

# 우리나라 연안 해저면 서식지의 건강성 평가를 위한 생태지수의 성능 비교

## Performance Comparison of Ecological Indices for Health Assessment of Benthic Habitats in Korean Coastal Areas

한아름\* · 김보라\* · 류종성\*\*

A Reum Han · Bo Ra Kim · Jong Seong Ryu

**요약** 본 논문은 우리나라 연안 해저면 서식지의 저서 생태지수와 다변량지수를 구하고, 그 성능을 비교하였다. 2015-2016년에 수행된 국가해양생태계종합조사 연안생태분야의 대형저서동물 자료와 퇴적물 환경자료를 분석에 이용하였고 조사정점은 5개 생태구(서해중부, 서남해역, 대한해협, 동해, 제주)에 걸쳐 총 146개이다. 총 15개의 생태지수, 다변량지수를 사용하였고, 통계분석을 위해 주성분분석, 다차원척도법, Wilcoxon 대응표본 비모수검정을 적용했다. 퇴적물 환경변수를 이용한 주성분분석 결과 146개 정점들은 2개의 주성분(설명력: 주성분1- 66.3%, 주성분2- 10.0%)으로 이루어진 공간상에서 5개 생태구별로 뚜렷하게 구분되었다. 건강성지수의 등급판정 결과를 Wilcoxon 대응표본 비모수검정법을 통해 비교한 결과 H'과 M-AMBI가 5개 생태구에서 모두 유사한 판정결과를 보였다. 15개 생태 및 다변량지수의 계산 결과의 유사성을 다차원척도법을 통해 분석한 결과 생태구별로 지수 간의 유사관계가 다양하게 나타났다. 5개의 생태구로 구분되는 우리나라 해저면의 건강성을 평가할 때 단일지수를 사용하는 것은 평가결과의 오류를 가져올 수 있으며, 다양한 종류의 지수를 활용하여 결과를 종합하는 것이 바람직하다.

**키워드** 저서 서식지, 대형저서동물, 무척추동물, 저서지수, 생태구

**Abstract** This study compared performance of 15 ecological univariate and multivariate indices to evaluate health of marine benthic ecosystems. Sediment environmental data and macrozoobenthic community data were retrieved from the coastal observation of Korean national ocean ecosystem observations. A total of 146 locations were surveyed two times in May and August in 2015-2016 targetting the entire coasts around the Korean peninsula. For statistical analyses, principal component analysis (PCA), multi-dimensional scaling (MDS), nonparametric Wilcoxon paired sample test were applied to compare performance of health evaluations by various indices. All locations were clearly grouped by five eco-regions in two-dimensional spaces of PCA where two principal components accounted for 76.3% of variances. Ecological health evaluation was similar in Shannon index and M-AMBI throughout all five eco-regions by Wilcoxon paired sample test. Similarity of evaluation by 15 indices were analyzed in two-dimensional space of MDS, resulting to different in five eco-regions. Several indices should be applied to evaluate benthic ecosystem health in Korean coastal areas rather than using a single index.

**Key words** Benthic habitat, Macrozoobenthos, Invertebrates, Benthic indices, Eco-regions

### 1. 서론

대형저서동물은 퇴적물에 서식하는 특성 때문에 환경변화와 오염을 지시하는 생물학적 지시자이며 (Warwick et al., 2002; Ysebaert et al., 2002), 환경요소와의 관계, 종 다양성 및 식성과 같은 생태적 특성을

바탕으로 해양환경을 이해하고 생태계의 건강성을 파악하는데 세계적으로 매우 유용하게 사용되고 있다 (Pearson and Rosenberg, 1978; McManus and Pauly, 1990). 이러한 이유로 대형저서동물의 생물다양성, 생물지수(개체수 및 생체량)와 군집구조는 해역 생태계의 구조적 안정성과 건강도 평가에 있어 중요한 요소

Received: 2020.12.28, Revised: 2021.01.04, Accepted: 2021.01.04

\* ㈜오션사이텍(Ocean Scitech Inc., Ganghwa-gun, Korea)

\*\* 안양대학교 해양바이오시스템공학과(Department of Marine Biotechnology, Anyang University, Ganghwa-gun, Korea)

로 고려되고 있다(Pearson and Rosenberg, 1978; Rosenberg and Nilson, 2005; Wildsmith et al., 2009).

현재 우리나라에서도 대형저서동물을 이용하여 해저면 서식지의 건강성을 평가하고 있는데, 유럽에서 개발된 AZTI Marine Biotic Index (AMBI) (Borja et al., 2000), Benthic Quality Index (BQI) (Rosenberg, 2004), Ecological Quality Ratio (EQR) (Borja et al., 2004), Multivariate Azti's Marine Biotic Index (M-AMBI) (Muxika et al., 2007) 등 과 우리나라에서 개발된 Benthic Health Index (BHI) (NFRDI, 2010), Benthic Pollution Index (BPI) (KORDI, 1995) 등이 대표적으로 활용되고 있다. 우리나라의 해양생태계에 적합한 생태계 건강성 지수(ecological health index) 개발도 시도되고 있지만(Yoo et al., 2010), 많은 지수(index)들이 개발되어 있는 현실을 고려할 때 새로운 평가기법을 개발하기 보다는 기존 지수들의 적정성을 비교하고 평가하는데 심혈을 기울여야 한다 (Borja and Dauer, 2008; Borja et al., 2008; Diaz et al., 2004).

우리나라는 해양생태계의 현황을 파악하고 변화를 신속하게 진단하기 위해 2015년부터 매년 국가해양생태계종합조사를 실시하고 있다. 본 국가해양생태계종합조사는 우리나라 연안을 2개 권역으로 구분하여 매년 1개 권역에 대해 연 1~2회 조사를 하는 기본조사와 우리나라 해양생태계의 중요지역을 정하여 매년 조사하는 중점조사로 구분된다. 생산된 자료는 해양생태도 작성, 해양보호구역 지정 등 건강한 해양생태계 보전을 위한 국가 해양환경정책 수립의 근거로 활용된다. 본 조사를 통해 구축된 해양생태계 자료는 국내 연안의 건강성을 진단하고, 나아가 미래의 해양생태계 변화를 예측하기 위한 기초자료로서 근간이 되기에 그 활용가치가 매우 높을 것이다.

본 연구에서는 우리나라 연안 해저면을 5개의 생태구(해양수산부 고시 제2018-10호, 해양환경기준)로 나누어 2015-2016년에 수행되었던 국가해양생태계종합조사 중 연안생태계 자료를 이용하여 저서 생태지수와 다변량지수를 구하고, 그 성능을 평가하고자 하였다. 따라서 본 연구의 목적은 1) 5개의 생태구로 구분된 우리나라 연안 해저면의 저서 건강성을 파악하고, 2) 생태지수와 다변량지수 사이의 유사도를 분석하고, 3) 통계분석을 통해 각 지수들의 성능을 비교하는 것이다.

## 2. 재료 및 방법

본 연구에서는 2015-2016년에 수행되었던 국가해양

생태계종합조사 중 연안생태조사의 기본조사 데이터를 해양수산부에서 운영하는 정보제공 사이트인 '해양환경정보포털'에서 다운로드 사용하였다. 대형저서동물과 퇴적물의 평균입도(Mz), 총유기탄소(TOC), 중금속 8종(Cd, Co, Cr, Cu, Pb, Zn, Ni, Al)데이터를 분석에 사용하였다.

기본조사는 2015년 서해 6개 정점, 남해 서부 18개 정점, 2016년 남해 동부 30개 정점, 동해 23개 정점, 제주도 12개 정점에서 각각 조사가 이루어졌다. 조사 정점은 총 146개 정점이며, 연 2회(5월, 8월) 조사되었으므로 총 292개 정점이 분석에 사용되었다. 기본조사 정점은 해양환경기준(해양수산부 고시 제2018-10호)을 근거로 나누어지는 다섯 개 생태구로 구분하여 데이터를 분석하였다. 서해중부 생태구 84개 정점, 서남해역 생태구 86개 정점, 대한해협 생태구 58개 정점, 동해 생태구 40개 정점, 제주 생태구 24개 정점이 데이터 분석에 사용되었다(Fig. 1).

생태계의 상태를 나타내는 지수는 크게 3가지로 구분된다. 첫째, 저서군집의 가장 기본적인 정보를 알 수 있는 서식밀도(A), 종수(S), 서식밀도와 종수의 비율(A/S)은 생태변수(ecological variables)이다. 둘째, 저서군집의 다양성을 설명할 수 있는 생태지수(ecological index)로서 1- $\lambda$  (Hill, 1973; Jost, 2006), 종다양도지수(H') (Shannon et al., 1963), 종풍부도지수(Margalef, 1958), 종균등도지수(Pielou, 1966), ES50 (Hurlbert, 1971), delta+ (Clarke et al., 1998; Clarke et al., 1999) 등 총 6개가 포함된다. 생태변수와 생태지수는 Primer v6 software를 이용하여 계산하였다(Clarke and Gorley, 2006). 셋째, 저서군집의 건강성을 평가할 수 있는 다변량지수(multivariate index)로서 AMBI (Borja et al., 2000), BHI (NFRDI, 2010), BPI (KORDI, 1995), BQI (Rosenberg, 2004), EQR (Borja et al., 2004), M-AMBI (Muxika et al., 2007), 해양생태등급(EcoQR)등 총 7개가 포함된다. 해양생태등급은 「해양생태계의 보전 및 관리에 관한 법률」 제12조의 규정에 의거한 해양생태도 작성을 위해 2014년에 해양수산부에서 고시한 방법에 따라 계산하였다(해양수산부 고시 제2014-182호). 다변량지수는 2000년대 들어 오면서 전 세계적으로 해양생태계 관리목표를 설정하기 위해 생태계의 건강성을 평가할 필요성이 대두됨에 따라 비교적 최근에 개발 되었다(Ryu et al., 2016).

생태지수 H'과 다변량지수 7개는 등급을 결정할 수 있는 기준이 제안되어 있다(Table 1). 따라서 등급을 평가할 수 있는 위의 8개 지수를 건강성지수로 명명하였다.

생태구 간 환경요인(퇴적물 평균입도, 총유기탄소,

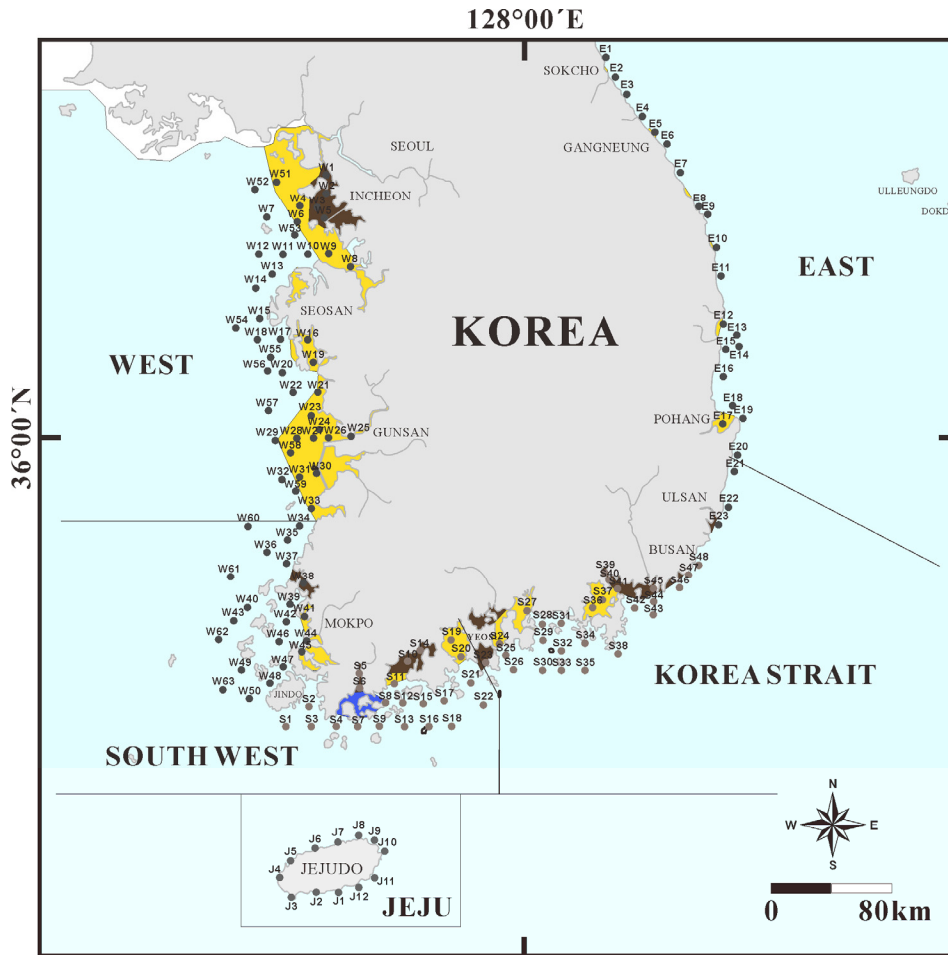


Figure 1. Map showing the sampling stations of the coastal observation of Korean national ocean ecosystem observations. The map also presents delineation of five eco-regions

Table 1. The classification criteria of ecological quality (EcoQ) in seven benthic ecological quality indices. Abbreviations of indices referred to the text

EcoQ	AMBI	BHI	BPI	BQI	EQR	H'	M-AMBI
1 (High)	≤ 1.2	≥ 71	≥ 60	(reference value) > 31.8	≥ 0.80	> 4	≥ 0.77
2 (Good)	≤ 3.3	26 ~ 70	≥ 40	≤ 31.8	≥ 0.65	≤ 4	≥ 0.53
3 (Moderate)	≤ 5.0	≤ 25	≥ 30	≤ 23.8	≥ 0.43	≤ 3	≥ 0.39
4 (Poor)	≤ 6.0		≥ 20	≤ 15.9	≥ 0.20	≤ 2	≥ 0.2
5 (Bad)	> 6.0		< 20	≤ 7.9	< 0.20	≤ 1	< 0.2

중금속)의 특성을 비교하기 위해 주성분분석(Principal Component Analysis, PCA)을, 생태지수와 다변량지수 간 유사도를 알아보기 위해 다차원척도법(Multi-dimensional Scaling, MDS)을 실시하였다. 건강성지수

의 성능을 비교평가하기 위해 비모수통계검정법 중 Wilcoxon 대응표본 비모수검정(Wilcoxon paired sample test, 이하 Wilcoxon test라 명명)을 이용하였다 (Wilcoxon, 1945). Wilcoxon test는 건강성지수의 등급

간의 일치정도를 보여주는 검정법으로, 유의하지 않다는 결과는 등급판정의 차이가 유의하지 않다는 의미이다. 주성분분석과 Wilcoxon test는 SPSS 12.0을, 다차원척도법은 Primer v6 software를 이용하여 분석하였다.

### 3. 결과 및 고찰

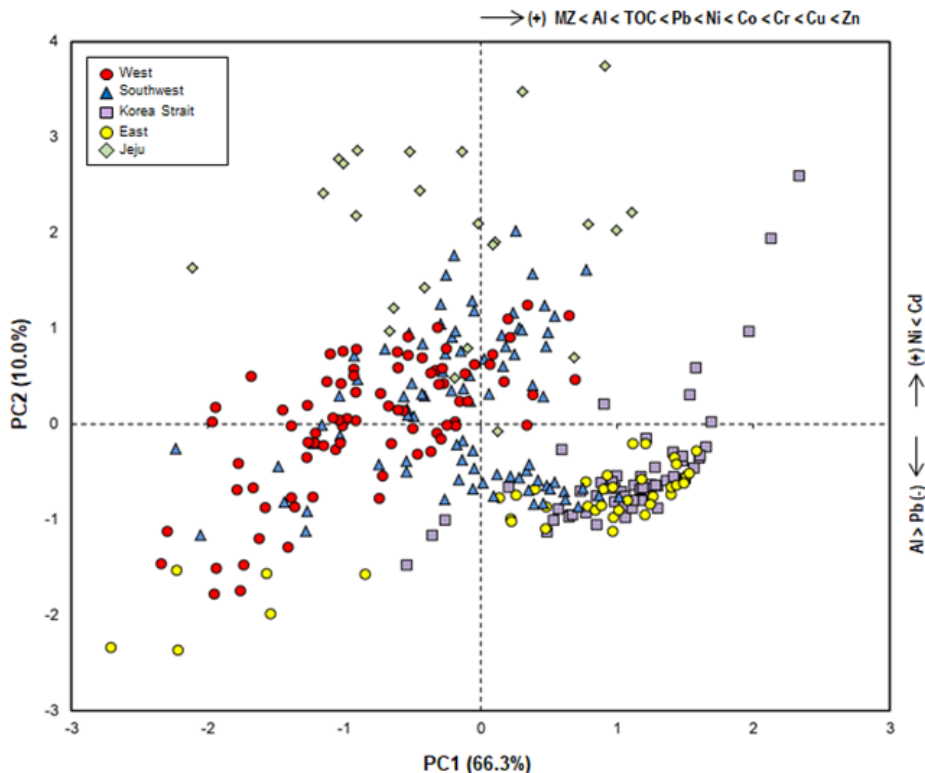
#### 3.1 5개 생태구의 환경 및 생태 특성

생태구별 퇴적물 환경 특성을 파악하기 위해 평균입도(Mz)와 총유기탄소(TOC), 8종의 중금속(Cd, Co, Cr, Cu, Pb, Zn, Ni, Al)을 이용하여 주성분분석을 실시하였다. 그 결과 성분 I(PC I)에서 퇴적물 환경 요인이 생태구별 특성을 약 66.3% 설명할 수 있으며, 이중 Cd를 제외한 대부분의 환경요인들이 많이 기여를 하고 있었다. 성분 II(PC II)에서는 약 10.0% 정도로 퇴적물 환경 요인이 생태구별 특성을 설명해 주고 있으며, 이중 Cd, Ni, Al, Pb가 높은 기여를 하고 있었다(Table 2). 성분 I을 기준으로 대한해협과 동해 생태구는 대부분 양의 방향에 위치하고 있어 평균입도와 총유기탄소, 퇴적물 중금속의 농도가 높음을 보여주고,

**Table 2.** Summary of principal component analysis (PCA) based on correlation matrix of the sediment environmental variables in eco-regions of Korea

	PC I	PC II
Percentage	66.25	10.02
Cum. Percentage	66.25	76.23
	PC I	PC II
Zn	0.974	-0.018
Cu	0.956	0.025
Cr	0.925	0.192
Co	0.844	0.284
Ni	0.840	0.372
Pb	0.803	-0.424
TOC	0.766	-0.057
Al	0.741	-0.586
Mz	0.720	-0.154
Cd	0.437	0.442

대부분 음의 방향에 위치한 서해중부와 서남해역 생태구는 평균입도와 총유기탄소, 퇴적물 중금속의 농도가 상대적으로 낮음을 보여준다. 또한 동일 생태구별로 비슷한 공간상에 밀집되어 있어, 공간상에서 5개 생태구별로 뚜렷하게 구분됨을 확인하였다(Fig. 2). 이는



**Figure 2.** Ordination of 148 locations in a space with axes of PC1 and PC2 based on sediment environmental variables. Five eco-regions are presented in different symbols

해류, 조석, 탁도 등을 기준으로 다섯 개로 구분된 생태구가(Rho et al., 2012) 저서동물이 서식하는 퇴적물 환경 특성을 기준으로 분석한 결과와도 유사하게 구분됨을 보여준다.

2015-2016년에 우리나라 전체 해역에서 출현한 대형저서동물은 총 1053종이고, 정점당 평균 종수는 47.8±31.3종. 평균 서식밀도는 1161.8±1600.9 indiv./m<sup>2</sup>, 평균 생물량은 80.7±144.0 gWW/m<sup>2</sup>이다.

각 정점별로 구한 각각의 건강성지수 등급을 모아 해저면 건강성을 평가하였다. 생태구별로 평균한 값을 대표값으로 사용하였다. 3등급 체계인 BHI와 EcoQR을 이용하여 해저면 서식지 건강성을 평가한 결과 전체 해역은 평균 1.4±0.4등급으로 매우 양호하게 평가되었다. 생태구별로 살펴보면 서해중부 생태구 1.3±0.3등급, 서남해역 생태구 1.4±0.4등급, 대한해협 생태구 1.7±0.5등급, 동해 생태구 1.5±0.3등급, 제주 생태구 2.0±0.4등급으로 매우 양호하게 평가되었다. 5등급 체계인 AMBI, BPI, BQI, EQR, H', M-AMBI를 이용하여 해저면 서식지 건강성을 평가한 결과 전체 해역은 평균 2.2±0.6등급으로 양호한 상태를 나타냈다. 생태구별로 살펴보면 서해중부 생태구 1.9±0.6등급, 서남해역 생태구 2.2±0.6등급, 대한해협 생태구 2.7±0.7등급, 동해 생태구 2.3±0.2등급, 제주 생태구 2.0±0.4등급으로 양호하게 평가되었다(Table 3). 대형저서동물을 통한 저서건강도 평가에 대한 연구는 진행되고 있지만(Jeong et al., 2018), 특정 해역별로 평가된 연구가 대부분이며 전체 해역별 혹은 생태구별 연

구는 부족한 상황이다. 매년 수행되는 국가해양생태계 종합조사 데이터를 기반으로 해저면 건강성 평가를 위한 연구가 필요할 것으로 사료된다.

### 3.2 8개 건강성지수의 생태등급 판정 비교

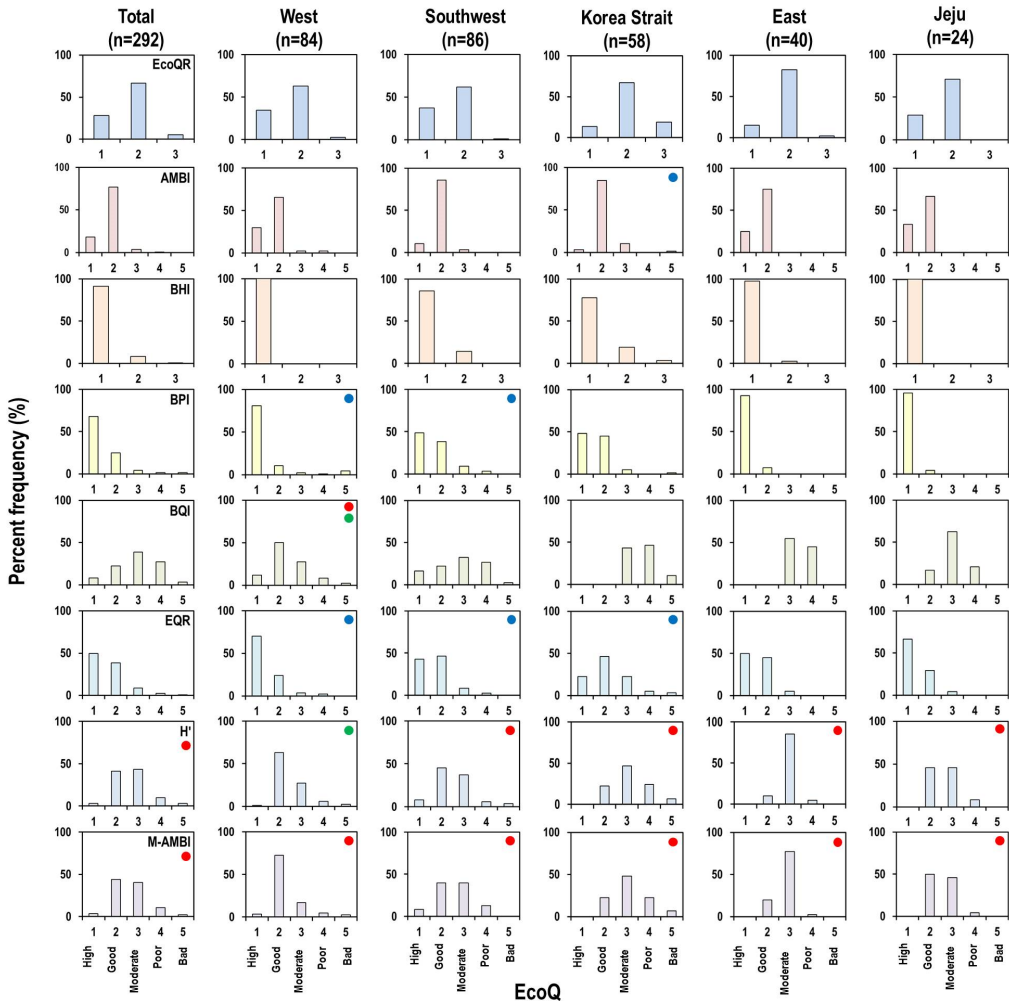
각 건강성지수가 나타내는 등급분포 경향을 살펴보고, 건강성지수 간의 일치 정도를 알아보기 위해 Wilcoxon test를 실시하였다. Wilcoxon test에서 유의하지 않다는 결과는 차이가 없다는 뜻으로 유사하다고 해석한다. Wilcoxon test는 같은 등급 체계일 때만 분석이 가능하기 때문에 3등급 체계로 되어있는 BHI와 EcoQR은 분석에서 제외하고 5등급 체계로 되어 있는 6개 지수(AMBI, BPI, BQI, EQR, H', M-AMBI)만을 분석에 사용하였다.

건강성지수의 등급분포 경향은 동일 생태구라도 지수간의 등급분포에 차이가 있었다. 대표적인 예로 동해 생태구에서 AMBI는 2등급의 비율이 75%, 1등급의 비율이 25%로 양호한 수준으로 평가되었지만, BQI는 3등급의 비율이 55%, 4등급의 비율이 45%로 불량한 수준으로 평가되었다. 또한 대한해협 생태구에서 BPI는 1등급이 48%, 2등급이 45%의 비율을 보였지만, H'과 M-AMBI는 3등급이 각각 47%, 48%, 4등급이 각각 24%, 22%의 비율을 보여 각 건강성지수로 평가된 등급분포에 차이를 보였다.

건강성지수의 Wilcoxon test 결과 전체 해역은 H'과 M-AMBI의 등급이 유사하게 나타났다. 서해중부 생태구는 BPI와 EQR의 등급, BQI와 H'의 등급, BQI와

**Table 3.** Number of species, mean number of species, mean density, mean biomass (wet weight), ecological uni- and multi-variate indices in five eco-regions of Korean coastal areas in 2015-2016

Coastal area / EcoQ	Total	West	Southwest	Korea Strait	East	Jeju
Number of species	1053	535	626	301	299	279
Mean number of species (indiv./0.3m <sup>2</sup> )	47.8 ±31.3	63.9 ±32.7	51.6 ±37.4	31.5 ±18.3	35.7 ±12.6	37.8 ±16.6
Mean density (indiv./m <sup>2</sup> )	1161.8 ±1600.8	1843.9 ±2374.0	974.4 ±1003.2	680.7 ±896.8	1182.6 ±1374.6	573.9 ±627.8
Mean biomass (gWW/m <sup>2</sup> )	80.7 ±144.0	73.3 ±142.1	80.8 ±142.2	98.3 ±171.2	86.0 ±60.9	55.3 ±184.6
EcoQR	1.8±0.5	1.7±0.5	1.6±0.5	2.1±0.6	1.9±0.4	1.7±0.5
BHI	1.1±0.3	1.0±0.0	1.1±0.4	1.3±0.5	1.0±0.2	1.0±0.0
Mean EcoQ (3GS)	1.4±0.4	1.3±0.3	1.4±0.4	1.7±0.5	1.5±0.3	2.0±0.4
AMBI	1.9±0.5	1.8±0.6	1.9±0.4	2.1±0.5	1.8±0.4	1.7±0.5
BPI	1.4±0.8	1.4±1.0	1.7±0.8	1.6±0.8	1.1±0.3	1.0±0.2
BQI	3.0±1.0	2.4±0.9	2.8±1.1	3.7±0.7	3.5±0.5	3.0±0.6
EQR	1.7±0.8	1.4±0.7	1.7±0.7	2.2±1.0	1.6±0.6	1.4±0.6
H'	2.7±0.8	2.5±0.7	2.5±0.9	3.2±0.9	3.0±0.4	2.6±0.7
M-AMBI	2.6±0.8	2.3±0.7	2.6±0.8	3.1±0.9	2.8±0.5	2.5±0.6
Mean EcoQ (5GS)	2.2±0.6	1.9±0.6	2.2±0.6	2.7±0.7	2.3±0.2	2.0±0.4



**Figure 3.** Percent frequency (%) of ecological quality (EcoQ) status based on eight selected ecological health indices (EcoQ, AMBI, BHI, BPI, BQI, EQR, H', M-AMBI) in five eco-regions of Korea. Abbreviations of indices referred to the text

M-AMBI의 등급이 유사하게 나타났다. 서남해역 생태구는 BPI와 EQR의 등급, H'과 M-AMBI의 등급이 유사하게 나타났고, 대한해협 생태구는 AMBI와 EQR의 등급, H'과 M-AMBI의 등급이 유사하게 나타났다. 동해와 제주 생태구는 H'과 M-AMBI의 등급이 유사하게 나타났다. 서해중부 생태계를 제외한 모든 생태구에서 H'과 M-AMBI의 등급이 유사한 결과를 보였다 (Fig. 3, Table 4). 관리에 있어 지역별 Ecological Quality (EcoQ)에 대해 평가의 목적에 따라 적절한 지수를 선택하거나 지수와의 관계를 검토하는 것은 중요하다(Blanchet et al., 2008). 생태구별 EcoQ를 평가할 때도 건강성지수의 생태등급 결과가 다르므로 적절한 지수를 신중히 선택할 필요가 있다.

### 3.3 생태지수와 다변량지수의 성능 비교

15개의 생태지수와 다변량지수의 계산결과의 유사성을 MDS를 통해 분석해 본 결과 생태구별로 지수 간의 유사관계가 다양하게 나타났다(Fig. 4). 출현종수는 해역에서 출현한 종의 다양성을 가장 쉽게 평가할 수 있는 지수인데, 이 출현종수와 다른 지수들 간의 유사도를 분석한 결과 서해중부와 대한해협, 동해 생태구는 근접해있다. 반면, 서남해역, 제주 생태구는 분산되어 있다. 이는 서남해역과 제주 생태구에서는 출현종수만으로 그 해역의 다양성을 평가할 수 없음을 보여준다. 다양성을 설명할 수 있는 생태지수와 건강성을 설명할 수 있는 다변량지수의 공간배열도 생태구별로 다양한 결과를 보였다. 서해중부, 대한해협, 동해 생태

**Table 4.** Result of the non-parametric Wilcoxon paired sample test among the ecological indices deriving ecological quality status classification (with the five EcoQ classes defined by the WFD) without considering tied ranking

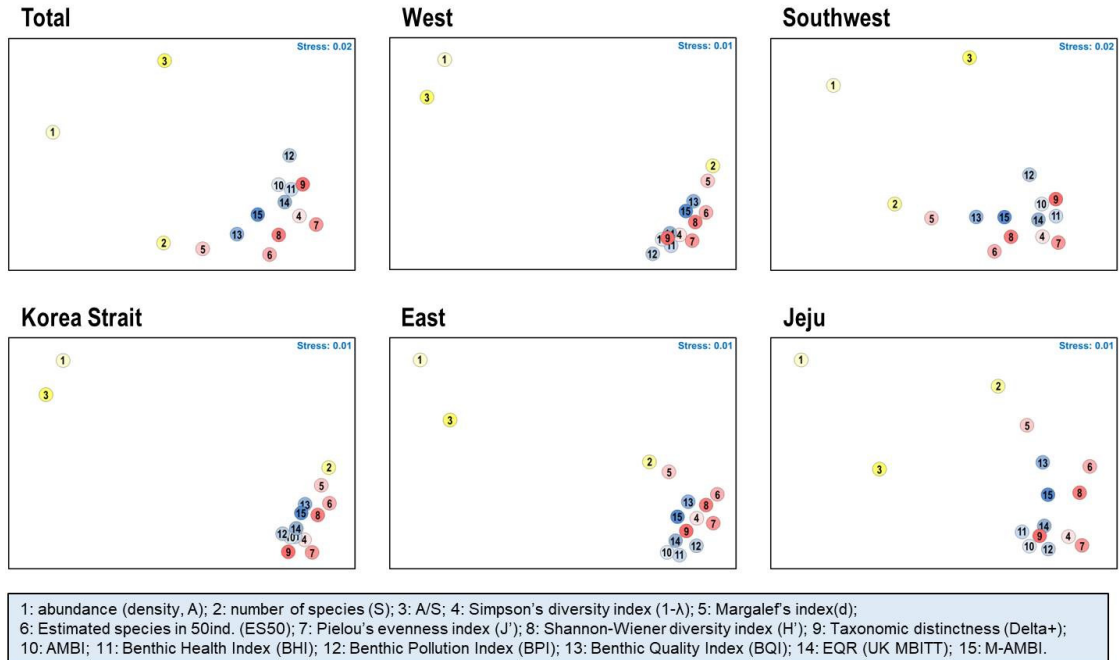
(a) Total (n=292)						(b) West (n=84)					
	BPI	BQI	EQR	H'	M-AMBI		BPI	BQI	EQR	H'	M-AMBI
AMBI	***	***	***	***	***	AMBI	***	***	***	***	***
BPI		***	***	***	***	BPI		***	ns	***	***
BQI			***	***	***	BQI			***	ns	ns
EQR				***	***	EQR				***	***
H'					ns	H'					**
(c) Southwest (n=86)						(d) Korea Strait (n=58)					
	BPI	BQI	EQR	H'	M-AMBI		BPI	BQI	EQR	H'	M-AMBI
AMBI	**	***	**	***	***	AMBI	***	***	ns	***	***
BPI		***	ns	***	***	BPI		***	***	***	***
BQI			***	**	**	BQI			***	***	***
EQR				***	***	EQR				***	***
H'					ns	H'					ns
(e) East (n=40)						(f) Jeju (n=24)					
	BPI	BQI	EQR	H'	M-AMBI		BPI	BQI	EQR	H'	M-AMBI
AMBI	***	***	*	***	***	AMBI	***	***	*	***	***
BPI		***	***	***	***	BPI		***	*	***	***
BQI			***	***	***	BQI			***	**	**
EQR				***	***	EQR				***	***
H'					ns	H'					ns

ns : not significant (p>0.05)

\* : Significant (p<0.05)

\*\* : Very significant (p<0.01)

\*\*\* : Highly significant (p<0.001)



**Figure 4.** Ordination of 15 ecological indices based on the similarity of evaluation results in two-dimensional space of MDS in five eco-regions of Korea

구는 생태지수와 다변량지수의 공간배열이 비슷한 위치에 밀집되어 있고, 서남해역, 제주 생태구는 분산되어 위치하였다. 이는 저서동물의 다양성과 건강성이 꼭 일치하지만은 않다는 결과를 보여준다. 1950년대부터 개발된 생태계 다양성을 평가하는 생태지수와는 달리 다변량지수는 2000년대 들어오면서 생태계의 건강성을 평가할 필요성이 대두됨에 따라 비교적 최근에 개발된 지수이다(Ryu et al., 2016). 생태지수와 다변량지수는 서로 다른 특성을 평가하기 때문에 어느 한 지수만으로 그 해역을 평가하는 것은 오류를 범할 수 있다. 따라서 다양한 지수를 통한 종합적인 평가가 이루어져야 할 것으로 사료된다.

#### 4. 결론

퇴적물 환경변수를 이용한 주성분분석 결과 146개 정점들은 2개의 주성분(설명력: 주성분1- 66.3%, 주성분2- 10.0%)으로 이루어진 공간에서 5개 생태구별로 구분되었다. 동일 생태구별로 비슷한 공간상에 밀집되어 있어, 공간상에서 5개 생태구별로 뚜렷하게 구분됨을 확인하였다.

건강성지수의 등급판정 결과를 Wilcoxon 대응표본 비모수검정법을 통해 비교한 결과 H'과 M-AMBI가 서해중부 생태구를 제외한 모든 생태구에서 유사한 판정결과를 보였다. 서해중부와 서남해역 생태구에서는 BPI와 EQR도 유사하게 나타났다. 이는 저서동물을 이용하여 건강성을 평가할 때, 여러 지수 중에서 성능이 유사하게 나타나는 지수는 그 중 하나를 선택하여 평가하는 것이 더 효율적인 방법일 것이라 사료된다.

15개 생태 및 다변량지수의 계산 결과의 유사성을 다차원척도법을 통해 분석해 본 결과 생태구별로 지수 간의 유사관계가 다양하게 나타났다. 서남해역과 제주 생태구는 생물 다양성과 해저면 서식지 건강성이 반드시 일치하지는 않았다.

5개의 생태구로 구분되는 우리나라 해저면의 건강성을 평가할 때 통일된 지수를 사용하는 것은 평가결과의 오류를 가져올 수 있으며, 다양한 종류의 지수를 이용하여 결과를 종합하여 제시하는 것이 바람직하다. 이를 위해서는 축적된 데이터를 이용하여 지속적인 연구가 더 필요할 것으로 사료된다.

#### 감사의 글

논문을 세심하게 검토해 주신 심사위원님께 감사의 말씀을 올립니다.

#### 참고문헌

- Blanchet, H., Lavesque, N., Ruellet, T., Dauvin, J.C., Sauriau, P.G., Desroy, N., Desclaux, C., Leconte, M., Bachelet, G., Janson, A.L., Bessineton, C., Duhamel, S., Jourde, J., Mayot, S., Simon, S., Montaudouin, X., 2008. Use of biotic indices in semi-enclosed coastal ecosystems and transitional waters habitats—implications for the implementation of the European Water Framework Directive. *Ecol. Indic.* 8, 360-372.
- Borja, A., 2004. The biotic indices and the Water Framework Directive: the required consensus in the new benthic monitoring tools. *Mar. Pollut. Bull.* 48, 405-408.
- Borja, A., Dauer, D.M., 2008. Assessing the environmental quality status in estuarine and coastal systems: comparing methodologies and indices. *Ecol. Indic.* 8, 331-337.
- Borja, A., Dauer, D.M., Diaz, R., Llansó, R.J., Muxika, I., Rodríguez, J.G., Schaffner, L., 2008. Assessing estuarine benthic quality conditions in Chesapeake Bay: a comparison of three indices. *Ecol. Indic.* 8, 395-403.
- Borja, A., Franco, J., Pérez, V., 2000. A marine biotic index to establish the ecological quality of soft-bottom benthos within European estuarine and coastal environments. *Mar. Pollut. Bull.* 40, 1100-1114.
- Clarke, K.R., Gorley, R.M., 2006. PRIMER v6: User Manual/Tutorial. PRIMER-E, Plymouth.
- Clarke, K., Warwick, R., 1998. A taxonomic distinctness index and its statistical properties. *J. Appl. Ecol.* 35, 523-531.
- Clarke, K., Warwick, R., 1999. The taxonomic distinctness measure of biodiversity: weighting of step lengths between hierarchical levels. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 184, 21-29.
- Diaz, R.J., Solan, M., Valente, R.M., 2004. A review of approaches for classifying benthic habitats and evaluating habitat quality. *J. Environ. Manag.* 73, 165-181.
- Hill, M. O., 1973. Diversity and evenness: a unifying notation and its consequences. *Ecology.* 54, 427-432.
- Hurlbert, S.H., 1971. The nonconcept of species



- diversity: a critique and alternative parameters. *Ecology*. 52, 577-586.
12. Jeong, B.G., Shin, H.C., 2018. Spatio-temporal Variation and Evaluation of Benthic Healthiness of Macrobenthic Polychaetous Community on the Coast of Ulsan. *Ocean Polar Res.* 40, 223-235.
  13. Jost, L., 2006. Entropy and diversity. *Oikos*. 113, 363-375.
  14. Jung, R.H., Seo, I.S., Lee, W.C., Kim, H.C., Park, S.R., Kim, J.B., Oh, C.W., Choi, B.M., 2014. Community structure and health assessment of macrobenthic assemblages at Spring and Summer in Cheonsu Bay, West Coast of Korea. *The Sea*. 19, 272-286.
  15. Korea Ocean Research & Development Institute (KORDI), 1995. Marine Environment Assessment Based on The Benthic Faunal Communities. KORDI, Ansan, Korea (in Korean).
  16. Lee, J.H., Ryu, J., 2018. Short-term variations in spatial distribution of the macrozoobenthic community near the Geum river estuary, Korea. *J. Korean Soc. Mar. Environ. Energy*. 21, 368-380
  17. Lim, H.S., 2015. Spatial Distribution of Soft Bottom Macrobenthos of Yeosu Bay in Summer Season, South Coast of Korea. *The Sea*. 20, 78-91.
  18. Margalef, R., 1958. Information theory in ecology. *Gen. Syst.* 3, 157-175.
  19. McManus, J.W., Pauly, D., 1990. Measuring ecological stress: variations on a theme by R.M. Warwick. *Mar. Biol.* 106, 305-308.
  20. Muxika, I., Borja, A., Bald, J., 2007. Using historical data, expert judgement and multivariate analysis in assessing reference conditions and benthic ecological status, according to the European Water Framework Directive. *Mar. Pollut. Bull.* 55, 16-29.
  21. Muxika, I., Somerfield, P.J., Borja, A., Warwick, R.M., 2012. Assessing proposed modifications to the AZTI marine biotic index (AMBI), using biomass and production. *Ecol. Indic.* 12, 96-104.
  22. National Fisheries Research and Development Institute (NFRDI), 2010. Study on the development of an ecological quality assessment index using macrobenthic community. NFRDI, Busan, Korea (in Korean).
  23. National Fisheries Research and Development Institute (NFRDI), 2016. Integrative ecosystem assessment and management of coastal aquaculture and fishing grounds. NFRDI, Busan, Korea (in Korean).
  24. Pearson, T.H., Rosenberg, R., 1978. Macrobenthic succession in relation to organic enrichment and pollution of the marine environment. *Oceanogr. Mar. Biol. Ann. Rev.* 16, 229-311.
  25. Pielou, E.C., 1966. The measurement of diversity in different types of biological collection. *J. Theoret. Biol.* 13, 131-144.
  26. Rho, T.K., Lee, T.S., Lee, S.R., Choi, M.S., Park, C., Lee, J.H., Lee, J.Y., Kim, S. S., 2012. Reference values and water quality assessment based on the regional environmental characteristics. *The Sea*. 17, 45-58
  27. Rosenberg, R., Blomqvist, M., Nilsson, H.C., Cederwall, H., Dimming, A., 2004. Marine quality assessment by use of benthic species-abundance distributions: a proposed new protocol within the European Union Water Framework Directive. *Mar. Pollut. Bull.* 49, 728-739.
  28. Rosenberg, R., Nilsson, H.C., 2005. Deterioration of soft-bottom benthos along the Swedish Skagerrak coast. *J. Sea Res.* 54, 231-242.
  29. Ryu, J., Hong, S., Chang, W. K., Khim, J. S., 2016. Performance evaluation and validation of ecological indices toward site-specific application for varying benthic conditions in Korean coasts. *Sci. Total. Environ.* 541, 1161-1171.
  30. Shannon, C.E., Weaver, W., 1963. The mathematical theory of communication. Univ. Illinois Press, Urbana, 177.
  31. Warwick, R.M., Ashman, C.M., Brown, A.R., Clarke, K.R., Dowell, B., Hart, B., Lewis, R.E., Shillabeer, N., Somerfield, P.J., Tapp, J.F., 2002. Inter-annual changes in the biodiversity and community structure of the macrobenthos in Tees Bay and the Tees estuary, UK, associated with local and regional environmental events. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 234, 1-13.
  32. Wilcoxon, F., 1945. Individual Comparisons by Ranking Methods. *Biometrics. Bull.* 1, 80-83.
  33. Wildsmith, M.D., Rose, T.H., Potter, I.C., Warwick, R.M., Clarke, K.R., Valesini, F.J., 2009. Changes in the benthic macroinvertebrate fauna of a large microtidal estuary following extreme

- modifications aimed at reducing eutrophication. *Mar. Pollut. Bull.* 589, 1250-1262.
34. Yoo, J.W., Lee, Y.W., Ruesink, J.L., Lee, C.G., Kim, C.S., Park, M.R., Yoon, K.T., Hwang I.S., Maeng J.H., Rosenberg, R., Hong, J.S., 2010. Environmental quality of Korean coasts as determined by modified Shannon-Wiener evenness proportion. *Environ. Monit. Assess.* 170, 141-157.
35. Ysebaert, T., Meire, P., Herman, P.M., Verbeek, H., 2002. Macrobenthic species response surfaces along estuarine gradients: prediction by logistic regression. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 225, 79-95.