

방사무늬김 황백화 발생에 해양환경이 미치는 영향

이상용, 김영희, 이지은, 유현일*

국립수산과학원 해조류연구센터

Effect of marine environmental characteristics on a discoloration outbreak of *Pyropia yezoensis*

Sang Yong Lee, Young Hee Kim, Jee Eun Lee and Hyun Il Yoo*

Seaweed Research Center, National Institute of Fisheries Science, Haenam 59002, Republic of Korea

*Corresponding author

Hyun Il Yoo

Tel. 061-530-3906

E-mail. hiyoo@korea.kr

Received: 10 October 2019

Revised: 8 November 2019

Revision accepted: 11 November 2019

Abstract: To elucidate the cause of *Pyropia yezoensis* discoloration, the characteristics of an aquaculture environment, as well as the morphology and cell structure of *P. yezoensis* thallus were examined from 2011 to 2014 in aquaculture farms of the Jeonbuk province. *P. yezoensis* discoloration did not occur in aquaculture farms at Gaeyado located in the Geum River Estuary but occurred in aquaculture farms of Seonyudo, Munyeodo, Biando, and Docheongri near the Saemangeum embankment in November 2011 and April and November 2014. The injured leaves showed discoloration and intracellular vacuole hypertrophy. During the study period, discoloration occurred at concentrations of dissolved inorganic nitrogen (DIN) and dissolved inorganic phosphorus (DIP) below 5 μ M and 0.4 μ M, respectively. As a result, *Pyropia discoloration* was determined by low concentrations of DIN and DIP. DIN deficiency affects the early stage and low DIP concentration affects the end stage of aquaculture.

Keywords: discoloration, *Pyropia yezoensis*, environmental, characteristics, aquaculture

서 론

김은 우리나라에서 1600년대 중반부터 양식되어 가장 오래된 양식품종 중 하나로서 (Sohn 1998), 우리나라 서해안 전 연안에서부터 남해안의 낙동강 하구까지 폭넓은 지역에서 양식이 이루어지고 있다 (Kang and Koh 1977). 김 생산량은 2010년에 23.5만톤에서 2018년에는 56.7만톤까지 약 2.4배 증가하였으며, 김 수출액은 2010년에 1억달러 이상에서 2018년에는 약 5.3억달러로 5배 이상 증가하였다 (MOF 2019).

김 양식 생산량은 양식기술 개선과 신품종 개발로 2010년 이후 지속적으로 증가하였으나, 생산량 증가와 함께 대량생산으로 인한 질병 발생과 품질저하, 대량생산을 위한 시비제 오·남용 등의 문제가 지속적으로 발생하고 있다. 특히, 김의 생산량과 품질저하를 동시에 유발하는 꺾병은 병원체의 감염에 의해 발생하는 기생성 꺾병과 양식장 환경에 따라 발생하는 생리적 꺾병으로 구분된다 (Kim et al. 2018). 기생성 꺾병은 김 엽체에 대한 활성처리제 사용과 김 망 관리 등을 통해 발생초기 관리가 가능하지만, 김 양식장 전체에서 발생하는 생리적 꺾병인 황백화는 원인파

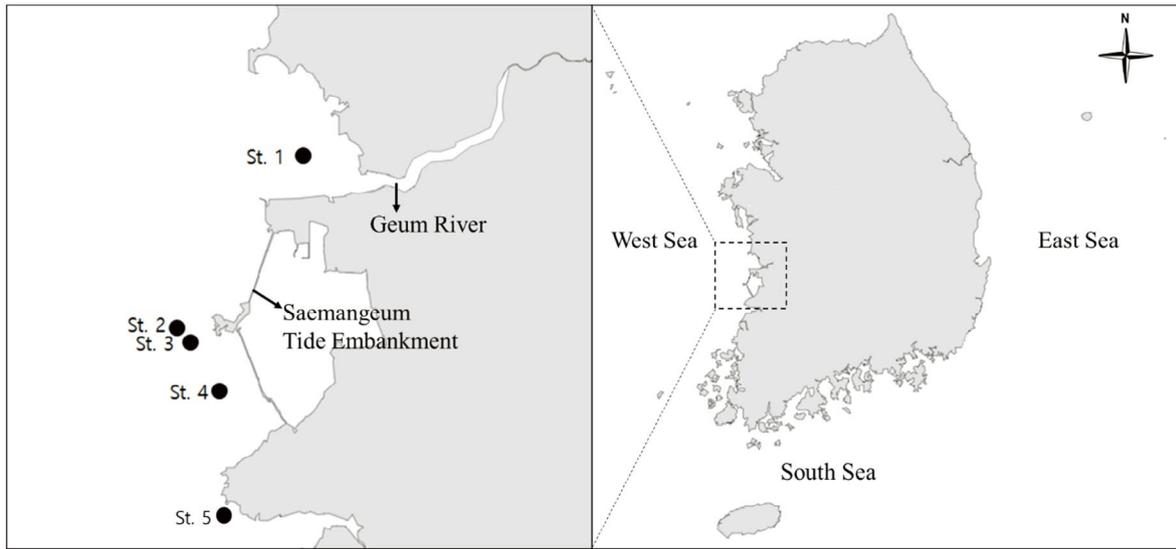


Fig. 1. Map of the study area showing the location of the sampling sites (St. 1, Gaeyado; St. 2, Seonyudo; St. 3, Munyeodo; St. 4, Biando; St. 5, Docheongri).

악과 대처가 어려운 실정이다.

일본의 경우, 2000년대 초반 Ariake Bay와 Seto Inland Sea 등의 김 양식장에서 황백화가 발생하여 생산량이 평년의 40% 수준까지 감소한 것으로 알려졌다(Kawaguchi *et al.* 2002; Matsuoka *et al.* 2005; Ishii *et al.* 2008; Kawamura 2012). 일본에서 발생한 황백화의 원인은 동계 대형 규조류 대발생과 하천수 유입 감소에 따른 영양염 부족과 고염분 저영양 수괴의 이동 등으로 판단하였다(Ishii *et al.* 2008; Hori *et al.* 2008; Tanda and Harada 2012; Kawamura 2012; Hata and Abe 2013). 황백화가 발생하는 용존무기영양염의 농도 기준은 양식방법과 양식장 주변환경에 따라 다른 것으로 알려져 있다. 일반적으로 해수 중 용존무기질소(DIN)의 농도가 3~7 μM 로 지속되거나, 용존무기인(DIP)의 농도가 0.2 μM 이하일 때 황백화가 발생하는 것으로 보고되었다(Matsuoka *et al.* 2005; Ishii *et al.* 2008; Tanda and Harada 2012).

우리나라에서 김 황백화는 2010년 서해안 김 양식장에서 처음으로 피해가 보고된 이후 충청남도과 전라북도에서는 지속적으로 발생하고 있으며, 전라북도에서는 평년의 경우 전국 생산량의 10% 내외의 생산량을 보였으나, 2014년에는 황백화 발생으로 인해 국내 생산량의 5.2%까지 감소하였다(KMI 2018). 지금까지 서해안에서 발생한 김 황백화는 해양환경자료의 부족과 양식초기 어린 엽체의 탈락으로 발생 원인을 밝히는 데 어려움이 있었다.

본 연구는 전라북도 김 양식장의 수온, 강수량, 영양염 농도와 방사무늬김의 세포형태를 분석하여 황백화 발생 원인과 황백화 김 엽체의 특징을 파악하고자 하였다.

재료 및 방법

1. 조사지역 및 김 시료 분석

황백화 피해 김 엽체의 특징을 파악하기 위해 2011년 9월부터 2015년 4월까지 전라북도 군산시의 4개 섬(비안도, 무녀도, 선유도, 개야도)과 부안군 도청리에 위치한 김 양식장에서 양식기간 동안 매월 김 엽체를 채집하였다(Fig. 1). 개야도는 금강 수괴의 영향을 받는 하구역에 위치하며, 비안도, 무녀도, 선유도와 도청리는 새만금방조제에서 방류되는 담수의 영향을 받는 해역에 위치한다(Fig. 1).

채집 당시 김 망의 상태는 현장에서 디지털카메라로 촬영하였으며, 채집된 김은 실험실로 운반하여 엽체 상태를 관찰하기 위해 대지 위에 펼쳐 엽체 전체의 사진촬영을 실시하고 일부를 잘라 현미경(BX51; Olympus, Japan)을 이용하여 세포구조 관찰 및 영상자료(DP73; Olympus, Japan)를 확보하였다.

황백화 김 엽체의 색택을 확인하기 위해 2014년 황백화가 발생한 부안군 도청리에서 채집된 엽체를 대지 위에 펼쳐 상, 중, 하부로 구분한 후 색차계(CR-300 Colorimeter;

Konica Minolta, Japan)로 색도 분석을 실시하였다($n=10$). 김 엽체의 색도는 CIE system에 따라 명도지수(Lightness; L), 적색지수(Redness; a), 황색지수(Yellowness; b)로 수치화하였다. 또한 수치화된 각 지수는 Munsell Color Chart (ASM Standard D 1535-96, 1980)에 위치하여 표현하였다. 황백화 피해 유무와 황백화 발생시기에 따른 색차계 지수의 차이에 대한 통계분석은 일차분산분석(one-way ANOVA)을 이용하여 유의차를 검정하였으며, 유의차가 확인되면 Tukey's test로 사후검정($p<0.05$)을 실시하였다. 자료의 통계처리는 SPSS Window Program (Release 10.0, SPSS Inc.)을 사용하여 실시하였다.

2. 김 양식장 환경분석

전라북도 김 양식장의 기온과 수온은 군산지역에 대한 국립해양조사원의 실시간 해양관측 정보시스템(KHOA 2019) 국립수산물과학원 연안정지관측(NIFS 2019)의 자료를 분석하였다. 강수량은 군산지역에 대한 기상청 관측자료(KMA 2019)를 분석하였으며, 일일 강수량을 합산하여 월 누적강수량으로 표시하였다. 또한 황백화 발생에 있어 담수유입의 영향을 파악하기 위해 2010년부터 2014년까지의 금강하구둑의 방류량 자료를 확보하여 월별 누적, 연간누적 방류량으로 도표화하였다.

김 양식장의 영양염 농도는 용존무기질소(DIN: $\text{NH}_4^+ + \text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-$)와 용존무기인(DIP: PO_4^{3-})에 대해 Parsons *et al.* (1984) 방법에 따라 자동분석기(QuAAtro system with 4 channel; BranLuebbe, Germany)를 이용하여 분석하였다. 해수시료는 매월 2회 주기로 김 양식장의 표층에서 약 1L씩 3회 채수하였다. 시간적인 영양염 성분의 변동은 용존무기질소와 용존무기인의 비(DIN/DIP)를 분석하였다.

결 과

1. 김 황백화 발생현황

2011년 9월부터 2015년 4월까지 전라북도 김 양식장의 황백화 발생여부를 조사한 결과 황백화는 2012년산 김 양식 초기인 2011년 11월과 2013년산 양식 중기인 2014년 3월에서 4월까지, 그리고 2015년산의 양식 초기인 2014년 11월 초에 발생하였다(Fig. 2). 시기별로 보면, 2011년 11월

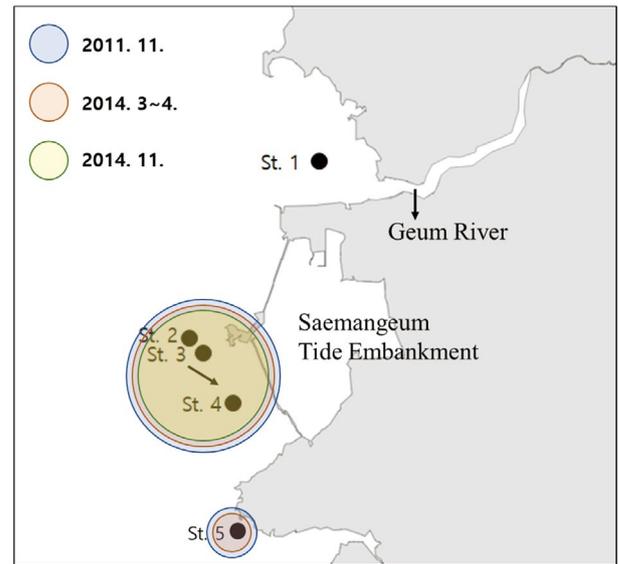


Fig. 2. Map showing the area of discoloration damage of *Pyropia yezoensis* in Jeollabuk-do aquaculture farm by year (St. 1, Gaeyado; St. 2, Seonyudo; St. 3, Munyeodo; St. 4, Biando; St. 5, Docheongri).

에는 5개 조사 정점 중 도청리, 비안도, 무녀도와 선유도 김 양식장에서 황백화가 발생하였으며, 개야도에서는 엽체의 탈색이 나타나지 않았다. 2014년 3월 말부터 4월 초의 경우에도 개야도를 제외한 4개 양식장에서 황백화가 발생하였으며, 2014년 11월에는 비안도, 무녀도와 선유도에서 황백화가 발생하여 연구기간 중 전북지역 5개 조사지역 중 3개 지역의 김 양식장에서 3회의 황백화가 발생하였으나 개야도 김 양식장에서는 조사기간 동안 황백화가 발생하지 않아 지역별로 황백화 발생의 차이를 보였다(Fig. 2).

2. 김 황백화 엽체의 특징

연구기간 중 황백화 피해 엽체의 상태를 관찰한 결과, 2011년 11월에는 김이 검붉은색에서 황갈색으로 퇴색되었으며, 김 망에서 쉽게 탈락되었다(Fig. 3). 또한 황백화 피해 김의 세포구조를 관찰한 결과 도청리, 비안도와 무녀도의 김 엽체에서 액포 비대가 관찰되었다. 반면 선유도의 황백화 피해 김은 엽체의 탈색은 확인되었으나 액포 비대는 확인되지 않았다. 황백화 피해가 진행된 11월 중순에는 4개 지역 모두에서 김의 액포 비대가 확인되었다(Fig. 4).

2013년산 양식 말기인 2014년 3~4월에 발생한 황백화 피해 김의 특징은 황백화 발생 초기인 3월에는 엽체의 색이 검붉은색에서 황갈색으로 퇴색되었으며, 황백화가 진

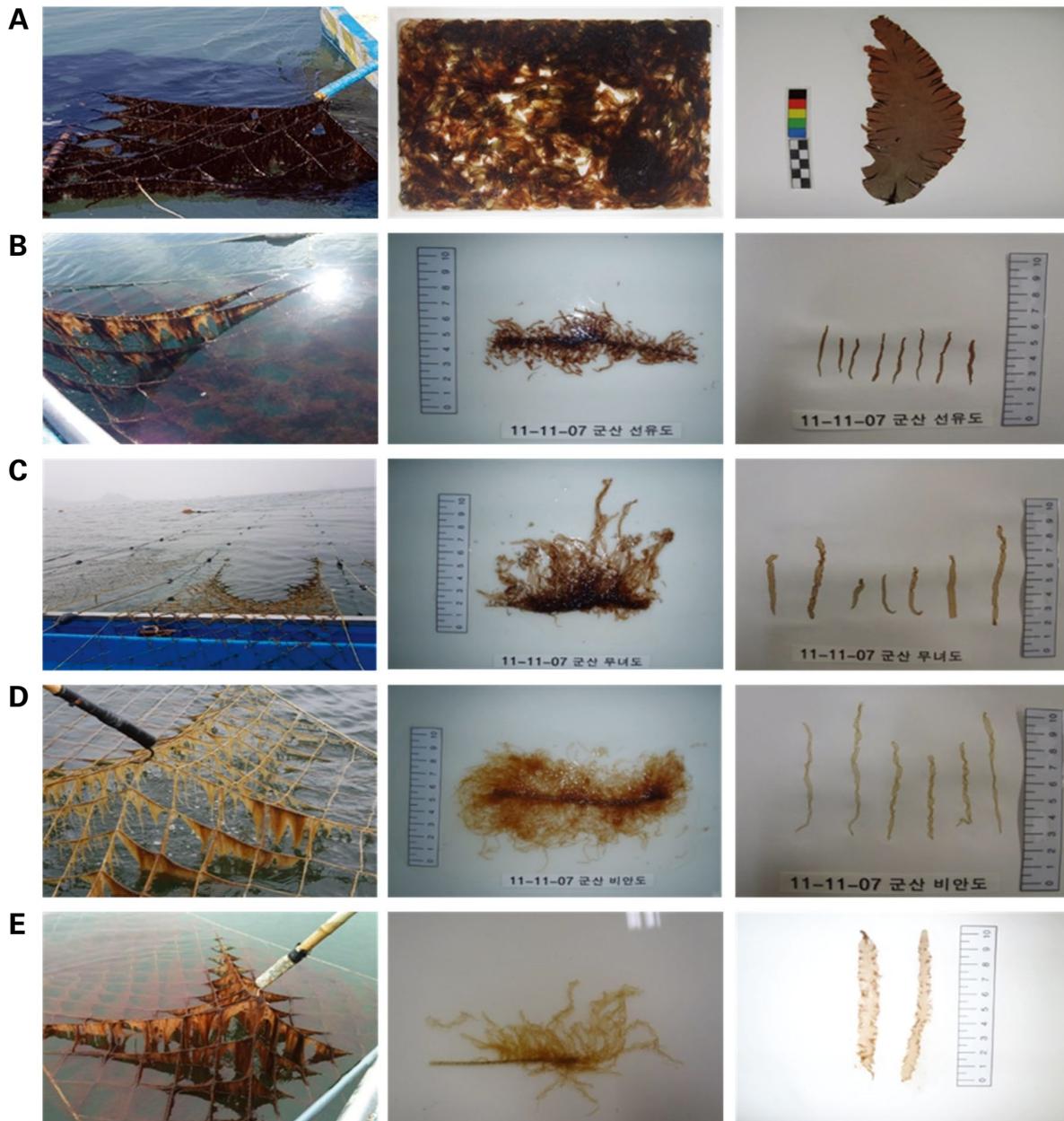


Fig. 3. Discoloration images of the culture net and thallus of *Pyropia yezoensis* in Jeollabuk-do aquaculture farm in early November 2011 (A, Gaeyado; B, Seonyudo; C, Munyeodo; D, Biando; E, Docheongri).

행되고 양식이 종료되는 4월에는 황녹색 또는 녹색으로 퇴색되어 황백화 진행 또는 엽체의 노후화에 따른 차이를 보였다. 또한 3월과 4월 황백화 피해 김 모두에서 액포 비대가 고르게 확인되었다(Fig. 4).

2015년산 양식 초기인 2014년 11월에 발생한 황백화 피해 엽체는 2011년 11월 및 2014년 3월과 마찬가지로 엽체의 색이 검붉은색에서 황갈색으로 퇴색되었으며, 퇴색된

엽체에서 액포 비대가 확인되었다. 개야도에서는 2014년 11월에도 황백화 피해가 발생하지 않았다(Fig. 4).

3. 김 황백화 엽체의 색도 분석

2014년 도청리 지역 황백화 피해 김의 색도 분석결과, 색차계로 측정된 황백화 방사무늬김의 적색지수(a)와 황

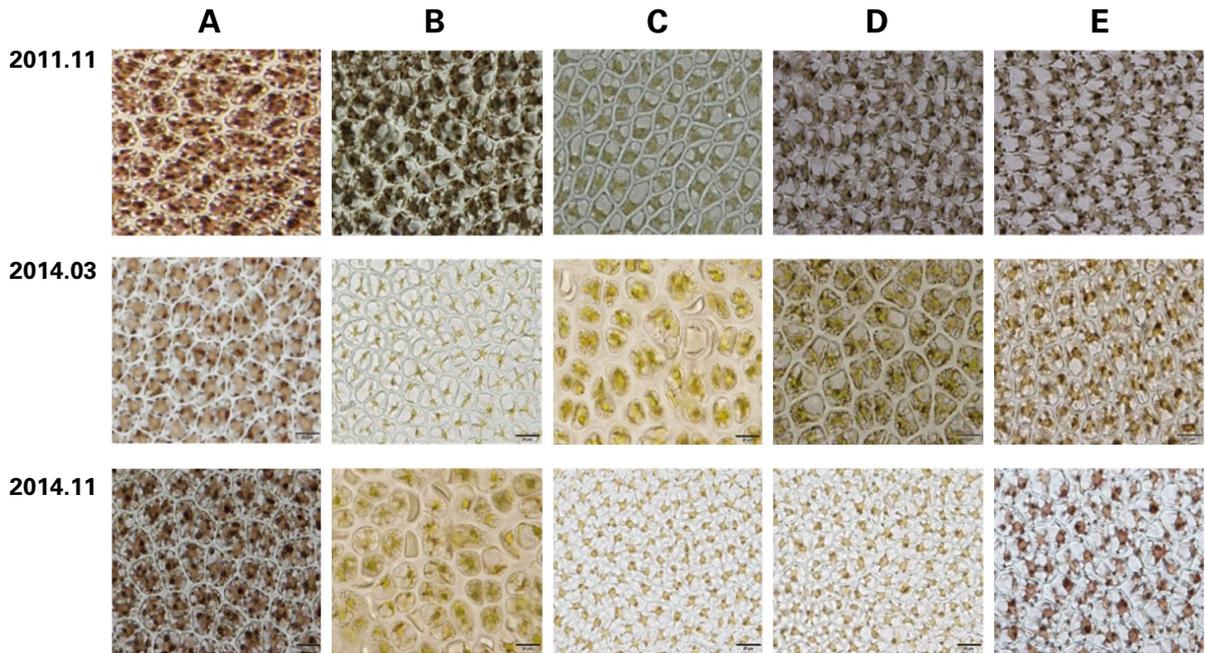
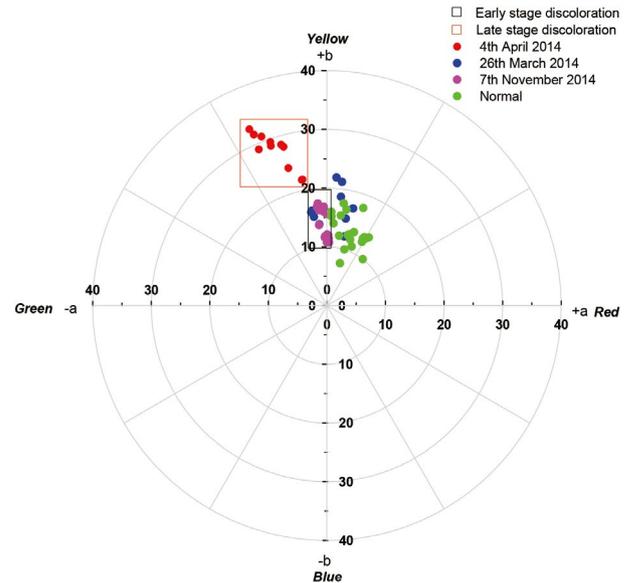


Fig. 4. Cell structure of discolored *Pyropia yezoensis* in Jeollabuk-do aquaculture farm in November 2011, April 2014, and November 2014 (A, Gaeyado; B, Seonyudo; C, Munyeodo; D, Biando; E, Docheongri).

색지수(b)는 정상 김 엽체와 차이를 보였다(Fig. 5). 2014년 4월 초(양식말기)에 황백화가 발생한 김 엽체의 적색지수(a)는 -4.1에서부터 -13.2까지의 범위에었으며, 황색지수(b)는 21.3에서부터 29.9까지의 범위로 나타났다. 2014년 11월 초(양식 초기)에 황백화가 발생한 김 엽체의 적색지수(a)는 -1.6에서부터 0.4까지의 범위에었으며, 황색지수(b)는 10.7에서부터 17.3까지의 범위로 나타났다. 김 엽체에 대한 색차계 a값과 b값은 황백화 발생시기에 따라 유의한 차이($p < 0.01$)를 보였으며, 2014년 3월 말과 11월 초 그룹은 2014년 4월 초 그룹과 구분되었다. 색차계의 명도(L)값은 황백화 발생시기에 따라 유의한 차이($p < 0.01$)를 보였으며, 2014년 3월 말 그룹은 2014년 4월 초와 11월 초 그룹과 구분되었다(Fig. 5).

4. 김 양식장 해황 특성

전라북도 지역의 5개 양식장의 김 양식기간 중의 수온과 기온은 10월부터 1월 중순까지 하강하였으며, 1월 말부터 4월까지 상승하는 경향을 보였다(Fig. 6). 양식 초기 황백화가 발생한 2011년과 2014년 11월의 수온은 각각 16.5°C에서 10.6°C로, 17.6°C에서 12.4°C로 하강하였다(Fig. 6A). 황백화가 발생한 기간에는 수온이 지속적으로



	Yellow index	Red index
Normal blade ^a	6.9-17.9	0.4-8.7
2014.3 ^b	11.7-22.5	-3.5-4.9
2014.4 ^c	21.3-29.9	-13.2--4.1
2014.11 ^d	10.7-17.3	-1.6-0.4

Fig. 5. Location of redness (a) and yellowness (b) values of *Pyropia yezoensis* on the chromaticity diagram in Docheong-ri aquaculture farm. Early stage discoloration; November-December, Late stage discoloration; late March-early April.

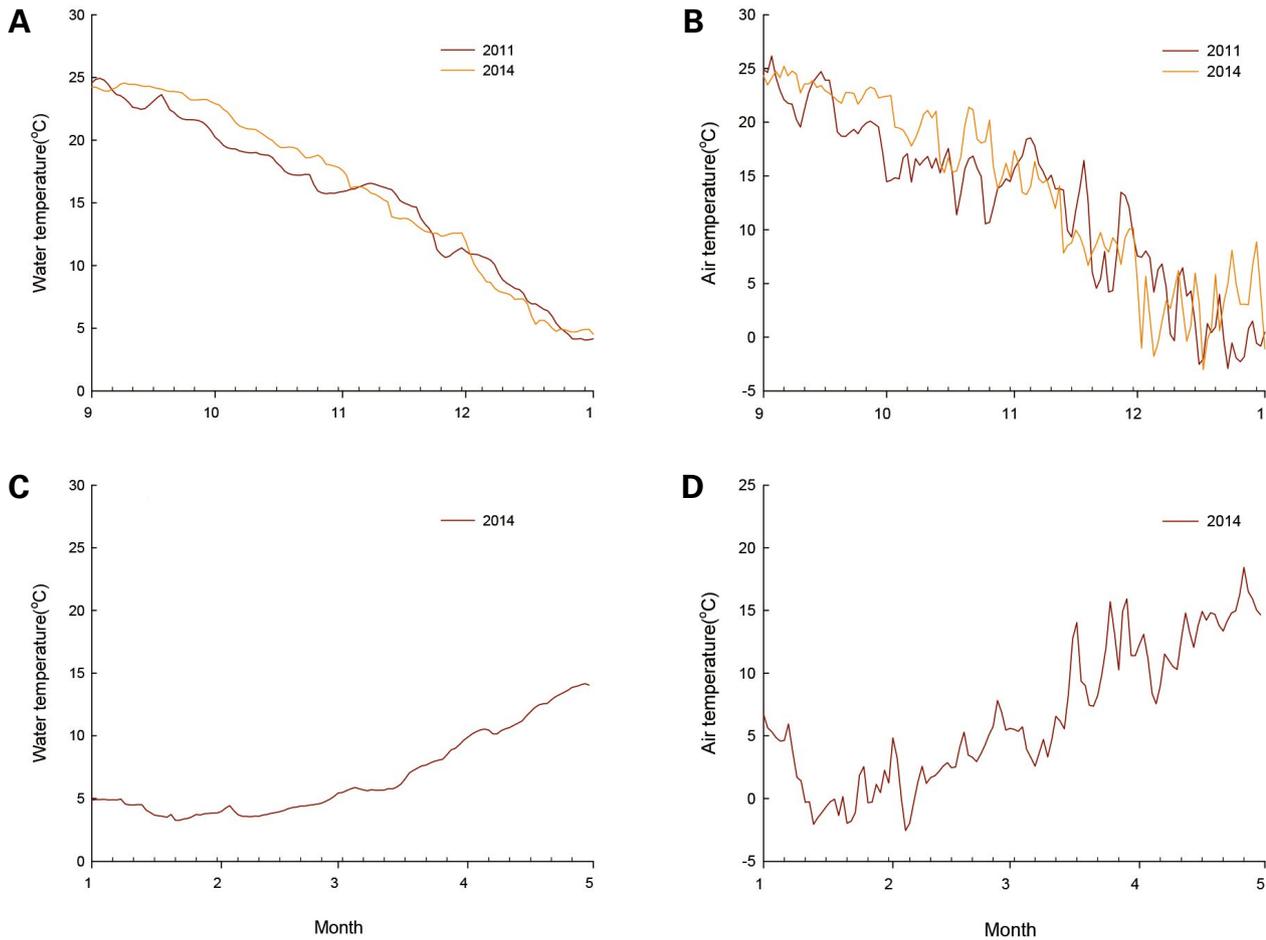


Fig. 6. Temporal changes in water and air temperature in Gunsan *Pyropia* aquaculture farm during the harvesting period of 2011 and 2014. A and B; early aquaculture period, C and D; late aquaculture period.

Table 1. The monthly precipitation in Kunsan and the discharge flow of Geum river from 2010 to 2014

Precipitation	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Sum (mm)
2010	370	92.5	63.8	68.4	132.8	18.9	375.6	362.3	144.9	8.8	10.4	32.1	13475
2011	8.9	63.5	12.0	73.3	85.1	253.2	644.5	292.4	86.9	15.5	83.7	15.2	1634.2
2012	25.3	8.5	43.3	91.2	23.7	83.2	305.2	710.1	198.5	54.2	52.7	63.6	1659.5
2013	29.2	63.3	62.1	94.1	157.5	38.4	293.0	108.2	114.2	10.6	95.4	26.6	1092.6
2014	6.9	9.1	89.9	97.7	58.2	82.4	113.2	293.2	128.2	128.7	69.0	64.5	1141.0
Discharge flow	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Sum (mil. tonnes)
2010	113	192	304	294	343	213	388	1,303	1,201	196	122	118	4,788
2011	136	147	142	122	489	1,013	2,584	2,347	516	262	244	298	8,302
2012	214	199	246	452	115	209	1,018	1,912	2,190	391	362	452	7,760
2013	433	526	295	336	387	598	847	641	496	230	234	164	5,187
2014	154	144	139	149	161	275	250	626	414	474	350	357	3,492

하강하지 않고 15°C 이상의 수온이 2주간 지속되었다. 반면 양식 말기 황백화가 발생한 2014년 3월 말부터 4월까지의 수온은 8.0°C에서 14.2°C까지 상승하였다(Fig. 6C).

황백화 발생에 강수량이 미치는 영향을 파악하기 위해 황백화 피해가 발생하지 않았던 2010년 1월부터 2014년 12월까지 월별강수량 자료를 비교하였다. 2010년부터

2014년까지 연간 누적강수량은 1,092.6~1,634.2 mm 범위였으며, 황백화가 발생하지 않은 2013년에 가장 낮았고 2012년에 가장 많은 강수량을 나타냈다(Table 1). 반면 11월 황백화가 발생한 2011년도에는 1,634.2 mm로 두번째로 높은 누적강수량을 보였으며, 3월과 11월에 황백화가 발생한 2014년도에는 조사기간 중 두번째로 낮은(1,141.0 mm) 강수량을 나타냈다(Table 1). 또한 육상유래 담수 유입의 영향을 파악하기 위해 금강하굿둑의 방류량 자료를 확인한 결과 2010년부터 2014년까지 연누적 35~83억톤 범위의 방류량을 보였으며, 2014년에 최소였고 2011년에 최대 방류량을 나타냈다(Table 1).

김 양식기간 동안 용존무기질소(DIN)의 농도는 지역과 시간에 따라 유의한 차이($p < 0.01$)를 보였다(Fig. 7). DIN 농도는 양식 초기와 양식 말기에 낮은 값을 보였으며, 개야도 김 양식장의 DIN 농도가 다른 김 양식장보다 유의하게 높았다($p < 0.01$). 2011년 10월 초부터 11월 중순까지 비안도, 무녀도, 선유도와 도청리 김 양식장의 DIN 농도는 $5 \mu\text{M}$ 이하로 나타났다(Fig. 7A). 개야도 김 양식장의 DIN 농도는 10월 초 $5 \mu\text{M}$ 이하였으나, 10월 중순부터 $10 \mu\text{M}$ 이상 값을 보였다. 2014년 3월 초부터 4월 중순까지 비안도와 무녀도 김 양식장의 DIN 농도는 $5 \mu\text{M}$ 이하의 값을 보였으며, 개야도와 도청리 김 양식장의 DIN 농도는 $5 \mu\text{M}$ 이상이였다(Fig. 7B). 2014년 11월 초 무녀도, 선유도, 비안도와 도청리 김 양식장의 DIN 농도는 $5 \mu\text{M}$ 이하로 나타났으며, 개야도 김 양식장의 DIN 농도는 $10 \mu\text{M}$ 이상의 값을 보였다(Fig. 7C).

김 양식기간 동안 용존무기질소(DIP)의 농도는 시간에 따라 유의한 차이($p < 0.01$)를 보였으며, 양식 초기와 양식 말기에 낮았다(Fig. 8). 2011년 10월 초부터 11월 중순까지 비안도, 무녀도, 선유도와 도청리 김 양식장의 DIP 농도는 $0.4 \mu\text{M}$ 이하였으며, 개야도 김 양식장의 DIP 농도는 $0.4 \mu\text{M}$ 이상의 값을 보였다(Fig. 8A). 2014년 3월 초부터 4월 중순까지 비안도, 무녀도, 선유도와 개야도 김 양식장의 DIP 농도는 $0.4 \mu\text{M}$ 이하였으며, 도청리 김 양식장의 DIP 농도는 3월 중순에만 $0.4 \mu\text{M}$ 이상의 값을 보였다(Fig. 8B). 2014년 11월 초부터 11월 말까지 비안도와 무녀도 김 양식장의 DIP 농도는 $0.4 \mu\text{M}$ 이하였으며, 개야도 김 양식장의 DIP 농도는 $0.4 \mu\text{M}$ 이상의 값을 보였다(Fig. 8C).

2011년 9월부터 12월까지 비안도, 무녀도, 선유도와 도청리 김 양식장의 DIN:DIP 비는 26:1 이하였으며, 개야

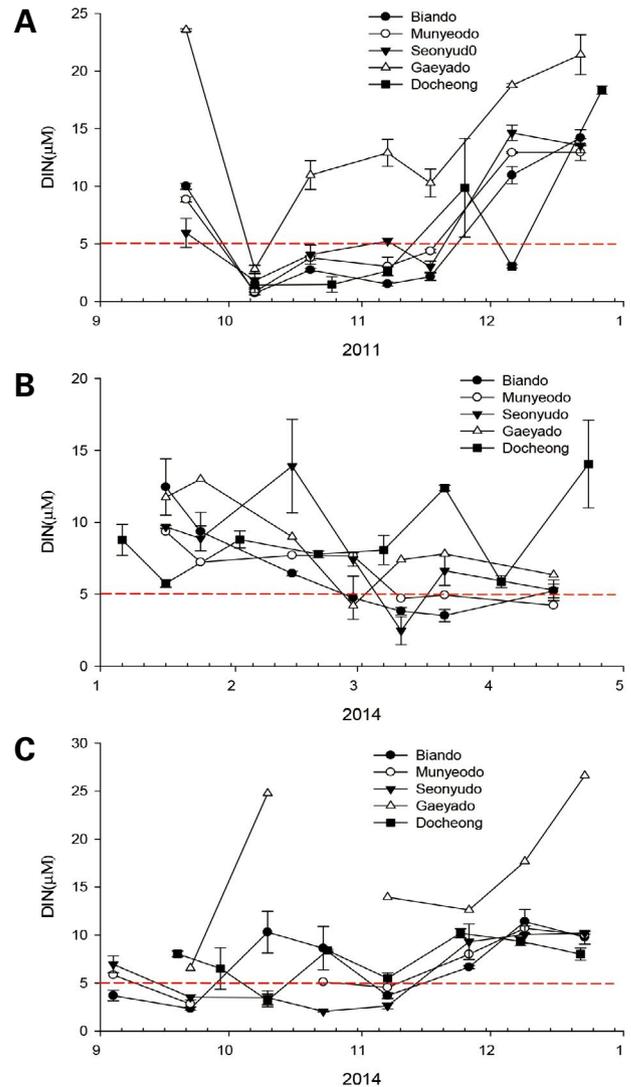


Fig. 7. Comparisons of temporal changes in dissolved inorganic nitrogen (DIN) concentrations in Jeollabuk-do aquaculture farm during the harvesting periods of 2011 and 2014. A and C, early aquaculture period; B, late aquaculture period. The red dotted line indicates the critical concentration in the discoloration outbreak of *Pyropia yezoensis*.

도 김 양식장의 DIN:DIP 비는 11월 초에만 36.4:1 이었다(Fig. 9A). 2011년 11월에 황백화가 발생한 비안도, 무녀도와 선유도 김 양식장의 DIN:DIP 비는 7.9~13.9 범위였으며, 도청리 김 양식장의 DIN:DIP 비는 15.8~18.9 범위로 나타났다. 2014년 2월부터 4월까지 비안도, 무녀도와 선유도 김 양식장의 DIN:DIP 비는 26:1 이하였으나, 개야도와 도청리 김 양식장의 DIN:DIP 비는 26:1 이상의 값을 보였다(Fig. 9B). 2014년 9월부터 12월 초까지 비안도, 무녀도,

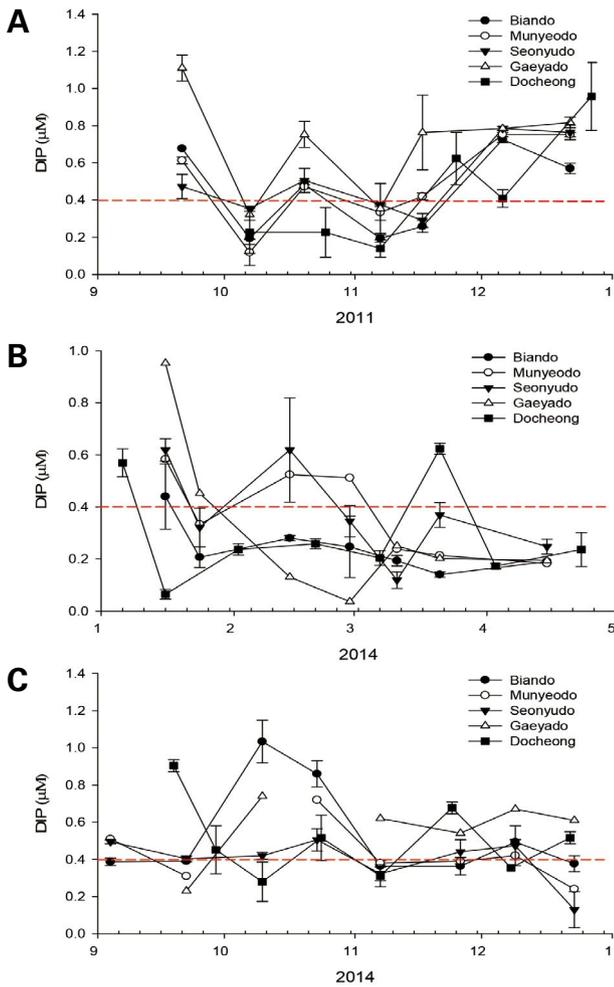


Fig. 8. Comparisons of the temporal changes in dissolved inorganic phosphate (DIP) concentrations in Jeollabuk-do aquaculture farm during the harvesting periods of 2011 and 2014. A and C; early aquaculture period, B; late aquaculture period. The red dotted line indicates the critical concentration in the discoloration outbreak of *Pyropia yezoensis*.

선유도와 도청리 김 양식장의 DIN:DIP 비는 26:1 이하였으며, 개야도 김 양식장의 DIN:DIP 비는 11월을 제외하고 26:1 이상의 값을 보였다(Fig. 9C). 또한 용존무기영양염 감소의 원인을 파악하기 위해 조사기간 동안 황백화 발생 시 해수 중의 플랑크톤 밀도를 조사한 결과 플랑크톤의 대량 발생은 확인되지 않았다.

고찰

김 엽체의 색택 변화는 피코시아닌과 피코에스린 색

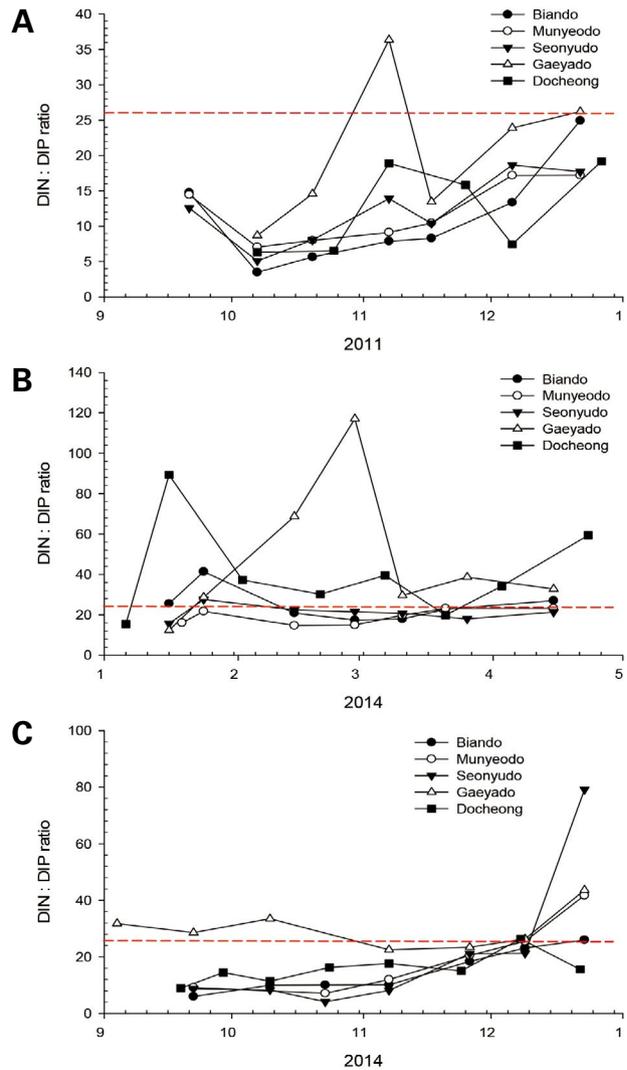


Fig. 9. Temporal changes in the DIN:DIP ratio in Jeollabuk-do aquaculture farm during the harvesting periods of 2011 and 2014. A and C; early aquaculture period, B; late aquaculture period. The red dotted line indicates the critical concentration in the discoloration outbreak of *Pyropia yezoensis*.

소의 함량 차이로 발생하며, 이들 색소의 함량이 부족하면 황백색으로 퇴색되는 것으로 알려져 있다(Amano and Noda 1987; Sakaguchi *et al.* 2003; Zhang *et al.* 2009). 또한 Ueki *et al.* (2010)은 영양 성분(질소, 인, 철)이 결핍되었을 때 김 엽체의 색소 함량이 감소하며, 엽록체의 축소, 세포 내 액포 증대와 세포간극의 확대가 나타난다고 보고하였다. 본 연구의 경우 전라북도 김 양식장에서 황백화 발생시기(2011년 11월, 2014년 4월과 2014년 11월)의 용존무기영양염의 농도를 확인한 결과 개야도를 제외한 4개

지역에서 DIN의 농도가 $5 \mu\text{M}$ 이하였으며, DIP의 농도가 $0.4 \mu\text{M}$ 이하로 나타나 김 엽체의 색택 변화 및 액포 비대는 영양염류의 감소에 의해 발생한 황백화의 증상으로 판단되었다. 또한 일본의 경우 Ariake Bay에서는 DIN 농도가 $7 \mu\text{M}$ 이하에서, Seto Inland Sea에서는 DIN 농도가 $3 \mu\text{M}$ 이하에서 발생하였으며 (Matsuoka *et al.* 2005; Hori *et al.* 2008), Tokyo Bay에서는 DIP의 농도가 $0.2 \mu\text{M}$ 이하에서 황백화가 발생하였다. 지역별 황백화 발생에 영향을 미치는 용존무기영양염의 종류가 다른 것으로 확인되어 본 연구 결과와 유사한 조건에서 황백화가 발생하였다 (Matsuoka *et al.* 2005; Ishii *et al.* 2008; Tanda and Harada 2012).

Ishii *et al.* (2008)은 양식 방사무늬김의 생육에 필요한 질소와 인의 비율은 26:1이며, DIN과 DIP의 농도 비율 통해 김 생육을 제한하는 용존무기영양염을 추정하였다. 본 연구에서 전라북도 김 양식장의 DIN:DIP 비는 양식 초기에 7.5~20.5 범위였으며, 양식 말기에는 18.0~34.2 범위로 나타나 양식 초기보다 양식 말기에 높은 값을 보였다. 따라서 양식 초기에는 DIN이, 양식 말기에는 DIP 농도가 김의 생장의 제한요소로 영향을 미친 것으로 추정된다. 또한 김 엽체의 황백화 피해상태는 색차계를 이용하여 정량적으로 분석이 가능한 것으로 알려져 있으며 (Kotani 2000; Lee *et al.* 2018), 본 연구에서 황백화 발생시기에 따라 색차계 지수의 차이가 확인되었다. 이러한 황백화 엽체의 색택 차이는 제한되는 용존무기영양염의 종류에 따른 색소의 합성의 차이로 보여진다.

일본의 경우, 황백화를 일으키는 영양염 결핍원인을 강수량 부족에 따른 하천수 유입 감소, 구조류의 대발생과 고염분 저염양 수괴의 이동 등에 의한 것으로 판단하였다 (Matsuoka *et al.* 2005; Ishii *et al.* 2008; Hori *et al.* 2008; Tanda and Harada 2012). 우리나라의 경우 황백화가 발생한 2011년과 2014년의 누적 강수량은 황백화가 발생하지 않은 시기보다 많거나 적게 나타나 강수량과 황백화 간의 상관관계는 확인되지 않았다. 또한 연안에 위치한 김 양식장의 영양염 농도에 영향을 미치는 하천수의 유입량을 확인하기 위해 농어촌공사의 금강하굿둑의 담수 방류량을 확인한 결과 2010년과 2013년에 각각 약 48억톤, 약 52억톤으로 상대적으로 적은 방류량을 보인 이듬해 황백화 피해가 크게 발생하였다. 반면, 본 연구지역의 5개 정점 중 금강하류에 위치한 개야도에서는 조사기간 동안 황백화가 발생하지 않았으며, 개야도 지역에서만 DIN의 농도가 $10 \mu\text{M}$ 이상이었고 새만금방조제 주변에 위치한 도청리,

비안도, 선유도와 무녀도 김 양식장에서는 $5 \mu\text{M}$ 이하로 나타남으로써 하굿둑 방출수의 영향을 배제할 수 없다.

국립수산과학원 연안정지관측 자료에 따르면 본 연구지역의 용존무기영양염의 농도는 2000년 이후 지속적으로 감소하고 있으며, 금강연안이 새만금방조제 인근해역에 비해 높은 것으로 나타났다. 또한 연안의 용존무기영양염의 감소와 더불어 연안으로 유입되는 금강의 총질소 농도도 2008년 이후 지속적 감소하고 있는 것으로 보고되었으며, 향후 용존무기영양염의 감소로 인한 김의 황백화 발생 빈도의 증가가 예상된다 (Kim *et al.* 2018).

결론적으로 본 연구에서는 우리나라에서 발생한 황백화 피해 엽체의 특징과 세포구조의 변화 등 황백화의 증상을 명확히 밝히고 황백화를 유발한 영양염 결핍의 원인을 찾고자 시도하였으나 원인은 추정될 뿐 명확한 결론을 내릴 수 없었다. 다만 향후 연안의 용존무기영양염의 지속적 감소와 더불어 하천의 수질정화에 의한 노력으로 강 하구 방출수의 용존무기영양염의 감소가 지속될 경우 김 양식장의 피해 빈도 및 규모는 증가될 것으로 예상된다. 따라서 보다 정확한 황백화 원인 구명과 황백화 피해를 낮추기 위한 후속연구가 지속되어야 할 것으로 판단된다.

적 요

김 황백화에 대한 원인을 파악하기 위하여 전라북도 김 양식장에 2011년부터 2014년까지 양식환경 특성과 황백화 피해 엽체의 형태 및 세포구조를 확인하였다. 연구 결과 금강 하구역에 위치한 개야도에서는 황백화가 확인되지 않았고 새만금방조제 주변의 도청리, 비안도, 무녀도와 선유도에서 황백화가 발생하였다. 김의 황백화 피해는 2011년 11월, 2014년 4월과 11월에 확인되었으며, 황백화 피해 엽체는 엽체 퇴색과 세포 내 액포 비대가 발생하였다. 연구기간 동안 황백화는 DIN과 DIP의 농도가 각각 $5 \mu\text{M}$ 와 $0.4 \mu\text{M}$ 이하에서 발생하였다. 용존무기질소(DIN)와 용존무기인(DIP)의 비율을 통해 결핍된 용존무기영양염을 확인한 결과 DIN 결핍은 양식 초기, 낮은 DIP 농도는 양식 말기 영향을 미치는 것으로 추정되었다.

사 사

본 논문은 2019년도 국립수산과학원의 연구비 지원

(R2019009)으로 수행된 연구이며, 연구비 지원에 감사드립니다.

REFERENCES

- Amano H and H Noda. 1987. Effect of nitrogenous fertilization on the recovery of discolored fronds of *Porphyra yezoensis*. Bot. Mar. 30:467-473.
- Hata K and M Abe. 2013. The state of the fishing and aquaculture seen from material cycling. Aquabiology 35:132-139.
- Hori Y, S Mochizuki and N Shimamoto. 2008. Relationship between the discoloration of cultivated *Porphyra* Thallii and long-term changes of the environmental factors in the northern part of Harima-nada, Eastern Seto Inland Sea, Japan. Bull. Jpn. Soc. Fish. Oceanogr. 72:107-112.
- Ishii M, K Haesegawa and Y Matsuyama. 2008. Environmental factors influencing *Porphyra* (Nori) farming in Tokyo Bay: Long term changes in inorganic nutrients and recent proliferation of diatoms. Bull. Jpn. Soc. Fish. Oceanogr. 72:22-29.
- Jeonbuk Province. 2019. Major Statistics for Fisheries of Jeonbuk. <http://www.jeonbuk.go.kr/board/> on May 24.
- Kang JW and NP Koh. 1977. Seaweed Cultivation. Korea Textbook Co. Ltd. Press. Busan.
- Kawaguchi O, T Yamamoto and O Matsuda. 2002. Characteristics of water quality in Aiake Bay, Kumamoto, Japan, in FY2000-the year of the devastated nori crop. Oceanogr. Jpn. 11:543-548.
- Kawamura Y. 2012. Nori cultivation and nitrogen budget in the inner area of the Ariake Bay. Aquabiology 34:142-148.
- KHOA. 2019. Oceanographic Observation of Water temperature. Korea Hydrographic and Oceanographic Agency. Ministry of Oceans and Fisheries, Korea. http://www.khoa.go.kr/koofs/kor/observation/obs_real.do on May 1.
- Kim YS, JS Kim, YY Kim and SY Choi. 2018. Analysis of factors underlying *Pyropia* chlorosis near Geumgang Estuary. J. Korean. Soc. Mar. Environ. Energy 21:381-386.
- KMA. 2019. Statistic database for temperature and precipitation of Kunsan. Korea Meteorological Administration. <https://data.kma.go.kr/data/grnd/> on May 1.
- KMI. 2018. Monthly Fisheries outlook and Issue-Seaweed. Vol.656. Korea Maritime Institute. Busan, Korea.
- Kotani M. 2000. Numeral indication of fading in cultured *Porphyra* lava. Bull. Fukuoka Fish. Mar. Technol. Res. Cent. 10:49-50.
- Lee SY, YH Kim JE Lee and EK Hwang. 2018. Evaluation of the discoloration of *Pyropia yezoensis* Ueda using a colorimeter. Korean. J. Environ. Biol. 36:620-625.
- Matsuoka S, S Yoshimatsu, A Ono, K Ichimi, M Fujiwara, K Honda and K Tasa. 2005. Discoloration of Nori (*Porphyra*) and characteristics of water quality in Eastern Bisan Seto. Bull. Coast. Oceanogr. 43:77-84.
- MOF. 2019. Fisheries Statistics. Ministry of Oceans and Fisheries. <http://www.fips.go.kr/p/S020304/>. Accessed 20 Sep. 2019.
- NFRDI. 2015. Report of NFRDI 2014 Projects (Study on the chlorosis phenomena in cultivated *Phyropia*). National Fisheries Research and Development Institute. p. 50.
- NIFS. 2019. Statistic Database for Water temperature of Gunsan. National Institute of Fisheries Science. Busan, Korea. http://www.nifs.go.kr/kodc/coo_list.kodc. on May 1.
- Parsons TR, Y Maita and CM Lalli. 1984. A manual of chemical and biological methods for seawater analysis. Pergamon Press. Oxford. England. p. 173.
- Sakaguchi K, N Ochiai, CS Park, M Kakinuma and H Amano. 2003. Evaluation of discoloration in harvested laver *Porphyra yezoensis* and recovery after treatment with ammonium sulfate enriched seawater. Nippon Suisan Gakkaishi 69:399-404.
- Tanda M and K Harada. 2012. Nutrient environment and fishery production in Harima-nada, Eastern Seto Inland, Japan. Aquabiology 34:132-141.
- Tanda M and K Harada. 2013. Action to improve present conditions and that of nutrient environment and future problem in the eastern Seto Inland Sea. Aquabiology 35:116-124.
- Ueki C, A Murakami, T Katoh, N Saga and T Motomura. 2010. Effects of nutrient deprivation on photosynthetic pigments and ultrastructure of chloroplasts in *Porphyra yezoensis*. Nippon Suisan Gakkaishi 76:375-382.
- Yoshida T, M Notoya, N Kikuchi and M Mitaya. 1997. Catalogue of species of *Porphyra* in the world, with special reference to the type locality and bibliography. Nat. Hist. Res. 3:5-18.
- Zhang J, T Sato, R Maruyama, Y Takao, T Azenaka, Y Fuita and S Yamazaki. 2009. Trace element deficiency, especially Iron deficiency, causes the discoloration of sea laver, Nori, in the Ariake Sea. Bull. Soc. Sea Water Sci. Jpn. 63:158-166.