

표층 퇴적물의 생화학적 조성을 이용한 남해연안 영양상태 평가

조윤식* · 김윤빈**† · 이원찬** · 홍석진** · 이석모***

*, ** 국립수산과학원 어장환경과, *** 부경대학교 생태공학과

The Trophic State Assessment using Biochemical Composition in the Surface Sediments, the Southern Coast of Korea

Yoon-Sik Cho* · Yoon-Bin Kim**† · Won-Chan Lee** · Sok-Jin Hong** · Suk-Mo Lee***

*, ** Marine Environment Research Division, National Fisheries Research & Development Institute, Busan, 619-705, Korea

*** Major of Ecological Engineering, Pukyong National University, Busan, 608-737, Korea

요약 : 연안생태계의 영양상태와 환경적 질을 평가하기 위하여, 2007년 2월 남해연안의 총 25개 소해역, 131개 정점을 대상으로 표층 퇴적물의 입도조성, 광합성 색소, 총유기탄소, 총질소, 생화학적 조성(단백질, 탄수화물, 지질) 등을 분석하였다. 다차원 분석 결과 4개의 그룹으로 나뉘었으며, 일원분산분석에서 단백질, 탄수화물, biopolymeric carbon 농도의 차이가 뚜렷하게 나타났다. 이를 토대로 퇴적물 내 생화학적 조성을 이용한 영양상태 기준을 설정하였으며, 조사해역의 영양상태를 평가한 결과 산업폐수 및 생활하수 유입이 많은 마산만, 진해만, 행암만을 포함한 I 그룹을 과영양 상태, 양식시설이 밀집한 통영, 고성·자란, 거제연안 등의 II 그룹은 부영양 상태로 추정되었으며, 가막만, 득량만, 여자만 등의 III 그룹은 중영양 상태로, 나머지 신안, 진도, 무안을 포함한 IV 그룹은 빈영양 상태로 추정되었다. 본 연구 결과로 퇴적물의 생화학적 조성을 이용한 영양상태 구분은 연안역의 영양도 평가를 위하여 유용한 방법으로 사용되어 질 수 있다고 판단된다.

핵심용어 : 영양상태, 퇴적물의 생화학적 조성, 단백질, 탄수화물, Biopolymeric carbon

Abstract : In order to classify the trophic state and environmental quality of marine coastal system, an approach using the characteristics and biochemical composition in the sediments can be available. This research, including 25 coastal bay, belong to 131 stations, was carried out along the south coasts of Korea in February 2007. Type of sediment, total organic carbon, total nitrogen, phytopigments and biochemical composition (proteins, lipids, carbohydrates) were analyzed. Result from Multi-dimensional Scaling (MDS) ordination indicates that four group can be identified. The result of ANOVA with tukey test shows that the concentrations of proteins, carbohydrates and biopolymeric carbon were significantly different to four groups. We propose the trophic state classification for these groups using the biochemical composition of sediment organic matter. I group (Masan, Jinhae, Haengam) has been defined as hypertrophic state, II group (Tongyeong, Goseong-Jaran, Geoje et al.), as eutrophic; III group (Gamak, Deungnyang, Yeoja et al.), as mesotrophic and IV group (Sinan, Jindo, Muan), as oligotrophic. On the basis of results reported in this study, the biochemical composition of sediment organic matter could be considered an useful and sensitive tool for the classification of the trophic state of marine coastal systems.

Key Words : Trophic state, Biochemical composition in the sediments, Proteins, Carbohydrates, Biopolymeric carbon

1. 서론

연안해역에 과도하게 유입되는 유기물은 종 다양성 감소와 같은 저서 건강도 악화, 해양생물의 사망 등 생태학적으로 악영향을 초래하는 계기가 된다. 해역의 영양상태(Trophic state)

는 빈영양(Oligotrophic), 중영양(Mesotrophic), 부영양(Eutrophic), 과영양(Hypertrophic) 상태로 구분될 수 있다(Nixon, 1995; Wasmund et al., 2001). 연안해역의 영양상태 분석 연구는 질소와 인과 같은 영양염 농도, 식물플랑크톤의 군집 분석, 물리·화학적 환경인자에 중점을 두고 있다. 이에 근거하여 부영양화의 원인항목으로 용존무기질소, 용존무기인, 일차반응항목으로 chlorophyll *a*, 투명도, 이차반응항목으로 저층용존산소포화도 등을 이용한 종합적인 영양지수가 연안해역의 수질 평가기

* First Author : ys@nfrdi.re.kr, 051-720-2525

† Corresponding Author : bin-scent@hanmail.net, 051-720-2525

법에 제안되고 있다(EPA, 2012). 즉, 최근 들어 환경인자를 기반으로 한 농도 중심의 정적인 관점(Static perspective)에서 유입·반응(Input-response) 관점으로 진화하고 있다(Cloern, 2001).

Nixon(1995)은 해역의 부영양화에 대하여 기존의 영양염 농도보다는 해역이 받는 유기물의 공급에 의미를 두어, 유기탄소 공급에 기초를 둔 영양상태 분류의 기준을 제안하였다. Fabiano et al.(1995)은 Nixon의 개념을 확장시켜 퇴적물 내 유기물 조성 및 농도가 해양환경에서 영양상태를 알기 위한 중요한 지표가 될 수 있다고 하였다. 부영양 해역에서는 많은 유기탄소를 축적하는 경향이 있고 이는 유기물의 생화학적 조성의 변화를 초래한다(Danovaro et al., 1993; Tselepidis et al., 2000). 또한, 퇴적물의 영양상태 변화는 퇴적된 유기탄소의 보존적 특성(Conservative nature)으로 인해 유기물의 농도보다는 유기물 조성 측면에서 더욱 뚜렷하게 나타난다(Dell'Anno et al., 2002). 퇴적물 내 유기물의 불안정한(labile) 화합물이 오히려 총 유기물(TOM)의 양보다 시스템의 전체 생산력의 변화에 더 민감한 것으로 보이며, 이는 해양 생태계의 영양상태를 알기 위한 좋은 지시자(Proxy)로 사용되어 질 수 있다(Pusceddu et al., 2005).

최근 연구 결과에서 퇴적물의 생화학적 조성은 입자의 기원을 알 수 있는 접근 방법일 뿐만 아니라, 저서 생물들에게 이용가능한 먹이질(Food availability)을 평가하기 위한 유용한 수단이라고 보고하였다(Rossi and Lardcci, 2002; Cividanes et al., 2002; Cotano and Villate, 2006). 또한, Dell'Anno et al.(2002)

은 퇴적물의 생화학적 조성을 이용하여 연안 생태계의 영양상태를 평가하였는데, 특히 퇴적물의 단백질 농도는 저서의 영양상태를 나타내는 유용한 분류자인 것으로 보고하였다. 국내의 퇴적물 내 유기물 환경은 연안해역의 환경문제 접근 방법 중 하나로 지속적인 연구가 이루어지고는 있으나(Kang et al., 1993; Noh et al., 2006; Hwang et al., 2006), 퇴적물 내 생화학적 조성을 이용한 연안 생태계 평가 연구는 시도되지 않았다.

이 연구는 국가해양측정망 중 남해연안에 대한 유기퇴적물의 농도 분포와 생화학적 조성을 이용하여 우리나라 해역의 영양상태를 비교하였으며, 퇴적물 내 유기물의 양과 질의 분석을 이용한 생화학적 접근 방법을 통해 우리나라 연안 해역의 영양상태를 평가하기 위한 새로운 분류자(New descriptor)를 확인하고 영양상태 기준을 설정하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

본 조사를 위한 시료채취는 국가 해양환경 정점(NFRDI, 2008) 중 울산만에서 무안해역까지 총 25개 소해역, 131개 정점을 대상으로 2007년 2월에 실시되었다(Fig. 1).

박스 코어를 이용하여 표층 퇴적물(0~3 cm)을 채취하였으며, 채취한 시료는 냉동 보관 후 실험실로 운반하여 입도 (grain size), 총 유기탄소(TOC; Total organic carbon), 총질소(TN; Total nitrogen), 광합성색소(Phytopigment; Chlorophyll *a*

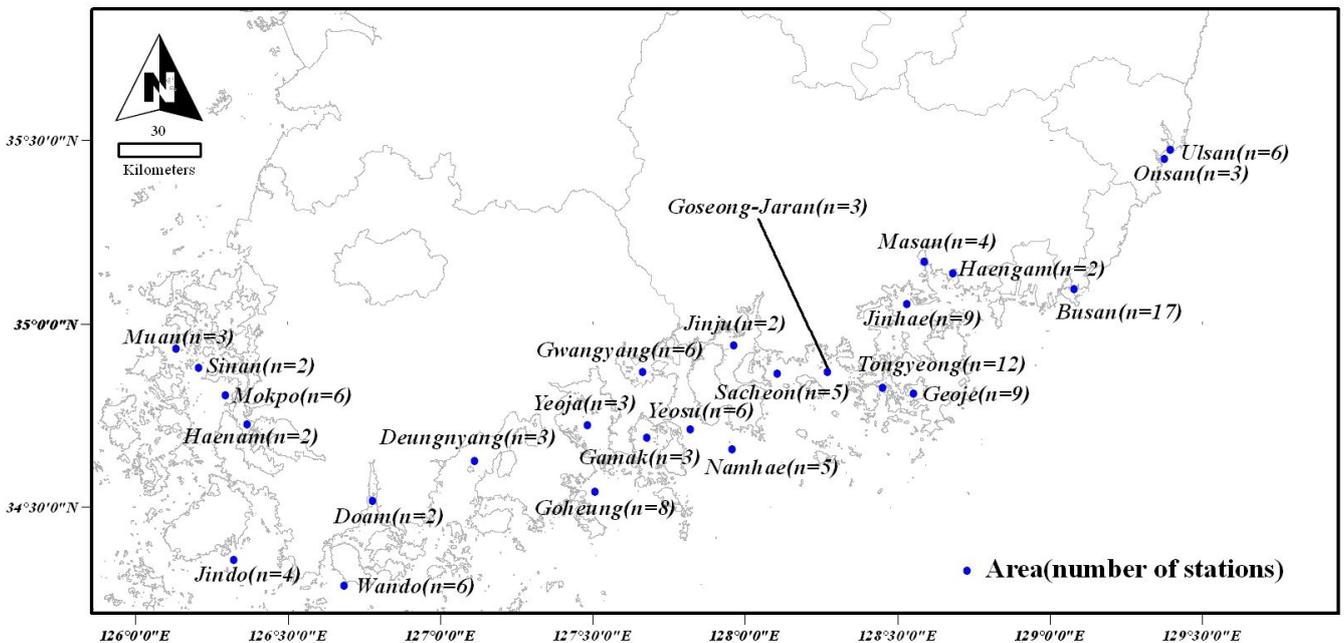


Fig. 1. Location map of coastal and offshore areas for environmental monitoring in the southern coast of Korea.

and phaeopigments), 단백질(Proteins), 탄수화물(Carbohydrates), 지질(Lipids)을 분석하였다.

퇴적상의 분류는 Folk(1968)의 방법에 따랐으며, TOC와 TN의 분석은 CHN 원소분석기(Flash EA-1112, Thermo Finnigan)로 측정하였다. 광합성색소(Chlorophyll *a* and phaeopigments)는 Lorenzen and Jeffrey(1980)의 방법을 따랐다. 단백질은 Folin-ciocalteu를 이용하여 발색하는 Lowry et al.(1951)의 방법으로, 탄수화물은 Dubois et al.(1956)의 Phenol-sulphuric acid 방법으로, 지질은 chloroform과 methanol로 추출한 후 Marsh and Weinstein(1966)의 방법으로 분석하였다. 검출된 각각의 농도에 0.49, 0.40, 0.75($\mu\text{g C } \mu\text{g}^{-1}$)의 변환 상수를 이용하여 탄소당량으로 변환시킨 후 합산하여 Biopolymeric carbon(BPC)으로 정의하였다(Mirto et al., 2000). 남해연안별 평균값 차이는 일원분산분석(One-way ANOVA)을 통하여 검정하였으며 사후분석으로는 터키검증(Tukey test)을 이용하였다. 또한 남해연안의 부영양 특성을 평가하기 위해 정점간의 유사도에 의한 그룹핑을 하기 위해 다차원 척도법(MDS; Multi-Dimensional Scaling)을 적용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 남해연안 퇴적물 특성

3.1.1 입도 조성

퇴적물 내의 입도조성은 퇴적물의 이화학적 특성을 결정하는 중요한 인자로서 퇴적물의 밀도와 유기물이 집적되어 보존될 수 있는 정도를 나타내는 항목이다. 우리나라 남해연안 표층퇴적물의 입도 조성을 살펴보면 Table 1과 같다. 퇴적물 내 자갈, 모래, 점토, 실트의 함량을 기초로 Folk(1968)의 삼각좌표에 도시한 결과, 연구지역내 퇴적물은 약 역질니(Slightly gravelly mud, (g)M), 역질니(Gravelly mud, gM), 약역니질사(Slightly gravelly muddy sand, (g)mS), 역니질사(Gravelly muddy sand, gmS), 니(Mud, M), 점토(Clay, C)인 총 6개의 퇴적물 유형(Sedimentary type)으로 이루어져 있었으며, 주로 약역질니((g)M)가 우세하게 분포하였다.

또한, 평균입도는 2.26~10.37 ϕ (평균 7.54 ϕ)범위로 중립사(Medium mud)부터 점토(Clay)까지 다양하였으며 전반적으로 세립질 퇴적물이 우세한 것으로 나타났다.

Table 1. Grain size, texture and type in the surface sediments, the southern coast of Korea

Area	Textures (%)					Mean size (ϕ)	Sediment type (Folk, 1968)
	Gravel	Sand	Clay	Silt	Mud		
Ulsan	0.42	7.28	32.40	59.90	92.30	8.68	(g)M
Onsan	0.11	4.70	25.41	69.78	95.19	9.35	(g)M
Busan	1.56	26.63	21.34	50.48	71.81	7.35	(g)M
Haengam	0.00	1.82	29.08	69.11	98.18	9.14	C
Masan	0.00	5.55	31.83	62.62	94.45	9.18	M
Jinhae	0.03	1.47	27.34	71.16	98.50	9.48	(g)M
Geoje	2.82	17.10	21.65	58.42	80.07	8.00	(g)M
Tongyeong	5.93	8.57	30.72	54.78	85.51	7.79	gM
Goseong-Jaran	0.45	0.79	25.20	73.57	98.76	9.63	(g)M
Sacheon	2.82	56.61	17.56	23.00	40.56	4.78	(g)mS
Jinju	2.44	48.81	21.99	26.76	48.75	5.41	(g)mS
Gwangyang	16.59	20.21	22.09	41.11	63.20	5.71	gM
Yeosu	0.00	0.84	34.62	64.53	99.16	9.25	M
Namhae	6.38	24.40	22.66	46.55	69.22	6.75	gM
Gamak	0.80	2.04	34.44	62.72	97.16	9.04	(g)M
Yeoja	0.23	1.74	13.23	84.80	98.03	10.37	(g)M
Goheung	0.08	14.43	29.35	56.13	85.48	8.47	(g)M
Deungnyang	0.11	2.27	41.16	56.47	97.62	8.99	(g)M
Wando	21.95	19.25	10.89	47.90	58.80	5.74	gM
Doam	23.22	23.66	23.66	29.47	53.13	4.57	gM
Jindo	28.08	19.14	14.54	38.25	52.79	4.42	gM
Haenam	0.47	0.80	18.76	79.98	98.74	10.18	(g)M
Mokpo	0.04	4.58	27.94	67.44	95.38	9.36	(g)M
Sinan	28.10	47.41	9.40	15.09	24.49	2.26	gmS
Muan	5.35	52.23	13.65	28.77	42.42	4.68	gmS

3.1.2 표층퇴적물의 총유기탄소 및 총질소

남해연안 표층퇴적물 중 유기물질 농도 자료를 ANOVA로 분석한 결과, 99% 신뢰수준에서 해역에 따라 통계적으로 유의한 차이를 나타내었다. 총유기탄소와 총질소를 살펴보면 (Fig. 2), TOC는 $0.62 \sim 42.16 \text{ mg C g}^{-1} \text{ dry}$ (평균 $13.16 \pm 7.57 \text{ mg C g}^{-1} \text{ dry}$)의 범위로 대표적인 오염해역으로 알려진 마산만 ($26.05 \pm 10.12 \text{ mg C g}^{-1} \text{ dry}$)에서 가장 높은 농도를 보였고, 행암만 ($25.44 \pm 0.99 \text{ mg C g}^{-1} \text{ dry}$)과 그 주변 해역인 진해만 ($25.15 \pm 8.93 \text{ mg C g}^{-1} \text{ dry}$)도 높은 농도를 나타내었다. 또한 양식장이 밀집한 통영연안, 고성-자란만, 거제연안에서도 남해 서부 해역에 비해 2~3배 높은 농도를 보였다. TOC 농도 값이 가장 낮은 곳은 완도해역 ($5.08 \pm 3.36 \text{ mg C g}^{-1} \text{ dry}$)이며, 남해 서부 지역에서는 도시형성으로 육상기인의 영향이 높은 목포해역이 주변지역에 비해 높게 나타났다.

TN은 $\text{N.D.} \sim 6.17 \text{ mg N g}^{-1} \text{ dry}$ (평균 $1.73 \pm 1.20 \text{ mg N g}^{-1} \text{ dry}$)의 범위로, 가장 높은 해역은 TOC와 마찬가지로 마산만 ($3.60 \pm 1.94 \text{ mg N g}^{-1} \text{ dry}$)이며, 가장 낮은 해역은 완도 ($0.48 \pm 0.40 \text{ mg N g}^{-1} \text{ dry}$)였다. 전체적으로 남해 동부에서 서부로 옮겨질수록 TOC와 TN의 농도가 낮아지는 경향을 나타내었다.

3.1.3 표층퇴적물의 광합성색소

표층수에서의 식물 플랑크톤에 의한 일차생산력은 연안 퇴적물에서 불안정한 유기탄소(Labile organic carbon)의 주요 공급원이다. 그래서 chlorophyll *a*는 연안역에서 생산력과 영

양도의 분류자로 사용할 수 있다(Lucas et al., 2000; Manini et al., 2001). 또한, 빛에너지를 화학에너지로 변형시키는 광합성색소로서 수주내 식물플랑크톤 생체량을 추정하는데 일반적으로 사용되고, 침강 연구에서도 가라앉는 식물플랑크톤의 지표로 사용되고 있다(Welschmeyer and Lorenzen, 1985). 클로로필로부터 유리되는 phaeopigment는 수주내에서 서식하는 동물플랑크톤(Zooplankton)들의 섭이활동(Grazing activity)에 의해서와(Shuman and Lorenzen, 1975; Hallegraeff, 1981), 퇴적물내의 저서 여과식자(Benthic filter-feeder) 및 퇴적물 식자(Deposit-feeder)에 의해 만들어진다(Hawkins et al., 1986). 그러므로 이들의 분해 생성물(Phaeopigment)의 농도는 식물플랑크톤의 자연군집(Natural populations of phytoplankton)에서의 생리적 상태(Physiological status) 및 섭이과정에 대한 유용한 지표로 사용된다.

남해연안별 chlorophyll *a*와 phaeopigment 농도를 살펴보면 (Fig. 3), chlorophyll *a*의 농도 범위는 $0.08 \sim 5.19 \mu\text{g g}^{-1}$ (평균 $1.72 \pm 0.96 \mu\text{g g}^{-1}$)이고, phaeopigment는 $0.58 \sim 3.32 \mu\text{g g}^{-1}$ (평균 $2.21 \pm 0.57 \mu\text{g g}^{-1}$)이다. Chlorophyll *a*는 해남만에서 가장 높은 $3.38 \pm 0.53 \mu\text{g g}^{-1}$ 을 보였으며, 무안에서 가장 낮은 $0.66 \pm 0.24 \mu\text{g g}^{-1}$ 의 농도를 보였다. Phaeopigment는 온산에서 가장 높은 $2.82 \pm 0.38 \mu\text{g g}^{-1}$ 을 보였고, 신안에서 가장 낮은 $0.96 \pm 0.29 \mu\text{g g}^{-1}$ 의 농도를 보였다. 해남만, 득량만, 사천만을 제외한 대부분의 해역에서 chlorophyll *a*보다 phaeopigment의 농도가 높게 나타났다.

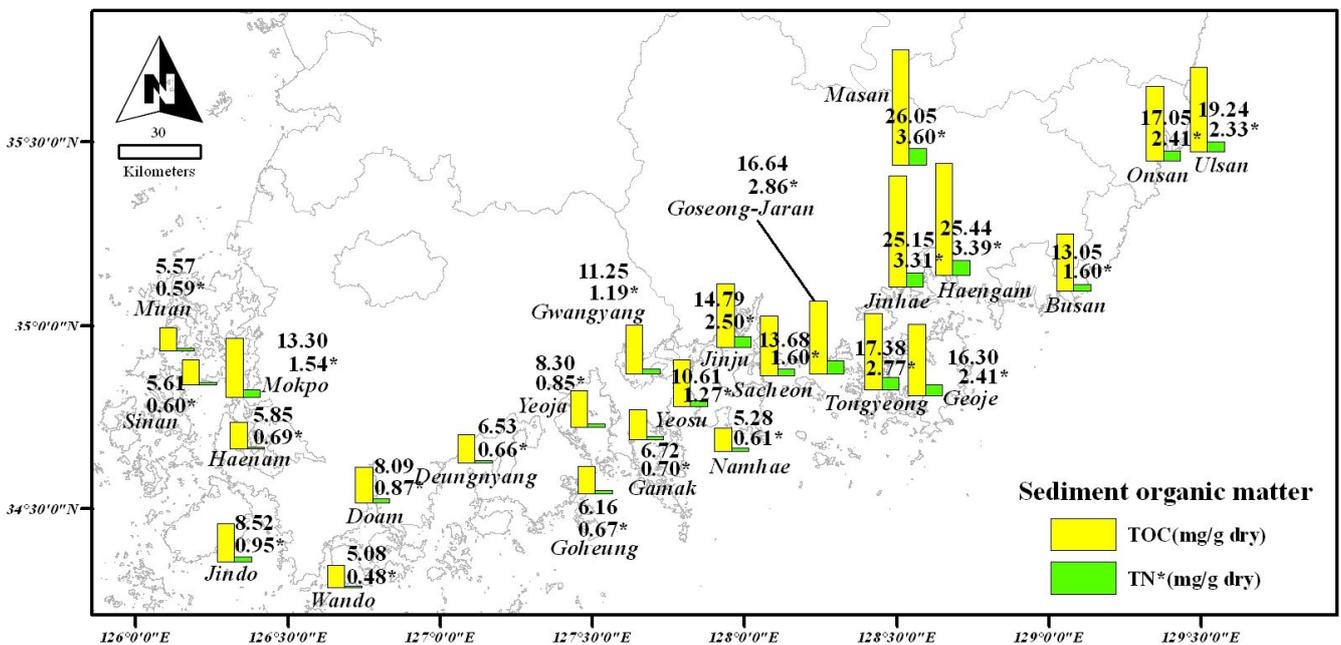


Fig. 2. Total organic carbon and total nitrogen concentrations in the surface sediments, the southern coast of Korea.

표층 퇴적물의 생화학적 조성을 이용한 남해연안 영양상태 평가

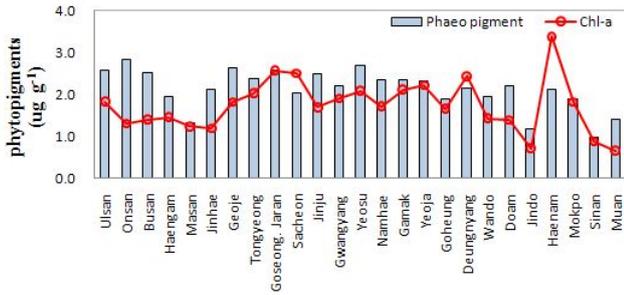


Fig. 3. Phytopigment content in the sediments in 2007 along the south coasts of Korea.

3.1.4 표층퇴적물의 생화학적 조성

각 해역의 생화학적 조성 농도는 지역에 따라 통계적으로 유의한 차이를 나타내었다(ANOVA, $p < 0.01$; Fig. 4). 남해연안에서 탄수화물이 유기화합물의 생화학적 조성의 가장 큰 구성요소이고(47% of BPC pools), 단백질(31% of BPC pools), 지질(22% of BPC pools)순으로 나타났다.

남해연안별 단백질 농도 범위는 $0.57 \sim 17.60 \text{ mg g}^{-1}$ (평균 $5.09 \pm 3.74 \text{ mg g}^{-1}$)였다. 농도가 가장 높은 지역은 TOC, TN과 같이 마산만($15.3 \pm 1.66 \text{ mg g}^{-1}$)이고 가장 낮은 지역인 무안($0.83 \pm 0.30 \text{ mg g}^{-1}$)과 비교해 18배 가량 차이가 났다. Cotano and Villate(2006)에 따르면 단백질은 인위적 물질(Anthropogenic material)과 관련이 있다고 하였는데, 이번 연구에서도 대규모 공단과 도시화로 산업 및 생활 오폐수의 영향이 큰 마산, 진해, 행암만이 다른 해역에 비해 농도가 높았고 삼천포 항이 있는 사천만도 비교적 높았다. 남해 서부 해역 중에서는 목포 해역이 주변해역보다 농도가 높았다.

남해연안별 탄수화물 농도 범위는 $1.76 \sim 31.94 \text{ mg g}^{-1}$ (평균 $9.13 \pm 6.02 \text{ mg g}^{-1}$)이다. 단백질이 인위적 물질과 관련이 있는 반면, 탄수화물은 저서식물 개체수 및 유기체설물과 더욱 연관이 있다(Cotano and Villate, 2006). 그리고 피어슨 상관분석 결과 탄수화물과 TN이 높은 상관관계를 띄고 있었다($r = 0.783, p < 0.01$). 농도가 가장 높은 해역은 마산만 ($23.25 \pm 7.16 \text{ mg g}^{-1}$)이고, 가장 낮은 해역은 신안($2.69 \pm 1.32 \text{ mg g}^{-1}$)이었다. 남해연안의 단백질/탄수화물 비는 $0.19 \sim 1.45(0.55 \pm 0.18)$ 의 값으로 대부분 1보다 낮았다. 이는 유기체설-중속영양환경(Detrital-heterotrophic environments)에서 나타나는 전형적 특징으로(Danovaro and Fabiano, 1996), 대부분의 해역에서 유기체설물이 우점하는 것으로 판단된다. 또한 단백질이 탄수화물보다 더 빠르게 광물화되기 때문에 이러한 낮은 비 값은 오래된 유기체설물이 존재함을 나타낸다(Newell and Field, 1983). 남해연안별 지질(Lipids) 농도 범위는 $0.82 \sim 4.40 \text{ mg g}^{-1}$ (평균 $1.89 \pm 0.69 \text{ mg g}^{-1}$)으로, 농도가 가장 높은 해역은 마산

만 ($3.76 \pm 0.59 \text{ mg g}^{-1}$), 가장 낮은 해역은 여자만($1.22 \pm 0.33 \text{ mg g}^{-1}$)이었다. 남해 동부연안에서 서부쪽으로 갈수록 농도가 낮아지는 단백질과 탄수화물과는 달리 지질에서는 그와 같은 큰 차이는 보이지 않았다.

BPC(Biopolymeric carbon)는 저서 생물의 이용가능한 먹이를 추정하는데 사용되며, 총 유기물과의 비율을 이용하여 퇴적물의 영양적 가치 추정에도 사용된다(Rodil et al., 2008). BPC의 공간적 분포는 TOC에서 관찰된 패턴을 잘 반영한다는 연구 결과가 있으며(Dell' Anno et al., 2002), 본 연구에서도 BPC와 TOC의 상관성이 높게 나타났다($r = 0.861, P < 0.05$; Fig. 5). 남해연안의 BPC 농도 범위는 $1.85 \sim 23.49 \text{ mg g}^{-1}$ (평균 $7.56 \pm 4.51 \text{ mg g}^{-1}$)이며, 가장 높은 해역은 마산($19.62 \pm 3.70 \text{ mg g}^{-1}$)이고, 가장 낮은 해역은 신안($2.69 \pm 0.24 \text{ mg g}^{-1}$)이다.

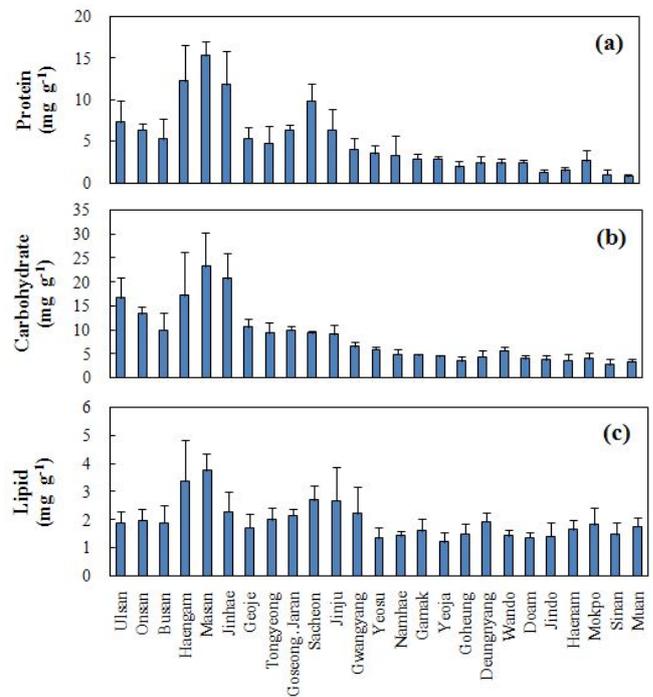


Fig. 4. Concentrations of biochemical composition in the sediments in 2007 along the south coasts of Korea; (a) proteins, (b) carbohydrates and (c) lipids. Standard deviations are reported.

3.2 남해연안 영양상태 평가

남해연안별 퇴적물 조사자료(입도, 색소, TOC, TN, 단백질, 탄수화물, 지질, BPC)를 이용하여 다차원 척도법(MDS) 분석 결과를 Fig. 6에 나타내었다. I 그룹에는 마산만, 진해만, 행암만이, II 그룹은 사천연안, 진주만, 광양만, 부산연안, 통영연안, 거제연안, 온산연안, 울산연안, 고성자란만이, III

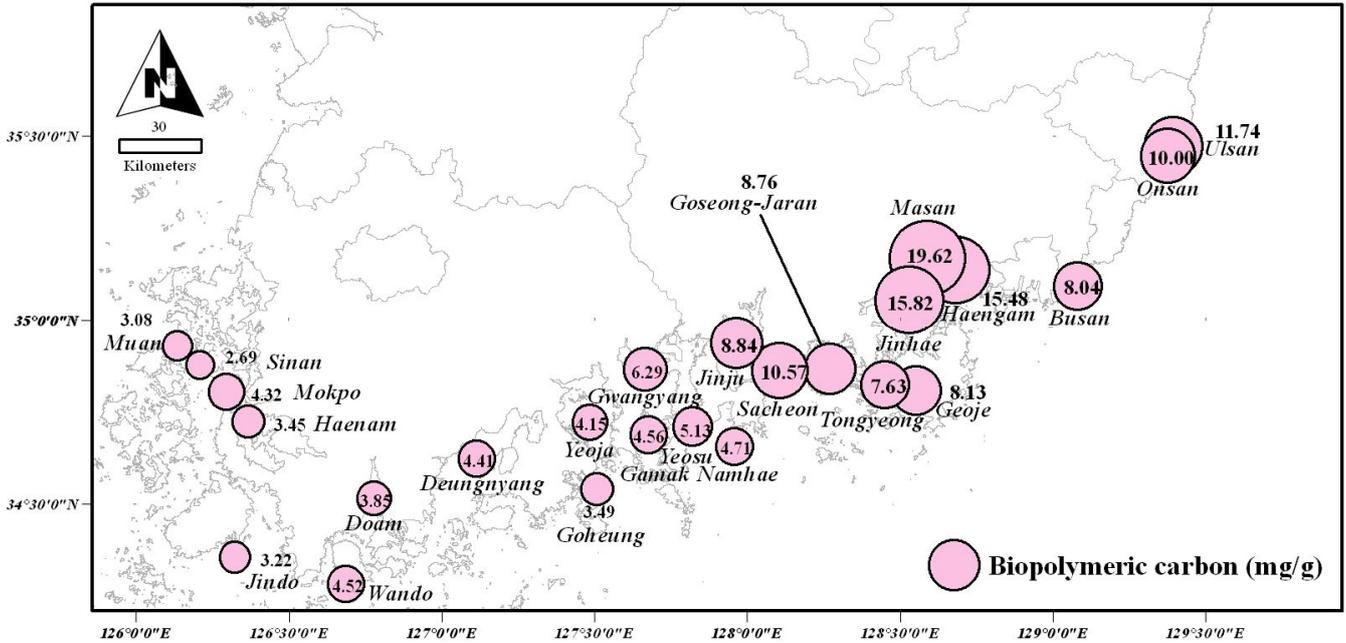


Fig. 5. Biopolymeric carbon concentrations in the surface sediments, the southern coast of Korea.

그룹은 도암만, 완도연안, 남해연안, 고흥연안, 목포연안, 득량만, 가막만, 여수연안, 여자만, 해남만이, IV그룹은 신안연안, 진도연안, 무안연안을 포함하였다.

분석결과 나뉜 4개 그룹에 대한 변수들의 평균값은 Table 2에 나타내었다. 그 결과 평균입도, 광합성 색소, 지질을 제외한 단백질, 탄수화물, BPC, 총유기탄소 및 질소에서 I그룹에서 IV그룹으로 갈수록 농도가 감소하는 경향이 나타났으며, 특히 단백질, 탄수화물, BPC에서 4개 그룹간의 농도 차이가 뚜렷하게 나타났다.

Table 2. Summarization of sediment variations of each station group

	Group I	Group II	Group III	Group IV
Proteins	12.81 ± 3.66	5.59 ± 2.08	2.61 ± 1.10	1.11 ± 0.40
Carbohydrates	20.98 ± 6.02	10.37 ± 3.55	4.59 ± 1.20	3.39 ± 0.93
Lipids	2.82 ± 0.99	1.95 ± 0.57	1.54 ± 0.39	1.54 ± 0.41
BPC	16.79 ± 4.51	8.35 ± 2.43	4.27 ± 0.93	3.05 ± 0.62
TOC	25.43 ± 8.23	15.53 ± 4.30	7.13 ± 4.36	6.89 ± 3.08
TN	3.40 ± 1.39	2.18 ± 0.84	0.77 ± 0.59	0.75 ± 0.42
Chlorophyll <i>a</i>	1.24 ± 0.30	1.83 ± 1.01	1.87 ± 0.99	0.73 ± 0.16
Phaeopigment	1.89 ± 0.81	2.49 ± 0.36	2.13 ± 0.45	1.20 ± 0.31
Mean grain size	9.36 ± 0.68	7.55 ± 2.51	8.20 ± 2.73	4.03 ± 2.89

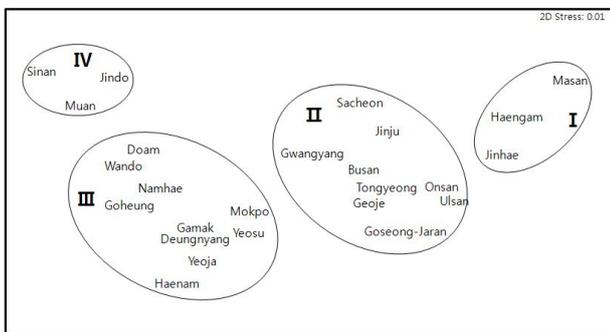


Fig. 6. Output of the non-metric multi-dimensional scaling (MDS) analysis based on transformed data (proteins, carbohydrates, lipids, BPC, TOC, TN, chlorophyll *a*, phaeopigment and grain size).

각 그룹별 유기물 농도 및 성분 조성 자료가 통계적으로 유의한지 알아보기 위해 일원분산분석 결과(Table 3), 등분산 가정을 만족한 단백질, 탄수화물, BPC, TOC, TN 항목이 99.99% 신뢰수준에서 그룹별 해역에 따라 통계적으로 유의한 차이가 있는 것으로 나타났다. 또한, 그룹 간의 차이를 알아보기 위한 사후 분석(Tukey test) 결과, 단백질, 탄수화물, BPC에서 4개의 그룹간의 차이가 뚜렷한 것으로 밝혀졌다.

표층 퇴적물의 생화학적 조성을 이용한 남해연안 영양상태 평가

Table 3. ANOVA with Tukey test to identify differences between studied areas

	df	ss	ms	F	P	Differences(Tukey)
Proteins	3	5.703	1.901	122.01	0.001	I ≠ II ≠ III ≠ IV
Carbohydrates	3	5.458	1.819	126.63	0.001	I ≠ II ≠ III ≠ IV
Lipids	3	0.356	0.119	19.25	0.001	I = II, III, IV
BPC	3	4.152	1.384	138.86	0.001	I = II ≠ III ≠ IV
TOC	3	4.873	1.624	58.09	0.001	I = II ≠ III, IV
TN	3	2.652	0.884	58.95	0.001	I = II ≠ III, IV
Chlorophyll <i>a</i>	3	0.378	0.126	6.42	0.001	I, IV = II, III
Phaeopigment	3	0.393	0.131	27.51	0.001	I, III = II ≠ IV
Grain size	3	0.909	0.303	7.28	0.001	I, II, III ≠ IV

3.3 퇴적물 내 생화학적 조성을 이용한 영양상태 기준설정

Dell' Anno et al.(2002)는 이탈리아 Apolian 연안을 대상지역으로 하여, 2000년 3월과 9월, 99개 정점에서 함수율, 공극률, 총유기물, chlorophyll *a*, phaeopigment, 단백질, 탄수화물, 지질 등을 분석하였다. 공업항, 관광항만, 발전소, 양식장 등 인간 활동에 의해 인위적 영향(Anthropogenic impact)을 많이 받는 지역과 대조구(Control)로 외부영양이 없는 해양보호구역을 포함하여 퇴적물 내 생화학적 조성을 이용한 영양상태 기준을 제시하였다. Lee et al.(2004)은 수질의 생지화학적 자료(Chlorophyll *a*, DIN, DIP)를 이용하여 남해연안의 영양상태를 평가한 바가 있다. 우리나라 해역에 맞는 경계값 설정을 위해 Dell' Anno et al.(2002)의 기준 설정 방법과 Lee et al.(2004)의 결과를 참고하였다.

먼저, 산업폐수 및 생활하수 유입이 많은 마산만, 진해만을 포함한 I 그룹을 과영양 상태(Hypertrophic state)로 가정하였다. Nixon(1995)의 영양도 기준을 적용하였을 때 역시 과영양 상태인 것으로 나타났고, Lee et al.(2004)에서도 과영양으로 평가되어 타당성을 가지는 것으로 판단된다. 생태계 보전에 장애가 있고 해양환경 기준 유지가 곤란한 특별관리해역 모두를 포함하는 II 그룹은 부영양 상태(Eutrophic state)로 가정하였으며, 여기에 속한 부산, 온산, 울산만은 Lee et al.(2004)에서도 부영양 해역으로 평가되었다. 해양 환경 및 생태계의 보존이 양호하며, 환경보전해역(가막만, 득량만, 완도·도암만) 모두를 포함한 III 그룹을 중영양 상태(Mesotrophic state)로 가정하였다. Lee et al.(2004)의 연구에서도 이 그룹에 속한 모든 해역이 중영양으로 평가되었고, Dell' Anno et al.(2002)의 연구에서도 해양보호구역을 중·빈영양으로 가정한 점을 참고하였다. 마지막으로 유기물 풍부도가 가장 낮은 신안, 진도, 무안의 IV 그룹을 빈영양 상태

(Oligotrophic state)로 가정하였다. 단백질, 탄수화물, BPC에 대하여 각각의 경계값은 각 그룹별 평균값과 양의 표준편차의 합으로 경계값을 설정하였다. 그 결과 퇴적물의 생화학적 조성을 이용한 연안역의 영양상태 평가 기준으로 Table 4와 같이 제안하였다.

Table 4. A proposal for the trophic state assessment using biochemical composition of sediment in Korean southern coastal areas

Trophic state	Protein (mg g ⁻¹)	Carbohydrate (mg g ⁻¹)	BPC (mg g ⁻¹)
Hypertrophic	7.7 <	13.9 <	10.8 <
Eutrophic	3.7 - 7.7	5.8 - 13.9	5.2 - 10.8
Mesotrophic	1.5 - 3.7	4.3 - 5.8	3.7 - 5.2
Oligotrophic	< 1.5	< 4.3	< 3.7

Lee et al.(2004)이 국가해양환경 측정망 운영 결과 중 6년(1997~2002)간의 수질 생지화학적 자료(Chlorophyll *a*, DIN, DIP)를 이용하여 한국 남해연안의 영양상태를 평가한 결과를 이번 연구와 비교하였을 때, 각 해역의 상대적인 분포 경향이 비슷하게 나타났다. 이는 한 시점에서의 퇴적물 내 생화학적 조성을 이용한 영양상태 평가가 오랜 기간 수질 데이터를 이용하여 얻은 남해연안별 영양상태의 패턴을 비교적 잘 반영하고 있는 것으로 판단된다. 또한 퇴적물의 단백질 농도는 해양 시스템에서 생산력을 반영하므로(Danovaro et al., 2000) 이러한 점들을 종합해 볼 때 단백질과 탄수화물 농도로 연안의 영양도와 유기물 풍부도를 서술하는 데 무리가 없을 것으로 판단된다. 하지만 이러한 영양단계에 대한 경계값들은 다른 세계 여러 연안역의 값들과 비교해서 더욱 강화되고 세밀하게 구별되어야 할 것이다.

해역의 영양상태 평가는 우리가 조사한 인자 이외에 유기물 플럭스, chlorophyll *a*, 투명도, 총인 등 다양한 생화학적 인자가 복합적으로 이용된다(Nixon, 1995; Wasmund et al., 2001). 이는 영양 상태 판단 기준이 연안의 특이성과 복잡한 생지화학적 반응 등에 의해 절대적일 수 없음을 보여준다. 이런 이유로 영양상태 평가에 객관적인 정량·정성적 해석도구와 해역의 고유한 특성에 맞는 기준이 요구된다(Cognetti, 2001). 상기 Table 4 역시, BPC가 퇴적물 내 유기물의 생화학적 조성인자들의 탄소당량 합산값이고, 퇴적물 TOC와의 상관성이 높으며($r=0.862$, $p<0.01$), BPC와 TOC의 남해연안 분포가 유사한 점(Fig. 2, Fig. 5) 등을 미루어 TOC를 기준으로 한 영양상태 평가 또한 가능할 것이다.

부영양화 지수를 활용하는 국내연구 사례는 꾸준히 늘고

있으나 이것이 국내에서 수정 없이 적용할 수 있는지에 대한 명쾌한 연구는 거의 없는 실정이다. 부영양 해역에서의 퇴적물은 수층에 지속적으로 영향을 주며 수질의 악화를 초래하고 있다. 하지만 이를 관리하기 위한 해양퇴적물에 대한 정확한 실태 파악 및 해저 퇴적물의 생화학적·물리적 특성, 오염물질 배출원, 오염물질의 수지 파악 등의 체계적인 연구가 미흡한 실정이며, 현재 해양환경에 대한 관리는 수질 위주로 되어 있어 해양퇴적물에 대한 관리 기준 마련도 필요할 것으로 판단된다.

4. 결론

퇴적물 내 유기물의 양과 질을 분석하여 연안역에서의 영양상태(trophic state)와 환경의 질을 평가하였다. 본 연구에서 한반도 연안역 퇴적물의 유기물 변화는 남해 동부에서 서부로 갈수록 감소하고 있음을 보여준다. 이와 같은 차이는 한국 남해연안에서 유기물 부하량에 따라 다른 영양 상태를 보인다는 것을 알 수 있다. 남해안은 1970년대 이후 산업발달과 인구증가에 따른 산업폐수와 생활하수의 증가 및 양식 활동에 의하여 해역의 유기물 부하량이 증가하고 있다. 특히, 남해동부와 중부해역을 중심으로 한 심한 유기물 축적 현상은 1990년대 이후 생활하수 및 양식장 시설에 의한 자가오염에 의해 매우 급격히 진행되고 있는 것으로 판단된다. 이것은 유기물의 생화학적 관점에서 뚜렷하게 나타났다. 집괴분석에 근거한 다차원 분석(MDS) 결과 한국 남해연안은 4개의 그룹으로 나뉘었으며, 일원분산분석에서 단백질, 탄수화물, BPC 농도의 차이가 뚜렷하게 나타났다. 이것을 토대로 조사해역의 영양상태를 평가한 결과 산업폐수 및 생활하수 유입이 많은 마산만, 진해만, 행암만을 포함한 I 그룹은 과영양 상태(Hypertrophic state)로, 양식시설이 밀집한 통영연안, 고성·자란만, 거제연안이 포함된 II 그룹은 부영양 상태(Eutrophic state)로 추정되었으며, 가막만, 득량만, 여자만 등이 포함된 III 그룹은 중영양 상태(Mesotrophic state)로, 나머지 신안, 진도, 무안을 포함한 IV 그룹은 빈영양 상태(Oligotrophic state)로 추정되었다.

본 연구결과로 유추하여 퇴적물의 단백질과 탄수화물 농도로 연안의 영양도와 유기물 풍부도(Enrichment)를 서술하는 데 무리가 없을 것으로 판단되며, 생화학적 조성을 이용한 영양상태(Trophic state) 구분은 연안역의 영양도 평가를 위한 유용한 방법으로 사용되어 질 수 있다고 판단된다. 또한 저층에서의 생지화학적 반응은 연안생태계 전반에 걸쳐 직·간접적으로 관련이 있으므로 이러한 연안 환경에서 저층의 영양상태 연구는 해양 생태계 전반에 걸친 영향에 이해를 줄 수 있어 다양한 연구가 수행되어야 할 필요성이 있다.

감사의 글

이 연구는 국립수산과학원의 사업과제(연안어장 생태계 통합 평가 및 관리 연구, RP-2013-ME-025)의 일환으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- [1] Cividanes, S., M. Incera and J. López(2002), Temporal variability in the biochemical composition of sedimentary organic matter in an intertidal flat of the Galician coast (NW Spain), *Oceanologica Acta*, Vol. 25, pp. 1-12.
- [2] Cloern, J. E.(2001), Our evolving conceptual model of the coastal eutrophication problem, *Marine Ecology Progress Series*, Vol. 210, pp. 223-253.
- [3] Cognetti, G.(2001), Marine eutrophication: the need for a new indication system, *Mar. Poll. Bull.*, Vol. 42, pp. 163-164.
- [4] Cotano, U. and F. Villate(2006), Anthropogenic influence on the organic fraction of sediments in two contrasting estuaries: A biochemical approach, *Marine Pollution Bulletin*, Vol. 52, pp. 404-414.
- [5] Danovaro, R., C. Gambi, E. Manini and M. Fabiano(2000), Meiofauna response to a dynamic river plume front, *Marine Biology*, Vol. 137, pp. 359-370.
- [6] Danovaro, R. and M. Fabiano(1996), Detritus-bacteria-meiofauna interactions in a seagrass bed (*Posidonia oceanica*) of the NW Mediterranean, *Marine Biology*, Vol. 127, pp. 1-13.
- [7] Danovaro, R., M. Fabiano and N. Della Croce(1993), Labile organic matter and microbial biomasses in deep-sea sediments(Eastern Mediterranean Sea), *Deep-Sea Research*, Vol. 40, pp. 953-965.
- [8] Dell' Anno, A., M. L. Mei, A. Pusceddu and R. Danovaro (2002), Assessing the trophic state and eutrophication of coastal marine systems: a new approach based on the biochemical composition of sediment organic matter, *Marine Pollution Bulletin*, Vol. 44, pp. 611-622.
- [9] Dubois, M., K. A. Gills, J. K. Hamilton, P. A. Roberts and F. Smith(1956), Colorimetric method for the determination of sugars and related substances, *Analytical Chemistry*, Vol. 28, pp. 350-356.
- [10] EPA(2012), National coastal condition report IV, United States Environmental Protection Agency Office of Research and Development/Office of Water, Washington, DC 20460, p.

- 368.
- [11] Fabiano, M., R. Danovaro and S. Frascchetti(1995), A three year time series of elemental and biochemical composition of organic matter in subtidal sediments of the Ligurian Sea(northwestern mediterranean), *Continental Shelf Research*, Vol. 15, pp. 1453-1469.
- [12] Folk R. L(1968), *Petrology of sedimentary rock*, Hemphill's, pp. 1-170.
- [13] Hallegraeff, G. M.(1981), Seasonal study of phytoplankton pigments and species at a coastal station off Sydney: importance of diatoms and nanoplankton, *Mar. biol.*, Vol. 61, pp. 107-118.
- [14] Hawkins, A. J., B. L. Bayne, R. F. C. Mantoura and C. A. Llewellyn(1986), Chlorophyll degradation and adsorption throughout the digestive system of blue mussel *Mytilus edulis* L., *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, Vol. 96, pp. 213-223.
- [15] Hwang, D. W., S. G. Kim, H. G. Jin, S. S. Kim, J. D. Kim and J. S. Park(2006), Distribution of organic matters and metallic elements in the surface sediments of Masan Harbor, Korea, *Korean Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, Vol. 39, No. 2, pp. 106-117.
- [16] Kang, C. K., P. Y. Lee, J. S. Park and P. J. Kim(1993), On the distribution of organic matter in the nearshore surface sediment of Korea, *Bull. Kor. Fish. Soc.*, Vol. 26, No. 6, pp. 557-566.
- [17] Lee, J. S., K. H. Kim, S. S. Kim, R. H. Jung, K. Y. Kim, J. S. Park, P. Y. Lee, Y. S. Lee, W. J. Choi, Y. C. Park, P. J. Kim, W. C. Lee, J. N. Kwon, K. H. Uhm, J. I. Choi, K. A. Jeon and J. H. Han(2004), The assessment of trophic state and the importance of benthic boundary layer in the southern coast of Korea, *The Sea, Journal of the Korean Society of Oceanography*, Vol. 9, No. 4, pp. 179-195.
- [18] Lorenzen, C. and J. Jeffrey(1980), Determination of chlorophyll in sea water, UNESCO, *Technical Papers in Marine Science*, Vol. 35, pp. 1-20.
- [19] Lowry, O. H., N. J. Rosebrough, A. L. Farr and R. J. Randall(1951), Protein measurement with the Folin phenol reagent, *Journal of Biological Chemistry*, Vol. 193, pp. 265-275.
- [20] Lucas, C. H., J. Widdows, M. D. Brinsley, P. N. Salkeld and P. M. J. Herman(2000), Benthic-pelagic exchange of microalgae at a tidal flat, 1. Pigment analysis, *Marine Ecology Progress Series*, Vol. 196, pp. 59-73.
- [21] Manini, E., R. Danovaro and M. Fabiano(2001), Benthic pelagic coupling in frontal system areas of the northern Adriatic sea: analysis of the carbon budgets, *Chemistry and Ecology*, Vol. 18, pp. 1-9.
- [22] Marsh, B. J. and D. B. Weinstein(1966), Simple charring method for determination of lipids, *Journal of Lipid Research*, Vol. 7, pp. 574-576.
- [23] Mirto, S., T. La Rosa, R. Danovaro and A. Mazzola(2000), Microbial and meiofaunal response to intensive mussel-farm biodeposition in coastal sediments of the Western Mediterranean, *Marine Pollution Bulletin*, Vol. 40, No. 3, pp. 244-252.
- [24] Newell, R. C. and J. G. Field(1983), The contribution of bacteria and detritus to carbon and nitrogen flow in a benthic community, *Marine Biological Letter*, pp. 23-36.
- [25] NFRDI(2008), Annual monitoring report of Korean marine environment 2007, National Fisheries Research & Development Institute, Vol. 12. p. 408.
- [26] Nixon, S. W.(1995), Coastal marine eutrophication ; a definition, social causes and future concerns, *OPHELIA*, Vol. 41, pp. 199-219.
- [27] Noh, I. H., H. Y. Yang, D. I. Kim and J. S. Park(2006), The spatio-temporal distribution of organic matter on the surface sediment and its origin in Gamak Bay, Korea, *Journal of the Korean Society for Marine Environmental Engineering*, Vol. 9, No. 1, pp. 1-13.
- [28] Pusceddu, A., C. Fiordelmondo, P. Polymenakou, T. Polychronaki, A. Tselepides and R. Danovaro(2005), Effects of the bottom trawling on the quantity and biochemical composition of organic matter in coastal marine sediments(Thermaikos Gulf, northwestern Aegean Sea), *Continental Shelf Research*, Vol. 25, pp. 2491-2505.
- [29] Rodil, I. F., S. Cividanes, M. Lastra and J. Lopez(2008), Seasonal variability in the vertical distribution of benthic macrofauna and sedimentary organic matter in an Estuarine beach(NW Spain), *Estuaries and Coasts: J CERF*, Vol. 31, pp. 382-395.
- [30] Rossi, F. and C. Lardcci(2002), Role of the nutritive value of sediment in regulating population dynamics of the deposit-feeding polychaete *Streblospio shrubsolii*, *Marine Biology*, Vol. 140, No. 6, pp. 1129-1138.
- [31] Shuman, F. R. and C. J. Lorenzen(1975), Quantitative degradation of chlorophyll by a marine herbivore, *Limnol. Oceanogr.*, Vol. 20, pp. 580-586.
- [32] Tselepides, A., T. Polychronaki, D. Marrale, I. Akoumianaki,

A. Dell' Anno, A. Pusceddu and R. Danovaro(2000), Organic matter composition of the continental shelf and bathyal sediments of the Cretan Sea (NE Mediterranean), *Progress in Oceanography*, Vol. 46, pp. 311-344.

[33] Wasmund, N., A. Andrushaitis, E. Lysiak-Pastuszek, B. Müller-Karulis, G. Nausch, T. Neumann, H. Ojaveer, I. Olenina, L. Pastel and Z. Witek(2001), Trophic status of the South-Eastern Baltic Sea: a comparison of coastal and open areas, *Est. Coast. ShelfSci.*, Vol. 53, pp. 849-864.

[34] Welschmeyer, N. A. and C. J. Lorenzen(1985), Chlorophyll budgets: zooplankton grazing and phytoplankton growth in a temperate fjord and the central Pacific Gyres. *Limnol. Oceanogr.*, Vol. 30, pp. 1-21.

원고접수일 : 2013년 01월 11일

원고수정일 : 2013년 02월 05일

게재확정일 : 2013년 04월 25일