	40	40
DIATOMS	63,160	4,040	52,080
Centric diatoms	21,000	2,800	50,400
<i>Actinopterychus senarius</i>	40	—	—
<i>Chaetoceros curvisetus</i>	6,640	—	—
<i>Ch. debilis</i>	—	—	120
<i>Ch. lorenzianus</i>	440	—	—
<i>Ch. socialis</i>	—	—	39,200
<i>Chaetoceros</i> spp.	1,720	440	120
<i>Coscinodiscus gigas</i>	—	—	40
<i>Dictylum brightwellii</i>	520	—	—
<i>Leptocylindrus danicus</i>	160	—	—
<i>Odontella aurita</i>	160	—	—
<i>Paralia sulcata</i>	1,200	360	720
<i>Proboscia alata</i>	—	640	—
<i>Rhizosolenia setigera</i>	40	—	—
<i>Skeletonema costatum</i>	4,960	240	7,320
<i>Thalassiosira rotula</i>	1,320	280	1,920
<i>Thalassiosira</i> spp.	3,600	—	—
Other centric diatoms	400	840	600
Pennate diatoms	42,160	1,480	1,680
<i>Asterionellopsis kariana</i>	720	—	—
<i>Licmophora abbreviata</i>	—	—	120
<i>Navicula</i> sp.	33,080	80	—
<i>Nitzschia longissima</i>	3,120	440	480
<i>Pleurosigma normanii</i>	160	40	40
<i>Pseudo-nitzschia pungens</i>	4,200	760	—
<i>Surirella fastuosa</i>	40	—	—
<i>Thalassionema nitzschioides</i>	1,040	—	—
Other pennate diatoms	200	160	1,040
Species number	24	14	15

높았다 (Table 1).

압해도 김 양식장에서 질소는 전체적으로 김 엽상체 증가에 따라 감소하는 반면, 인은 증가하는 경향을 보였다. 또한 TN에서 DIN이 차지하는 비율 역시 51.3~54.2%로 김 엽상체 성장에 따라 감소하였고, PN 비율은 8.6~9.9% 매우 낮아, 무기형태가 유기형태나 입자형태 보다 높은 비율로 존재하였다. 그러나 TP에서 DIP가 차지하는 비율은 35.1~43.7%로 DOP의 20.1~34.3%이나 PP의 32.8~36.1%보다 다소 높지만, 질소에 비해 입자형태로 존재하는 비율이 매우 높았다. 그리고 N/P ratio는 15.4~22.2로서 전체적으로 질소와 인의 균형이 잡혀있지만, 유엽기와 중엽기에 인보다 질소의 변화가 다소 크게 나

타났다 (Table 1).

3) 화학적 산소요구량과 부유물질 총량

학적 산소요구량 변화는 유엽기에 0.65 mg L⁻¹에서 성엽기에 1.22 mg L⁻¹로 성엽기에 높았다. 부유물질 총량은 유엽기 20.52 mg L⁻¹에서 성엽기에 46.88 mg L⁻¹로 유엽기와 중엽기에 비해 성엽기가 2배 이상 높은 농도를 보였다 (Table 1).

4) 식물플랑크톤 생물량 (엽록소 a)

Chl-*a* 농도 변화는 유엽기 2.09 mg m⁻³에서 성엽기 1.46 mg m⁻³로 중엽기에 0.81 mg m⁻³로 가장 낮고, 유엽기에 높았다 (Table 1).

3. 식물플랑크톤 군집

식물플랑크톤 출현종은 유엽기 24종에서 성엽기 15종으로 변화하지만, 중엽기에 14종으로 가장 낮았다. 세포 밀도로 표현한 현존량은 유엽기 $63,480 \text{ cells L}^{-1}$ 에서 성엽기 $52,200 \text{ cells L}^{-1}$ 로 변화하지만, 출현종과 같이 중엽기에 $4,360 \text{ cells L}^{-1}$ 로 유엽기와 성엽기에 비해 1단위 낮았다. 표준편차에서 본 세포밀도의 공간적 차이는 중엽기와 성엽기가 높고, 수집 m 범위에서도 강한 패치분포를 하는 것으로 나타났다. 우점종은 표본에 따른 오차가 비교적 크게 나타났지만, 유엽기에 부착성 규조류인 *Navicula* sp.가 우점하였고, 중엽기는 특징적인 우점종이 출현하지 않았다. 성엽기에는 중심목 규조류 *Chaetoceros socialis*가 높은 우점율로 우점하였고, 다음으로 *Skeletonema* spp.가 우점하였다 (Table 2).

고 찰

신안군 압해도 김 양식장에서 겨울 성엽기에 모든 정점에서 동일하게 기록되는 4.5°C 수온은 난류의 영향을 받는 해역으로는 매우 낮다. 그러나 목포 연안은 1933~1995년 66년 1월 중순 평균수온은 $5.34 \pm 1.26^{\circ}\text{C}$ 를 기록하고 있고, 최저 수온은 2월 상순 평균으로 $4.52 \pm 1.18^{\circ}\text{C}$ 를, 1986~1995년 10년 평균도 최저수온은 2월 상순 평균으로 $4.94 \pm 0.85^{\circ}\text{C}$ 를 나타내고 있어 (NFRDI, 1998), 목포 내만 정점보다 다소 외해에 위치하는 압해 남서해역은 난류 영향을 직접 받고 있지 않아 연중최저 수준의 수온을 나타내는 것으로 판단된다. 염분도 한국 남서해안과 서남해안은 겨울에 점차 높아지다 초봄 최대 34 psu 이상의 농도를 보이지만, 신안 김양식장 인근에서 영산강 하구어의 내만해역까지 5개 정점에 대한 염분변화는 여름에 최저를 보이지만, 32년 평균 2월 겨울 표층은 $31.60 \pm 0.29 \text{ psu}$, 저층은 $32.15 \pm 0.21 \text{ psu}$ 를 기록하고 있는 것 (Park *et al.* 2010)으로, 신안 해역의 해역특성을 표현하는 것으로 판단되었다.

압해 김 양식장 영양염류에서 DIN 농도는 1979~2009년까지 31년 동안 신안 김양식장 외부에서 영산강 하구어 부근까지 5개 정점을 평균한 11월 표층의 $10.1 \mu\text{M}$ 이나 2월의 $10.3 \mu\text{M}$ 보다 높았다 (Park *et al.* 2010). 김 성장에 따른 질소원 변화는 김 성장에 의해 영양염이 흡수되어 낮아지는 양상으로, 일본 세도내해에서 질소원 부족에 의한 김 성장 부진 현상과 일치하는 것으로 판단되었다 (Tada *et al.* 2010). 양식장에 공급되는 영양염 공급원으로 목포연안은 영산호 등 대소 하천을 통해 유입

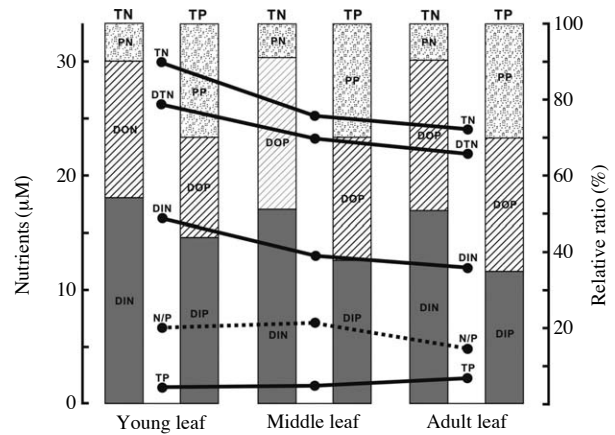


Fig. 2. Variation of nutrients, N/P ratio and relative ratio of TN/P during laver growth steps in the Aphae laver farm.

되는 부분이 클 것으로 판단되지만, Park *et al.* (2010)에 의하면 영산강 하구어의 31년 연간 DIN 농도는 $17.7 \mu\text{M}$ 수준이지만, 화원반도 복단을 지나 목포항을 벗어나면 $8.36 \mu\text{M}$ 수준으로 급감하는 것을 보고하고 있다. 그러나 항계 밖에서 떨어진 신안 김 양식장은 영양염류 농도가 가장 높은 여름을 제외하여도 김 성육시기의 DIN 농도가 훨씬 높았다. 이와 같은 결과를 신안 김 양식장 염분 및 총부유물질량 변동 등을 고려하면, 바람과 조석혼합 등 물리적 교란에 의한 해저 표층퇴적물이 재부유에 의한 혼입으로 공급되는 영양염 비율이 높은 것으로 추정되었다 (Choi 1991; Lee and Cho 1995; Jang *et al.* 2005). N/P ratio는 질소와 인의 용존비도 비교적 균형이 맞는 것으로 보여 지며 (Redfield *et al.* 1963), TN에서 DIN가 점유하는 비율도 50% 이상으로 높았고, DON은 약 40% 전후로 영산강 및 섬진강 수계 (Kim *et al.* 2009)와 유사하였다 (Fig. 2). 다만 한국 동해 남부해역과는 다른 양상을 보였다 (Kwon *et al.* 2014). 신안 김 양식장은 일본 세도내해 (Seto Inland Sea) 및 아리아케해 (Ariakekai) 환경과는 달리 DIN 농도가 상대적으로 높아, DIN이 일본처럼 김 생산을 제한하는 인자로 작용할 가능성은 낮은 것으로 판단되었다. 실제 해역은 다소 다르지만 담수유입이 원활한 낙동강 하구어의 김 생산량은 기온과 수온이 낮을수록, 바람이 비교적 강할수록 높으며, 염분과 질소원에 크게 영향을 받지 않은 것으로 보고하고 있다 (Kwon *et al.* 2013).

식물플랑크톤 군집과 영양염류, 총 부유물질, 화학적 산소요구량 등에서 신안 김 양식장 해역은 유기오염 수준이라고 할 단계는 아니지만, 높은 영양염류에도 불구하고 낮은 Chl-*a*와 식물플랑크톤 세포밀도도 $10^4 \text{ cells L}^{-1}$

수준으로 낮았다. 또한 수십 m의 수평적인 이격거리에서도 심한 패치 분포를 하는 것으로 판단되었다(Haury *et al.* 1978). 이와 같은 결과는 해수 유동문제, 광량 투과 정도 등에 대한 직접적인 자료 보충이 필요하지만, 시설물에 의한 해수유동 문제 및 높은 부유물질량에 따른 광제한 요소가 식물플랑크톤 성장과 분포를 지배하는 것으로 추정되었다(Gallegos *et al.* 2005; Laskar and Gupta 2009; Kirk 2011). 실제 연구해역에서 직선거리로 약 20 km 북쪽에 위치하는 신안군 지도면 연안해역에서 2005년 4월 김 수확시기에 비교적 광역적으로 조사한 표층 총부유물질량은 대조시 205.5 mg L^{-1} ($n=23$), 소조시 112.4 mg L^{-1} ($n=23$)였고, 2시간 간격으로 24시간 연속관측한 결과도 표층에서 230.9 mg L^{-1} 를 나타내어(FSI-YNU 2005), 신안군 해역 김 양식장에 투과 가능한 광은 극히 표층에 제한될 것임을 증명해주고 있다. 당시 주변 해역의 수질환경도 신안 김 양식장과 유사하였다.

식물플랑크톤 우점종은 *Navicula sp.*, *Chaetoceros socialis* 등의 저서성 및 부유성 소형종으로 최근 겨울 김 성장 시기에 일본의 김 양식장에서 종종 발생하는 대형 규조 적조종 *Coscinodiscus wailesii*, *Eucampia zodiacus*, *Asterionellopsis kariana* 등과는 매우 다른 결과를 보였다(Nagai *et al.* 1996; Ishizawa *et al.* 2006).

최근 산업발전에 따라 용수와 치수를 목적으로 대형 하천의 하구역에 건설된 하구 독에 의해 하천과 절단된 연안 해역의 주된 수층혼합 기작은 조류에서 방류수량으로 변화되었다(Jang and Kim 2006; Kim *et al.* 2011). 또한 정체된 인공호에 의한 오염부하량, 영양염류 농도, 여름 해저 빈산소화, 담수 및 해양 식물플랑크톤 생물량 증가에 따른 유기물 축적 등(Yoon 2000, 2001; Cho *et al.* 2007; Yoon *et al.* 2008) 산업발전에 동반한 연안의 인위적 개발행위는 최종적으로 김 생산을 포함하여 해역에서의 자원생물의 생산성을 급격하게 저하시키는 원인이 되고 있다(Sato 2004)

그러나 신안 김 양식장의 해양환경과 최근 김 생산의 흉작과 변색의 원인이 되는 환경과 비교하면, 일본의 김 생산량 감소 및 변색에 의한 상품 가치 하락의 이유에 대해 자연과학적 측면의 메카니즘으로 ① 장기적으로 하천에서 유입되는 영양염부하량의 감소(세도내해의 경우 용존무기질소가 연중 $10 \mu\text{M}$ 이하), ② 해수 유광층의 증가에 따른 식물플랑크톤의 영양염류 소비량 증가 및 겨울 적조, ③ 성층강도의 저하에 따른 고수온기 저층해수의 영양염류 농도 감소, ④ 해저 표층퇴적물에서 영양염류의 용출량 저하로 보고 있다(Tada *et al.* 2010; Oyama *et al.* 2012). 이에 대해 신안 양식장은 얇은 수심으로 바

람, 조석 등의 물리적 교란에 의한 해저표층퇴적물의 재부유에 의한 영양염류 공급이 원활하고, 높은 부유물질에 의해 광량 저하로 식물플랑크톤의 성장을 제한하는 등, 영양경쟁을 할 수 있는 대형 규조류의 발생은 어려운 것으로 판단할 수 있었다. 성층 및 표층퇴적물에서의 용출 역시 수십의 얇은 신안 김 양식장에서는 큰 문제로 작용할 가능성은 희박하여, 바람과 조석 혼합에 의한 높은 무기영양염류 공급과 높은 부유물질에 의한 광 투과 저해로 보다 높은 영양염류를 요구하는 대형식물플랑크톤 성장을 저해하는 신안 김 양식어장의 해양환경 특성이 김 성육시기의 겨울 중간 경쟁을 차단시켜 김 생산량을 증가하는 데 크게 기여하는 것으로 판단할 수 있었다.

적 요

신안군 압해도 남서해역에 위치하는 김 양식 어장의 해양환경 특성을 파악하기 위하여 2013년 10월부터 2014년 월까지 김 엽상체의 성육 단계인 유엽기, 중엽기 및 성엽기에 맞추어 3회에 걸쳐 수질환경과 식물플랑크톤 군집 파악을 위한 현장조사를 실시하였다. 압해 김 양식장은 수십의 얇은 천해역에 위치하여 바람과 조석혼합 등 물리적 교란에 의해 해저 표층퇴적물의 재부유가 심하게 발생하고 있다. 해저 표층퇴적물의 재부유는 영양염류의 공급과 함께 높은 총부유물질량에 의해 해수 중으로 투과되는 빛을 방해하여, 겨울 김 성장시기에 김과 동일한 영양염류 흡수를 경쟁하는 식물플랑크톤 성장을 방해하는 것으로 판단되었다. 이러한 압해 김 양식장 해양환경은 최근 일본의 김 흉작과 변색에 의해 품질이 저하되는 원인인 김 성장기 질소원을 중심으로 하는 영양염류 부족과 투명한 해수로 인한 충분한 광 투과로 김 보다 영양흡수 효율이 좋은 대형 규조류가 겨울 규조적조를 발생시키는 환경과 대조된다. 즉 압해도 김 양식장의 물리적 교란에 따른 퇴적물 재부유로 인한 영양염 공급과 높은 부유물질량에 따른 식물플랑크톤 성장 억제와 같은 해양환경이 우리나라 서해 남부 김 양식장의 높은 생산량으로 연결하는 중요한 인자로 작용한다고 판단되었다.

사 사

이 논문은 2013년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(No. 2013005394) 결과의 일부이다.

REFERENCES

- Aoki K and K Kajitori. 2011. An essay on a construction of quantitative models of cultured nori production in Ariake Sea using SVM. *J. Nat'l Fish. Univ.* 59:253-256. (in Japanese)
- Chihara M and M Murano. 1997. *An Illustrated Guide to Marine Plankton in Japan*. Tokai Univ. Press, Tokyo. 1574pp. (in Japanese)
- Cho HY, BJ Cho and YH Kim. 2007. Estimation error analysis on the COD loads due to the sampling intervals. *J. Korean Soc. Coast. Ocean Eng.* 19:266-273. (in Korean)
- Choe S and TW Chung. 1972. Nutrients and suspended organic particulates in the Estuary of Nak-Dong River. *J. Oceanol. Soc. Korea.* 7:1-14. (in Korean)
- Choi JK. 1991. The influence of the tidal front on primary productivity and distribution of phytoplankton in the mid-eastern coast of Yellow Sea. *J. Oceanol. Soc. Korea.* 26:223-241. (in Korean)
- Cupp EE. 1943. Marine plankton diatoms of the west coast of north America. *Bulletin of the Scripps Institution of Oceanogr. Univ. Calif.* 5:1-237.
- Dodge JD. 1982. *Marine dinoflagellates of the British Isles*. Her Majesty's Office, London. 303pp.
- FSI-YNU (Fisheries Science Institute, Yosu National University). 2005. Report on the survey for damages of fishery right by the developmental projects of industrial complex of rural areas in Shinan-gun. FSI-YNU. Yeosu. 222pp. (in Korean)
- Gallegos CL, TE Jordan, AH Hines and DH Weller. 2005. Temporal variability of optical properties in a shallow, eutrophic estuary: Seasonal and interannual variability. *Est. Coast. Shelf Sci.* 64:156-170.
- Hallegraeff GM, CJS Bolch, DRA Hill, I Jameson, JM LeRoi, A McMinn, S Murray, MF de Salas and K Saunders. 2010. *Algae of Australia: Phytoplankton of Temperate Coastal Waters*. CSIRO Publishing, Canberra. 432pp.
- Haurly LR, JA McGowan and PH Wiebe. 1978. Patterns and processes in the time-space scales of plankton distributions. pp. 277-327. In *Spacial Pattern in Plankton Communities* (Steele JH ed.). NATO Conf. Ser. IV, Vol. 3, Plenum.
- Hong JS, CB Song, NG Kim, JM Kim and HT Huh. 1987. Oceanographic conditions in relation to laver production in Kwangyang Bay, Korea. *Bull. Korean Fish. Soc.* 20:237-247. (in Korean)
- Ishii M, K Hasegawa and U Matsuyama. 2008. Environmental factors influencing *Porphyra* (Nori) farming in Tokyo Bay: Longterm changes in inorganic nutrients and recent proliferation of diatoms. *Bull. Japan. Soc. Fish. Oceanogr.* 72:22-29. (in Japanese)
- Ishizawa J, Y Kitaura, Y Touke, H Sasaki, A Tanaka, H Murakami, T Suzuki, K Matsuoka and H Nakata. 2006. Satellite detection of red tide in Ariake Sound, 1998-2001. *J. Oceanogr.* 62:37-45.
- Jang PK, WJ Lee, MC Jang, JD Lee, WJ Lee, M Chang, KC Hwang and K Shin. 2005. Spatial and temporal distribution of inorganic nutrients and factors controlling their distributions in Gwangyang Bay. *Ocean Polar Res.* 27:359-379. (in Korean)
- Jang ST and KC Kim. 2006. Changes of oceanographic environment in the Nakdong Estuary. 「The Sea」 *J. Korean Soc. Oceanogr.* 11:11-20. (in Korean)
- JWA (Japan Weather Association). 1985. *Manual for Marine Observation*. Oceanogr. Soc. Japan. Tokyo. 428pp. (in Japanese)
- Kim J, B Kim, M Shin, JK Kim, S Jung, Y Lee and JH Park. 2009. The distribution of nitrogen and the decomposition rate of organic nitrogen in the Youngsan River and the Sumjin River, Korea. *J. Korean Soc. Water Qual.* 25:135-143. (in Korean)
- Kim SJ, SH Woo, BM Kim and SD Hur. 2011. Trends in sea surface temperature (SST) change near the Korean Peninsula for the past 130 years. *Ocean Polar Res.* 33:281-290.
- Kirk JTO. 2011. *Light and Photosynthesis in Aquatic Ecosystems* (3rd eds). Cambridge Univ. Press, Oxford. 662pp.
- Kumagai K and T Naitoh. 2007. The trend of DIN supply to the area of Fukuoka Prefecture in the Ariake Sea. *Bull. Fukuoka Fish. Mar. Tech. Res. Center.* 17:73-80. (in Japanese)
- Kwon HG, SJ Oh, MO Park and HS Yang. 2014. Distribution of water masses and distribution characteristics of dissolved inorganic and organic nutrients in the southern part of the East Sea of Korea: Focus on the observed data in September, 2011. *J. Kor. Soc. Mar. Environ. Energ.* 17:90-103. (in Korean)
- Kwon JN, JH Shim, SY Lee and JD Cho. 2013. Effects of meteorological and oceanographic properties on variability of laver production at Nakdong River estuary, south coast of Korea. *Korean J. Fish. Aquat. Sci.* 46:868-877. (in Korean)
- Laskar HS and S Gupta. 2009. Phytoplankton diversity and dynamics of Chatla floodplain lake, Barak Valley, Assam, North East India-a seasonal study. *J. Environ. Biol.* 30:1007-1012.
- Lee BG and KD Cho. 1995. Temporal variations of stratification-destratification in the Deukryang Bay, Korea. *Korean Environ. Sci. Soc.* 4:139-149.
- MOF (Ministry of Ocaen and Fisheries). 2010. *Manual for Stan-dard Methods of Marine Environments*. Seoul. 461pp. (in Korean)
- Nagai S, H Hori, K Miyahara, T Manabe and I Imai. 1996. pop-

- ulation dynamic of *Coscinodiscus wailesii* Gran (Bacillariophyceae) in Harima-Nada, Seto Inland Sea, Japan. pp. 239-242. In Harmful and Toxic Algal Blooms (Yasumoto T, Y Oshima and Y Fukuyo eds). IOC of Unesco. Paris.
- NFRDI (National Fisheries Research and Development Institute). 1993. Daily variations of SSR at Mokpo area. NFRDI, Pusan. 111pp.
- Ock YS. 2011. The research on the development steps and facing problems of Korean and Japanese laver industry. J. Fish. Bus. Admin. 42:113-130. (in Korean)
- Omura T, M Iwataki, VM Borja, H Takayama and Y Fukuyo. 2012. Marine Phytoplankton of the Western Pacific. Kouseisha Kouseikaku. Tokyo. 160pp.
- Oyama K, T Fujisawa, M Abe and T Kitao. 2012. Environmental factors influencing the changes in dissolved inorganic nitrogen during season of *Porphyra yezoensis* cultures in the coastal area of Kagawa Prefecture, Seto Inland Sea, Japan. Bull. Akashiwo Res. Inst. Kagawa Pref. 8:7-15. (in Japanese)
- Park SY, SS Kim, PJ Kim, ES Cho, SY Kim, YS Choi, BM Kim and DU Kim. 2010. Long-term variation and characteristics of water quality in the Mokpo coastal areas of the Yellow Sea, Korea. J. Korean Soc. Mar. Environ. Saf. 16: 321-337. (in Korean)
- Parsons TR, M Takahashi and B Hargrave. 1984. Biological Oceanographic Processes (3rd Eds). Pergamon Press, Oxford. 330pp.
- Redfield AC, BH Ketchum and FA Richards. 1963. The influence of organisms on the composition of sea-water. pp.26-77. In The Sea. Vol. 2. The composition of sea-water comparative and descriptive oceanography (Hill MN ed). John Wiley & Son, New York.
- Sato M. 2004. Richness of Ariake Sea in Kyushu, Japan and its crisis by human impacts. Saga Nat. Study 10:129-149. (in Japanese)
- SCOR-Unesco. 1966. Determination of photosynthetic pigments. pp.10-18. In Determination of photosynthetic pigments in sea water (Unesco ed.). Paris.
- Sohn CH. 1996. Historical review on seaweed cultivation of Korea. Algae 11:357-364. (in Korean)
- Song HI and YK Chung. 1999. A study on the production and environmental conditions of wild-*Porphyra* farming area in the West Sea of Korea. Bull. Nat'l Fish. Res. Devel. Inst. 55:83-97. (in Korean)
- Tada K, M Fujiwara and T. Honjo. 2010. Water quality and nori (*Porphyra*) culture in the Seto Inland Sea. Bunseki Kagaku. 59:945-955. (in Japanese)
- Thronsdon J. 1978. Preservation and storage. pp.69-74. In Phytoplankton Manualin (Sournia A ed.). Unesco, Paris.
- Tomas CR (ed.). 1997. Identifying marine diatoms and dinoflagellates. Academic Press. Oxford. 858pp.
- Yoon HS, S Park, IC Lee and HT Kim. 2008. Spatio-temporal variations of seawater quality due to the inflow of discharge from Nakdong River Barrage. J. Korean Soc. Mar. Environ. Eng. 11:78-85. (in Korean)
- Yoon YH. 2000. On the distributional characteristics of organic matters on the surface sediments and its origin in Mokpo coastal waters, southwestern Korea during low temperature seasons. J. Inst. Nat. Sci., Yeosu Nat'l Univ. 2:83-94. (in Korean)
- Yoon YH. 2001. On the distributional characteristics of water quality and environmental factors on the variation of primary production in Mokpo coastal waters, southwestern Korea during low temperature seasons. J. Korean Soc. Water Qual. 17:1-13. (in Korean)
- Yoon YH. 2010. Red Tides -An Uprising from the Sea-. Jipmoondang, Seoul. 531pp. (in Korean)

Received: 13 June 2014

Revised: 11 July 2014

Revision accepted: 12 July 2014