

# 기후변화가 마로해의 김 양식에 미치는 영향 및 대응방안<sup>†</sup>

김태형\* · 신종암<sup>1</sup> · 최상덕<sup>2</sup>

\*전남대학교 어촌양식연구소 연구원, <sup>1</sup>주수중생태기술연구소 기술이사, <sup>2</sup>전남대학교 교수

## Effects of Climate Change on Purple Laver Farming in Maro-hae (Jindo-gun and Haenam-gun), Republic of Korea and Countermeasures

Tae-Hyung Kim\*, Jong-Ahm Shin<sup>1</sup> and Sang-Duk Choi<sup>2</sup>

\*Researcher, Institute of Fishing village & Aquaculture, Chonnam National University, Yeosu, 59626, Rep. of Korea

<sup>1</sup>Technology director, General Director of Technology, Underwater Ecology Institute, Yeosu, 59769, Rep. of Korea

<sup>2</sup>Professor, Faculty of Marine Technology, College of Fisheries & Ocean Science, Chonnam National University, Yeosu, 59626, Rep. of Korea

Global warming affects critical natural resources, one of which is the oceans that occupy 70% of the total cover of the earth. In other words, ocean warming is a subset of global warming which needs to be addressed urgently. Purple laver (*pyropia* spp.) is one of the most vulnerable items to climate change although it is a major export product of Korean fisheries. The purpose of this study is to analyze the causality of how climate change caused by global warming affects the increase or decrease of PLP (purple laver production). The target area for analysis was set to Maro-hae between Jindo-gun and Haenam-gun. We selected marine environmental factors and meteorologic factors that could affect PLP as variables, as well as co-integration tests to determine long-term balance, and the Granger causality tests. As a result, PLP and marine environmental factors WT (water temperature), pH, and DO confirmed that long-term equilibrium relationships were established, respectively. However, there is only causality with WT and it is confirmed that there is only a correlation between pH and DO (dissolved oxygen). There was no long-term equilibrium relationship between PLP and HDD (heating degree days) and there is a causal effect that HDD affects PLP; however, it was less clear than that of WT. The relationship between PLP and RF (rainfall), WS (wind speed), SS (percentage of sunshine), and FF (farm facilities) was all balanced in the long term, and causality exists. Based on the results of the analysis, policy proposals were made.

Keywords : Climate Change Adaptation, Purple Laver Production, Granger Causality, Aquaculture Policy

Received 04 June 2021 / Received in revised form 28 June 2021 / Accepted 29 June 2021

<sup>†</sup> 본 논문은 김태형의 전남대학교 박사학위 논문의 일부를 발췌·수정하여 게재한 논문임.

\*Corresponding author : <https://orcid.org/0000-0003-4473-3831>, +82-61-659-7578, [timothytaehyung@gmail.com](mailto:timothytaehyung@gmail.com)

<sup>1</sup> <https://orcid.org/0000-0003-0141-1170>

<sup>2</sup> <https://orcid.org/0000-0002-2516-7646>

© 2021, The Korean Society of Fisheries Business Administration

## I. 서 론

지구위험한계선(Planetary boundaries)은 인류의 지속가능한 발전을 위한 홀로세(Holocene) 상태 유지라는 과제를 해결하기 위해 반드시 보존해야 하는 영역들을 지구시스템 관점으로 제시한 개념이다. 지구위험한계선에는 기후변화, 생물다양성 손실, 생물지구화학적 순환(질소·인), 성층권 오존층 파괴, 해양산성화, 담수이용문제, 토지이용변화, 화학오염, 대기의 에어로졸 증가와 같은 9가지 행성 생명유지시스템(Planetary life support system)이 포함되어 있다. 이 중 2009년 기준으로 생물다양성 손실과 생물지구화학적 순환 2가지 문제가 이미 위험 한계선을 넘었고, 기후변화가 다음으로 무너질 위험에 처해 있다고 하였고(Rockström et al., 2009), 이후, 2015년에는 지속적인 인간 활동의 결과로 기존의 생물다양성 손실과, 생물지구화학적 순환 문제에 기후변화와 토지이용변화 2가지 문제가 새롭게 추가됨으로써 총 네 가지 지구 생명유지시스템이 지구위험한계선을 넘었다(Steffen et al., 2015).

지구의 기온은 계속 상승하고 있으며, 2015년에서 2019년까지는 가장 따뜻한 5년으로 기록되었다. 또한 2015년부터 2019년까지의 CO<sub>2</sub> 배출량은 최소 207 Gt CO<sub>2</sub>로 추정되며, 이 수치는 2010년부터 2014년까지의 배출량인 200 Gt CO<sub>2</sub>를 초과하였다(WMO, 2019). 지구온난화로 인해 전 세계적으로 평균기온은 1880년부터 2012년까지 110여 년 동안 0.85°C 상승하였고, 21세기 중반을 넘어서는 2065년까지 2.0°C 상승, 21세기 말인 2100년까지 3.7°C에서 최대 4.8°C까지 상승할 수 있다고 전망하고 있다(IPCC, 2014).

해양은 대기 중의 CO<sub>2</sub> 및 열을 흡수해 기후 완충 역할을 수행하고, 해양의 흡수 용량은 기후시스템을 좌우하는 중요한 부분이다. 하지만 인공 온실효과로 복사 불균형이 발생해 해양은 온실가스로 갇힌 열의 90% 이상을 흡수한 것으로 추정된다. 바다의 열 함유량은 2015년 이후 신기록을 달성했다(WMO, 2019). 최근 49년간(1968~2016) 한국 해역의 연평균 표층수온은 약 1.23°C 상승하여 같은 기간 전 세계 표층수온이 0.47°C 상승한 것에 비해 약 2.6배의 높은 수준을 보였다(환경부, 2020). 지속적인 해양 수온의 상승뿐만 아니라 최근에는 국지적이고 산발적인 고수온(Marine heatwaves) 발생을 우려하고 있다. 대표적으로 2011년 오스트레일리아 서쪽해역(Kataoka et al., 2014), 2012년 북서대서양 해역의 고수온 현상(Mils et al., 2013), 2013~2015년 북태평양에서의 이상고수온현상(Bond et al., 2015) 등이 있다(IPCC, 2019). 지구온난화가 지속되면 이런 고수온 현상의 발생 확률은 더욱 증가할 것이고, 지속시간과 빈도, 범위, 강도가 증가할 것으로 예측된다(Ramírez and Briones, 2017; Alexander et al., 2018).

지구온난화는 지구 표면의 70% 이상을 차지하는 바다에 여러 영향을 미치고 있고, 그 중 대표적인 3가지가 해수온상승(Ocean warming), 해양탈산소화(Ocean deoxygenation), 해양산성화(Ocean acidification)이다(Kwiatkowski et al., 2020). 지구온난화에 따른 기후변화는 전 세계적으로 다양한 영역에 영향을 미칠 것으로 예상되지만, 특히 해양생물의 번식과 분포와 같은 해양생태계에 직접적인 영향을 미친다. 또 수산물을 어획하는 어업 공동체에도 직·간접적인 영향을 끼쳐 결국 지속 가능한 어업을 불가능하게 만드는 원인이 될 것이라고 한다(박성래 외, 2010; Cisneros-Mata, M. A. et al., 2019).

김(Purple laver)은 대한민국 수산물 수출 주력상품으로, 대한민국 수산업에서 큰 비중을 차지하고 있지만, IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change) 2001년(3차)과 2007년(4차) 보고서에서의 정의에 따라 기후노출(E), 민감도(S), 적응능력(AC)을 함수로 설정하여, 양식어업을 대상으로 기후변화

취약성(V)을 평가한 결과, 김, 미역과 같은 해조류가 가장 취약한 것으로 나타났다. 이러한 취약성은 기후에 대한 노출(E)이 크거나, 민감도(S)가 높지만, 적응능력(AC)이 낮기 때문이다(환경부, 2020). 이처럼, 김 양식은 수온에 민감해 기후변화에 취약한 품종으로 분류되었고, 김 양식 산업은 기후변화라는 큰 변화의 물결 앞에 놓여 있다(Kim et al, 2019). 한 예로, 꾸준히 증가하던 김 생산량은 2019년 김 양식 순기(循期) 초기 잦은 태풍으로 인해 시설물 피해가 있었고, 2019년 말부터 2020년 초, 겨울 이상 고수온 현상으로 2020년 1월까지 김을 포함한 해조류의 생산량이 2019년 동기 대비 20% 가까이 감소하였다. 여기서 문제는 겨울철 고수온 현상이 당해 연도만의 문제가 아닌 지구온난화 현상에 따른 것이므로 앞으로도 같은 피해가 빈번할 것으로 예상된다(백은영 외, 2020).

이처럼 김은 우리나라 수산업에서 큰 비중을 차지하는 품종이지만 기후변화에 취약한 품종으로 알려져 있다. 하지만 기존의 많은 선행연구에서는 기후변화가 해양생태계에 미치는 영향을 주로 분석하였고, 기후변화가 김에 미치는 영향에 대한 분석은 제한적이다. 따라서 기후변화에 따른 취약성을 보완하고 위기에 대처해 나가야 한다는 판단에 본 연구를 진행하게 되었고, 본 연구의 목적은 지구온난화에 따른 기후변화가 양식 김의 주산지인 전라남도 마로해역에서의 김 생산량의 증감에 어떤 영향을 미치는지 기후변화와 김 생산량 간의 인과성을 분석하는 것이다. 인과성 분석을 위해 김 생산량에 영향을 미칠 수 있는 지구온난화에 따른 해양환경 요소와 기후요소를 변수로 선택하여 공적분검정과 Granger 인과검정을 이용하여 분석하였다.

## II. 분석 자료 및 방법

### 1. 연구 대상 해역

본 연구의 공간적 범위는 진도군과 해남군 김 양식장이 집중된 전국 최대 김 양식장인 마로해역으로 설정하였다(그림 1). 이 지역은 지리적으로 한국의 남해안과 서해안의 중간지점이며 풍부한 영양염



<그림 1> 마로해(진도군-해남군) 김 양식장 현황

과 유속이 빠른 지정학적 요인으로 김 양식이 많이 이루어지는 한국 김 양식의 주산지이다(김정배, 2016). 2019년 계통판매 기준으로 이 지역의 김 생산량은 한국에서 생산되는 전체 김 생산량의 36%를 차지하였다(해양수산부, 2019).

## 2. 분석자료 및 변수설정

기후변화가 종속변수인 마로해의 김 생산량(PLP)에 미치는 영향을 분석하기 위한 설명변수로 지구 온난화가 바다에 영향을 미치는 대표적인 해양환경 요소인 수온(WT), pH, 용존산소(DO)와(Kwiatkowski et al., 2020), 기후의 3요소인 기온 정보를 재가공한 난방도일(HDD), 강수량(RF), 풍속(WS)을 선택하였

<표 1> 변수설정 근거 및 출처

변수		근거 및 출처
종속 변수	김 생산량(PLP)	진도군 · 해남군(마로해역)에서 생산되는 김 생산량
	PLP 출처	해양수산부 수산정보포털, 2005년 10월~2020년 4월, 진도군, 해남군 수협 계통판매자료
설명 변수	수온 (WT)	김의 생장에 필요한 첫 번째 환경요인으로 수온이 있다. 겨울철 수온이 3°C 이상이며, 5~8°C(최적 수온) 기간이 3개월 이상 유지되는 곳이 김 양식에 가장 적합한 환경이다. 즉, 김 양식의 성패를 좌우하는 핵심 환경요인은 수온이다(홍재상 외, 1987).
	pH	해양산성화는 식물플랑크톤과 동물플랑크톤을 감소시키고, 무척추동물과 해조류의 성장과 번식에 부정적인 영향을 주게 되어 수산자원의 감소를 초래하게 된다(김충재, 2018).
	용존산소 (DO)	용존산소의 감소는 해양 생산력, 생물다양성, 생화학적 순환에 큰 변화를 줄 수 있다 (Breitburg, D. et al, 2018). 전 세계적으로 지난 50년간 저산소 해역은 10배, 무산소 해역은 4배가 증가했다(김충재, 2018).
	WT, pH, DO 출처	2005년~2019년까지: 해양환경정보포털, 해양환경측정망 2020년 2월 자료: 국립수산과학원, 어장환경모니터링
	난방도일 (HDD)	기온은 영하로 내려가는 경우, 시계열분석의 차분을 통한 자료 가공이 쉽지 않아, 본연구에서는 기후 정보를 재가공한 정보인 기후응용정보 냉방/난방도일 지표를 활용했다. 냉방/난방도일은 날씨의 춥고 더운 정도를 표시하는 지수로서, 매일의 일 평균기온과 기존 온도의 차이를 일별로 누적해, 일평균기온이 기준온도보다 낮으면 난방도일, 높으면 냉방도일이라고 한다. 즉 난방도일 값이 크다는 것은 날씨가 춥다는 것을 의미하고 국내에서는 난방도일의 기준 온도를 18°C 이하로 정하고 있다(기상청, 2020). 기온과 난방도일은 대칭을 이루고 있어, 난방도일로 추정할 값의 반대가 기온이라고 판단할 수 있다.
	강수량 (RF)	김의 생장에 필요한 환경요인인 영양염류의 함유량을 결정하는 강수량은 김 작황에 중요한 요소이고 강수량의 증감에 따라 김 작황의 성패 여부가 갈리기도 한다(Tada et al., 2010).
	풍속 (WS)	김 양식을 하는 어민들은 김은 바람을 맞아야 잡풀도 떨어지고 껌병 예방도 된다고 한다. 풍속은 미래에도 기후변화의 영향을 받지 않고 큰 변화가 없을 것으로 전망되고 있다(기상청, 2018).
	일조율 (SS)	일조율은 어떤 날의 실제의 일조시간과 가조시간의 비를 가리킨다. 일조율은 해조류 군집에 영향을 미쳐, 어업기상에 많이 쓰이고 있다(Hedberg et al., 2018).
	HDD, RF, WS, SS 출처	기상자료개방포털 2005년 10월~2020년 4월, 진도점철산(175) 기상대가 2019년 관측 종료하는 관계로 진도군(268) 기상대와 혼합(Pooling)하여 활용하였고, 다만 풍속자료의 경우 두 기상대의 위치에 따라 자료의 편차가 있음을 역시 사전에 명기함
	시설량 (FF)	시설량을 추가한 이유는 시설량이 증가하면 김 생산량도 증가할 것이라는 기본 가설을 기각할 만한 지구온난화에 따른 기후변화로 인한 김 양식장 환경변화와 김 생산량 감소의 현상을 분석해 보기 위함
FF 출처	KMI 수산업관측센터 수산관측 해조류 월보, 2005~2020년 연도별 전라남도 시설채수를 발췌 정리하였고, 진도, 해남 각각의 자료를 확보하는 것은 한계가 있어서 진도군-해남군 두 지역의 생산량이 전남에서 가장 큰 비중을 차지해 전남 전체 시설채수의 연도별 변화와 큰 차이가 없다고 판단하여 분석에 이용함	

주 1) 김 생산량(Purple laver production, PLP), 수온(Water temperature, WT), 수소이온농도(Hydrogen ion concentration, pH), 용존산소(Dissolved oxygen, DO), 난방도일(Heating degree day, HDD), 강수량(Rainfall, RF), 풍속(Windspeed, WS), 일조율(Percentage of sunshine, SS), 시설량(Farm facilities, FF).

&lt;표 2&gt; 기초통계량

변수명	평균	중간값	최고값	최저값	표준편차	J-B	p-value	관측치수
PLP (kg)	14874512	8171700	60212819	1	14837483	26.974	0.000001	119
WT (°C)	12.727	15.165	18.33	4.92	4.246	6.328	0.042	44
pH	8.078	8.09	8.453	7.545	0.166	18.369	0.0001	44
DO (mg/L)	9.002	8.818	11.467	5.913	1.336	0.625	0.732	44
HDD (°C · days)	10.185	10	22.5	2.4	5.387	7.731	0.021	119
RF (mm)	81.327	60.4	297	2.9	64.483	33.654	0	119
WS (m/s)	4.255	4.7	6.8	1.7	1.432	11.173	0.0038	119
SS (%)	49.616	49.32	69.65	27.56	10.213	4.006	0.135	119
FF (10,000)	58.137	57	85.6	40.9	12.048	11.556	0.0031	119

주 1) 변수명 약자는 <표 1> 참조

고, 추가적으로 일조율(SS)과 시설량(FF) 변수를 선택하여 각각의 인과성 규명을 시도하였다. 분석에는 Eviews software를 사용하였고, 이용 가능한 각 변수를 선택한 근거와 분석자료 출처는 <표 1>과 같다.

변수의 기술통계량은 <표 2>와 같으며, 먼저 이 변수들의 정규분포 여부를 확인하기 위하여 Jarque-Bera(J-B) 검정을 하였다. J-B는 시계열 자료의 정규분포를 검정하는 통계량으로, 정규분포는 왜도 ‘0’, 첨도 ‘3’ 일 때, J-B 통계량은 ‘0’이 된다. J-B 통계량의  $H_0$ (귀무가설)는 ‘시계열 자료는 정규분포를 따른다.’이고,  $H_1$  (대립가설)은 ‘시계열 자료는 정규분포를 따르지 않는다.’이다. 김 생산량(PLP), pH, 강수량(RF), 풍속(WS), 시설량(FF)은  $H_0$ 가 1% 유의수준에서, 수온(WT), 난방도일(HDD)은 5% 유의수준에서 모두 정규성이 기각되어 이 일곱 가지 시계열 자료는 실증분석에서 분포 형태가 정규분포를 따르지 않는 것으로 나타났고, 용존산소(DO)와 일조율(SS)은  $H_0$ 가 10%의 유의수준에서도 기각할 수 없어 정규성을 띠는 것으로 나타났다.

시계열자료의 단위근검정과 공적분검정을 하기 위해서는 일반적으로 각 변수들의 원자료 값보다 자연로그(ln)를 취한 값을 근거로 하여 인과성을 검정 분석한다(유승훈, 2003). 본연구에서도 모든 변수는 원자료의 값을 ln으로 변환하여 분석을 진행하였다.

### 3. 분석방법

시계열 자료 분석에서 시계열 자료의 안정성(Stationarity) 여부 파악은 가장 우선적으로 고려되어야 할 중요한 문제이다. 단위근검정(Unit root test)이란 시계열 자료의 안정성을 검정하는 방법으로 요한슨 공적분검정(Johansen cointegration test)에 앞서 선행적으로 시행하는 사전검사이다.

단위근검정에는 Augmented Dickey Fuller(ADF) 검정, Philips-Perron(PP) 검정, Dickey-Fuller(DF) 검정이 있다. William Schwert(1987, 2002)는 Monte-Carle의 사례를 근거로 하며 PP 검정이 불안정한  $H_0$ 를 기각하는 경향이 있어 일반적으로 단위근검정에서 가장 많이 사용되는 ADF 검정을 이용하는 것을 권하고 있다. ADF 검정은 DF 검정의 자기상관 문제를 해결하기 위해  $\mu_t$ 의 차분변수의 시차변수를 설명변수로 포함시켜  $\rho=1$ 이라는  $H_0$ 를 검정한다.

단위근검정은 단일 시계열에 대한 검정이고, 공적분검정은 변수 집단 간의 관계에 대한 검정이다. 공적분검정으로는 장기적 관점에서 균형 관계를 파악할 수 있는 다변량 시계열분석에 의한 요한슨 공적분검정(Johansen's cointegration test)을 사용하였고, 이 방법이 공적분검정에서 가장 우수하다고 알려

져 있고, 보편적으로 사용되고 있다. 시계열 변수 각각은 불안정하고 비정상적이거나 시계열 변수의 선형결합이 정상적이고, 그 변수들끼리 동일한 공동추세(Common trend)를 공유하고 있다면, 변수들 사이의 관계는 장기적으로 균형적인 관계(Long-run equilibrium relation)를 갖는데 이를 ‘공적분 관계가 있다.’라고 하며, 가성회귀 문제를 해결할 수 있다고 한다(배영수, 2015).

Granger 인과검정(Granger causality test)은 한 변수가 다른 변수를 예측하는 데 도움이 되는지, 도움이 되지 않는지를 검정하는 방법으로 ‘Granger 인과관계가 없다.’라는  $H_0$ 가 기각되는 경우에 Granger 인과관계가 성립된다. Granger 인과관계 검정에 대한 분석은 다음과 같은 두 개의 회귀방정식 모형으로 나타내며,  $H_0 : \alpha_i = 0$  또는  $H_0 : \lambda_i = 0$ 을 검정한다. 오차항인  $\mu_t$ 는 상호 독립적이고 iid(Independently and identically distributed)이다(Engle and Granger, 1987).

$$Y_t = \sum_{i=1}^j \alpha_i X_{t-i} + \sum_{k=1}^k \beta_k Y_{t-k} + \mu_{1t}$$

$$X_t = \sum_{i=1}^j \lambda_i Y_{t-i} + \sum_{k=1}^k \delta_k X_{t-k} + \mu_{2t}$$

Granger 인과검정은 시차(Lag) 수에 민감하므로 적정시차(Optimal lag length)를 선택하는 것이 중요하다. 월별 자료의 경우, 시차의 항이 1, 4, 6, 12, 24 등의 시차 항의 범위를 선택할 수 있고, 분기 자료의 경우에는 범위를 좁혀 1, 4, 6, 12 등을 선택할 수 있고, 연간 자료는 그 범위를 훨씬 작게 설정하여야 한다. 결국 적정시차는 F-값의 유의한 변화에 의해서 결정된다.

즉, 본연구에서 공적분검정은 변수 간의 장기적 균형적인 관계를 파악하기 위함이고, Granger 인과검정은 변수 간의 원인과 결과변수를 확인하기 위함이지만, Granger 인과성 검정 결과에서 주의할 점은 변수 X가 변수 Y와 인과관계가 있다는 것은 두 변수의 예측을 도운다는 것이지 확실한 인과관계가 있다는 의미가 아님을 주의해야 한다.

### III. 결 과

#### 1. 단위근검정(Unit root test) 결과

변수 각각의 시계열 자료가 안정적인지 확인하기 위해 단위근검정인 ADF 검정을 실시하였다. ADF 검정 결과, 김 생산량(PLP), 수온(WT), pH, 강수량(RF), 일조율(SS)은 1% 유의수준에서  $H_0$ 가 기각되어 안정적인 시계열로 나타났고, 나머지 변수는 5% 유의수준에서  $H_0$ 를 기각할 수 없어 불안정한 시계열로 판단되어 1차 차분을 진행하였다. 그 결과, 나머지 용존산소(DO), 난방도일(HDD), 풍속(WS), 시설량(FF)이 1차 차분에서 모두 1% 유의수준에서  $H_0$ 가 기각되어 불안정했던 변수들이 안정적인 시계열로 전환되었다(<표 3>).

단위근검정 다음으로는 적정시차를 결정해야 한다. 적정시차를 도출하기 위한 정보기준(Information criterion)에는 Final Prediction Error(FPE), Akaike Information Criterion(AIC), Schwarz Criterion(SC), Hannan Quinn(HQ)가 있다. 본 분석에서는 일반적으로 차수의 결정 시 이용되는 AIC와 SC를 함께 이용했다.

**<표 3> ADF 단위근 검정 결과**

변수	PLP (kg)	WT (°C)	pH	DO (mg/L)	HDD (°C·days)	RF (mm)	WS (m/s)	SS (%)	FF (10,000)
수준변수(ln)	-8.485 ***	-4.277 ***	-3.786 ***	-2.798 *	-1.776	-8.946 ***	-2.567	-8.275 ***	0.026
1차 차분변수(dln)	-	-	-	-14.569 ***	-18.259 ***	-	-13.590 ***	-	-10.864 ***

주 1) 변수명 약자는 <표 1> 참조

2) \*\*\*: 1%, \*\*: 5%, \*: 10% 유의수준에서 통계적 유의성이 있음.

**<표 4> 적정시차와 요한슨 공적분검정 결과**

변수	귀무가설(Ho)	Trace Statistic	0.05 임계치	p - value **	lags	criterion
	No. of CE(s)					
WT pH DO	None * $\gamma = 0$	340.5837	197.3709	0.0000	2	AIC
	At most 1 * $\gamma \leq 1$	211.1605	159.5297	0.0000		
	At most 2 * $\gamma \leq 2$	132.4281	125.6154	0.0180		
	At most 3 $\gamma \leq 3$	89.56111	95.75366	0.1236		
HDD	None $\gamma = 0$	13.78006	15.49471	0.0892	8	AIC
	At most 1 $\gamma \leq 1$	2.586805	3.841466	0.1078		
RF	None * $\gamma = 0$	92.48557	15.49471	0.0000	1	SC
	At most 1 * $\gamma \leq 1$	42.95411	3.841466	0.0000		
WS	None * $\gamma = 0$	46.10636	15.49471	0.0000	2	SC
	At most 1 $\gamma \leq 1$	2.245852	3.841466	0.1340		
SS	None * $\gamma = 0$	72.75356	15.49471	0.0000	2	AIC
	At most 1 * $\gamma \leq 1$	28.29805	3.841466	0.0000		
FF	None * $\gamma = 0$	46.41412	15.49471	0.0000	1	SC
	At most 1 $\gamma \leq 1$	0.001978	3.841466	0.9612		

주 1) 변수명 약자는 <표 1> 참조

2)  $\gamma$  는 공적분 벡터(cointegration rank).

수온(WT), pH, 용존산소(DO)와 김 생산량 간의 요한슨 공적분검정 결과 ‘None’부터 ‘At most 2’까지의 Ho는 유의수준 0.05에서 기각되어 95% 신뢰수준에서 2개의 공적분 벡터가 존재함을 확인하였다. 즉, 수온(WT), pH, 용존산소(DO)와 김 생산량(PLP) 간의 관계에서 장기적 균형 관계가 성립하는 것이 확인되었다. 난방도일(HDD)과 김 생산량(PLP) 간에는 공적분이 발견되지 않아 VAR을 이용하여 두 변수 간의 균형 관계를 살펴본 결과, 난방도일(HDD)은 시차 8에서 양(+)의 관계로 5% 유의수준에서 유의한 것으로 나타나서 장기적인 관계는 확인되지 않았고, 두 변수의 단기 관계 역시 약하다고 볼 수 있다. 강수량(RF), 풍속(WS), 일조율(SS), 시설량(FF)은 각각 김 생산량(PLP)과 1개의 공적분이 존재해 장기적으로 균형 관계가 있다(<표 4>).

## 2. Granger 인과검정

기후변화에 따른 변수들과 김 생산량 간의 인과관계 검증을 위한 Granger 인과성 검정 결과는 <표 5>와 같다. 수온(WT)과 난방도일(HDD)은 1%, 강수량(RF)과 일조율(SS)은 10%, 풍속(WS)과 시설량(FF)은 5% 유의수준에서 Ho가 기각되어 김 생산량(PLP)에 영향을 주는 변수로 pH와 용존산소

<표 5> Granger 인과검정 결과

귀무가설 (Ho)	lags	F - value	p - value	분석결과
WT $\nRightarrow$ PLP	2	20.7551	9.E-07***	WT $\Rightarrow$ PLP
pH $\nRightarrow$ PLP	2	0.10248	0.9028	pH $\nRightarrow$ PLP
DO $\nRightarrow$ PLP	2	0.87183	0.4266	DO $\nRightarrow$ PLP
HDD $\nRightarrow$ PLP	8	3.13805	0.0034***	HDD $\Rightarrow$ PLP
RF $\nRightarrow$ PLP	1	3.62471	0.0594*	RF $\Rightarrow$ PLP
WS $\nRightarrow$ PLP	2	3.14053	0.0471**	WS $\Rightarrow$ PLP
SS $\nRightarrow$ PLP	2	2.64265	0.0756*	SS $\Rightarrow$ PLP
FF $\nRightarrow$ PLP	1	5.58093	0.0198**	FF $\Rightarrow$ PLP

- 주 1) 변수명 약자는 <표 1> 참조  
 2)  $\nRightarrow$ 는 does not granger cause.  
 3) \*\*\*: 1%, \*\*: 5%, \*: 10% 유의수준에서 통계적 유의성이 있음.

(DO)는 김 생산량에 영향을 주지 않는 변수로 확인되었다. 즉, 수온(WT), 난방도일(HDD), 강수량(RF), 풍속(WS), 일조율(SS), 시설량(FF)은 김 생산량과 인과성이 존재하는 것을 확인할 수 있다.

#### IV. 고 찰

기존 선행연구에서는 고수온으로 평년보다 수온(WT)이 높으면 김 생산량이 감소하고, 평년보다 수온(WT)이 낮으면 김 생산량이 증가한다고 하였고(이충일·김현주, 2007), 기후요인과 해양환경 요소 중, 기온과 수온(WT)은 김 생산량과 음의(-) 선형관계를, 강수량(RF), 풍속(WS), 일조율(SS)은 김 생산량(PLP)과 양(+의 선형 상관성을 보였다(권정노 외, 2013).

본 연구결과, 김 생산량(PLP)과 해양환경요인인 수온(WT), pH, 용존산소(DO)는 각각 장기적 균형 관계가 성립하는 것을 확인하였지만, 수온(WT)과는 인과성이, pH, 용존산소(DO)와는 상관관계만 있는 것으로 판단된다. 김 생산량(PLP)과 난방도일(HDD)은 장기균형관계는 존재하지 않았고, 난방도일(HDD)이 김 생산량(PLP)에 영향을 미치는 인과성은 있지만, 수온(WT)보다 명확하지 않았다. 김 생산량(PLP)과 강수량(RF), 풍속(WS), 일조율(SS), 시설량(FF) 각각의 관계는 모두 장기적으로 균형 관계가 성립하였고, 인과성이 존재한다. 기후변화의 요소들과 김 생산량 간의 분석을 통해 각각의 두 변인의 관계는 단순한 우연을 통한 ‘상관관계’가 있든지, 혹은 하나의 변인이 다른 변인의 원인이 되는 ‘인과관계’가 있음을 확인하였다. 즉 상관관계가 있다는 것이 반드시 인과관계가 있다는 것을 보장하는 것이 아닌 것을 확인하였고, 인과성을 결정할 수 있을 때 비로소 더 나은 모형이 가능하고 예측이 가능하다.

결국, 본 연구결과와 선행연구를 종합해 보면, 수온(WT)은 김 생산량에 부(-)의 영향을 미치며, 김 생산량 증감을 결정하는 가장 핵심 요소이고, 기온(AT)은 수온(WT)과 같이 김 생산량에 부(-)의 영향을 미치지만, 장기균형관계가 존재하지 않고 기온 상승에 따른 수온의 반응은 각 해역에서 차이를 보인다. 따라서 기온(AT)은 수온(WT)보다 김 생산량에 덜 영향을 미치는 것으로 판단된다. 또한 pH와



용존산소(DO) 역시 김 생산량에 미치는 영향은 미미한 것으로 보인다. 강수량(RF), 풍속(WS), 일조율(SS), 시설량(FI) 각각은 김 생산량과 장기적으로 균형관계가 성립하기 때문에 정(+), 부(-)로 김 생산량에 영향을 미치는 것으로 판단된다. 따라서 지속적인 김 양식을 위해서는 다른 어떤 변수보다도 수온(WT)의 변화에 민감하게 대처할 필요가 있다.

본 연구는 우리나라 김 양식의 주산지인 진도군과 해남군 김 양식장이 집중된 마로해역이라는 일정 지역을 대상으로 선택하여 기후변화가 김 생산량(PLP)에 미치는 영향을 분석하였다. 한편 기후변화는 어느 특정한 해역에만 일어나는 현상이 아닌 우리나라 동·서·남해안에 보편적으로 적용된다. 국립수산과학원이 진행했던 기후변화 양식업 취약성 평가 결과에서 기후 노출에 대한 취약성은 품종 간에는 큰 차이가 나지만, 한 품종 내에서 생산 지역 간의 차이는 크지 않다는 결과와 일맥상통하다(국립수산과학원, 2019). 따라서 진도군과 해남군의 마로해역 김 양식어업 대응방안은 곧 김 양식업 전체의 대응방안으로 봐도 무관할 것이라고 판단된다.

## V. 결론 및 정책제언

본 논문의 분석결과를 통해 기후변화와 김 생산량 간의 인과성 분석이 매우 중요한 의미가 있음을 확인하였다. 이를 기반으로 정책의 빈 곳을 찾고 새로운 정책을 도입해야 하며, 단편적인 접근이 아닌 종합적인 접근 방식이 필요하다. 앞의 분석결과와 기존 문헌을 바탕으로 지속가능한 김 양식어업 대응방안을 위한 정책적 제언은 다음과 같다.

첫째, 김 양식 시기이다. 우선 기후변화와 같은 외부영향으로부터 안정적으로 김을 채모할 수 있는 시스템 구축이 필요하다. 일본에서의 김 종자 인공채묘는 육상채묘와 해상채묘가 거의 반반의 비율로 이루어지고 있다(백은영, 2015). 반면 국내의 경우, 해상채묘가 70%, 육상채묘는 30%로 해상채묘의 비중이 높다(국립수산과학원, 2018). 그 이유는 기존 시설에서 전환할 때 드는 경영비 부담 때문이다(백은영, 2017). 육상채묘는 육상에서 회전수차로 그물을 감으며 채묘하는 방식으로 저온 냉동망 보관 시설에 씨앗 밭을 저장했다가 필요 시 사용할 수 있어 해상채묘에 비해 수온 상승 및 태풍과 같은 외부의 영향을 적게 받고 김 생산성의 불안정성을 해소할 수 있어 안정적인 채묘가 가능하므로 육상채묘의 확대가 필요하다. 다만, 일부 김 양식어가에서는 육상채묘를 위한 김망은 작업 효율성이 낮다는 인식이 있어, 육상채묘 선호도가 높지 않은데, 육상채묘 확대를 위해서는 김 양식어가 니즈에 부합하는 재질과 규격의 김망을 공급해 김망에 대한 인식 개선이 선행되어야 한다.

또한 김 채묘시기와 관련하여 해상채묘는 수온이 20~23°C 이하로 내려갈 때 채묘를 하는 것이 가장 좋다. 해상채묘의 채묘장은 보통 육지에서 가까운 앞바다에 있고, 주로 사상체 패각을 투입하고 비닐봉투를 씌운 후 채묘작업을 한다. 김 생산량 작황여부는 대체로 채묘시기의 수온에 따라 결정되는데 KMI에 따르면 2019년 10월부터 2020년 1월까지 김 생산량이 전년 같은 기간보다 24% 이상 감소했다고 한다(KMI, 2020). 김 생산량이 감소한 원인으로는 겨울철 고수온 원인과 함께 관성적으로 진행된 채묘시기를 꼽을 수 있다. 마로해역의 경우, 진도군 관내에서 양식할 잇바디돌김은 9월 7일 이후, 모무늬돌김과 방사무늬김은 9월 26일 이후에 채묘할 것을 권고하였고, 해남군 관내에서 양식할 잇바디돌김은 9월 24일 이후, 모무늬돌김과 방사무늬김은 10월 7일 이후에 채묘를 진행하도록 권고하였다(전라남도 해양수산과학원, 2020). 따라서 김 생산량 감소를 예방하기 위해서는 관련 기관의 보도자

료 등을 통한 수온 자료를 참고해서 채묘를 하는 것이 가장 효율적인 방법이다(현대해양, 2020). 또한 김 채묘시기와 관련하여 김 양성시기 조절을 통해 겨울철 고수온 현상에 따른 김 생산량 피해를 최소화하도록 해야 한다.

둘째, 고수온에서도 잘 성장하는 환경 내성이 강하고 각 지역에 적합한 새로운 김 종자 개발과 보급이다(Brander et al., 2017; Ruckelshaus et al., 2013). 2019년 말에서 2020년 초, 겨울철 고수온 현상으로 남해안은 평년보다 작황이 많이 부진했지만, 경기도 서해 일대는 작황이 역대 최대였다는 소식에서 확인할 수 있듯이 고수온에서도 잘 성장하는 김 종자 개발 및 보급이 김 산업의 근간을 유지할 수 있는 조건이다(백은영 외, 2020).

마로해역에서 양식하는 김 품종을 보면, 진도군의 경우 방사무늬김 신품종이 59.0%, 잇바디돌김 25.4%, 모무늬돌김 9.8%, 방사무늬김 기존품종 5.7%의 순이고, 해남군은 방사무늬김 신품종 56.4%, 잇바디돌김 25.5%, 방사무늬김 기존품종 11.4%, 모무늬돌김 6.7%로 두 지역 모두 신품종의 비중이 절반 이상을 차지하고 있고(KMI 수산물센터 2019년 기준), 김 신품종 중에서도 일반 개각사상체보다 15일 정도 성장이 빠르고, 업체의 성장도 일반김보다 10일 이상 성장이 빨라 수확량이 많고, 내병성이 강한 해풍 1호를 가장 많이 양식하고 있다(전라남도 해양수산과학원, 2020). 김 양식 어민들은 김 업체의 형질이 뻗뻗하지 않고, 색은 검고, 윤기가 나며, 강한 내병성을 지닌 품종을 선호한다.

김 산업의 근간인 김 종자 개발과 생산을 확고히 해야 기후변화에 대비한 김 산업의 경쟁력을 확보할 수 있다. 효과적인 김 수산종자 개발과 보급을 위해서는 UPOV(International Union for the Protection of New Varieties of Plants) 협약에 따라 모든 작물은 품종 보호의 대상이 되고, 누구나 육종을 해서 등록이 가능하기 때문에, 민간육종에 대한 꾸준한 정책적 지원과 함께 김 양식어가에 대한 신품종 지원과 피드백을 통한 맞춤형 보급을 고려해 볼 수 있다.

셋째, 어장정비와 먼바다로의 확장이다(환경부, 2020). 어장의 밀집, 과잉시설로 인해 밀식이 점차 심해지고 있지만, 김 수출이 늘어날수록 김 양식어가의 김 시설 설치 의향은 더욱 높아질 것이다. 하지만 밀식 양식은 어장을 오염시키고 어장 생태계에 좋지 않은 영향을 미치며, 기후변화에 따른 김 생산량 감소를 더욱 가속시키는 또 하나의 원인이 되고 있다. 따라서 항공사진과 인공위성 영상을 이용해 김 양식 어장의 정확한 실태를 파악해, 오염되고 오래된 내만의 어장 정비가 필요하다. 또한 어장환경수용력을 주어진 어장환경이 유지할 수 있는 최대 개체군 또는 생물량이라고 정의하는데, 김 양식장에서 품질 좋은 김을 지속적으로 생산하기 위해서는 주기적인 어장 수용력 산정을 통해 어장을 정비해 나갈 필요가 있다(임효혁 외, 2003). 그리고 내만의 경우, 양식장이 밀집되어 있을 뿐 아니라 먼바다보다 해수의 소통이 원활하지 않고 수온도 쉽게 상승하는데, 해수의 소통이 원활한 먼바다로의 어장 이전과 설치를 고려할 필요가 있다. 이를 위해 환경변화에 대한 양식생물의 적응력과 생산력 변화에 대한 지속적인 모니터링과 연구, 그리고 철저한 사전 환경 조사로 최적 양식지를 선정해 김 생산 단지화를 구축하고 통합관리할 필요가 있다(환경부, 2020).

넷째, 위에 언급한 양식시기, 종자개발과 보급 및 어장정비와 확장에 관련된 환경요인들과 김 생산량의 자료를 수집하고, 빅 데이터(Big data)화 하여 축적해 두어야 할 것이다. 김 생산량은 양식시기와 종자 및 해역에 따라 달라지기 때문에, 최대생산량을 얻기 위해 데이터창고(Data warehouse)(Kelleher · Tierney, 2018)를 만들어 두어야 한다. 김도 본성과 양육(Nature via nurture)(Ridley, M., 2003)이라는 틀에서 벗어나지 못하기 때문이다.

본 연구의 한계점과 향후 연구과제로는 본 연구는 진도군과 해남군 김 양식장이 집중된 마로해역을 대상으로 기후변화와 김 생산성 간의 인과성을 분석하였지만, 김 생산량을 예측하기까지는 연구가 이루어지지 않았다. 김 생산량을 결정하는데 많은 변수가 유기적으로 작동을 하고, 지역별, 기간별, 기상 자료와 해양환경 요소의 자료 확보가 쉽지 않아, 이를 예측하는 것이 결코 쉬운 과정은 아니다. 따라서 앞으로 적극적으로 자료를 수집하여 축적된 빅데이터를 기반으로 김 생산량을 예측할 수 있도록 해야 한다. 즉, 데이터과학 기반 양식(Data science-based aquaculture)으로 나아가야 한다. 또한 본 연구는 마로해를 대상으로 기후변화와 김 생산량 간의 인과성을 분석하였는데 향후, 서해안 일대인 충남 서천지역과 동남해안 일대인 낙동강 하구의 김 양식장 일대와 비교 연구를 할 필요가 있다고 본다. 그리고 ‘김(Purple laver)’ 뿐만 아니라, 다양한 수산물 품종에 대한 기후변화와의 인과성 분석을 통해 생산량 변화를 정량적으로 예측해 보는 후속 연구가 필요하다고 생각된다. 또한 김 양식 산업은 관련 전방산업과 후방산업을 잇는 중요한 산업이며, 김 산업의 근간이다. 따라서 김 산업의 지속가능성 혁명(Sustainability revolution)의 방향을 정립하여 청색혁명의 기틀을 다져야 한다.

## REFERENCES

- 국립수산과학원(2018), “수산양식기술(김) 매뉴얼”, ISBN 979-11-964926-3-2.
- \_\_\_\_\_ (2019), “수산분야 기후변화 평가 백서”.
- 권정노 · 심정희 · 이상용 · 조진대(2013), “낙동강 하구 해양환경 및 기상 요인이 김(*Porphyra yezoensis*) 생산량 변화에 미치는 영향”, *Korean Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 46(6), 868-877.
- 기상청(2018), “한반도 2018 보고서”.
- 김정배(2016), “안정동위원소 및 Diving-PAM 을 이용한 남서해안 만호해역 (진도-해남) 김 양식장에서의 일차 생산력”, *환경생물*, 34(1), 18-29.
- 김충재(2018), “기후변화가 초래한 수산업의 위기와 강원도의 대응 방향”, 강원연구원, 정책메모, 1-3.
- 김태형(2020), “기후변화와 김 생산량 간의 인과성 및 김 위판 가격예측모형”, 박사학위논문, 전남대학교, 1-157.
- 박성래 · 권혁준 · 박종운 · 차철표(2010), “기후변화와 수산업의 관계에 관한 연구”, *수산해양교육연구*, 22(3), 388-401.
- 배영수(2015), “공적분 기법을 이용한 중장기 에너지 수요함수 추정 및 전망”, *에너지경제연구*, 14(2), 21-50.
- 백은영(2015), “일본의 김종묘생산 현장방문기”, *수산관측 리뷰*, 한국해양수산개발원, 3, 73-81.
- \_\_\_\_\_ (2017), “한국 김 종자 생산현황과 발전방안에 관한 연구”, *한국도서연구*, 29(2), 53-71.
- 백은영 · 노아현 · 김기완 · 이남수(2020), “이상 고온으로 해조류 공급차질 우려, 수급관리체계 재정비 필요”, *KMI 동향분석*, 166, 1-18.
- 우경숙 · 신영전(2014), “체계적 문헌고찰을 통한 국내 보건복지 분야의 시계열 분석 연구 동향”, *한국데이터정보과학회지*, 25(3), 579-599.
- 유승훈(2003), “정부 R&D 투자와 민간 R&D 투자의 인과관계 분석”, *기술혁신연구*, 11(2), 175-193.
- 이충일 · 김현주(2007), “멸치와 김 생산량 변동에 미치는 수온의 영향”, *한국환경과학회지*, 16(8), 897-906.
- 임효혁 · 강대석 · 남정호(2003), “연안유역관리를 위한 해양환경수용력 평가모델의 활용 개선방안”, *해양정책연구*, 18(1), 33-69.
- 전라남도, 해양수산과학원(2020), “전남도, 2021년산 김 양식 채묘적기 예보”.
- 해양수산부, 수산정보포털 Available at: <https://www.fips.go.kr/>
- 해양수산부, 해양환경측정망 Available at: <https://www.meis.go.kr/mei/observe/port.do>.
- 현대해양(2020), “김 생산 적신호, 관성적 채묘 중단해야”. Retrieved from <http://www.hdhy.co.kr/news/articleView>.

html?idxno=11913.

- 홍재상 · 송춘복 · 김남길 · 김종만 · 허형택(1987), “광양만의 김 생산과 양식장환경과의 관계에 대하여”, 한국수산과 학회지, 20(3), 237-247.
- 환경부(2020), “한국 기후변화 평가보고서 2020: 기후변화 영향 및 적응”, ISBN 978-89-93652-58-1.
- Alexander, M. A., Scott, J. D., Friedland, K. D., Mills, K. E., Nye, J. A., Pershing, A. J. and Thomas, A. C. (2018), “Projected sea surface temperatures over the 21st century: Changes in the mean, variability and extremes for large marine ecosystem regions of Northern Oceans,” *Elementa: Science of the Anthropocene*, 6(9).
- Bond, N. A., Cronin, M. F., Freeland, H. and Mantua, N. (2015), “Causes and impacts of the 2014 warm anomaly in the NE Pacific,” *Geophysical Research Letters*, 42(9), 3414-3420.
- Brander, K., Cochrane, K., Barange, M. and Soto, D. (2017), “Climate change implications for fisheries and aquaculture,” *Climate changes impacts on fisheries and aquaculture, A global analysis*, John Wiley & Sons, New Jersey, 45-62.
- Breitburg, D., Levin, L. A., Oschlies, A., Grégoire, M., Chavez, F. P., Conley, D. J., Garçon, V., Gilbert, D., Gutiérrez, D., Isensee, K., Jacinto, G. S., Limburg, K. E., Montes, I., Naqvi, S. W. A., Pitcher, G. C., Rabalais, N. N., Roman, M. R., Rose, K. A., Seibel, B. A., Telszewski, M., Yasuhara, M. and Zhang, J. (2018), “Declining oxygen in the global ocean and coastal waters,” *Science*, 359 (6371).
- Cisneros-Mata, M. A., Mangin, T., Bone, J., Rodriguez, L., Smith, S. L. and Gaines, S. D. (2019), “Fisheries governance in the face of climate change: Assessment of policy reform implications for Mexican fisheries,” *PLoS One*, 14 (10).
- Engle, R. F. and Granger, C. W. (1987), “Co-integration and error correction: representation, estimation, and testing, *Econometrica*,” *Journal of the Econometric Society*, 55(2), 251-276.
- Granger, C. W. J. and Newbold, P. (1974), “Spurious regressions in econometrics”, *Journal of Econometrics* 2, 111-120.
- Hedberg, N., Schreeb, K. V., Charisiadou, S., Jiddawi, N. S., Tedengren, M. and Nordlund, L. M. (2018), “Habitat preference for seaweed farming - A case study from Zanzibar, Tanzania,” *Ocean & Coastal Management*, 154, 186-195.
- IPCC (2014), “Climate Change 2014: Synthesis Report,” Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
- \_\_\_\_\_ (2019), “The Ocean and cryosphere in a changing climate,” A special report of the intergovernmental Panel on climate change. Intergovernmental Panel on climate change.
- Kataoka, T., Tozuka, T., Behera, S. and Yamagata, T. (2014), “On the Ningaloo Niño/Niña,” *Climate dynamics*, 43, 1463-1482.
- Kelleher, J. D. and Tierney, B. (2018). “Data science,” MIT Press.
- Kim, B. T., Brown, C. L. and Kim, D. H. (2019), “Assessment on the vulnerability of Korean aquaculture to climate change,” *Marine Policy*, 99, 111-122.
- KMA (Korea Meteorological Administration), Weather Data Service. Available at: <https://data.kma.go.kr/cmmn/main.do>.
- KMI (Korea Maritime Institute). Available at: [www.foc.re.kr](http://www.foc.re.kr).
- Kwiatkowski, L., Torres, O., Bopp, L., Aumont, O., Chamberlain, M., Christian, J. R., Dunne, J. P., Gehlen, M., Ilyina, T., John, J. G., Lenton, A., Li, H., Lovenduski, N. S., Orr, J. C., Palmieri, J., Santana-Falcón, Y., Schwinger, J., Séférian, R., Stock, C. A., Tagliabue, A., Takano, Y., Tjiputra, J., Toyama, K., Tsujino, H., Watanabe, M., Yamamoto, A., Yool, A. and Ziehn, T. (2020), “Twenty-first century ocean warming, acidification, deoxygenation, and upper-ocean nutrient and primary production decline from CMIP6 model projections,” *Biogeosciences*, 17 (13), 3439-3470.
- Mills, K. E., Pershing, A. J., Brown, C. J., Chen, Y., Chiang, F. S., Holland, D. S., Lehuta, S., Nye, J. A., Sun,

- J. C., Thomas A. C. and Wahle, R. A. (2013), "Fisheries management in a changing climate: Lessons from the 2012 ocean heat wave in the Northwest Atlantic," *Oceanography*, 26(2), 191-195.
- Ramírez, I. J. and Briones, F. (2017), "Understanding the El Niño Costero of 2017: The Definition Problem and Challenges of Climate Forecasting and Disaster Responses," *International Journal of Disaster Risk Science*, 8 (4), 489-492.
- Ridley, M. (2003). "Nature via nurture: Genes, experience, and what makes us human," New York.
- Rockström, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, Å., Chapin III, F. S., Lambin, E., Lenton, T. M., Scheffer, M., Folke, C., Schellnhuber, H. J., Nykvist, B., Wit, C. A., Hughes, T., Leeuw, S., Rodhe, H., Sörlin, S., Snyder, P. K., Costanza, R., Svedin, U., Falkenmark, M., Karlberg, L., Corell, R. W., Fabry, V. J., Hansen, J., Walker, B., Liverman, D., Richardson, K., Crutzen, P. and Foley, J. (2009), "Planetary boundaries: Exploring the safe operating space for humanity," *Ecology and society*, 14(2).
- Ruckelshaus, M., Doney, S. C., Galindo, H. M., Barry, J. P., Chan, F., Duffy, J. E., English, C. A., Gaines, S. D., Grebmeier, J. M., Hollowed, A. B., Knowlton, N., Polovina, J., Rabalais, N. N., Sydeman, W. J. and Talley, L. D. (2013), "Securing ocean benefits for society in the face of climate change," *Marine Policy*, 40, 154-159.
- Schwert, G. W. (1987), "Effects of model specification on tests for unit roots in macroeconomic data," *Journal of monetary economics*, 20(1), 73-103.
- Schwert, G. W. (2002), "Tests for unit roots: A Monte Carlo investigation," *Journal of Business & Economic Statistics*, 20(1), 5-17.
- Steffen, W., Richardson, K., Rockström, J., Cornell, S. E., Fetzer, I., Bennett, E. M., Biggs, R., Carpenter, S. R., Vries, W., Wit, C. A., Folke, C., Gerten, D., Heinke, J., Mace, G. M., Persson, L. M., Ramanathan, V., Reyers, B. and Sörlin, S. (2015), "Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet," *Science*, 80, 347.
- Tada, K., Fujiwara, M. and Honjo, T. (2010), "Water quality and Nori (porphyra) culture in the Seto Inland Sea", *Bunseki Kagaku/Japan Analyst*, 59(11), 945-955.
- WMO (World Meteorological Organization) (2019), "The Global Climate in 2015-2019," World Meteorological Organization, Geneva, 24.