

동적 요인분석을 이용한 한국 연근해 생태 인자 및 환경·인위적 요인의 공통 경향 분석

Dynamic Factor Analysis to Estimate Common Trends among Environment, Human, and Ecosystem Indicators in the Korean coastal waters

조춘옥* · 권봉오**

Chun Ok Jo · Bong Oh Kwon

요약 한국 연근해는 급격한 기후·환경 변화와 과도한 개발과 이용으로 인한 생태계 변화에 대한 우려가 커지고 있으며, 이러한 변화 요인에 기인한 생태계의 반응과 변화 예측의 중요성이 강조되고 있다. 연근해 생태계 변화 예측을 위해서는 다양한 변화 요인들과 생태계를 구성하는 요소들의 변동 특성과 이들의 상관관계에 대한 이해가 필요하다. 본 연구에서는 한국 연근해에 영향을 미칠 수 있는 17개의 기후·환경 요인과 12개의 인위적 요인 및 6개의 생태 인자의 시계열 그룹에 다변량 동적 요인분석을 적용하여 2000~2016년 동안 3개의 그룹 시계열에 내포된 공통의 변동 경향을 산출하였다. 기후·환경 요인 그룹은 2개, 인위적 요인 그룹은 2개, 생태 인자 그룹은 1개의 공통 경향이 각각 산출되었다. 또한, 생태 인자의 동물플랑크톤 시계열에서 우세한 공통 경향은 환경 요인의 영양염 및 인위적 요인의 어획량 시계열에서 우세한 공통 경향과 유의한 상관관계를 보였다. 이러한 밀접한 연관성은 환경 및 인위적 변화 요인에 대한 생태계의 반응을 예측하기 위한 하나의 접근 방법으로써 공통 경향의 활용 가능성을 제시한다.

키워드 동적 요인분석, 생태 인자, 환경 인자, 인위적 요인, 공통 경향

Abstract The climate change-induced variations in physical, chemical, and biological conditions coupled with increasing anthropogenic activities in the Korean coastal waters may cause an abrupt change in the composition and functions of the marine ecosystem. Understanding common patterns of environment, human drivers, and ecosystem components, and also their relationships is necessary for anticipating ecosystem responses to the drivers. In this study, we compiled time series of environment ($N = 17$), human drivers ($N = 12$), and ecosystem components ($N = 6$) for the Korean coastal waters during 2000-2016. Dynamic factor analysis (DFA), a multivariate time series dimensional reduction technique, was applied to extract common patterns in the time series. Application of DFA identified two common trends for the environment drivers, two common trends for the human drivers, and one common trend for the ecosystem indicators. We found significant correlations among the common trends in the time series of nutrients for the environment drivers, fishery landings for the human drivers, and zooplankton for the ecosystem indicators. This result suggests that there is a predictable relationship between environment and human drivers and ecosystem response indicators for the Korean coastal waters.

Key words Dynamic Factor Analysis, Ecosystem Indicators, Environment Drivers, Human Drivers, Common Trends

1. 서론

지구온난화로 인한 기후변화는 전 세계 여러 해역에서 해수면 상승과 수온 상승 등의 환경 변화 및 이로 인한 해양 생태계의 변화를 초래하고 있다(IPCC, 2014).

특히, 연근해 지역은 기후변화뿐 아니라 인간 활동에 의한 수질 오염과 빈산소수괴 발생(Breitburg et al., 2018), 수산자원의 과도한 남획(Bris et al., 2018), 간척 사업을 통한 해양의 육상화(Murray et al., 2019) 등으로 인한 생태계의 훼손이 복합적으로 발생하고 있어

회복 불가능한 상태로 생태계 변화에 대한 우려가 커지고 있다. 따라서 연근해 생태계 보전과 효율적인 관리를 위해서는 기후·환경 변화 및 인위적 요인의 영향에 대한 연근해 생태계의 반응과 변화 예측이 무엇보다 중요하다 할 수 있다.

기후·환경 변화 및 인위적 요인에 대한 해양 생태계의 반응은 종종 선형적인 상관관계를 통해서 예측되며, 이러한 선형의 상관관계는 생태계 변화에 대한 직관적인 정보를 제공할 수 있다. 그러나, 압력 요인에 대한 생태계의 반응이 비선형의 상관관계를 보인다면, 짧은 기간 동안 작은 압력 요인의 변화가 급격한 생태계의 변화와 일반적인 예측 범위와 임계치를 벗어나는 생태계 반응 등을 초래할 수 있다(deYoung et al., 2008; Litzow et al., 2020).

우리나라의 황해, 남해, 동해를 포함하는 연근해의 수온은 증가 추세를 보이며, 1982~2006년 동안 표층 수온은 0.67-1.09°C 증가하였다(Belkin, 2009; Seong et al., 2010). 이는 전 세계 표층 수온의 10년간 증가율보다 2-4배 높은 수치이다(Belkin, 2009). 진해만, 가막만, 천수만 등의 지역에서는 부영양화로 인한 빈산소수괴(hypoxia water mass)가 매년 발생하고 있으며, 진해만은 빈산소수괴 발생 면적이 확대되고 있음이 보고되었다(Lee et al., 2018). Rahman과 Lee (2012)는 1964~2010년 동안 기후 및 수온 변화와 동반된 어획 강도의 변화로 인해 1970년대 이후 어획량이 증가하였음을 보고하였다. 지난 2010년부터는 해양수산부의 지원으로 장기해양생태연구(K-LTMER: Korean Long-Term Marine Ecological Research)가 수행되고 있으며, 이를 통해 기후변화와 인간 활동이 연안 생태계의 다양한 구성 요소에 영향을 미치고 있음이 보고되었다(Hyun et al., 2020). 이와 같은 다양한 선행연구는 한국의 연근해 지역은 기후·환경 변화 요인과 동반된 인간 활동의 영향으로 생태계가 급격한 변화 위기에 직면해 있음을 보여준다. 따라서 연근해 생태계 변화 예측을 위해서는 기후·환경 및 인위적 요인들과 생태계를 구성하는 요소들의 변동 특성과 이들의 상관관계에 대한 이해가 필요하다.

본 연구에서는 한국 연근해 생태계에 영향을 미칠 수 있는 기후·환경 및 인위적 요인들과 생태 인자들의 시간에 따른 변동성을 분석하고자 한다. 특히 다양한 생태 인자와 변화 요인들의 변동성에 공통으로 내포된 비선형적인 변화 경향을 산출하고, 공통 경향들의 상관관계를 분석함으로써 생태계 변화 예측을 위해 필수적인 정보를 획득하고자 한다.

2. 자료 및 방법

2.1 기후·환경 및 인위적 요인과 생태인자 시계열 자료 생성

한국 연근해의 기후·환경 및 인위적 요인들과 생태계 반응 인자들의 변동성 분석은 황해, 남해, 동해를 포함하는 광범위 지역에서 장기간 연속 관측자료의 이용이 가능한 인자들을 선별하여 수행하였다. 기후·환경 요인은 총 17개 인자를 선정하였다. 물리 환경 인자는 수온(Temp: temperature) 및 염분(salinity), 수질 환경 인자는 화학적 산소 요구량(COD: Chemical Oxygen Demand), 용존 산소(DO: Dissolved Oxygen), 영양염(NH₄-N, NO₂-N, NO₃-N, DIN, DIP, SiO₂-Si) 농도, pH, 부유사 농도(SS: suspended solid), 투명도(transparency), 기후 인자는 PDO (Pacific Decadal Oscillation), 적도 태평양 Niño3.4지역(5°N-5°S, 170°W-120°W)의 표층수온 아노말리로 표현되는 NINO3.4, MEI (Multivariate ENSO Index), NPGO (North Pacific Gyre Oscillation)를 선별하였다. 물리 및 수질 환경 인자는 해양환경공단(KOEM: Korea Marine Environment Management Corporation)의 해양환경측정망(<https://meis.go.kr/portal/main.do>)의 전국 연안 425개 정점(Fig. 1)에서 관측된 2000~2016년 동

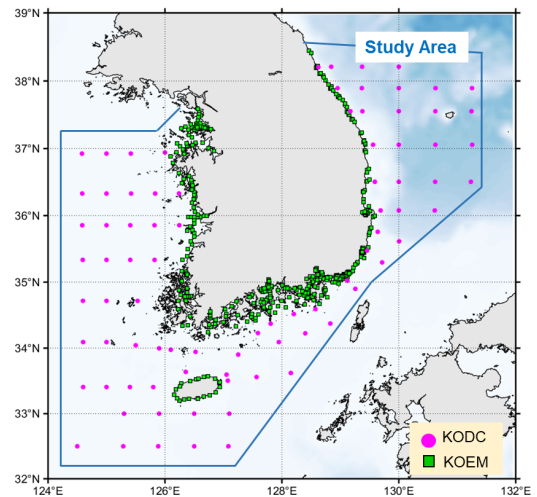


Figure 1. The study area and long-term monitoring stations around the Korean Peninsula for time series of environment and human drivers and ecosystem indicators. Data for time series of environment drivers and ecosystem indicators were obtained from marine environment monitoring operated by KOEM (green) and serial oceanographic observations for KODC (magenta), respectively

안 계절별 (2, 5, 8, 11월) 표층 자료를 이용하여 각 인자에 대한 전국연안의 연평균값을 계산하였다. 전국연안의 연평균 자료를 이용하여 각 각의 물리·수질 인자에 대한 시계열 자료를 생산하였다. 기후 인자는 물리 및 수질 자료와 동일 기간의 각 월별자료를 이용하여 연평균을 계산 및 시계열 자료를 생성하였다. PDO, NINO3.4, MEI는 NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration), NPGO는 WMO (World Meteorological Organization)에서 제공하는 자료를 이용하였다.

인위적 요인은 오징어(Squid), 멸치(Anchovy), 장어(Eel), 게(Crab), 새우(Shrimp), 조기(Croaker), 갈치(Hairtail), 고등어(Mackerel), 강달이(Collichthys niveatus), 곤쟁이(Mysid shrimp)의 어획량, 총어획량(Total amount of fish landings) 및 총 선박톤수(Total ships tonnages)를 사용하였다. 인위적 요인들의 시계열 자료는 해양수산부의 수산정보포털(<https://www.fips.go.kr/p/Main/>)과 국가통계포털(<https://www.fips.go.kr/p/Main/>)을 통해 연평균 값을 획득 후 시계열 자료를 생성하였다.

생태계 인자는 엽록소 농도(Chl-*a*: Chlorophyll-*a*), 동물플랑크톤 습중량(Zooplankton wet weight) 및 동물플랑크톤의 개체수를 우점하고 있는 요각류(Copepods), 난바다곤쟁이류(Euphausiids), 척삭류(Chordata), 야광충(Notiluca)의 개체수를 사용하였다. Chl-*a*는 해양환경측정망 자료를 이용하여 수질 인자와 동일한 방법으로 시계열 자료를 생성하였다. 동물플랑크톤은 한국해양자료센터(KODC: Korea Oceanographic Data Center, http://www.nifs.go.kr/kodc/index_kodc)에서 정선해양관측정점의 계절별 동물플랑크톤 자료(Fig. 1) 수집 및 연평균을 계산하여 시계열 자료를 생성하였다.

2.3 동적 요인분석

동적 요인분석(DFA: Dynamic Factor Analysis)은 여러 시계열 자료에 공통으로 내포된 변동 패턴을 산출하기 위해 사용되고 있는 다변량 시계열 분석 방법이다(Zuur et al., 2003; Holmes et al., 2012; Ohlberger et al., 2016). 이 분석방법은 시계열의 변동성을 공통의 변화 경향과 계절 변동성 등의 패턴(common patterns), 설명 변수(explanatory variables), 파라미터(a level parameter), 잡영 성분(a noise component)의 결합으로 표현할 수 있다. 본 연구에서 사용된 기후·환경 및 인위적 요인과 생태 인자의 시계열 자료는 연평균 값으로 구성되어 있으며, 자료의 기간이 17년 이내로 비교적 짧아 M 개의 공통 경향 및 잡영 성분을 사용

하여 다음 식과 같이 표현하였다(Zuur et al., 2003).

$$y_{it} = z_{i1} \alpha_{1t} + z_{i2} \alpha_{2t} + \dots + z_{iM} \alpha_{Mt} + e_{it}$$

여기서, y_{it} 는 t 시기에 i 번째 시계열에 해당하는 값, α_{jt} 는 j 번째 공통 경향, z_{ij} 는 요인부하값(factor loading), e_{it} 는 잡영 성분을 의미하며, 행렬 표현은 다음과 같다(Zuur et al., 2003).

$$y_t = Z\alpha_t + e_t$$

y_t 는 t 시기의 N 시계열 값들을 포함하는 $N \times 1$ 벡터, α_t 는 t 시기의 M 개의 공통 경향의 값, e_t 는 $N \times 1$ 의 잡영 성분을 나타낸다. $N \times M$ 행렬의 Z 는 공통 경향의 패턴을 결정하는 요인부하값을 포함한다.

다양한 척도 단위(unit scale)의 시계열 자료에 내포된 공통 변화 경향의 산출을 위해, 각 각의 시계열 자료는 다음의 식과 같이 평균과 표준편차를 이용하여 표준화하였다.

$$x_{normalized} = \frac{(x - m)}{std}$$

여기서, x 는 시계열 자료를 구성하는 연평균값, m 과 std 는 시계열 전체 기간의 연평균값의 평균과 표준편차를 의미한다. 표준화된 기후·환경 요인의 17개 시계열, 인위적 요인의 12개 시계열, 생태 인자의 6개 시계열을 3개의 그룹으로 구분 및 동적 요인분석을 이용하여 각 그룹에 속하는 시계열에 포함된 공통 변화 경향을 산출하였다. 본 연구에서 사용된 동적 요인분석은 오픈소스 코드인 R의 MARSS(Multivariate Autoregressive State-Space) 모델 패키지를 이용하였으며(Holmes et al., 2012), AIC(Akaike's Information Criterion)가 최소의 값을 가지는 경우의 공통 경향수를 M 으로 사용하였다. 시계열 그룹에서 산출된 공통 경향수가 2개인 경우, 각 각의 공통 경향은 Trend 1, Trend 2로 정의하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 연근해 생태 인자와 기후·환경 및 인위적 요인의 공통 경향

한반도 전체 연안해역의 17개의 표준화된 기후·환경 요인들의 2000~2016년 동안 시계열 변동성(Fig. 2a)에는 2개의 비선형의 공통 경향이 내포된 것으로 분석되

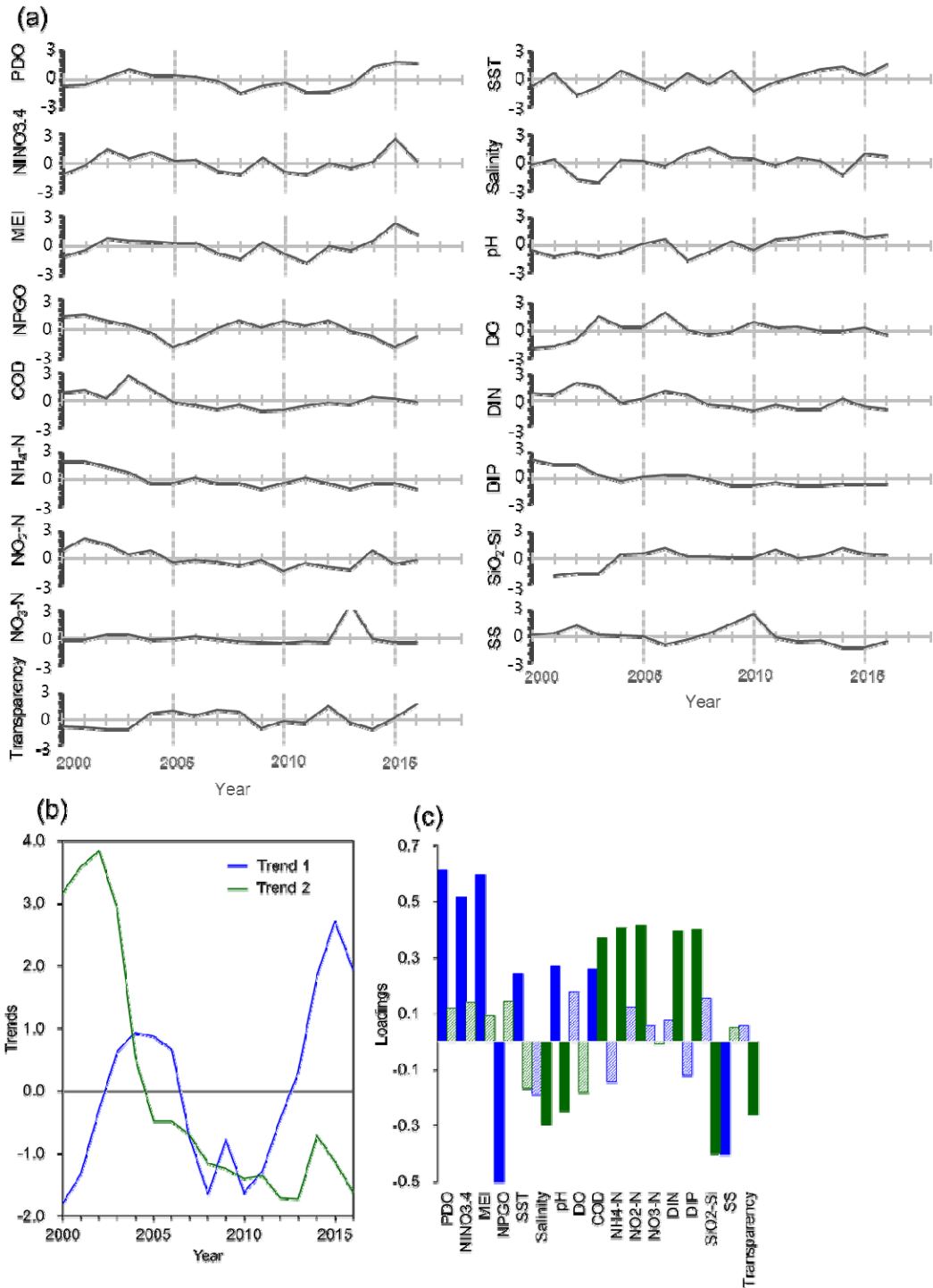


Figure 2. Time series of normalized environment drivers (a) and two common trends (Trend 1: blue line, Trend 2: green line) (b) and factor loadings (c) for the environment drivers identified by Dynamic Factor Analysis (DFA). The common trends and factor loadings are unitless. The diagonal pattern indicates that the absolute value of factor loading is smaller than 0.2

었다(Fig. 2b). 첫 번째 공통 경향(Trend 1)은 2000년부터 2004년까지 증가 경향을 보이나, 이후부터는 2010년까지 감소 경향을 보이며, 2010년부터 2015년까지는 급격한 증가 경향을 보인다. 두 번째 공통 경향(Trend 2)은 2002년부터 2016년 동안 급격한 감소의 경향을 보인다. 각 기후·환경 요인의 요인부하값의 절대값은 값의 크기가 클수록 시계열 변동성에 대한 공통 경향의 기여도가 높음을 의미한다. Trend 1과 Trend 2에 대한 각 인자에 대한 요인부하값은 -0.5~0.7의 범위를 보이며(Fig. 2c), 본 연구에서는 요인부하값의 절대값이 0.2보다 큰 인자를 중심으로 시계열에 내포된 공통 경향을 기술하였다. 공통 경향 Trend 1은 PDO, NINO3.4, MEI, NPGO, 수온, pH, COD에서 요인부하값의 절대값이 0.2보다 높게 나타났다. 공통 경향 Trend 2는 염분, pH, COD, NH₄-N, NO₂-N, SiO₂-Si, DIN, DIP의 요인부하값의 절대값이 0.2보다 높았다. COD와 pH는 Trend 1과 Trend 2에 대한 요인부하값의 절대값이 모두 0.2보다 크게 나타났다. 기후 인자인 PDO, NINO3.4, MEI, NPGO는 Trend 1에 대한 요인부하값의 절대값이 모두 0.5보다 크지만, Trend 2에 대해서는 0.2보다 낮았다. 이는 기후 인자들의 시계열 변동성에 Trend 1이 공통적으로 지배적인 영향을 미치고 있음을 의미한다. NPGO는 음의 요인부하값을 가지며, 양의 요인부하값을 가지는 PDO, NINO3.4, MEI와는 상반된 패턴의 공통 경향을 의미한다(Fig. 2c). NH₄-N, NO₂-N, SiO₂-Si, DIN, DIP는 Trend 2에 대한 요인부하값의 절대값들이 약 0.4이며, 다른 인자들과 비교해서 Trend 2가 시계열 변동성에 주요하게 기여함을 의미한다. SiO₂-Si는 음의 요인부하값을 가지며, 양의 요인부하값을 가지는 NH₄-N, NO₂-N, DIN, DIP와는 상반된 Trend 2의 공통 경향이 나타난다(Fig. 2c).

어종별 어획량, 총어획량 및 총선박톤수의 표준화된 시계열 자료의 변동성(Fig. 3a)에는 2개의 공통 경향이 내포된 것으로 분석되었다(Fig. 3b). 첫 번째 공통 경향(Trend 1)은 2002년 이후부터 2016년까지 급격한 감소 경향을 보이며, 두 번째 공통 경향(Trend 2)은 2000년부터 2003년 동안 급격한 증가 이후 2004~2016년은 값이 일정한 특성을 보인다. Trend 1과 Trend 2에 대한 각 인자들의 요인부하값은 -0.3~0.6의 범위를 보인다(Fig. 3c). Trend 1은 오징어, 게, 조기, 곤쟁이의 어획량 시계열에 대하여 요인부하값의 절대값이 0.2보다 높게 나타났다. Trend 2는 멸치, 장어, 새우, 곤쟁이 어획량, 총어획량 및 총선박톤수의 시계열에 대하여 요인부하값의 절대값이 0.2보다 높게 나타난다. 곤쟁이는 Trend 1과 Trend 2에 대한

요인부하값의 절대값이 모두 0.2보다 크게 나타났다. 따라서 오징어, 게, 조기의 어획량은 Trend 1, 멸치, 장어, 총선박톤수는 Trend 2, 곤쟁이는 Trend 1과 Trend 2의 변화 경향이 함께 우세하게 내포되어 있음을 의미한다.

생태 인자인 엽록소 농도, 동물플랑크톤인 요각류, 난바다곤쟁이류, 척색류, 아광층의 개체수 및 채집된 전체 동물플랑크톤 습중량의 표준화된 시계열 자료의 변동성(Fig. 4a)에는 1개의 공통 경향(Trend 1)이 산출되었다(Fig. 4b). KODC에서는 2010년 이전에 채집된 동물플랑크톤 자료는 제공하지 않아, 그 이후의 동물플랑크톤 시계열 자료와 2000~2016년 동안의 Chl-*a* 시계열 자료의 공통 경향을 분석하였다. Trend 1은 2010~2016년 동안의 5개의 동물플랑크톤 시계열 자료의 변동성을 대표하며(Fig. 4c), 2010년 이전의 변동성은 해석에 주의가 필요하다.

3.2 공통 경향들의 상관관계

한국 연근해에서 지난 17년간 관측된 기후·환경 및 인위적 요인과 생태 인자의 시계열 변동성에는 총 5개의 비선형적인 공통 경향이 내포되어 있음이 분석되었으며(Fig. 2-4), 이들의 상호 연관 분석을 위해 Pearson's correlation coefficient를 구하여 검토하였다(Table 1).

17개의 기후, 물리, 수질 인자들의 시계열 변동성에 공통으로 내포된 Trend 1은 중관규모의 기후 인자의 변동성에서 우세하게 나타났으며(Fig. 2c), Trend 2는 영양염, 투명도 등 연안 지역 수질 인자의 시계열에서 우세하게 나타났다(Fig. 2c). 그러나 이들 공통 경향 간에는 뚜렷한 연관성이 없는 것으로 나타났다(Table 1). 한국 연안의 수질 인자들은 기후변화보다 지역의 오염원과 물리·화학·생물적 요인 등, 수질에 직접적인 영향을 미칠 수 있는 요인들이 주요한 변동 원인으로 작용하고 있음을 제시한다. 실제 우리나라는 지방자치단체별로 하천 및 연안의 수질 개선을 위한 오염총량 관리제가 시행되고 있으며, 수질오염총량관리제 시행 이후 3대강 하류의 총 인(T-P)은 2005~2015년 동안 28.7% 개선된 것으로 평가된다(국립환경과학원 수질총량정보시스템, <http://tmdlms.nier.go.kr/Main.do>). 따라서 연안으로 유입되는 오염원 감소가 NH₄-N, NO₂-N, DIN, DIP 농도의 뚜렷한 감소(Fig. 2b)를 초래했을 것으로 판단된다.

인위적 요인 12개의 시계열 변동성에는 Trend 1과 Trend 2의 공통 경향이 내포된 것으로 나타났다(Fig. 3b). Trend 1은 오징어, 게, 조기의 어획량, Trend 2는 멸치, 장어 어획량 변화에서 우세하게 나타났다(Fig. 3c). 곤쟁이 어획량의 변화는 Trend 1과 Trend 2의 변

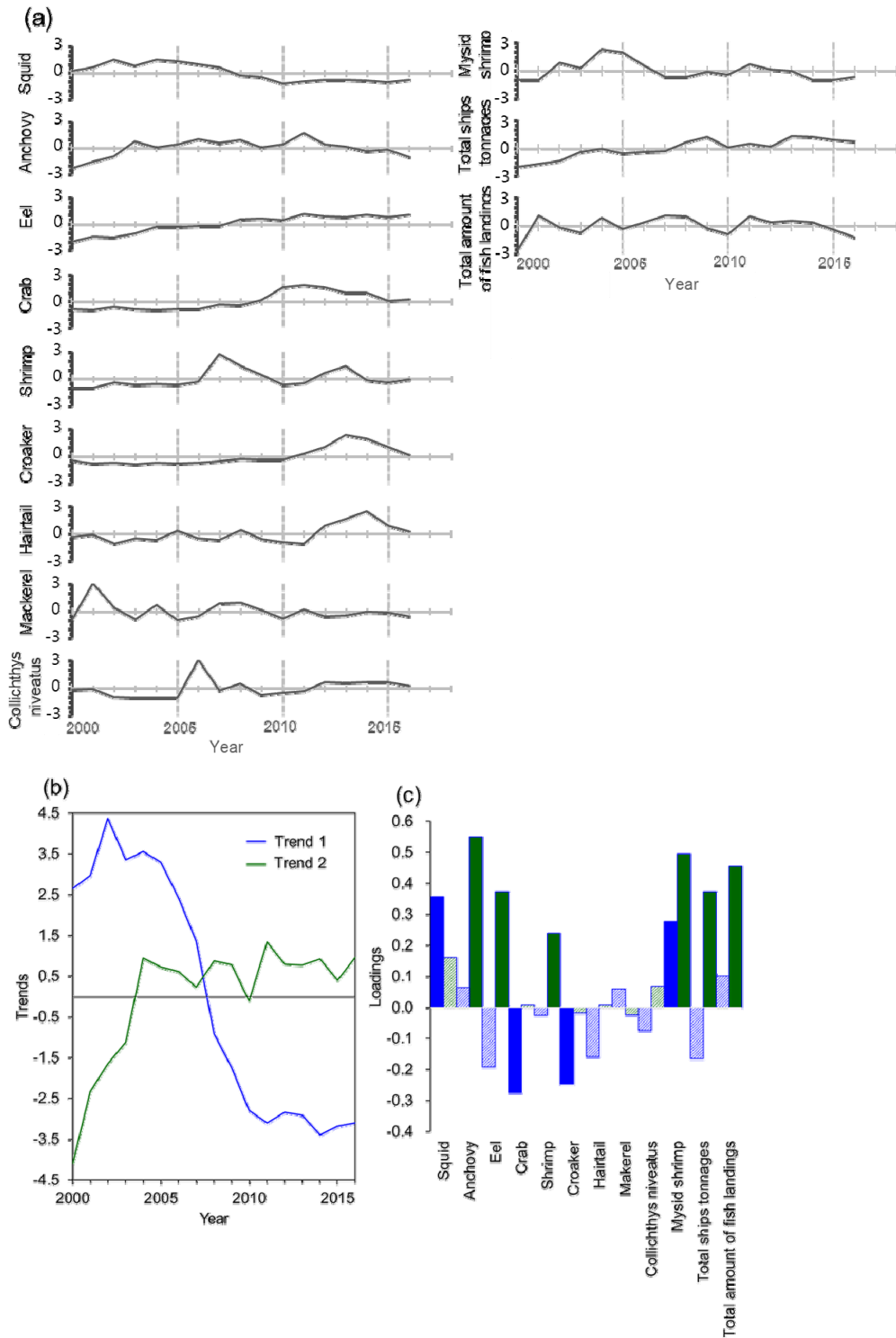


Figure 3. Time series of normalized human drivers (a) and two common trends (Trend 1: blue line, Trend 2: green line) (b) and factor loadings (c) for the human drivers identified by the DFA. The common trends and factor loadings are unitless. The diagonal pattern indicates that the absolute value of factor loading is smaller than 0.2

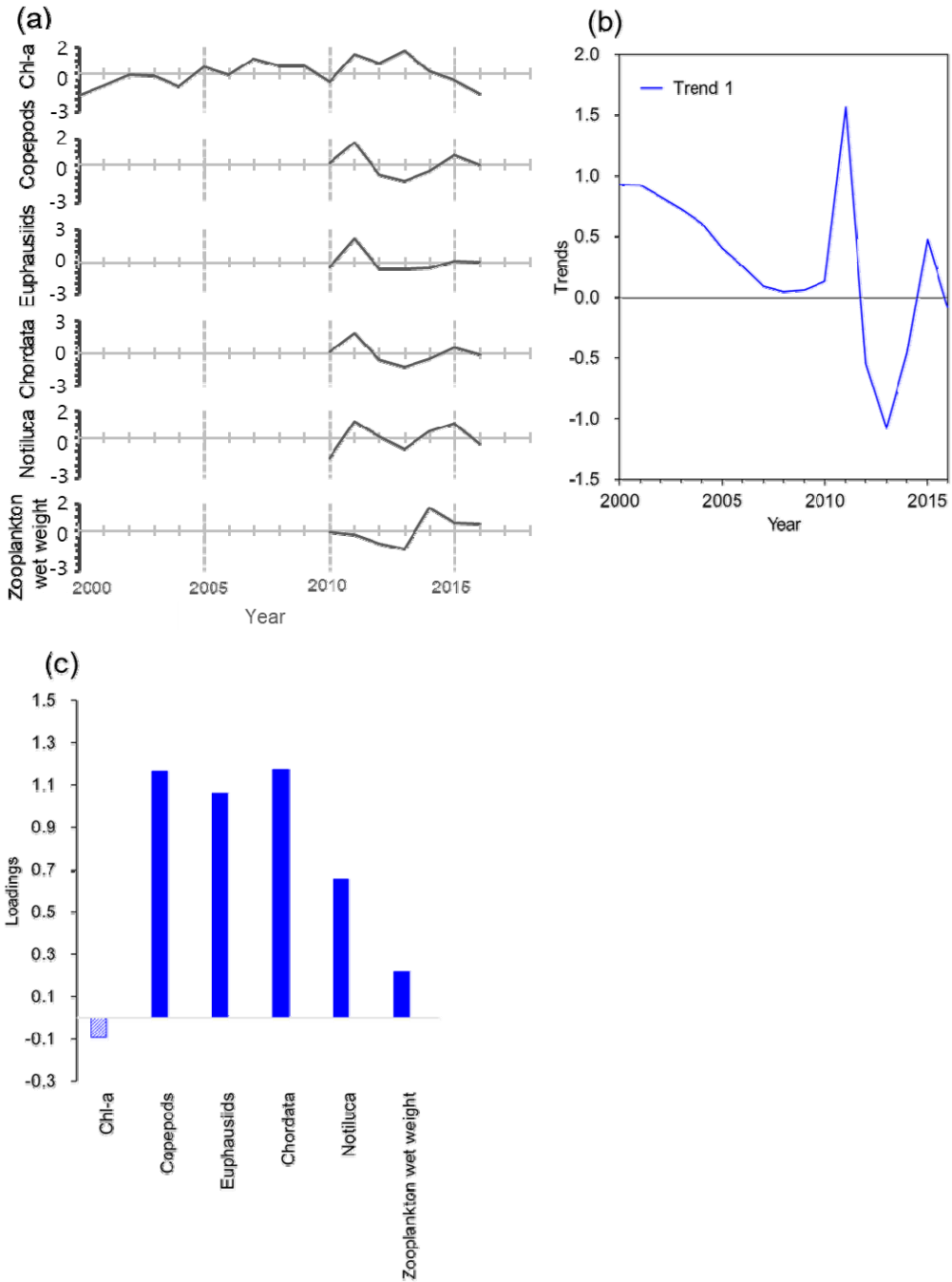


Figure 4. Time series of normalized ecosystem indicators (a) and one common trend (Trend 1: blue line) (b) and factor loadings (c) for the ecosystem indicators identified by the DFA. The common trend and factor loadings are unitless. The diagonal pattern indicates that the absolute value of factor loading is smaller than 0.2

화 경향이 모두 영향을 미치고 있는 것으로 분석되었다. 통계청의 ‘기후(수온)변화에 따른 주요 어종 어획량 변화’ 보도 자료(2018년)에 따르면, 1990년 이후부

터 수온 상승에 따른 고등어, 멸치, 오징어 등의 난류성 어종 증가에 따라 어획량이 증가한 것으로 보고되었다. 그러나 본 연구에서 산출된 오징어(Trend 1)와

Table 1. Pearson's correlation coefficients between the common trends of the environment (ENV), human (HUM) drivers, and ecosystem (ECO) indicators

	Trend 1 (ENV) ^a	Trend 2 (ENV) ^a	Trend 1 (HUM) ^b	Trend 2 (HUM) ^b	Trend 1 (ECO) ^c
Trend 1 (ENV) ^a	1	-0.22	-0.15	0.40	-0.27
Trend 2 (ENV) ^a	-0.22	1	0.78*	-0.86*	0.57*
Trend 1 (HUM) ^b	-0.15	0.78*	1	-0.55*	0.49*
Trend 2 (HUM) ^b	0.40	-0.86*	-0.55*	1	-0.44
Trend 1 (ECO) ^c	-0.27	0.57*	0.49*	-0.44	1

* Correlation is significant at the 0.05 level ($p < 0.05$).

^a Two common trends for 17 of the time series for environment drivers.

^b Two common trends for 12 of the time series for human drivers.

^c One common trend for 6 of the time series for ecosystem indicators.

멸치(Trend 2)의 공통 경향에는 어획량의 증가 경향이 나타나지 않았으며, 오징어는 오히려 어획량 감소 경향이 나타났다(Fig. 3b). 환경 요인인 수온의 시계열 자료에서 우세하게 나타난 공통 경향(Trend 1, Fig. 2b)과 오징어(Trend 1), 멸치(Trend 2) 어획량 시계열에서 우세한 공통 경향들과의 Pearson's correlation coefficients도 유의하지 않은 것으로 나타났다(Table 1). 이러한 결과는 어종별 어획량의 변화는 수온 변화 외에 먹이생물과의 관계, 어선·어구발달 등이 주요한 영향을 미칠 수 있음을 의미하며(Cho et al., 2021), 기존의 수산자원 관리 모델에서 사용되고 있는 선형적인 수온과 어획량의 관계에 대한 개선의 필요성을 보여준다.

생태 인자 6개 시계열 자료의 변동성에 공통으로 내포된 Trend 1은 요각류, 난바다곤쟁이류, 척색류, 야광충 시계열 변동성에서 최우점하는 것으로 분석되었다(Fig. 4c). 특히 요각류는 어류의 주요한 먹이생물이며, 요각류의 시계열에 내포된 Trend 1은 오징어, 게, 조기의 어획량 변동성에 내포된 Trend 1과 유의한 양의 상관관계를 보인다(Table 1). 또한, 앞서 언급된 환경 인자인 영양염에서 우세한 공통 경향(Trend 2)은 요각류(Trend 1)와 오징어, 게, 조기 등의 어획량(Trend 1)에서 우세한 공통 경향과도 유의한 상관관계를 가지는 것으로 나타났다. 요각류의 시계열 변동성은 2010년 이전 자료의 부재로 인해 공통 경향들의 상관관계 분석 시 주의가 필요하지만, 이러한 밀접한 연관성은 한국 연근해의 환경 및 인위적 변화 요인에 대한 생태계의 반응 예측을 위한 접근법으로써 공통 경향의 활용 가능성을 제시한다.

4. 결론

한국 연근해는 급격한 기후·환경 변화와 함께 인간 활동에 의한 생태계의 과도한 개발과 이용에 노출되고

있어 급격한 생태계 변화에 대한 위험도가 높은 곳이다. 연근해의 보전과 효율적 관리를 위해서는 이러한 변화 요인들에 기인한 생태계 반응에 대한 이해가 필요하다.

본 연구에서는 한국 연근해에 영향을 미칠 수 있는 17개의 기후·환경 요인과 12개의 인위적 요인 및 6개의 생태 인자의 시계열 그룹에 다변량 동적 요인분석을 적용하여 지난 17년 동안 3그룹의 시계열 변동성에 내포된 비선형의 공통 경향을 산출하였다. 또한, 산출된 공통 경향들의 상관관계 분석을 통해, 환경 요인인 영양염과 주요 상업 어종의 어획량 및 동물플랑크톤 우점종들의 시계열 변동성은 공통의 경향을 공유하고 있음을 확인하였다. 따라서 환경·인위적 요인과 생태 인자에 내포된 비선형의 공통 경향은 한국 연근해 생태계의 변화를 예측하고 이를 위한 수치 모델 개발 및 개선에 활용될 수 있을 것이다. 향후 지속적인 연구를 통한 동해, 남해, 황해 등, 해역별로 환경·인위적 요인과 생태 인자들의 시계열 변동성에 내포된 공통 경향 정보의 획득은 한국 연근해 생태계의 현황에 대한 우리의 이해도를 높이게 될 것이다.

감사의 글

본 연구는 2021년 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 ‘과학기술기반 해역이용영향평가 기술개발 (20210427)’과 ‘생태계기반 해양공간분석 및 활용기술 개발 (2017-0325)’ 연구사업의 지원을 받아 수행하였습니다.

참고문헌

1. Belkin, I.M., 2009. Rapid warming of large marine ecosystems. *Progress in Oceanography*. 81, 207-213.

2. Breitburg, D. et al., 2018. Declining oxygen in the global ocean and coastal waters. *Science*, 359, eaam7240. <https://doi.org/10.1126/science.aam7240>.
3. Bris, A.L., Mills, K.E., Wahle, R.A., Chen, Y., Alexander, M.A., Allyn, A.J., Schuetz, J.G., Scott, J.D., Pershing, A.J., 2018. Climate vulnerability and resilience in the most valuable North American fishery. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 115, 1831-1836. <https://doi.org/10.1073/pnas.1711122115>.
4. Cho, C.W., Song, Y.S., Kim, C., Youn, S.H., 2021. Study on a three-dimensional ecosystem modeling framework based on marine food web in the Korean Peninsula. *Korean Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 54(2), 194-207.
5. deYoung, B., Barange, M., Beaugrand, G., Harris, R., Perry, R.I., Scheffer, M., Werner, F., 2008. Regime shifts in marine ecosystems: detection, prediction and management. *Trends in Ecology and Evolution*, 23, 402-409. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2008.03.008>.
6. Holmes, E.E., Ward, E.J., and Wills, K., 2012. MARSS: Multivariate Autoregressive State-Space models for analyzing time-series data. *The R Journal*, 4, 11-19.
7. Hyun, J.H., Choi, K.S., Lee, K.S., Lee, S.H., Kim, Y.K., and Kang, C.K., 2020. Climate change and anthropogenic impact around the Korean coastal ecosystems: Korean Long-Term Marine Ecological Research (K-LTMER). *Estuaries and Coasts*, 43, 441-448. <https://doi.org/10.1007/s12237-020-00711-6>.
8. IPCC, 2014. *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Group I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.
9. Lee, J., Park, K.T., Lim, J.H., Yoon, J.E., and Kim, I.N., 2018. Hypoxia in Korean coastal waters: a case study of the natural Jinhae Bay and Artificial Shihwa Bay. *Frontiers in Marine Science*, 5(70). <https://doi.org/10.3389/fmars.2018.00070>.
10. Litzow, M.A., Hunsicker, M.E., Bond, N.A., Burke, B.J., Cunningham, C.J., Gosselin, J.L., Norton, E.L., Ward, E.J., and Zador, S.G., 2020. The changing physical and ecological meanings of North Pacific Ocean climate indices. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 117(14), 7665-7671. <https://doi.org/10.1073/pnas.1921266117>.
11. Murray, N.J., Phinn, S.R., DeWitt, M., Ferrari, R., Johnston, R., Lyons, M.B., Clinton, N., Thau, D., Fuller, R.A., 2019. The global distribution and trajectory of tidal flats. *Nature*, 565, 222-225. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0805-8>.
12. Ohlberger, J., Scheuerell, M.D., and Schindler, D.E., 2016. Population coherence and environmental impacts across spatial scales: a case study of Chinook salmon. *Ecosphere*, 7, e01333. <https://doi.org/10.1002/ecs2.1333>.
13. Rahman, S.M and Lee, C.I., 2012. Long term changes pattern in marine ecosystem of Korean Waters. *Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety*, 18(3), 193-198.
14. Seong, K.T., Hwang, J.D., Han, I.S., Go, W.J., Suh, Y.S., and Lee, J.Y., 2010. Characteristic for long-term trends of temperature in the Korean waters. *Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety*, 16(4), 353-360.
15. Zuur, A.F., Tuck, I.D., and Bailey, N., 2003. Dynamic factor analysis to estimate common trends in fisheries time series. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 60, 542-552.

