

낙동강 하구 해양환경 및 기상 요인이 김(*Porphyra yezoensis*) 생산량 변화에 미치는 영향

권정노 · 심정희* · 이상용¹ · 조진대²

국립수산과학원 어장환경과, ¹ 국립수산과학원 해조류바이오연구센터, ² 부산지방기상청 예보과

Effects of Meteorological and Oceanographic Properties on Variability of Laver Production at Nakdong River Estuary, South Coast of Korea

Jung-no Kwon, JeongHee Shim*, Sang Yong Lee¹ and Jin Dae Cho²

Marine Environment Research Division, National Fisheries Research & Development Institute, Busan 619-705, Korea

¹ Seaweed Research Center, National Fisheries Research & Development Institute, Mokpo 530-420, Korea

² Busan Regional Meteorological Administration, Busan 607-804, Korea

To understand the effects of marine environmental and meteorological parameters on laver *Porphyra yezoensis* production at Nakdong River Estuary, we analyzed marine environmental (water temperature, salinity, nutrients, etc.) and meteorological properties (air temperature, wind speed, precipitation, sunshine hours) with yearly and monthly variations in laver production over 10 years (2003-2013). Air and water temperature, wind speed, sunshine hours and precipitation were major factors affecting yearly variability in laver production at the Nakdong River Estuary. Lower air and water temperatures together with higher levels of nutrients and sunshine and stronger wind speeds resulted in higher laver harvests. Salinity and nitrogen did not show clear correlations with laver production, mainly due to the plentiful supply of nitrogen from river discharge and the low frequency of environmental measurements, which resulted in low statistical confidence. However, environmental factors affecting monthly laver production were related to the life cycle (culturing stage) of *Porphyra yezoensis* and were somewhat different from factors affecting annual laver production. In November, a young laver needs lower water temperatures for rapid growth, while a mature laver needs much stronger winds and more sunshine, as well as lower temperatures for massive production and effective photosynthesis, mostly in December and January. However, in spring (March), more stable environments with fewer fluctuations in air temperature are needed to sustain the production of newly deployed culture-nets (2nd time culture). These results indicate that rapid changes in weather and marine environments caused by global climate change will negatively affect laver production and, thus, to sustain the yield of and predict future variability in laver production at the Nakdong River estuary, environmental variation around laver culturing farms needs to be monitored with high resolution in space and time.

Key words : Laver, *Porphyra yezoensis*, Mass production, Aquacultural environment, Nakdong River Estuary

서 론

우리나라 김(*Porphyra yezoensis*)은 양식의 역사성이나 생산 규모 면에서 대표적인 양식품목이다(Ock, 2010). 김 양식은 약 540여년전(1470년대) 남해안 광양만에서 시작되었으며(Bae, 1991), 1920년 후반부터 우리나라 전역에 근대 김 양식이 활발해졌다(Yoo, 2003). 낙동강 하구에서도 100여년 전부터 김 양식이 이루어진 것으로 추정되며, 실제로 1933년에는 낙동강 하

구 김 어장의 흥작에 관한 조사가 이루어졌다(Kang, 1972). 양식 김의 연간 생산량은 35 만 톤, 생산액은 2,774억 원으로 양식 품종 중 넉치, 전복 다음으로 생산액이 높으며(2012년 기준, 통계청 <http://www.kostat.go.kr>), 수출도 지속적으로 증가하여 2012년 2.3억 달러로 해조류 전체 수출금액의 73%를 차지하였다(수산정보포털 <http://www.figs.go.kr>).

낙동강 하구에는 약 721 ha에 이르는 면적에 김 양식장이 분포하고 있으며, 이는 전국에 김 양식 허가 면적의 약 1.3%로, 전

Article history;

Received 28 October 2013; Revised 13 December 2013; Accepted 16 December 2013

*Corresponding author: Tel: +82. 51. 720. 2543 Fax: +82. 51. 720. 2515

E-mail address: jshim@korea.kr

Kor J Fish Aquat Sci 46(6) 868-877, December 2013

<http://dx.doi.org/10.5657/KFAS.2013.0868>

pISSN:0374-8111, eISSN:2287-8815

© The Korean Society of Fisheries and Aquatic Science. All rights reserved

국 생산량의 4.3%를 차지하고 있다(2012년 기준, 통계청 <http://www.kostat.go.kr>). Choe and Chung (1972)은 낙동강 하구가 일본의 김 생산해역 및 국내 완도 등지에 비해 영양염이 풍부하여 김 생산을 위한 우수한 어장이라 평가하였으며, 실제 낙동강에서 생산되는 김은 색택과 식감이 우수하여 좋은 평가를 받고 있다. 한편 낙동강하구는 1980년대 하구 독 건설 후 지형적으로 을숙도 아래 사주 발달이 심화되고 있으며, 수층 혼합에 관여하는 주 기작이 조류에서 방류수량으로 바뀌었다(Jang and Kim, 2006; Kim et al., 2011). 또한 하구 독 건설 후 오염 부하량, 영양염류 농도, 녹조류 및 남조류 밀도 증가 등의 생화학적 변화가 확인되었다(Moon and Choi, 1991; Cho et al., 2007; Yoon et al., 2008). 이처럼 낙동강 하구는 담수로부터 공급된 풍부한 영양염으로 인해 김 양식의 적지로 판단되지만, 주변 산업단지로부터의 오염물질 유입과 하구 독 건설로 인한 하구순환변화 등의 환경변화를 겪었으며, 현재도 진행 중이다.

이외에도 최근 김 양식 산업은 기후변화에 따른 해양환경변화(고수온, 영양염류 부족, 유해물질 증가 등)로 갯병 빈발, 황백화 발생 등의 어려움을 겪고 있으며, 대외적으로 후발주자인 중국의 김 생산이 급속하게 증가함으로 인한 수출 경쟁 등의 상황에 직면하고 있다(NFRDI, 2013). 따라서 본 연구는 안정적이고 고효율의 김 생산을 위해 낙동강 하구의 김 생산량에 영향을 미치는 해양환경 및 기상요인을 파악하고자 수행되었다.

재료 및 방법

김 양식 현황 및 통계

우리나라에 보고된 김 속은 16종 2품종(Hwang and Lee, 1994 and 2002)이 있으나, 현재 양식에는 참김(*P. tenera* Kjellman)과 방사무늬김(*P. yezoensis* Ueda)이 주를 이룬다. 낙동강 하구에서는 방사무늬 김을 주로 양식하고 있으며, 성장속도와 생존력이 강한 특성으로 점차 확대되는 추세이다. 낙동강 하구에서는 추석을 전후하여 채묘된 그물발을 부유식 양식장에 설치하고, 보름 정도 단련기간을 거친 후 본양성에 들어간다. 첫 채취는 본 양성 시작 후 15일 경에 하고, 이후 20-25일 간격으로 4-5회 더 채취한다. 두 번째 양성을 위해 냉동상태로 보존하던 그물발을 양식장에 설치하고 단련과 본양성을 반복 실시하며, 그 시기는 주로 2월경 설 전후가 된다. 따라서 김 양식기간에 총 두 번의 양식(일종의 이모작)을 시행한다.

김의 양식 생산은 12월부터 본격적으로 시작되고 다음해 4월까지 지속된다. 따라서 김 생산량을 산출할 때 1월부터 12월까지의 연도별 생산량 자료는 실제적으로 두 번의 양식기간에 걸친 생산량이므로, 해당 양식시기의 풍·흉년을 논하기에는 대표성이 떨어지는 단점이 있다. 따라서 김 생산량 자료는 양식 순기를 기준으로 10월부터 다음해 5월까지의 연산별 생산량 자료를 활용하였다. 이에 따라 해양환경자료 및 기상자료도 11월부터 다음해 3월까지를 한 시기로 나누어 비교하였다.

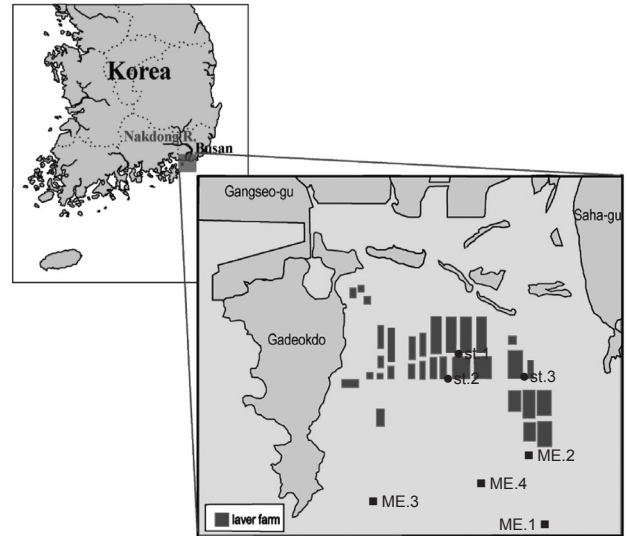


Fig. 1. Map showing the study areas and laver culturing farms at Nakdong River Estuary. St. 1~3 (red circles) are the stations for this study and ME. 1~4 (blue squares) are the Nakdong Estuary stations surveyed by the project of nationwide marine environmental monitoring network (<http://www.meis.go.kr>).

낙동강 하구에서 생산되는 김 생산 통계는 부산광역시와 경상남도의 월별 생산량 및 생산금액을 합산하여 이용하였다(통계청, <http://www.kostat.go.kr>). 과거 낙동강 하구역 일부가 경상남도 의창군에 속하였던 관계로 이 지역에서 생산되는 김은 인근에 위치한 의창수협을 통해 경상남도 수산물 생산 통계로 집계된다. 따라서 낙동강 하구의 실질적인 김 생산은 경상남도 와 부산광역시의 자료를 합산해야만 한다. 이는 경상남도의 김 양식 면허지가 없다는 점과 경상남도 와 부산시 해양수산물 통계 및 전화 문의, 김 양식협회 부산지부 관계자 자문을 통해 확인하였다.

연구지역 및 현장 조사

낙동강 하구에 위치한 김 양식장은 삼각주 중 울타리섬(진우도, 신자도, 도요등), 가덕도와 다대포를 경계로 하는 해역에 동서방향으로 분포하고 있다(Fig. 1). 해양환경조사는 2011/2012년과 2012/2013년 김 양식시기(9월부터 5월까지)에 보름 간격으로 김 양식장을 대표할 수 있는 3개 정점에서 실시하였다(Fig. 1). 다목적 수질측정기(YSI6000, YSI, USA)로 수온, 염분, pH, 용존산소를 측정하였으며, Niskin채수기로 표층 해수를 채집하였다. 표층수의 영양염과 엽록소, 부유물질 분석을 위해 채집된 해수는 냉장상태로 실험실로 옮긴 후(1-2시간 이동), 해양환경 공정시험기준(MLTM, 2010)에 따라 전처리 및 분석을 실시하였다. 영양염은 자동분석기(QuAAtro system with 4 channel, BranLuebbe, Germany)로 측정하였으며, 표준물질(OSIL社 & Wako社)로 검량용 표준용액을 만들고 검정하였다. 용존산소

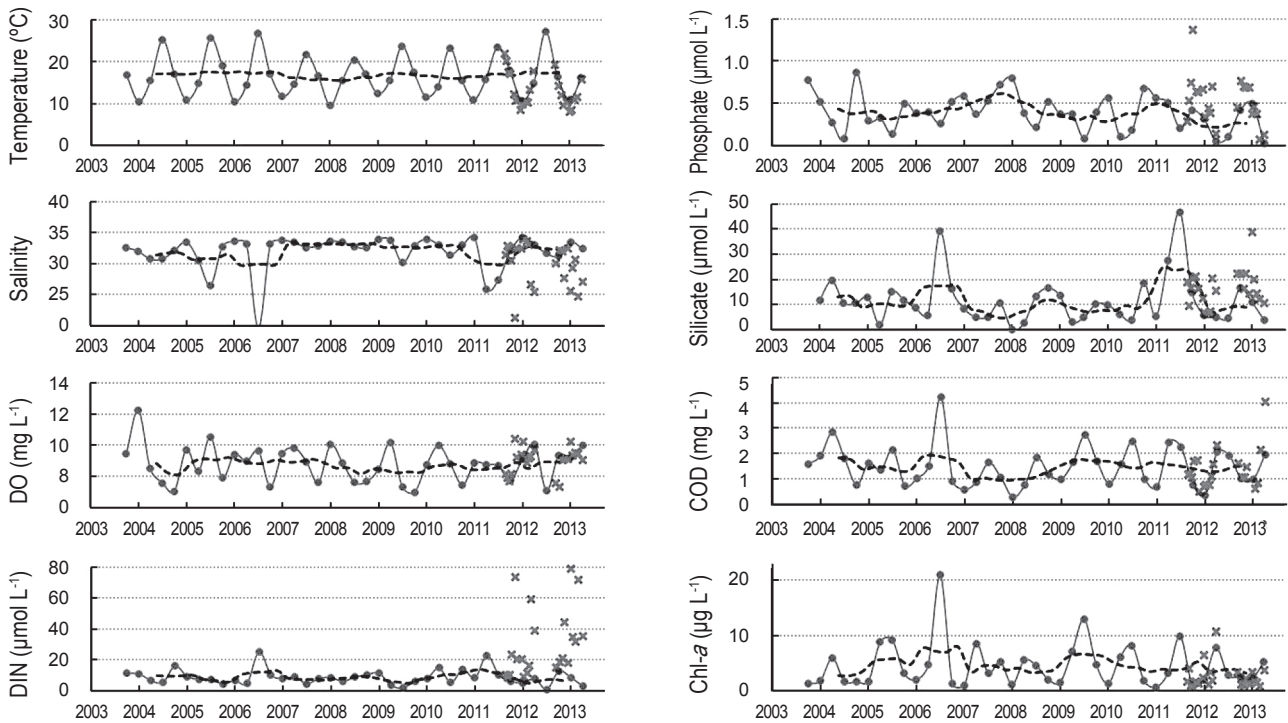


Fig. 2. Temporal variations of water temperature, salinity, dissolved oxygen (DO), dissolved inorganic nitrogen (DIN), phosphate, silicate, chemical oxygen demand (COD), and Chlorophyll-a at Nakdong River Estuary from 2004 to 2013 surveyed by the project of nationwide marine environmental monitoring network (circle and dotted line (moving average of 4 points), <http://www.meis.go.kr>) and by this study from 2011 to 2013 (x in red).

는 현장에서 용존산소용 병에 채수하고 1, 2차 고정시약으로 고정 후, 실험실로 옮겨 적정기(Dosimat 876 system, Metrohm, Switzerland)로 적정하였다(Parsons et al., 1984). 한편 다목적 수질측정기(YSI6000, YSI, USA)는 현장에 나가기 전에 검교정을 하고, 실험실에서 동일조건에서 CTD (19plus, Sea-Bird Electronics, USA)와 비교 측정 후 보정하였다.

기상 및 해양환경 자료

1996년부터 전국 연안환경의 지속관리를 위해 국가적 규모로 실시된 해양환경측정망은 전국 연안의 약 400개 정점에서 환경조사를 지속적(년 4회)으로 실시하고 있다. 낙동강 하구는 2004년 이전에는 부산권 해역에 포함되어 1-2 정점 조사되었으나, 2004년부터 특별관리해역으로 분류되어 조사정점이 총 4개로 확대되었다(Fig. 1). 해양환경측정망의 낙동강 하구정점은 김 양식해역과 본 연구의 조사 정점 보다 다소 외해에 위치하나(김 양식장과 직선으로 약 3-7 km 거리), 낙동강 환경변화를 대변할 수 있는 유일한 장기 해양환경 모니터링 자료이다. 따라서 김 생산량 자료와 비교하기 위해 2004년 2월부터 2013년 5월까지의 관측 자료를 활용하였다(국가해양환경정보통합시스템, <http://www.meis.go.kr>).

낙동강하구에 위치한 김 양식장의 기상은 부산기상대에서 관측한 2003년 1월부터 2013년 5월까지의 자료(일평균기온, 일평균풍속, 강수량, 일조량 등)를 이용하였다(<http://web.kma.go.kr/aboutkma/intro/busan>). 부산시 동래구에 위치한 부산기상청은 김 양식장과 약 25-30 km 떨어져있어, 국지적으로 발생하는 기상현상이나 바다로부터 받는 영향 등을 정밀하게 대변할 수는 없으나 본 연구에서는 월 또는 계절주기의 기상변화를 주로 평가할 것이므로 부산기상청의 관측 정보가 낙동강 하구의 월별, 계절별, 연별 기상 변화를 대표한다고 가정하였다.

결 과

낙동강 하구 해양환경특성

국가 해양환경측정망에서 2004년 2월부터 2013년 5월까지 관측된 낙동강하구의 해양환경인자들의 변화(4개 정점 평균)는 Fig. 2와 같다. 수온은 계절별로 8월에 (20.4-27.2°C) 가장 높았고 2월에 (9.6-12.4°C) 가장 낮았으며, 2012년 8월에 27.2°C로 최고 수온을 보였고, 2008년 2월에 9.6°C로 최저 수온을 나타냈다. 김 양식이 시작되는 11월 수온은 2010년이 15.6°C로 가장 낮았고 2005년이 18.3°C로 가장 높았다. 표층수의 염분은

Table 1. Comparison of ranges and averages of environmental parameters measured at/near laver *Porphyra yezoensis* mariculture ground in Nakdong Estuary, Busan

Parameter (Unit)	Annual base				Season for laver production			
	St. 5 at Choe & Chung, (1972) ¹		St. 2 at MEIS ²		Choe & Chung(1972) ³		This study	
	range	average	range	average	range	average	range	average
Temperature (°C)	5.7~27.5	18.2	11.44~26.5	17.35			8.1~21.9	13.2
Salinity	11.26~31.22	21.34	15.07~34.2	32.38			21.22~33.89	29.88
pH	7.7~8.4	8.0	7.78~8.4	8.13			7.46~8.17	7.93
DO (mg L ⁻¹)	7.57~10.27	8.67	6.12~12.7	8.80			7.33~10.43	9.01
NH ₄ -N (μmol L ⁻¹)	0.33~2.73	0.78	~7.47	1.15	0.24~12.54	1.59	0.83~6.96	2.70
NO ₂ -N (μmol L ⁻¹)	0.19~2.09	0.88	~2.57	0.43	0.21~1.47	0.57	0.04~3.22	0.86
NO ₃ -N (μmol L ⁻¹)	5.93~56.79	23.17	0.07~19.86	5.00	8.70~34.17	17.13	4.52~71.17	27.20
PO ₄ -P (μmol L ⁻¹)	0.20~1.73	0.88	0.03~0.97	0.38	0.27~1.45	0.63	0.07~1.37	0.53
SiO ₂ -Si (μmol L ⁻¹)	18.33~131.03	71.16	0.32~47.92	9.17	18.33~123.56	56.34	6.67~38.71	16.64

¹Values are based on the result of 11 monthly cruises from Feb. to Dec., 1970.

²Values are based on the results of every 4 months(Feb., May, Aug., Nov.) from 2004 to 2011 (<http://www.meis.go.kr>).

³Values are based on the results of Feb., Mar., and Nov., 1970.

19.6-34.3 psu 범위였으며, 평균은 31.9 psu 이었다. 강우에 의한 영향으로 여름에 염분이 낮았으며, 2006년 8월에 19.6 psu 로 가장 낮았다. 이는 2006년 7월(강수량 600 mm)이 다른 해 7월(2000-2012년 평균 강수량 390 mm)에 비해 강수량이 많았던 관계로, 조사기간(8월 초)에도 하구 독을 통한 담수 방류가 지속되었던 것으로 생각된다. 이처럼 조사시기와 하구 독 방류 시간이 일치하고 그 양이 많을 경우, 측정망 정점까지 담수 영향이 확대되어 나타나며, 이로 인해 염분을 비롯한 해양환경인자들이 영향을 받는 것으로 나타났다.

용존산소는 7.0-12.3 mg L⁻¹ 범위였으며, 2-5월에 높고 11월에 낮은 계절변화를 보였다. 화학적산소요구량(COD)은 0.3-4.2 mg L⁻¹ 범위였으며, 염분이 가장 낮았던 2006년 8월에 화학적산소요구량은 가장 높았다. 엽록소 a 농도는 0.7-21.0 μg L⁻¹ (평균 4.8 μg L⁻¹)범위를 나타내었으며, 5-8월에 비교적 높고 11-2월에 낮았다. 영양염류 중 용존무기질소는 1.1-25.5 μmol L⁻¹ (평균 8.9 μmol L⁻¹)범위였으며, 계절에 따른 변화보다는 염분이 낮을 때 비교적 높은 값을 보여, 담수 유입량에 따른 변동이 강한 것으로 생각된다. 용존무기인의 경우 0.1-0.9 μmol L⁻¹ (평균 0.4 μmol L⁻¹)범위였으며, 11월에 낮고 2월-5월에 높은 계절 변화를 보였으며, 규산염의 경우 0.3-46.7 μmol L⁻¹ (평균 11.6 μmol L⁻¹)범위였으며, 뚜렷한 계절변동보다는 용존무기질소와 마찬가지로 담수의 영향을 받는 것으로 생각된다.

1970년 낙동강 양식장에서 11개월 조사한 결과(Choe and Chung, 1972)와 비교를 통해 그 간의 환경변화를 고찰하고

자 하였다(Table 1). Choe and Chung (1972)이 조사한 정점 5의 위치가 국가 해양환경측정망 낙동강 하구 정점 2와 비슷하여 직접 비교하였다. 염분의 경우 1970년에 측정된 Choe and Chung(1972)에서 더 낮았으며, 더불어 용존무기질소의 80-90%를 차지하는 질산염의 농도도 4-5배 높았다. 특히 규산염의 경우는 측정망에 비해 Choe and Chung (1972)에서 약 8배 높게 나타났다. 김 양식시기의 결과만 비교하면, Choe and Chung (1972)에 비해 본 연구에서 측정된 질산염의 평균농도가 다소 높았다. 반면 규산염은 Choe and Chung (1972)에서 이번 결과보다 평균 3-5배 높았다. 이상의 결과에서, 하구 독 건설 이전에 낙동강 하구는 지금보다 더 넓은 해역에 걸쳐 담수의 영향으로 염분을 비롯한 질산염과 규산염의 분포에 있어 현재보다 시공간적인 변화가 컸던 것으로 생각된다. 특히 규산염은 질산염보다 하구 독 건설 전과 후에 농도범위와 평균이 매우 크게 변화한 것으로 나타났다.

2011/12년과 2012/13년 양식시기에 김 양식장에서 관측한 해양환경자료를 측정망자료와 비교를 위해 Fig. 2에 같이 나타내었다(3개 정점 평균). 수온의 경우 8.1-21.9°C (평균 13.2°C)범위였으며 측정망 결과와도 잘 일치하였다. 양식 초기(9월 중순)부터 수온은 점차 낮아져 1월말/2월초에 최저치를 보인 후 5월 까지 점차 상승하는 경향이였다. 김 양식장에서 측정된 염분은 21.2-33.9 psu (평균 29.9 psu)범위였으며, 측정망 결과보다 대체로 낮은 경향을 보였으며, 그 변화도 일정하지 않았다. 이는 김 양식장 정점이 측정망 정점에 비해 하구독의 방류수 영향을

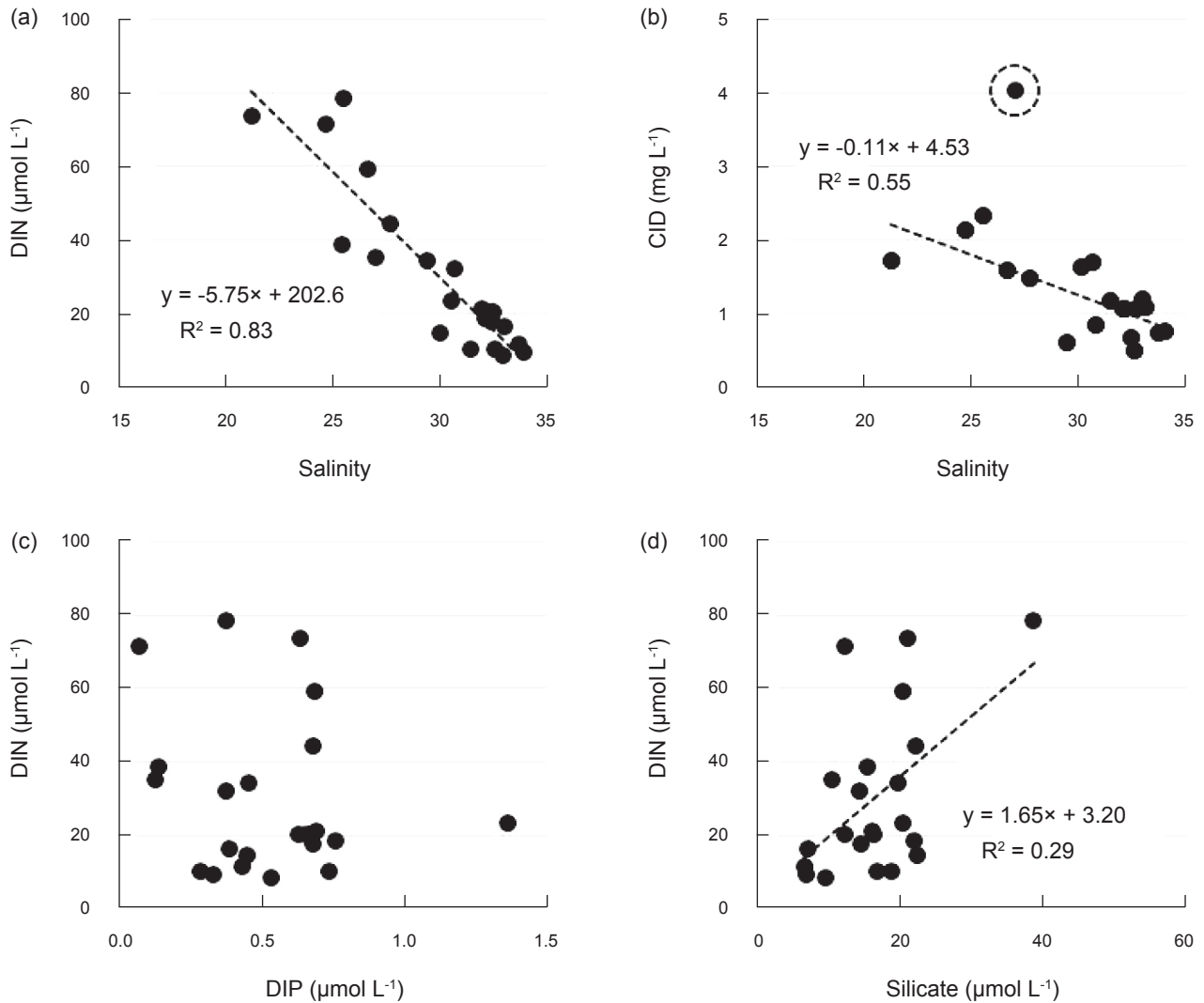


Fig. 3. Relationships between salinity and dissolved inorganic nitrogen (a) and chemical oxygen demand (b), dissolved inorganic nitrogen and phosphate (c), and silicate (d) measured at laver *Porphyra yezoensis* culturing farms around Nakdong River Estuary in 2011/12 and 2012/13 seasons. Dotted circle point is excluded in calculation of correlation.

직접적으로 받는 위치에 있으며, 비가 내린 직후 조사를 실시한 경우가 많았기 때문이다. 특히 2012/13년은 겨울 강수량이 평소에 비해 2배 이상(12월 강수량의 경우 평소보다 5배 이상) 많이 내렸던 해로, 염분의 변화가 더욱 컸던 것으로 생각된다. 그림에는 표현하지 않았지만, 김 양식장의 정점 1에서 정점 3으로 갈수록 염분이 높은 것으로 보아, 정점 1이 방류수의 영향을 가장 많이 받는 것으로 생각된다. 상대적으로 동남쪽에 위치한 정점 3이 비교적 영향을 덜 받는 것으로 생각되며, 이는 Jang and Kim (2006)의 조사에서 담수패치(patch)가 가덕도 방향으로 편향된다는 결과와 잘 일치한다.

용존산소는 $7.3\text{--}10.4 \text{ mg L}^{-1}$ (평균 9.0 mg L^{-1})의 범위를 보였

으며, 측정값 결과와 비교하였을 때, 편차범위 내에 분포하였다. 화학적산소요구량은 2013년 5월을 제외하면 $0.5\text{--}2.3 \text{ mg L}^{-1}$ (평균 1.2 mg L^{-1}) 범위였으며, 측정값 결과와 대체로 유사한 분포 범위를 보였으나, 염분과 양의 상관성을($r^2=0.55$, Fig. 3) 보이는 것으로 보아 방류수의 영향으로 다소 높은 경우도 빈발하였다. 그 예로 2013년 5월은 4.0 mg L^{-1} 으로 비슷한 시기에 측정된 측정값보다 약 2배 높게 나타났다. 염록소 a는 $0.7\text{--}10.8 \mu\text{g L}^{-1}$ (평균 $2.5 \mu\text{g L}^{-1}$) 범위였으며, 측정값결과와 유사한 분포 범위를 보였다.

용존무기질소는 $8.9\text{--}78.6 \mu\text{mol L}^{-1}$ (평균 $30.7 \mu\text{mol L}^{-1}$) 범위로 담수의 영향으로 높게 나타난 것으로 생각되며, 이는 염분과

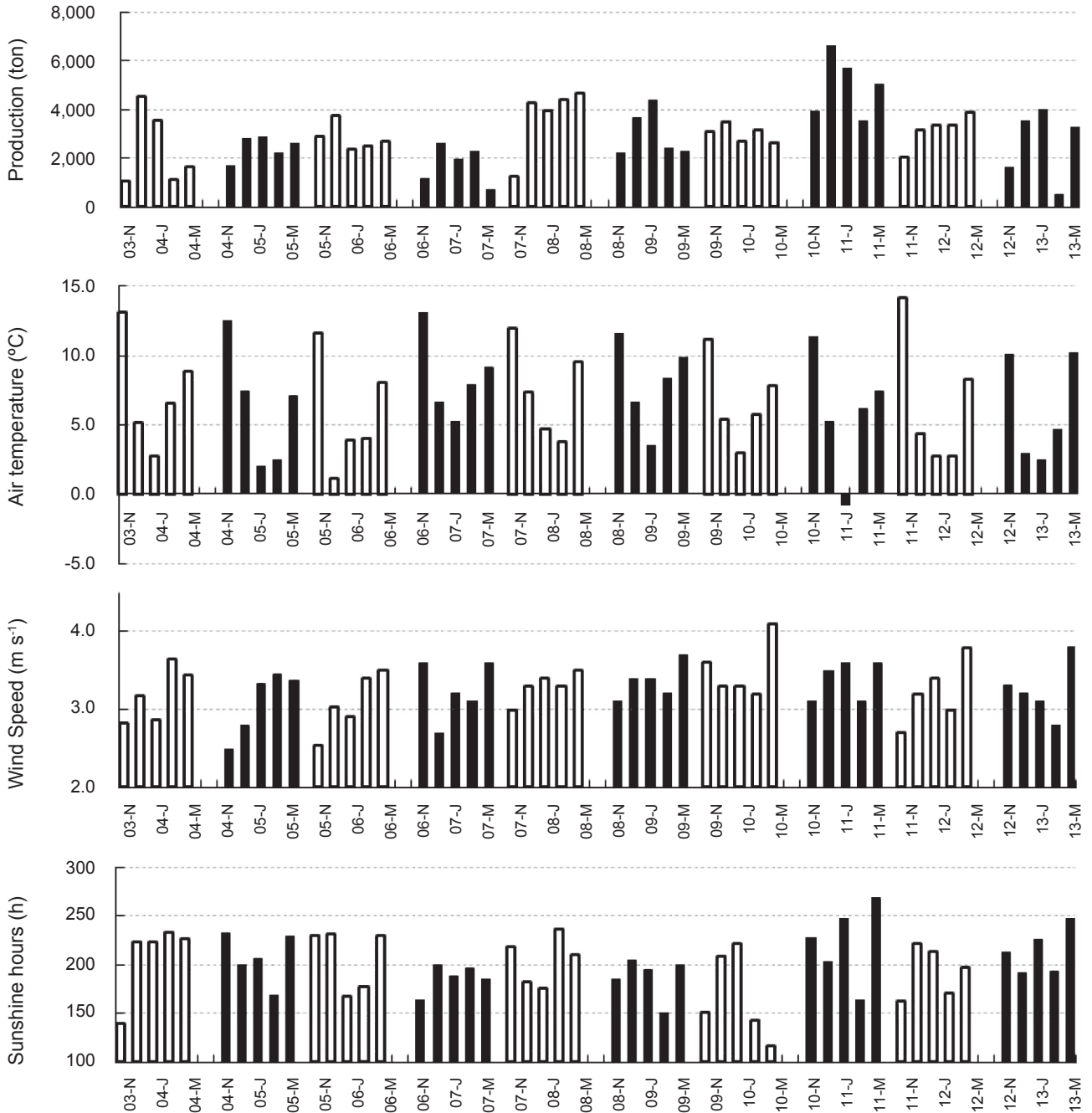


Fig. 4. Monthly variations of laver mass-production, mean of air temperature and wind speed, and sum of sunshine hours during laver *Porphyra yezoensis* culturing season (from Nov. to Mar.) of 2003~2013 measured at laver farms around Nakdong River Estuary and at Busan meteorological station.

높은 음의 상관성을 나타내는 것으로 알 수 있다($r^2=0.83$, Fig. 3). 따라서 측정망에 비해 대부분의 시기에 질산염은 높고 황백화 발생 기준($5 \mu\text{mol L}^{-1}$)보다도 높으므로, 낙동강 하구에 위치하는 김 양식장은 풍부한 영양염으로 인해 황백화 발생 가능성

이 매우 낮음을 알 수 있었다. 인산염과 규산염은 각각 $0.1\text{--}1.4 \mu\text{mol L}^{-1}$ (평균 $0.5 \mu\text{mol L}^{-1}$)와 $6.7\text{--}38.7 \mu\text{mol L}^{-1}$ (평균 $16.6 \mu\text{mol L}^{-1}$) 범위였으며 측정망 정점에 비해 다소 높게 나타났으나, 특이하게 높은 1~2점을 제외하면, 측정망과 비슷한 범위

였다. 낙동강 하구 김양식장에서 관측된 용존무기질소는 용존 무기인과는 거의 상관성을 보이지 않았으나(Fig. 3), 규산염과는 다소 양의 상관성을 보였다($r^2=0.29$, Fig. 3). 이는 용존무기 질소와 규산염은 방류수를 통한 담수 영향을 받는 반면, 용존무기인은 거의 영향을 받지 않기 때문인 것으로 생각된다. Moon and Choi (1991)이 하구둑 건설 직후 관측한 결과에서도 질산염과 규산염 농도가 염분과 높은 역상관 관계를 보이는 것과 일치하는 결과이다.

이상의 결과에서, 김 양식장이 위치한 하구의 해양환경은 수온을 비롯한 용존산소, 엽록소 *a*, 인산염 등은 측정망에서 관측된 분포 경향과 유사한 반면, 염분과 질소성분 등은 하구둑에서 방류되는 담수 영향으로 시공간적인 변동이 매우 큰 것으로 나타났다. 따라서 국가 해양환경측정망에서 관측된 자료는 김 양식장 환경변화를 대변하기에 시공간적인 해상도가 매우 부족하므로, 김 양식환경을 정밀하게 파악할 수 있는 별도의 모니터링 체계가 필요할 것으로 생각된다.

낙동강 하구 김 생산량과 기상변화

2003년부터 2013년까지 낙동강 하구에서 김 양식 순기(년 말 ~ 익년 초) 동안 생산된 총량은 8,900-26,800톤 범위였으며 생산 총액은 93-226억 범위였다(Table 2). 조사 기간 중 2011년산 김의 생산량과 생산금액이 가장 높았으며, 2007년산 김 생산량이 가장 낮았다. 1월부터 12월까지의 연간 총 생산량으로 평가하면, 2011년이 가장 높았으며(21,542톤), 2007년이 가장 낮았다(10,624톤). 김 생산량의 월변화는 양식 초기인 11월에는 낮다가 12월에 급격히 증가하여 1월까지 유지하였으며, 2월부터 감소하는 경향이였다(Fig. 4). 그러나 2008년과 2012년산의 경우 2-3월에 오히려 최대 생산량을 나타내었는데, 이는 두 번째 설치한 채묘밭의 양성이 잘 되었던 것으로 추측된다. 월 생산량으로는 2010년 12월에 6,600톤으로 최고치를 보였으며, 이는 단위 면적(ha)당 한 달에 약 6.3톤을 생산한 것으로, 12월 평균 생산량(3.7 ha/month)을 고려하면 약 2배 높았다.

부산시 기상청에서 관측한 11월부터 3월까지 월평균기온, 월 평균풍속 그리고 월 일조량 합을 Fig. 4에 나타내었다. 2003년부터 2013년까지 부산의 11월 평균 기온은 10.1-14.1°C (11월 평년기온(1980-2010년의 30년 평균)은 11.6°C)의 범위였으나 12월에는 5°C 이상 급격히 떨어져 1.2-7.4°C(12월 평년기온은 5.8°C) 범위였으며, 다시 2-3°C 더 하강하여 1월 평균 기온은 -0.7~5.2°C (1월 평년기온은 3.1°C)로 연 중 가장 낮았다. 11월부터 3월까지 평균기온은 2006/07시기에 8.4°C로 가장 높았으며, 2005/06과 2010/11시기에 6.0°C 이하로 낮았다.

부산시의 평년 풍속의 월평균은 2.5-4.1 m s⁻¹의 범위로 11월부터 3월까지 평균하였을 때, 2009/10과 2010/11시기에 3.4-3.5 m s⁻¹로 가장 높았다. 월별로는 대체적으로 3월에 바람이 가장 강하였던 것으로 나타났다. 부산기상청에서 관측한 11월부터 3월까지 일조시간의 월평균은 약 120-270시간 범위를 보였

Table 2. Yearly and culturing seasonal variations of laver *Porphyra yezoensis* production in mass and value at Nakdong River Estuary, Busan from 2004 to 2013

Year	Mass production (M/T)		Value production (million won)	
	Jan.~Dec.	last Oct.~May	Jan.~Dec.	last Oct.~May
2004	11,131	12,242	8,616	9,393
2005	15,597	13,459	14,346	12,120
2006	11,958	14,825	10,609	12,882
2007	10,624	8,892	10,595	9,342
2008	20,438	20,158	15,914	17,232
2009	16,804	15,935	12,230	10,900
2010	20,916	17,094	19,221	15,910
2011	21,542	26,816	19,180	22,603
2012	17,488	17,531	18,240	18,149
2013	-	14,845	-	13,574

으며, 2010/11년 시기에 가장 높았다. 한편 일조시간의 월별 변화 경향은 뚜렷하지 않았다.

고찰

2003년부터 2013년까지 10번의 양식주기 동안 낙동강하구에서 생산되는 김의 생산량 변동에 영향을 미치는 환경인자를 파악하기 위해 해양환경인자와 기상인자들의 관련성을 살펴 보았다(Fig. 5). 김 양식순기의 총 생산량과 비교하기 위해, 해양환경인자는 11월과 다음해 2월에 관측된 결과를 평균하였으며, 기상자료는 11월부터 다음해 2월까지의 4개월의 결과를 평균하였다. 낙동강 하구의 김 생산량 변동은 기온 및 수온과 비교적 상관이 있는 것(각각 $r^2=0.37, 0.30$, Fig. 5)으로 나타났다. 부산지역의 기온과 수온이 낮아질수록 김 생산량이 높은 것으로 나타났다. 조사기간 중 부산시의 1월 평균기온이 유일하게 영하로(-0.7°C) 내려갔던 2011년산 김 생산량이 가장 많았던 것과, 1월 평균기온이 유일하게 5°C 이상으로(5.2°C) 높았던 2007년산 김 생산량이 가장 적었던 것은 이를 강력하게 뒷받침한다. 김은 수온이 23°C 이하로 떨어지면 채묘를 시작하고, 엽체의 성장은 15°C 이하에서 시작되며, 5-8°C에서 가장 잘 자란다(Yoo, 2003). 본 연구 결과에 의하면, 12월에서 이듬해 2월까지 낙동강에 위치한 김 양식장 해역의 수온이 8-12°C 정도로 낮아지긴 했지만, 5°C 가까이 낮아지는 경우는 관측할 수 없었다. 김 생산량이 높았던 2010/2011은 특히 11월 수온이 평균(17.1°C)보다 2°C나 낮은 15.6°C이었다. 이는 양식 초기의 수온이 평년보다 낮게 유지되어 김의 생산량이 많았던 것으로 생각된다. 염분

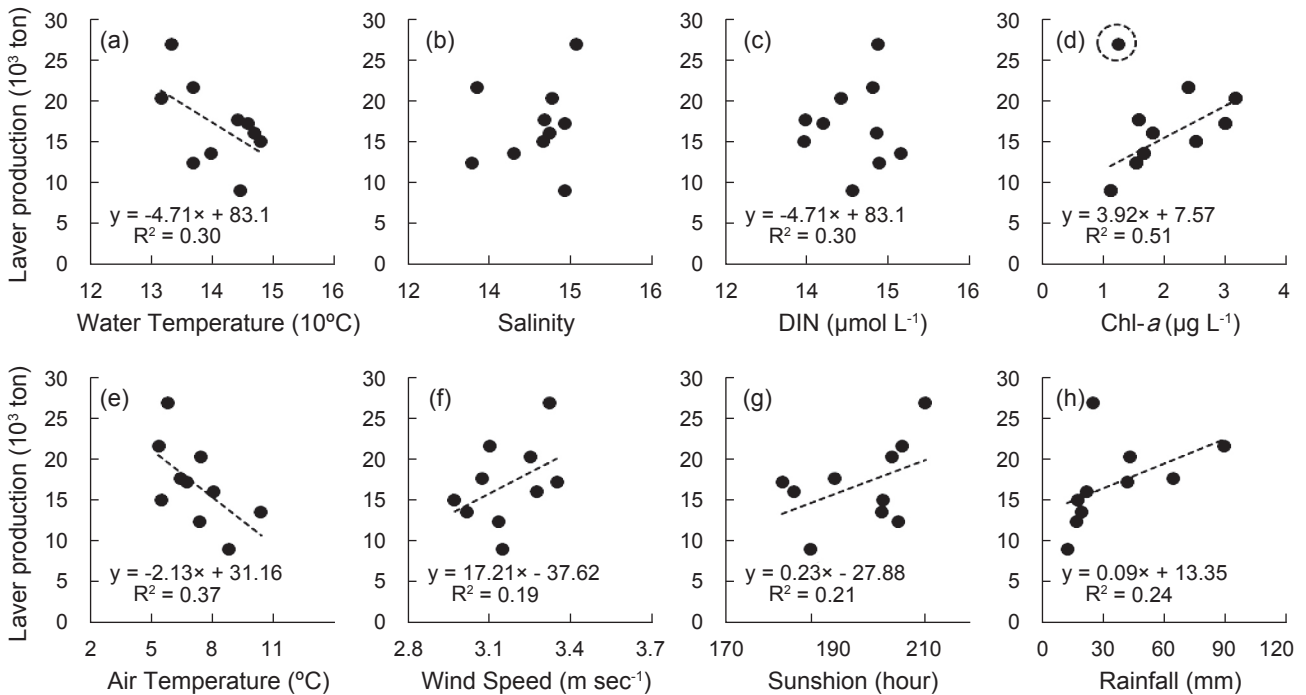


Fig. 5. Relationships between laver *Porphyra yezoensis* mass-production (sum of Oct.~ Apr.) and water temperature (a), salinity (b), dissolved inorganic nitrogen (c), chlorophyll-*a* (d), air temperature (e), wind speed (f), sunshine hours (g), and precipitation (h) at Nakdong River Estuary from 2004 to 2013 laver culturing season. Dotted circle point is excluded in calculation of correlation.

은 하구의 특성상 시공간적인 변화가 크기 때문에 김 생산량과는 상관성이 없는 것으로 나타났다(Fig. 5). 이는 김의 특성상 염분 변화에 잘 적응하는 성질이 있으며, 특히 낙동강 하구의 주 생산종인 방사무늬-김은 다른 종에 비해 고염분에서 잘 자라므로(Jang, 2002) 김 양식에 적합한 해수 비중(1.015-1.025)에 비해 염분이 높고 시공간적 변화가 큰 낙동강하구에서도 생장이 양호한 것으로 생각된다. 한편 김의 생장에 필요한 영양성분인 질소와 생산량 사이에도 큰 상관관계가 없는 것으로 나타났다(Fig. 5). 이는 앞에서 언급한 것과 같이, 낙동강 하구의 경우, 무기질소 농도는 김의 황백화가 유발되는 최소 농도($5 \mu\text{mol L}^{-1}$) 보다 항상 높게 유지되고 있기 때문에 상관관계가 없는 것으로 판단된다. Jang (2002)은 총질소 농도가 $100 \mu\text{g L}^{-1}$ (약 $7 \mu\text{mol L}^{-1}$) 이상에서 양질의 김이 생산된다고 하였으며, 본 연구에서 김의 생육시기에 조사한 용존무기질소의 최소 농도는 $9 \mu\text{mol L}^{-1}$ 로 나타났으며, 평균 농도는 약 $30 \mu\text{mol L}^{-1}$ 이었다. 따라서 낙동강 하구는 풍부한 질소성분으로 인해 양질의 김 생산에 최적의 환경을 유지하였다.

낙동강 하구의 엽록소 *a* 농도와 김 생산량은 비교적 높은 상관성을 보였다($r^2=0.51$, Fig. 5). 김 생장에 적합한 환경조건에서는 일차생산을 하는 식물플랑크톤도 생장이 원활하게 되므로 김 생산량이 높을수록 엽록소 *a* 농도도 높았던 것으로 유추된다. 따라서 엽록소 *a*는 김 생산량에 영향을 미치는 인자는 아

니지만 김 생산량 변동을 간접적으로 알려주는 지시자로 인식할 수 있을 것으로 생각된다. 그러나 이 같은 현상은 낙동강과 같이 영양염이 풍부한 환경에서만 적용 가능한 것으로, 영양염이 부족하여 김 황백화가 빈발하는 서해안(군산, 부안 등)에서는 김과 식물플랑크톤이 영양염에 대해 서로 경쟁적으로 흡수하게 되어, 김 생산량과 엽록소 *a* 사이에 항상 양의 상관성을 가진다고는 할 수 없을 것이다.

그 외의 환경인자 중 풍속, 일조시간, 강우량이 김 생산량과 각각 양의 선형 상관성을 보였다(r^2 는 각각 0.19, 0.21, 0.24, Fig. 5). 따라서 김의 주생육시기인 겨울철에 바람이 강할수록, 일조시간이 길수록, 비가 많이 내릴수록 김 생산량이 비교적 높은 것으로 나타났다. 일반적으로 김은 조류 속도가 20 m s^{-1} 이상에서 잘 자라며, 이는 영양염 및 이산화탄소 공급, 대사노폐물 제거, 미세한 부니 부착 방지, 활발한 대사활동을 위해 필요하다(Jang, 2002). Hong et al. (1987)도 1980년대 중반 광양만의 김 생산이 감소한 원인의 하나로, 주변 공단 조성에 따른 매립 등으로 김 양식장의 유속감소를 꼽았다. 본 연구에서 김 양식장의 조류속도를 직접 측정하지 못하였지만, 풍속과 김 생산량이 양의 상관성을 보이는 것은 강한 바람으로 인해 수층의 혼합이 이루어졌을 것이며, 이는 조류가 하는 역할과 유사하게 작용하였을 것으로 생각된다. 마찬가지로 식물의 광합성에 필수조건인 광량 및 광질 자료를 얻을 수는 없었지만, 기상 관측에서 측정할

Table 3. Correlations of monthly laver *Porphyra yezeensis* production and meteorological parameters at Nakdong River Estuary, Busan from 2013 to 2014

	Nov.	Dec.	Jan.	Feb.	Mar.
Air temp.	-0.405	-0.096	-0.686(*)	-0.218	-0.161
Max air temp.	-0.224	-0.083	-0.709(*)	-0.231	-0.059
Min air temp.	-0.491	-0.149	-0.655(*)	-0.134	-0.215
Sunshine hours	0.288	0.002	0.547	-0.109	0.36
Wind speed	0.031	0.703(*)	0.564	-0.018	0.082
Rain	-0.135	0.079	-0.249	-0.252	0.025
STD of air temp.	0.21	0.405	-0.265	-0.446	-0.753(*)

(*) Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed)

일조시간이 김의 일차생산에 필요한 광량 공급을 간접적으로 대변할 수 있을 것이다. 따라서 월별 일조시간의 합이 클수록 김의 일차생산이 활발하여 김 생산량이 증가한 것으로 생각된다. 실제 일조시간의 최소 기준인 태양광의 직달 일사량 0.12 kW/m^2 은 약 $550 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 광량에 해당하므로, 일반적으로 해조류의 광합성에 필요한 양을 충족시키는 광량이다.

한편 김 생산량과 겨울철 월 평균 강수량이 양의 상관관계를 나타낸 것은, Jang (2002)과 Yoo (2003)가 홍수가 많은 곳은 김의 생장에 좋지 않고 특히 방사무늬 김은 비가 많이 올 때는 잘 자라지 못한다고 설명한 것과 상반된다. 부산지역의 11월에서 2월까지의 월 강수량의 10년 평균은 18-60 mm의 범위로 Jang (2002)과 Yoo (2003)가 언급한 많은 비 또는 홍수로 김 성장을 방해할 정도는 아니었으며, 특히 상대적으로 담수유입이 부족한 겨울철에 강우를 통해 질소원이 공급됨에 따라 김의 생장이 원활했던 것으로 생각된다.

낙동강 하구의 김 생산량 변동에 기온을 비롯한 기상인자의 영향이 크게 작용하는 것으로 파악되었으며, 이를 보다 정밀하게 파악하기 위하여 월별 생산량을 기준으로 상관성(Pearson correlation)을 살펴보았다(Table 3).

낙동강 하구의 11월 김 생산량은 기상 인자 중 최저 기온과 가장 높은 상관성을 나타내었다. 보통 11월은 단련기간을 거친 유엽이 성장하는 시기로, 수온이 15°C 이하로 신속하게 하강하는 것이 중요하므로, 평균기온과 최고기온 보다는 수온이 15°C 이하로 떨어지는 빈도가 중요하므로 이를 좌우하는 최저기온이 낮을수록 생산량이 높게 나타났다. 12월은 연 중 생산량이 가장 많은 달로 평균풍속에 대해서만 $r=0.7$ 로 유의한 상관성(95% 신뢰수준)을 보인 반면, 1월 김 생산량은 기온인자(평균기온, 최고기온, 최저기온)와 95% 신뢰수준에서 유의한 상관성을 보였으며, 일조시간과 풍속과도 $r=0.5$ 이상의 상관성을 보여 12월에

비해 여러 기상인자와 고르게 상관성을 보였다. 1월에는 김 생장에 가장 중요한 요소인 기온과 수온이 연 중 가장 낮지만, 부산의 겨울철 수온은 김 생장에 적합한 $5-8^\circ\text{C}$ 보다 높기 때문에, 1월 평균 기온과 수온이 낮을수록 생산량이 증가하는 경향이 있었다. 더불어 광합성을 하기 위한 광량의 간접인자라 할 수 있는 일조시간과, 수층 혼합을 원활하게 하는 간접인자인 풍속과 각각 양의 상관성을 나타낸 것은 당연한 결과로 생각된다. 한편, 12월의 경우 1월과 달리, 기온과는 거의 상관성을 보이지 않은 반면, 풍속과 유일하게 유의한 상관성을 보이는 데에는 다음과 같은 이유가 있을 것으로 추론된다. 첫째, 12월의 경우 연 중 기온 변화의 편차가 가장 큰 달로 낮게는 영하부터 높게는 10°C 이상으로 크게 변동하였다. 따라서 월 평균 기온보다는 예를 들어 평균기온이 5°C 이하로 하강한 일 수 등이 더 유용한 인자가 될 것으로 생각된다. 둘째, 12월은 바람의 방향이 남풍에서 북서계절풍으로 전환되는 달로, 우리나라 대기권에 차가운 공기층을 형성하는 북서계절풍이 강할수록 기온이나 수온이 하강하게 된다. 따라서 12월의 바람은 수층 혼합 작용과 동시에 수온 하강의 2가지 역할을 하였을 것으로 생각된다. 추후 12월 풍향과 김 생산량 변화에 대한 정밀한 분석이 필요할 것으로 생각된다.

2월과 3월의 김 생산량은 평균기온의 편차와 음의 상관성을 보였으며, 특히 3월은 95% 신뢰수준에서 유의한 상관성을 보였다. 2월은 보통 냉동시킨 김 발을 설치하여 두 번째 양식을 시작하는 시기로, 첫 번째 양식의 마지막 채취, 두 번째 양식의 단련 등으로 생산량이 고르지 못한 점이 있다. 따라서 2월의 기온이나 수온이 3월보다 낮은 데도 불구하고 생산량은 오히려 낮거나 비슷한 경향을 보인다. 따라서 2월 생산량은 환경인자의 영향보다는 양식 주기 측면에서 생산량 자체가 고르지 못한 달이라고 할 수 있다. 3월의 김 생산량은 평균기온의 편차와 유의한 음의 상관성을 보였는데, 이는 기온편차가 높을수록 생산량이 감소하는 것을 의미한다. 3월은 겨울에서 봄으로 넘어가는 시기로 12월과 마찬가지로 기온이 영하부터 높게는 15°C 까지 변동하며, 꽃샘 추위와 같은 현상으로 일기가 매우 불안정한 시기이다. 이 같은 기온 변동이 김이 안정적으로 성장하는데 저해요인으로 작용한 것으로 나타났다. 한편 2월과 3월의 경우 평균풍속과 거의 상관성이 없는 것으로 나타난 것은 월 평균풍속이 다른 달에 비해 높아 김의 생장에 적합한 수층 혼합이 형성되었던 것으로 추정된다. 한편, 2013년 2월 1일에는 순간풍속 20 m s^{-1} 이상의 강풍(남풍계열)으로 낙동강 양식면적의 약 80%가 파손된 사례가 발생하였다(연합뉴스 2013년 2월 5일자). 이로 인해 약 50억 원의 피해가 발생하였으며, 생산량도 2월 중 최저생산량(약 500톤)으로 평년에 비해 약 1/5 수준이었다. 이 같은 강풍 피해는 1990년 전라남도 웅진군에서 발생한 이후, 최근 들어 2009년과 2012년에 해남과 군산해역에서도 발생한 것으로 보고되었다. 이처럼 2월과 3월은 오히려 강풍으로 인한 양식 피해 발생에 대한 대비를 해야 할 것으로 생각된다.

결론적으로, 낙동강 하구에서 생산되는 김의 연간 변화는 기

온과 수온이 낮을수록, 바람이 비교적 강할수록 생산량이 높은 것으로 나타났으며, 염분과 질소성분은 크게 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 그러나 김의 월별 생산량변화는 양식 주기 별로 김의 생육에 주요한 기상 인자가 달랐으며, 이들 요인들의 작은 변화는 김 생산량에 민감하게 작용하는 것으로 나타났다. 여러 연구자들에 의하면 한반도 주변해역의 온난화는 산업혁명 이후 약 1℃ 정도 상승한 것으로 나타났으며(Jung, 2008; Yeh et al., 2010; Kim et al., 2011), 특히 Kim et al.(2011)은 겨울철 남해의 수온증가는 1.5℃ 정도로 전지구 평균 수온 증가(약 0.6℃)보다 약 3배 빨리 진행되고 있다고 하였다. NFRDI (2012)은 2100년 한반도 주변 해역은 평균 4.02℃ 상승하는 것으로 보고하였으며, KMA (2011)는 2100년 부산시 평균기온(현재 14.8℃)이 지금보다 4.8℃ 상승할 것으로 전망하였다. 이 같은 전지구 기후변화에 따른 수온 상승은 낙동강 하구 김 생산량에 직접적인 영향을 미칠 것으로 예상된다. 따라서 미래 해양환경 변화에 대비하고 김 생산 적지를 평가하기 위해, 전국 김 양식해역에 대한 고해상도 해양환경 모니터링이 필요할 것으로 생각된다.

사 사

이 연구는 국립수산물과학원(RP-2013-ME-098)의 지원으로 수행되었습니다. 낙동강 하구 김 양식장 조사에 도움을 주신 오성태님께 감사드립니다. 그리고 이 논문을 검토하시고 조언을 해주신 심사위원들께도 감사드립니다.

References

Bae S-H. 1991. The origin and development process of laver culture industry in Korea I. Laver culture history till the end of Chosun dynasty. Bull Korean Fish Soc 24, 153-166.

Cho HY, Cho BJ and Kim YH. 2007. Estimation error analysis on the COD loads due to the sampling intervals. Journal of Korean Society of Coastal and ocean Engineers 19, 266-273.

Choe S and Chung TW. 1972. Nutrients and suspended organic particulates in the Estuary of Nak-Dong River. The Journal of the Oceanological Society of Korea 7. 1-14.

Hong J-S, Song CB, Kim N-G, Kim JM and Huh HT. 1987. Oceanographic conditions in relation to laver production in Kwangyang Bay, Korea. Bull Korean Fish Soc 20, 237-247.

Hwang MS, Chung IK and Oh YS. 1997. Temperature responses of *Porphyra tenera* Kjellman and *P. yezoensis* Ueda (Bangiales, Rhodophyta) from Korea from Korea. Algae 12, 207-213.

Hwang MS and Lee IK. 2002. Character analysis and numerical taxonomy of *Porphyra* (Bangiales, Rhodophyta) from Korea. Algae 17, 217-233.

Hwang MS and Lee IK. 1994. Two species of *Porphyra* (Ban-

giales, Rhodophyta), *P. koreana* sp. Nov. and *P. lacerate* Miura from Korea. The Korean Journal of Phycology 9, 169-177.

Jang GN. 2002. Aquaculture of Seaweeds (macro algae) and Crustacean. Sam-Gwang Press, Seoul. p. 153-190.

Jang S-T and Kim K-C. 2006. Changes of oceanographic environment in the Nakdong Estuary. 『The Sea』 Journal of the Korean Society of Oceanography 11, 11-20.

Jung S. 2008. Spatial variability in long-term changes of climate and oceanographic conditions in Korea. Journal of Environmental Biology 29, 519-529.

Kang JW. 1972. Diseases of the cultivated porphyra at culture beds with special reference to the effects of fertilizer plant effluents. Bull Korean Fish Soc 5, 39-44.

Kim BO, Lee SR and Khim BK. 2011. Temporal change of grain size of the beach sediments in the Sinjado, Nakdong River Estuary. Journal of Korean Society of Coastal and ocean Engineers 23, 304-312.

Kim SJ, Woo SH, Kim BM and Hur SD. 2011. Trends in Sea Surface Temperature (SST) change near the Korean Peninsula for the past 130 years. Ocean and Polar Research, 33, 281-290.

KMA. 2011. How to use regional climate change information? 11-1360000-000812-01, 76-81.

MLTM. 2010. Analytical standard methods for marine environmental parameters. 50-100.

Moon C-H and Choi H-J. 1991. Studies on the environmental characteristics and phytoplankton community in the Nakdong River estuary. The Journal of the Oceanological Society of Korea 26, 144-154.

NFRDI. 2012. Countermeasure and research about impact on climate change of fisheries . 10-51.

NFRDI. 2013. One hundreds species of fisheries I. 218-230.

Ock YS. 2010. Some schemes for the sustainable development of Korean laver industry. The Journal of Fisheries Business Administration 41, 25-44.

Parsons TR, Maita Y and Lalli CM. 1984. A manual of chemical and biological methods for seawater analysis. Pergamon Press. 173.

Yeh SW, Park YG, Min HS, Kim CH and Lee JH. 2010. Analysis of characteristics in the sea surface temperature variability in the East/Japan Sea. Progress in Oceanography, 85, 213-223.

Yoo SG. 2003. Introduction to aquaculture. Gu-Deok Press, Busan, Korea, 309-331.

Yoon HS, Park S, Lee IC and Kim HT. 2008. Spatiotemporal variations of seawater quality due to the inflow of discharge from Nakdong River Barrage. Journal of the Korean Society for Marine Environmental Engineering 11, 78-85.