한국해양환경·에너지학회지
J. Korean Soc. Mar. Environ. Energy
Vol. 26, No. 1, 49-56, February 2023

https://doi.org/10.7846/JKOSMEE.2023.26.1.49
ISSN 2288-0089(Print) / ISSN 2288-081X(Online)

Original Article

비인만 김 양식장 황백화 발생 시기에 따른 물질수지 비교 산정

최용현[1] · 홍석진[2] · 권기영[3] · 최민규[3] · 이원찬[4] · 이대인[2,†]
[1]국립수산과학원 어장환경과 연구원
[2]국립수산과학원 어장환경과 연구사
[3]국립수산과학원 어장환경과 연구관
[4]국립수산과학원 어장환경과 과장

Mass Balance Approach toward Outbreak of Chlorosis Phenomenon of the *Pyropia* Aquaculture Farms in Biin Bay, Korea

Yonghyeon Choi[1], Sokjin Hong[2], Keeyoung Kwon[3], Minkyu Choi[3], Wonchan Lee[4], and Daein Lee[2,†]

[1]Scientific Researcher, Marine Environmental Management Division, National Institute of Fisheries Science, Busan 46083, Korea
[2]Scientific Officer, Marine Environmental Management Division, National Institute of Fisheries Science, Busan 46083, Korea
[3]Senior Scientific Officer, Marine Environmental Management Division, National Institute of Fisheries Science, Busan 46083, Korea
[4]Director, Marine Environmental Management Division, National Institute of Fisheries Science, Busan 46083, Korea

요 약

김 양식장의 무분별한 증설 및 연안 매립, 방조제, 댐 건설 등으로 해안선 변화가 진행되어 육상기원 영양물질 유입이 원활하지 못하거나 영양물질에 대한 먹이경쟁 등 복합적인 원인에 의해 황백화 현상이 발생하는 것으로 추정되고 있다. 본 연구에서는 해양환경과 어장생산성 연계 연구의 일환으로 비인만 김 양식장 해양환경 인자의 변동 특성을 파악하고, 황백화 현상 유·무 시기의 물질수지를 산정하여 발생 원인을 진단하였다. 연구 결과, 영양염 부족이 황백화 현상 발생에 영향을 미쳤으며, 물질수지 산정 결과 황백화가 발생한 2018년 2월에 김 양식장내의(시스템 내) DIN, DIP 부하량이 각각 – 9,100.3 kg/day, 99.2 kg/day로 나타나 황백화 현상은 영양염 중 특히 DIN이 부족할 때 발생하였다. 따라서 김 양식장의 지속가능한 어장생산성 관리를 위해서는 김 양식장 적정 어장 수용력 산정 및 양식장으로 유입되는 물질의 부하량 파악 등 보다 체계적인 어장환경관리가 필요하다.

Abstract – Chlorosis phenomenon is occurring due to complex causes such as indiscriminate expansion of *pyropia* aquaculture farms, and the inflow of terrestrial nutrients from changes in the coastline due to reclamation, dike and weir construction. In this study, the characteristics of changes in the marine environment of the *pyropia* aquaculture farms in Biin Bay were identified, and the mass balance was calculated during the period with or without chlorosis phenomenon. As a result of the investigation, lack of nutrients affected the occurrence of chlorosis phenomenon. Mass balance calculation, in February 2018, when chlorosis phenomenon occurred, DIN and DIP loads were – 9,100.3 kg/day, 99.2 kg/day. chlorosis phenomenon occurred especially when DIN was deficient. Therefore, in order to manage the sustainable productivity of *pyropia* aquaculture farms, more systematic fishery management is needed, such as calculating the optimal fishery carring capacity and identifying the load of materials flowing into the aquaculture farms.

Keywords: LOICZ model(LOICZ 모델), Mass balance(물질수지), *Pyropia*(김), Chlorosis phenomenon(황백화 현상), Aquaculture farm management(양식어장관리)

†Corresponding author: dilee70@korea.kr

1. 서 론

김은 1600년대부터 양식된 가장 오래된 해조류 품종 중 하나로, 양질의 단백질, 비타민 A, 비타민 B12, 칼슘 등 필수 성분을 다량 함유한 자연식품이다(NIFS[2018]). 김의 생산량은 1990년 10만 ton에서 2016년에 40만 ton까지 증가하였고, 2016년을 기준으로 우리나라 해조류 양식 생산량의 29%였지만, 생산액은 68%를 차지하고 있어 지속적으로 연구해야 할 필요성이 있는 고부가가치 수산양식품종이다(Sohn[1988]).

양식기술이 발전하면서 김의 생산량은 지속적으로 증가했지만, 김 양식장 준법시설 비율이 2005년에 52.9%에 불과하였고, 낮은 면허지내 준법시설 비율은 정확한 시설량과 생산량 파악이 어려울 뿐만아니라 양식장의 무분별한 증설 및 이용으로 김의 품질 저하, 시비제 오·남용 등으로 인한 환경오염 문제를 지속적으로 유발한다(Ma[2000]; Yang and Park[2006]). 우리나라 주요 김 양식장이 분포해 있는 남·서해 연안에 매립, 방조제 및 댐 건설 등으로 해안선 변화가 진행되어 육상기원 영양물질의 유입이 원활하지 못하고, 해안선 변화로 하구역의 수층 혼합에 기여하는 주요 기작이 조류에서 방류량으로 변화하는 등 복합적인 원인으로 인해 2010년에 김의 황백화 현상(chlorosis phenomenon)이 발생하였다(Jang and Kim[2006]; KMI[2022]). 김의 엽체가 황색으로 변하는 생리적 갯병인 김의 황백화 현상은 정확한 원인파악이 어려워 대처가 난해한 실정이다(Kim *et al.*[2018]).

국내에서는 실내 실험이나 세포 또는 색소 분석을 통해 해양환경이 황백화 현상에 미치는 영향 연구와 해양생태계 변화에 따른 김 양식장의 적정 어장수용력 연구 등이 수행되었다(NFRDI[2011]; Kim *et al.*[2012]; Lee *et al.*[2019]). 김의 황백화 현상은 우리나라 뿐만 아니라 일본에도 2000년대 초에 대규모로 발생하여 피해 지역의 김 생산량이 평년의 40% 수준으로 급감하는 사례가 있다(Kawaguchi *et al.*[2002]; Matsuoka *et al.*[2005]; Ishii *et al.*[2008]; Kawamura[2012]). 일본 연안에서 발생한 황백화 현상에 대한 원인으로 동계 규조류의 대량발생, 고염분 저영양 수괴 이동, 하천수 유입량 감소에 따른 영양염, 특히 DIN의 부족이 영향을 미치는 것으로 보고 된 바 있다(Hori *et al.*[2008]; Ishii *et al.*[2008]; Kawamura[2012]; Tanda and Harada[2012]; Hata and Abe[2013]; Tanda and Harada[2013]).

이처럼 국내·외에서 김 황백화 현상에 대한 다양한 연구가 진행되었지만, 국내에서 영양염 농도의 급격한 저감 원인은 명확하게 규명되지 않았고, 영양염 감소가 황백화 현상의 원인으로 추정되어 양식어장의 환경 변화에 대한 지속적인 모니터링이 수행되고 있는 실정이다(NIFS[2017]; Kim *et al.*[2018]).

따라서 본 연구에서는 해양환경과 어장생산성 연계 연구의 일환으로 비인만 김 양식장의 해양환경 장기 변동 특성을 파악하고, LOICZ model을 활용하여 황백화 현상 발생 유·무 시기의 물질수지를 산정·분석하여 보다 체계적인 어장관리방안을 제언하고자 한다.

2. 재료 및 방법

2.1 연구지역

충청남도 서천군에 위치해 있는 비인만은 금강 하구의 영향을 받는 충청남도의 주요 김 생산지역으로 조석에 따라서 창조류일 때 주요 흐름은 외해에서 금강 하구방향으로 유입되고, 낙조류일 때 금강유역에서 개야도를 중심으로 외해로 유출되는 특징이 있다(CNI[2017]).

모델의 구성 및 경계 설정에는 지형, 물질분포 및 유동, 생태계 특성 등 다양한 요인이 고려되는데, 본 연구에서는 환경변화 파악 및 물질수지 산정을 위해 해양환경공단에서 운영하고 있는 해양환경측정망 정점 중 비인만의 주요 유입원인 금강 하구, 외해 정점을 선정하였고, 비인만의 서천 김 양식장 중 황백화가 발생한 인근 지역에 대하여 정점 선정 및 1개의 시스템으로 구성하였다(NIFS[2021])(Fig. 1.). 시스템의 면적 및 체적은 국립해양조사원 자료와 Geographic Information System(GIS) 프로그램을 활용하여 산정하였고, 해역면적은 118.4 km^2, 평균 수심은 5.1 m, 총 시스템 체적은 0.6 km^3으로 나타났다.

2.2 물질수지 산정(LOICZ Box Model)

시스템으로 유·출입되는 담수유량을 파악하여 물 수지와 염분 수지를 산정하고, 잔차류의 유량을 결정하였다. 유·출입에 사용된 값은 기상청 자료, 물환경정보시스템의 금강 유량 자료, 해양환경공단에서 운영 중인 해양환경측정망 자료를 활용하였고, 수집된 항목별 농도와 유량을 이용하여 유동 부하량을 계산하였다. 이를 위하여 필요한 전제 조건은 아래와 같다.

① 조사 기간 동안 시스템의 체적은 정상상태를 유지한다.

② 염분은 보존성 물질로서, 시스템에 유입된 후 생지화학적 반응이나 그 외의 다른 과정에 의해 생산 또는 소실되지 않는다.

③ 시스템으로 유입되는 물의 유입원은 인근 하천수, 담지하수, 강우, 조석 작용에 의한 외해수 등이 있고, 유출원은 증발량과 잔

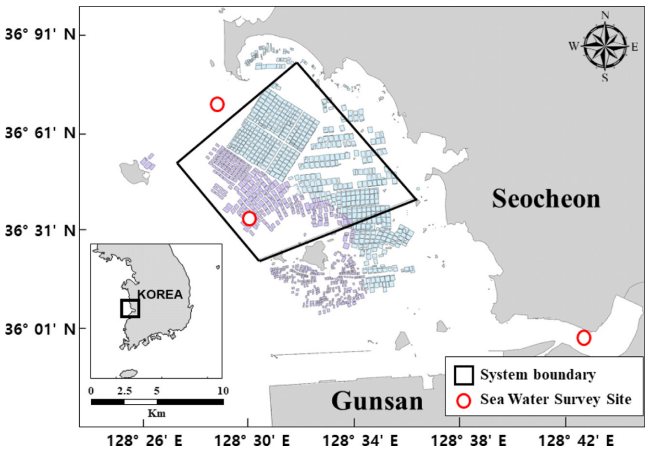

Fig. 1. Study of the system boundary area and survey sites in Biin bay, Korea.

차류이다. 조석 작용에 의한 외해수는 물 수지 산정과정에 따라 유입원 또는 유출원이 될 수 있다.

2.2.1 물 수지와 염분 수지

비인만의 물 수지를 정상상태로 가정하면, 시스템으로 유·출입은 균형을 이뤄야하므로 식 (1)과 같이 표현된다.

$$\text{System, } (V_Q + V_P + V_O + V_{FG}) - V_E \pm V_R = 0 \quad (1)$$

V_Q는 하천수 유입량, V_P는 해면으로의 강우량, V_O는 오폐수 유입량, V_{FG}는 담지하수 유입량, V_E는 해면에서의 증발량 V_R은 잔차 유동량을 나타낸다. 하천수 유입량은 금강 방류량 자료와 해양환경측정망 자료를 활용하였고, 비인만 인근의 소하천, 오폐수, 담지하수 유입은 없는 것으로 가정하였다. 유입되는 강우량은 비인만과 가장 가까운 군산지역의 기상청 자료를 활용하였고(KMA[2022]), 증발량 자료는 식 (2)를 활용하였다(Kim *et al.*[2000]). 식 (2)에 이용되는 온도, 풍속, 강우량은 기상청 자료를 활용하였고(KMA[2022]), 수온은 해양환경측정망 자료를 활용하여 산정하였다.

$$\begin{aligned}\text{Evaporation(mm/month)} &= 32.526 + 0.117\ \text{Temperature(℃)} \\ &+ 4.474\ \text{Air Temperature(℃)} + 20.765\ \text{Wind(m/s)} \\ &- 0.0882\ \text{Precipitation(mm)}\end{aligned} \quad (2)$$

보존성물질인 염분 수지 산정에 사용되는 S_{System}은 만 내의 염분, S_Q는 하천수의 염분, S_P는 강수의 염분, S_O는 오폐수의 염분, S_X는 조석작용에 의한 해수 교환량, S_{Ocn}은 외해의 염분, S_E는 증발에 의해 소실되는 염분, S_{FG}는 담지하수 염분을 나타낸다(Fig. 2). S_{System}, S_{Ocn}, S_X를 제외한 염분값들은 통상 0으로 가정할 수 있으며, 시스템의 체적(V)을 해수 교환량(V_X), 잔차 유동량(V_R)의 합으로 나누면 시스템 내의 평균체류시간(τ*)을 구할 수 있다.

2.2.2 영양염 수지

DIN, DIP의 농도와 시스템에 유·출입되는 물의 유량을 활용하여 영양염 유동량을 산정하였고, 비보존성물질인 영양염 수지(ΔY)를 산정하는 일반식은 식 (3)에 나타내었다.

$$V\frac{dY}{dt} = V_1\Sigma\text{influxes} - V_2\Sigma\text{effluxes} + \Delta Y \quad (3)$$

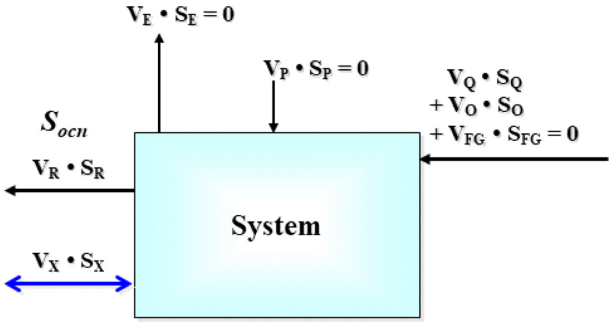

Fig. 2. Simple diagram of salt budgets for a coastal water body.

정상 상태로 가정했을 때, $V\frac{dY}{dt} = 0$ 이므로 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta Y = -(V_1\Sigma\text{influxes} - V_2\Sigma\text{effluxes}) \quad (4)$$

ΔY는 시스템에서 생지화학적 반응을 통해 생성 또는 소실되는 양을 의미하며, 양의 값일 경우 유기체 사망, 용출, 분해, 유입 등의 영양염 생성을 나타내고, 음의 값을 나타내면 광합성, 퇴적, 생물의 섭식, 유출 등의 영양염 소실을 나타낸다.

3. 결과 및 고찰

3.1 환경인자 변동 특성

일조량, 수온, 염분, 해수유동 및 영양염류(N, P)는 김의 성장에 영향을 미치는 주요 인자이다. 김은 11월부터 다음해 3월까지 양식이 이루어지므로, 해양환경측정망 자료를 활용하여 황백화가 처음 발생한 2010년 이전인 2007년부터 2021년까지 2월과 11월의 해양환경과 김의 연계성을 분석하였다(Fig. 3).

수온은 동계에 1.69~6.27℃(평균 4.04℃), 추계에 11.62~16.63℃(평균 14.31℃)로 나타났다. 김의 발아기인 추계에는 일반적으로 적정 생장 수온이 15~22℃이고, 15℃이하로 낮아지면 생장기에 들어간다. 발아기에 15℃ 이상의 해수 수온이 지속될수록 갯병의 발병 확률과 부착 규조류의 부착률이 증가하여 해적 생물로 인한 영향을 받을 수 있다. 생장기인 동계에는 5~8℃가 최적 수온이고, 4℃ 이하로 감소할 경우 오히려 김의 생장을 저해하며 영하 2℃가 되면 김이 서식하기 어려운 환경이 된다(Song and Chung[1999]; Yoo[2003]). 따라서 본 연구의 추계와 동계 평균 수온은 일반적인 생장 수온 범위로 나타났다.

염분은 22.5~32.6(평균 31.4)로 나타났다. 김의 적정 염분 범위는 21.5~33.5이고, 32.5에 근접할수록 최적이며, 34.4 이상일 경우 김의 광합성이 저하될 수 있다(Iwasaki[1965]; Chang *et al.*[1983]; Wang *et al.*[2016]). 2018년 11월에 염분이 낮게 나타났지만, 모두 적정 염분 범위 내에 분포를 보였다.

Chl.a는 0.10~17.32 ug/L(평균 3.34 ug/L)로 나타났고, 추계보다 동계에 높게 나타났다. 동계에는 주로 규조류가 번식을 하는데, 김의 부착 및 생장을 방해하고 품질을 저하시키는 해적생물의 역할을 한다(NIFS[2018]). 또한 Chl.a는 김과 영양염 섭취에 대한 경쟁 관계이므로 장기적인 모니터링을 통한 김 양식에 미치는 영향을 연구할 필요가 있다(Matsuoka *et al.*[2005]; Hori *et al.*[2008]; Ishii *et al.*[2008]; Kawamura[2012]; Tanda and Harada[2012]; Tanda and Harada[2013]).

DO는 7.71~13.02 mg/L(평균 9.99 mg/L), DO 포화도는 87.98~129.44%(평균 104.18%)로 나타났다. 해수 내의 DO는 광합성, 강수 및 하천수 유입에 의한 혼합, 대기 중 공기의 용해 등에 의해 증가되고, 생물의 호흡, 유기물 분해에 의해 감소하는데, 비인만 김 양식장은 안정적인 DO 농도와 포화도를 보여 활발한 광합성과 수괴혼합이 이루어지는 것으로 판단된다.

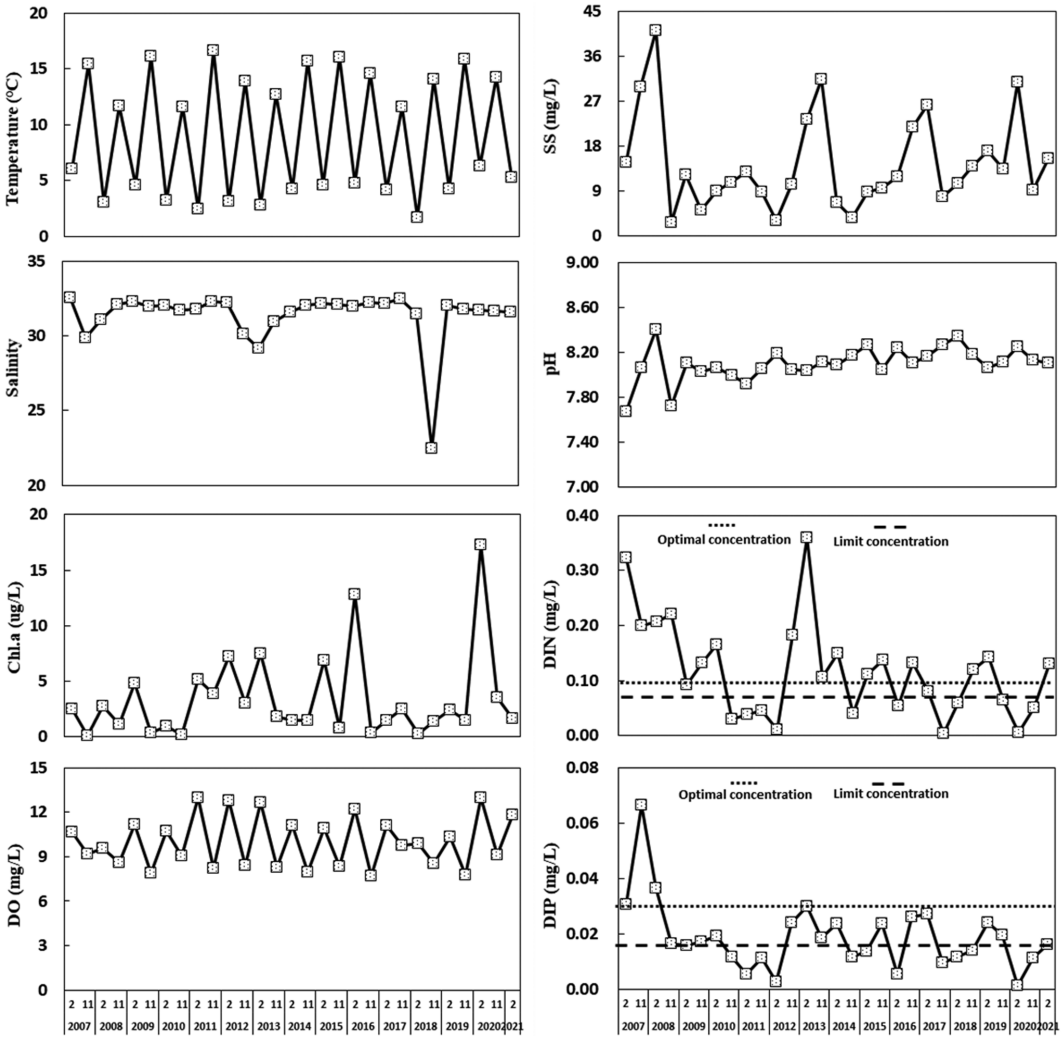

Fig. 3. Temporal changes of environmental factors in Biin Bay.

부유물질은 광합성을 위한 일조량에 영향을 미칠 수 있는 인자로 30 mg/L이상일 경우 광합성률이 25일 동안 약 50% 저하된다는 연구가 있으며(Chang *et al.*[1983]), 서해안의 경우 조석간만의 차이가 수중 부유물질 농도에 영향을 미쳐 광합성 및 호흡 등 생장에 부정적인 영향을 줄 수 있다(Hong *et al.*[1987]). 비인만의 부유물질 농도는 2.8~41.2 mg/L(평균 14.6 mg/L)로 나타났으며, 조사기간동안 30 mg/L 이상의 농도일 경우가 3회 있었지만, 비인만의 김 양식장은 부유식으로 운영되고 있고, 김의 총 생산량은 점차 증가하였기 때문에 부유물질에 의한 광합성률 저하가 생산량에 미치는 영향은 미미한 것으로 사료된다.

pH는 수체 내에서 광합성이 활발이 이루어지고, 해수의 순환이 원활하게 이루어질 경우 안정화될 수 있다(Day[1981], Kim and Park[1990]). 비인만의 pH는 7.71~8.41(평균 8.11)로 대부분 일반적인 해수 pH 범위인 7.80~8.20의 범위에 나타났으며, 광합성과 해수 순환이 원활한 것으로 판단된다.

영양염류는 김 황백화에 가장 큰 영향을 미치는 인자로, DIN과 DIP가 각각 0.10 mg/L, 0.03 mg/L 이상일 때 양질의 김 생장에 적합한 농도이고, 황백화 현상이 발생하는 제한농도는 DIN이 0.07 mg/L, DIP가 0.016 mg/L 이하일 경우이다(CNI[2017]; NFRDI[2014]). 비인만의 DIN, DIP 농도는 0.00~0.36 mg/L(평균 0.12 mg/L), 0.00~0.07 mg/L(평균 0.02 mg/L)로 나타났다. 황백화 현상이 처음 발생한 2010년 이전에는 DIN, DIP 모두 황백화 현상 발생 제한농도 이상의 값을 보였지만, 2010년 11월에 제한농도 이하로 급격하게 감소하여 12월 중순에 황백화 현상이 발생하였고, 이후 최근 2021년까지 간헐적으로 황백화 현상이 보고된 바 있다(KMI[2022]). DIN/DIP 비율은 0.49~13.39(평균 6.10)으로 Redfield ratio(N:P=16:1)보다 낮게 나타났고, 방사무늬김의 생장에 필요한 N:P=26:1 비율보다 매우 낮게 나타났다(Ishii *et al.*[2008]). 따라서 비인만에서 DIN이 김 생장에 제한요소로 작용하는 것으로 추정된다.

비인만 김 양식장 인근의 2007~2021년 해수 유속은 24.4~36.7 cm/s(평균 32.5 cm/s)로 나타났다(Table 1). 김의 생장에 적합한 해수 유속은 10~20 cm/s로, 해수 유속이 낮을 경우 영양염류 흡수 및 노폐물 제거가 원활하지 못하여 성장저해가 발생할 수 있고,

Table 1. Current speed in the Biin Bay of Korea

Survay site	Longitude	Latitude	Year	Average current speed (cm/s)	Reference
Farm	126° 33′ 42.1″	36° 01′ 48.0″	2007	33.6	KHOA[2022]
	126° 32′ 09.2″	36° 04′ 21.4″	2012	24.4	
	126° 26′ 22.9″	36° 02′ 07.4″	2021	33.4	LOEE[2021]
Oceon	126° 27′ 58.0″	36° 06′ 56.2″	2007	34.0	KHOA[2022]
	126° 28′ 45.9″	36° 06′ 25.9″	2012	36.7	
	126° 24′ 42.7″	36° 07′ 01.5″	2021	32.9	LOEE[2021]

높을 경우에는 김이 양식시설에서 탈락할 가능성이 높아진다(CNI[2017]). 비인만의 해수 유속은 김 생장을 위한 적정 유속범위보다 높게 나타났지만, 양식장 시설물이 있을 경우 유속이 50~65% 감소된다는 연구 결과가 있어 양식장 내에서는 적정 생장범위에 포함될 것으로 판단된다(Inoue[1972]; Grant and Bacher [2001]; Jung *et al.*[2020]).

2007년부터 2021년까지 김 양식이 이루어지는 11월~다음해 3월까지 평균 금강 방류량과 군산 강우량을 나타내었다(Fig. 4). 금강의 평균 방류량은 46.8~157.8 m^3/s(80.8 m^3/s)이고, 강우량은 25.38~61.20 mm/month(평균 40.07 mm/month)로 조사되었다. 2009-2010년, 2015-2016년을 제외하고 금강의 방류량은 강우량의 증감과 같은 경향을 보였고, 2012-2013, 2014-2015, 2019-2020년과 같이 방류량과 강우량이 높은 해에는 태풍 등의 기상 악화에 따른 엽체의 탈락, 수온 변화에 따른 갯병 발생 피해는 있었지만, 황백화로 인한 피해는 없었다(KMI[2022]).

3.2 물 수지와 염분 수지

비인만의 김 양식이 활발히 이루어지는 2월에 금강 하구 평균 방류량(2016년: 50.03 m^3/sec, 2018년: 52.1 m^3/sec) 및 군산 강우량(2016년: 46.1 mm, 2018년: 33.5 mm)이 가장 비슷하고, 해양환경측정망 영양염 농도 자료 중 황백화가 발생할 수 있는 제한농도 이하로 나타났지만, 황백화가 발생하지 않았던 2016년 2월과 황백화가 발생한 2018년 2월에 대하여 물 수지와 염분 수지를 산정하였다(KMI[2022])(Table 2; Fig. 5).

물 수지 산정 결과 주요 담수 유·출입량은 금강에서의 유입과 잔차유동량으로 담수 유입량은 2016년과 2018년에 각각 50.0 m^3/s, 52.1 m^3/s로 나타났고, 담수 유출량은 각각 46.5 m^3/s, 49.4 m^3/s로 나타났다.

염분 수지 산정에 사용된 김 양식장 정점과 외해의 염분은 각각 2016년에 31.95, 32.24, 2018년에 31.44, 32.11로 모두 김 양식장에서 외해로 갈수록 높아지는 경향을 보였다. 체류시간은 2016년에는 1.3 days, 2018년에는 2.9 days로 나타나 하천형 만의 특성을 지닌 낙동강 하구에서 체류시간 2.0 days와 유사하게 나타났으며(Hong *et al.*[1998]), 가막만(20.8 days), 마산만(21.6 days), 곰소만(25.5 days) 등 반폐쇄성만의 최소 체류시간보다 낮게 나타났다(Eom *et al.*[2011]; Hong *et al.*[2007]; Choi *et al.*[2017]). 비인만은 금강하구 인근에 위치해 있고, 외해와의 교류가 원활한 개방형의 특징을 지녀 짧은 체류시간이 나타난 것으로 판단된다.

연안역의 물질수지 산정에 있어 해수 지하수 유출량을 고려해야 하지만(Eom *et al.*[2011]), 본 연구의 물질수지 산정에는 염지하수를 고려하지 않아 추후 염지하수 조사 자료를 포함한 연구가 수행되어야한다.

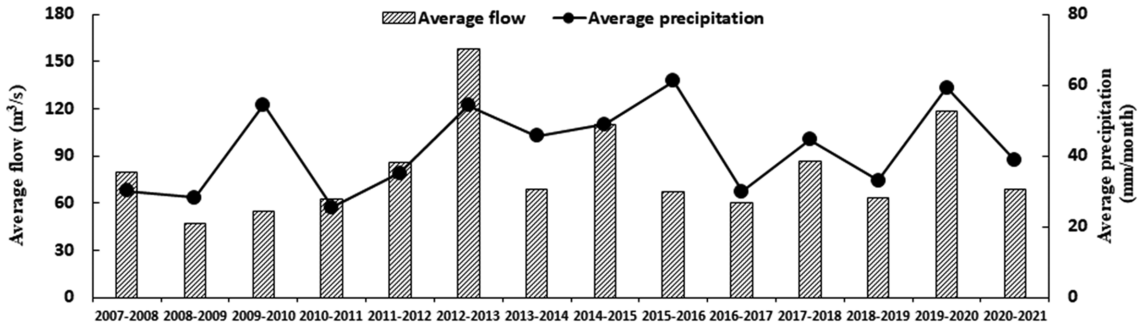

Fig. 4. Avergae Geum River flow and precipitation in Gunsan from November to March.

Table 2. Water budget in Biin Bay

		Influx				Efflux	
		V_Q	V_O	V_P	V_{FG}	V_R	V_E
		m^3/day				m^3/day	
Biin Bay	2016.02	4,322,592	-	102,851	-	4,016,403	409,040
	2018.02.	4,501,354	-	104,483	-	4,259,503	346,334

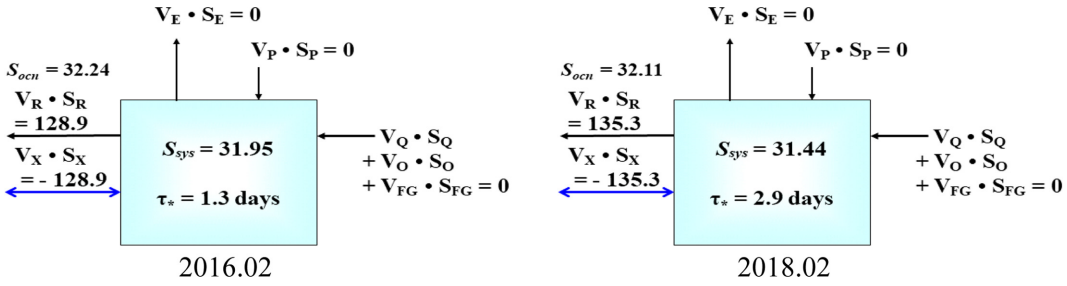

Fig. 5. Box diagram illustrating the salt budgets ($\times 10^6 \cdot m^3 \cdot day^{-1}$) in Biin Bay.

3.3 영양염 수지

비인만 김 양식장의 영양염 물질수지 산정을 위해 금강, 김 양식장, 외해의 DIN, DIP 농도는 해양환경측정망 자료와 물환경정보시스템의 금강 방류량 자료를 활용하여 부하량을 산정하였다(Fig. 6).

2016년 2월에 DIN, DIP 농도는 김 양식장에서 각각 0.054 mg/L, 0.006 mg/L였고, 외해에서는 각각 0.114 mg/L, 0.014 mg/L로 나타나 외해로 갈수록 높아지는 경향을 보였다. DIN, DIP 부하량은 외해로 각각 26,496.9 kg/day, 3,551.6 kg/day로 유출되었고, DIN 부하량은 금강에서 유입(2,769.2 kg/day)이 잔차류에 의한 유입(337.5 kg/day)보다 높게 나타났지만, DIP 부하량은 잔차류에 의한 유입(38.3 kg/day)이 금강에서 유입되는 부하량(6.6 kg/day)보다 높게 나타났다. 영양염 수지 산정 결과 system에서 DIN 부하량은 24,065.2 kg/day, DIP 부하량은 3,583.3 kg/day가 축적되었다.

2018년 2월에 DIN, DIP 농도는 김 양식장에서 각각 0.060 mg/L, 0.012 mg/L였고, 외해에서는 각각 0.023 mg/L, 0.013 mg/L로 나타나 DIN의 경우 2016년과는 다르게 김 양식장이 더 높게 나타났고, DIP는 유사한 농도를 보였다. DIN과 DIP 부하량 모두 금강에서 유입되는 유입 부하량(1,880.7 kg/day, 118.6 kg/day)이 잔차류에 의한 유입 부하량(175.9 kg/day, 52.1 kg/day)보다 높게 나타났다. 외해와의 교류작용으로 DIN 부하량은 7,395.5 kg/day가 유입되었고, DIP 부하량은 165.6 kg/day가 유출되어, 2016년과 2018년 모두 금강과 잔차류 유입량보다 외해와 유·출입 부하량이 가장 높게 나타났다. 영양염 수지 산정 결과 system에서 DIN 부하량은 – 9,100.3 kg/day가 소비되었고, DIP 부하량은 99.2 kg/day가 유입되었다.

황백화 현상이 발생하지 않았던 2016년에 DIN, DIP의 농도가 황백화 현상 발생 제한 농도 이하로 낮게 나타난 것은 Chl.a 농도가 높게 나타나 김 뿐만 아니라 플랑크톤의 섭식으로 인한 것으로 판단되고, 김 양식장이 밀집되어 있는 시스템 내에 다량의 유기체 사망, 용출, 분해, 유입 등으로 인한 영양염류가 생성되어 양의 값을 보이는 것으로 판단된다.

황백화 현상이 발생한 2018년에는 2016년보다 2배 이상의 체류시간을 보였는데, 체류시간이 길어질수록 수체 내의 영양염을 흡수할 기회도 증가하지만, 외해와의 해수교환이 낮아져 영양염 공급량이 감소하고 이로 인해 양식생물의 성장률도 감소하게 된다(Dumbauld *et al.*[2009]; Powell *et al.*[2012]; Kim[2019]). 따라서 상대적으로 긴 체류시간과 낮은 영양염 및 Chl.a 농도로 유입 및 재생산되는 영양염이 적어 김 양식장에서 생물의 섭식으로 인한 유출로 음의 값을 보이는 것으로 판단된다.

황백화 현상은 일반적으로 DIP보다 DIN 농도에 크게 영향을 받는다(NIFS[2018]; Lee *et al.*[2019]). 본 연구의 물질수지 산정 결과

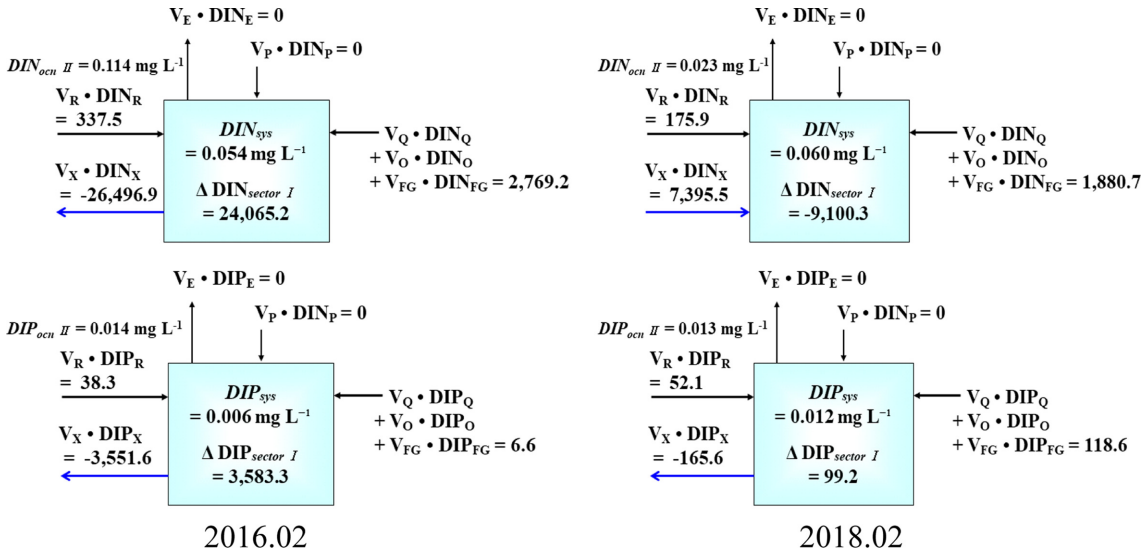

Fig. 6. Box diagram illustrating the DIN, DIP budgets (kg/day) in Biin Bay.

또한 황백화가 발생한 시기에 DIN이 부족하다는 것을 알 수 있어, DIP보다 DIN이 황백화 현상에 미치는 영향이 매우 큰 것으로 판단된다.

우리나라 하구에는 1980년대 이후부터 하구둑 건설이 진행되고 있으며, 이에 따른 영향으로 수층 혼합에 관여하는 주요 기작이 조류에서 방류수량으로 바뀌었다(Jang and Kim[2006]). 새만금 방조제 건설과 군산 비응항 개발·매립 등 금강 하구와 비인만 인근에도 2010년까지 대규모 해안선 변화가 있었으며, 이로 인한 해수유동의 변화가 금강 하구를 포함한 비인만의 영양염 분포에 영향을 미치는 것으로 사료된다. 따라서 영양염 부족, 특히 DIN의 고갈로 인해 황백화가 발생하기 때문에 김 양식이 활발히 진행되는 동계에 금강 하구둑 방류량 조절, 인근 하수처리장의 방류 수질 관리와 불법 양식어장 철거 등 해양의 영양염 농도 관리를 통한 황백화 발생 최소화 및 적정 어장 수용력과 같은 모델링 기법을 활용한 김 양식장 관리 방안 도출 등의 예방정책이 필요하다. 향후 황백화와 수온 변화에 내성이 있는 품종개량 연구 뿐만 아니라 김의 영양염 흡수율과 실시간 모니터링을 연계시켜 제한농도 이하의 영양염 농도 지속 기간을 고려한 황백화 발생 예상 기간 산정 연구가 필요할 것으로 생각된다.

4. 결 론

본 연구에서는 해양환경측정망 자료를 활용하여 김 생산성에 영향을 미치는 주요 해양환경 인자와 연계성을 분석하고, LOICZ 모델을 이용하여 금강 방류량과 강우량이 유사하지만, 황백화 현상이 발생하지 않은 2016년 2월과 황백화 현상이 발생한 2018년 2월에 비인만의 물질수지를 산정하였다.

조사 결과 환경인자의 경우 DIN, DIP의 농도가 낮을 때 황백화 현상 발생 시기와 가장 밀접한 관계를 보였고, N/P ratio가 평균 6.10으로 나타나 DIN이 김 생장에 제한요소로 작용하는 것으로 추정된다. 물질수지 산정결과 비인만의 체류시간은 1.3~2.9 days로 나타났다. 비인만의 체류시간이 짧게 나타난 것은 금강 하구 인근에 위치해 있어 하천형 만의 특성과 외해와의 교류가 원활한 개방형 만의 특성으로 인한 것으로 판단된다. 영양염수지의 경우 황백화 현상이 발생하지 않은 2016년 2월에 DIN, DIP는 각각 24,065.2 kg/day, 3,583.3 kg/day로 나타났고, 황백화 현상이 발생한 2018년 2월에는 – 9,100.3 kg/day, 99.2 kg/day로 나타나, 특히 DIN이 황백화 현상에 미치는 영향이 큰 것으로 판단된다. 따라서 김 양식장의 지속가능한 어장생산성 관리를 위해서는 김 양식장 적정 어장 수용력 산정 및 양식장으로 유입되는 물질의 부하량 파악 등 보다 체계적인 어장환경관리가 필요할 것으로 판단된다.

후 기

이 논문은 2023년도 국립수산과학원 수산과학연구사업(R2023014)의 지원으로 수행된 연구입니다. ‘해양환경측정망 자료 활용 논문 공모전’을 주최해주신 해양수산부와 해양환경측정망 자료를 제공해주신 해양환경공단에 감사드립니다.

References

[1] Chang, S.D., Chin, P. and Park, K.Y., 1983, Effects of Temperature, Salinity and Silt and Clay on the Rate of Photosynthesis of Laver, *Porphyra Yezoensis*, Bull. Korean Fish. Soc. 16(4), 335-340.

[2] Choi, Y.H., Cho, Y.S., Choi, Y.S. and Jeon, S.R., 2017, Mass Balance Using the LOICZ Model in Gomso and Geunso Bays, J. Korean Soc. Mar. Environ. Safe., 23(7), 869-877.

[3] CNI, 2017, A Study on the Utilization of Sewage Treatment Plant Effluent for the Management of Laver Discoloration in the West Coast, ChungNam Institute Report, ChungNam, Korea.

[4] Day, J.H., 1981, The Chemistry and Fertility of Estuaries in Estuarine Ecology, Eds, J. H. Day, A. A. Balkena. Rotterdam, 57-75.

[5] Dumbauld, B.R., Ruesink, J.I. and Rumrill, S., 2009, The Ecological Role of Bivalve Shellfish Aquaculture in the Estuarine Environment; A Review with Application to Oyster and Clam Culture in West Coast (USA) Estuaries, Aquaculture, 290, 196-223.

[6] Eom, K.H., Lee, W.C., Park, S.E., Hong, S.J., Kim, H.C. and Cho, Y.S., 2011, Dissolved Nutrient Balance and Net Ecosystem Metabolism using a Simple Box Model in Gamak Bay, Korea, J. Korean Soc. Marine Environ. Engineering, 14(4), 257-263.

[7] Grant, J., and Bacher, C., 2001, A Numerical Model of Flow Modification Induced by Suspended Aquaculture in a Chinese bay, Canadian J. Fish. and Aquati. Sci., 58(5), 1003-1011.

[8] Hata, K., and Abe, M., 2013, The State of the Fishing and Aquaculture seen From Material Cycling, Aquabiology, 35, 132-139.

[9] Hong, J.S., Song, C.B., Kim, N.G., Kim, J.M. and Huh, H.T., 1987, Oceanographic Conditions in Relation to Laver Production in Kwangyang bay, Bull. Korean Fish. Soc., 20(3), 237-247.

[10] Hong, S.J., Lee, W.C., Yoon, S.P., Park, S.E., Cho, Y.S., Kwon, J.N. and Kim, D.M. 2007, Reduction of Autochthonous Organics in Masan Bay using a Simple Box Model, J. Korean Soc. Mar. Environ. Safe., 13(2), 111-118.

[11] Hori, Y., Mochizuki, S. and Shimamoto, N., 2008, Relationship between the Discoloration of Cultivated *Porphyra Thalii* 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.

[12] Inoue, H., 1972, Water Exchange in a Net Cage Stocked with Fish, Hamachi, Bull. Japanese Soc. Sci. Fish., 38(2), 167-176.

[13] Ishii, M., Hasegawa, K. and Matsuyama, Y., 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.

[14] Iwasaki, H., 1965, Studies on the Physiology and Ecology of *Porphyra tenera*, J. Fac. of Fish. and Animal Husbandry, Hiroshima Univ., 6(1), 171-193.

[15] Jang, S.T. and Kim, K.C., 2006, Change of Oceanographic Environment in the Nakdong Estuary, J. Korean Soc. Ocean., 11(1), 11-20.

[16] Jung, W.S., Yoon, S.P., Lee, W.C., Kim, D.M. and Lee, D.I., 2020, Numerical Modeling for Assessment of the Hydrodynamic Field and Pollutant Impact Range in Marine Fish Cage Farm, J. Korean Soc. Mar. Environ. Energy, 23(4), 221-232.

[17] Kawaguchi, O., Yamamoto, T. and Matsuda, O., 2002, Characteristics of Water Quality in Aiake Bay, Kumamoto, Japan, in FY2000 the year of the Devastated Nori Crop, Oceanogr, Jpn. 11, 543-548.

[18] Kawamura, Y., 2012, Nori Cultivation and Nitrogen Budget in the Inner Area of Ariake Bay, Aquabiology, 34, 142-148.

[19] KHOA, Ocean data in grid framework, https://khoa.go.kr/oceangrid/gis/category/observe/observeSearch.do?type=EYS#none, 2022 (accessed 2022.10.10.)

[20] Kim, B.A., and Park S.Y., 1990, The Spatiotemporal Variation of Water Pollution in Inchon Coastal Waters, Korea, Bull. Nat'l, Fish. Res. Dev. Inst. Korea, 44, 9-25.

[21] Kim, J.B., Lee, W.C., Hong, S.J., Shim, J.H., Park, J.I., Park, J.H. and Lee, E.G., 2012, Relationship between Environmental Characteristics and Pigment Composition and Concentrations of *Porphyra yezoensis Ueda* in the Southwestern Coast of the Korean Peninsula, Korean J. Environ. Biol., 30(3), 200-209.

[22] Kim, J.H., 2019, Ecological indices-based modelling of oyster aquaculture sustainbility, Ph.D. dissertation, Dept. Ecology. Eng., Pukyong Univ., Busan, Korea.

[23] Kim, J.G., Kim, D.M. and Yang J.S., 2000, Estimation of Material Budget for Keum River Estuary using a Box Model, J. Korean Soc. Mar. Environ. Eng., 3(4), 76-90.

[24] Kim, Y.S., Kim, J.S., Kim, Y.Y. and Choi, S.Y., 2018, Analysis of Factors Underlying *Pyropia* Chlorosis near Gumgang Estuary, J. Korean Soc. Mar. Environ. Energy, 21(4), 381-386.

[25] KMA, Open MET data portal, https://data.kma.go.kr/data/publication/publicationAsosList.do?pgmNo=143, 2022(accessed 2022.10.14.)

[26] KMI, Fisheries outlook project, https://www.foc.re.kr/web/main/main.do?rbsIdx=1,2022(accessed 2022.10.15.)

[27] Lee, S.Y., Kim, Y.H., Kim S.H. and Yoo, H.I., 2019, A Study on Recovery of Discoloration of *Pyropia Yezoensis* in Laboratory Culture, J. Environ. Bio., 37(4), 719-725.

[28] LOEE, Hydrodynamic Analysis Report around Biin Bay Laver Aquaculture Farm, 2021, Land and Ocean Environment Eng. report, Korea.

[29] Ma, L.Y., 2000, Policy Direction for the Development of Laver Culture, Monthly Mar. Fish., 190, 49-54.

[30] Matsuoka, S., Yoshimatsu, S., Ono, A., Ichimi, K., Fujiwara, M., Honada, K. and Tada, K., 2005, Discoloration of Nori(*Porphyra*) and Characteristics of Water Quality in Eastern Bisan Seto, Bull. Coastal Oceanography, 43, 77-84.

[31] NFRDI, 2011, The Carrying Capacity for Laver Mariculure Farm according to Marine Ecosystem in the Southwest Coast, Korea, National Fisheries Research and Development Institute report, Busan, Korea.

[32] NFRDI, 2014, Study on the Chlorosis Phenomena in Cultivated *Phyropia*, National Fisheries Research and Development Institute report, Busan, Korea.

[33] NIFS, 2017, Seaweed Farm Damage Survey Report, National Institute of Fisheries Science report, Busan, Korea.

[34] NIFS, 2018, Laver Aquaculture Standard Manual, National Institute of Fisheries Science report, Busan, Korea.

[35] NIFS, 2021, Investigation of Factors for Calculating Fishery Productivity in Biin bay(II), National Institute of Fisheries Science Report, Busan, Korea.

[36] Powell, E.N., Kreeger, D.A., Morson, J.M., Haidvoel, D.B., Wang, Z., Thomas, R. and Gius, J.E., 2012, Oyster Food Supply in Delaware Bay; Estimation from a Hdrodynamic Model and Interaction with the Oyster Population, J. Mar. Research, 70, 469-503.

[37] Song, H.I. and Chung Y.K., 1999, A Study on the Production and Environmental Conditions of Wild-*Porphyra* Farming Area in the West Sea of Korea, Bulletin of NFRDI, 5, 83-97.

[38] Shon, C.H., 1998, The Seaweed Resources of Korea, in: Critchley, A.T., Ohno, M.(Eds.), Seaweed Resources of the World, Kanagawa International Fisheries Training Center, Yokosuka, 15-33.

[39] Tenda, M. and Harada, K., 2012, Nutrient Environment and Fishery Production in Harimananda, Eastern Seto Inland, Japan, Aquabiology, 34, 132-141.

[40] Tenda, M. and Harada, K., 2013, Action to Improve Present Conditions and That of Nutrient Environment and Future Problem in the Eastern Seto Inland Sea, Aquabiology, 35, 116-124.

[41] Wang, W.J., Sun, X.T., Liu, F.L., Liang Z.R., Zhang, J.H. and Wang, F.J., 2016, Effect of Abiotic Stress on the Gametophyte of *Pyropia katadae* var. *hemiphylla*(Bangiales, Rhodophyta), J. Appl. Phycol., 28, 469-479.

[42] Yang, C.S. and Park, S.W., 2006, Facilities Analysis of Laver Cultivation grounds in Korean Coastal Waters using SPOT-5 Images in 2005, J. Korean Soc. Marine Environ. Engineering, 9(3), 168-175.

[43] Yoo, S.G., 2003, Introduction to Aquaculture, Gu-Deok Press, Busan.

Received 28 November 2022
Revised 20 January 2023
Accepted 2 February 2023