

퇴적물 총유기탄소와 저서 다모류 군집을 이용한 패류양식장의 환경평가 기준설정

조윤식* · 이원찬**† · 김정배** · 홍석진** · 김형철** · 김청숙**

*, ** 국립수산과학원 어장환경과

Establishment of Environmental Assessment using Sediment Total Organic Carbon and Macrobenthic Polychaete Community in Shellfish Farms

Yoon-Sik Cho* · Won-Chan Lee**† · Jeong-Bae Kim** · Sok-Jin Hong** · Hyung-Chul Kim** · Chung-Sook Kim**

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

요 약 : 본 연구에서는 패류양식장이 밀집되어 있는 고성·자란만 22개 정점, 거제·한산만 15개 정점, 진해만 18개 정점에 대하여 계절별(2월, 5월, 8월, 11월)로 퇴적물 환경인자(화학적산소요구량, 강열감량, 산취발성황화물, 총유기탄소)와 저서 다모류 인자(출현 종 수, 서식밀도, 다양도, 균등도)에 대하여 분석하였다. 총유기탄소와 저서 다모류 다양도간의 상관계수가 0.61로 가장 높고 유의한 상관성($P<0.01$)을 보여, 어장환경평가를 위한 대표인자로 설정하였다. 그 결과 두 인자간의 상관성에 의한 어장환경평가 기준 총유기탄소는 Peak Point 15 mg/g dry, Warning Point 26 mg/g dry, Contaminated Point 31 mg/g dry이었으며, 저서 다모류 다양도의 경우 $H' \geq 2.6$ 은 Good, $2.6 > H' \geq 2.1$ 은 Moderate, $2.1 > H' \geq 1.2$ 는 Poor, $H' < 1.2$ 는 Bad로 분류되었다. 본 연구결과는 어장관리를 위한 환경기준 설정에 과학적 기여를 할 수 있을 것으로 판단된다.

핵심용어 : 총유기탄소, 저서 다모류 다양도, 패류양식장, 환경평가, 어장관리

Abstract : In this study, the seasonal field survey was conducted in Goseong-Jaran Bay(22 stations), Geoje-Hansan Bay(15 stations) and Jinhae Bay(18 stations). We analyzed the sediment environmental parameters(Chemical Oxygen Demand, Ignition Loss, Acid Volatile Sulfides, Total Organic Carbon) and biotic parameters of macrobenthic polychaetes(number of species, density, diversity, evenness). It had a good correlation between total organic carbon and polychaete diversity($R=0.61$, $P<0.01$), and we made a decision them as representative environmental indices. As a result of that, regarding the criteria in the assessment of farm environment, we suggest concentrations of total organic carbon : Peak Point = 15 mg/g dry, Warning Point = 26 mg/g dry, Contaminated Point = 31 mg/g dry and polychaete diversity : ~2.6(Good), 2.6~2.1(Moderate), 2.1~1.2(Poor) and 1.2~(Bad). This could be a scientific basis to establish the environmental standards for fishery management.

Key Words : Total organic carbon, Polychaete diversity, Shellfish farms, Environmental assessment, Fishery management

1. 서 론

양식업에 있어서 적정시설량을 초과한 과밀양식, 과잉급이 및 집약적인 양식어장 배치는 양식장 주변의 유기물부하를 증대시키게 되고, 그 영향은 양식장 주변에 한정되지만

육역에서 배출되는 도시폐수와 동등한 영향을 퇴적물의 저서동물상에 주는 것으로 밝혀지고 있다(Takashi, 2008). 이를 통하여 야기되는 어장환경의 악화는 양식장 부영양화, 적조 혹은 어병발생 등으로 이어지고 결과적으로 양식의 생산성을 저하시킨다(NFRDI, 2009a). 어장환경개선과 양식생물의 지속적인 생산성 확보를 위하여 과학적인 어장관리의 필요성과 더불어, 양식환경과 양식생물별 서식환경에 관한 적절한 평가의 필요성 또한 대두되고 있다.

* First Author : ysc@nfrdi.go.kr, 051-720-2525

† Corresponding Author : wclee@nfrdi.go.kr, 051-720-2520

최근, 연안 생태계 평가에 관한 전 세계적인 추세는 물리·화학적 환경인자들과 함께 생물학적 인자를 포함하여 생태학적 통합성을 나타내도록 개발되고 있다(Borja et al., 2008). 즉, 생태계 차원의 전체적인 접근을 통하여 생태학적 상태를 평가하며(Apitz et al., 2006), 이러한 생태계 기반 접근(ecosystem-based approach, EBA)은 특정 생물종 또는 농도 중심의 화학적 평가보다 더욱 효과적인 것으로 판단된다(Borja et al., 2008). 미국 환경청(EPA)에서는 연안해역 평가를 위해 수질지표(water quality index), 퇴적환경지표(sediment quality index), 저서지표(benthic index), 서식지지표(coastal habitat index) 그리고 어류오염지표(fish tissue contamination index) 등의 다섯 가지 지표를 세우고, 이중 퇴적환경지표는 다시 퇴적물 독성(sediment toxicity), 퇴적물 오염(sediment contaminants), 퇴적물 총유기탄소(sediment TOC)로, 저서지표는 종다양성, 종수, 개체수 등으로 세분화하여 통합 평가하고 있다(EPA, 2012). 일본은 ‘지속적 양식생산보호법’에 의거한 수질, 퇴적물, 저서생물을 지표로 어장환경기준을 정하고 있으며, ‘지속가능한 양식생산 확보를 위한 기본방침’과 ‘수산용수기준’을 참고로 어장주변의 환경특성, 양식대상생물의 종류 등을 고려한 어장환경기준에 따라 양식어장이 운영되고 있다(JFRCA, 2006). 또한, 퇴적물 및 저서생물의 조사·분석과 내만도의 적용으로 양식어장환경에 대한 구체적인 평가를 하였으며(Yokayama, 2003), 퇴적물 AVS와 대형저서동물의 생물량과의 상관성을 통하여 양식장 환경 평가 및 기준설정을 시도한 바가 있다(Takashi, 2008). 국내에서는 가막만 동계에 측정된 10개의 환경 변수로 저서환경요인과 저서다모류군집 구조와의 연관성 추정을 시도한 바 있으며(Yoon et al., 2008), 가막만, 득량만, 함평만의 3개 환경보전해역에서 출현한 대형저서동물과 물리자료 및 총유기탄소량 등의 환경요인과의 상관관계를 파악하기도 하였다(NFRDI, 2009b).

국내의 경우, 해양수질기준은 최근 해역별 특성(동·서·남·북해)에 맞는 수질기준은 제정되었으나(Rho et al., 2012), 품종별, 양식방법에 따른 어장환경기준은 별도로 마련되지 않고 있다. 과학적 방법에 의거한 어장환경 평가는 연안이용당사자간의 활용방안을 모색하고, 어장환경기준 설정을 통하여 어장환경 관리, 어장휴식년제 및 어장재배치 등에 관한 정책적 관리방안 수립에 활용될 수 있다.

본 연구는 남해안에서 패류 양식장이 밀집되어 있는 고성·자란만, 거제·한산만, 진해만에 대하여 생태학적 상태 평가를 위한 적정 환경인자와 생물인자를 모색하였으며, 어장환경 평가를 위한 기준값을 찾기 위하여 시도하였다.

2. 재료 및 방법

본 조사는 국립수산과학원의 어장환경실태조사(NFRDI, 2009a; NFRDI, 2010) 중 고성자란만 22개 정점(2009년), 거제·한산만 15개 정점(2008년), 진해만 18개 정점(2008년)에 대하여 계절별(2월, 5월, 8월, 11월)로 실시한 총 220개의 자료로 구성되었다(Fig. 1). 퇴적물 환경인자와 저서동물인자에 대하여 조사하였으며, 퇴적물 환경인자는 퇴적물 화학적산소요구량(chemical oxygen demand, COD), 강열감량(ignition loss, IL), 산휘발성황화물(acid volatile sulfide, AVS), 총유기탄소(total organic carbon, TOC), 총질소(total nitrogen, TN)를 분석하였다. 퇴적물 COD는 일정량의 시료를 알칼리성 과망간산 칼륨법으로 정량하였다(mg/g dry). IL은 약 5g의 퇴적물을 110℃에서 항량으로 될 때까지 건조하고, 550℃에서 2시간 강열한 후, 항량의 무게 차이를 측정(%)하였다. AVS는 약 2g의 퇴적물에 황산을 넣어 검지관에 흡수되는 황화수소의 양을 측정(mg/g dry)하였다. 퇴적물 COD, IL, AVS의 분석은 해양환경공정시험기준(MLTM, 2010)에 따랐으며, TOC와 TN의 분석은 일본저질조사방법에 준하여 염산 0.1 N로 전처리 후, CHN 원소분석기(Flash EA-1112, Thermo Finnigan)로 측정하였다.

저서동물인자는 만에 서식하고 있는 대형저서 다모류(macrobenthic polychaetes) 군집에 대하여 출현 종 수(Number of species), 서식밀도(density), 다양도(H'; Shannon and Weaver, 1949) 그리고 균등도(J'; Pielou, 1966)를 분석하였다. 저서 다모류의 채집을 위한 퇴적물 시료는 채집면적 0.1 m²인 van Veen grab을 사용하여 정점 당 2회 반복 채집하였다. 인양된 퇴적물은 선상에서 망목 크기 1.0 mm 체를 사용하여 체질하였으며, 잔존물은 현장에서 중성포르말린(10%)으로 고정하여 실험실로 운반 후, 저서 다모류의 완전한 개체나 머리가 있는 경우만을 계수하였다. 측정된 개체수는 채집면적 당(0.2 m²)의 값으로 분석에 이용하였다.

우선 남해안에 위치하고 있는 대표적 패류 양식장들의 해역면적, 어장면적의 지리적 여건과 만별 해수유동, 저서 다모류의 분포 특성과 같은 만별 특성을 살펴보았다. 그 다음, 4계절의 퇴적물 환경조사 및 저서 다모류 군집에 관한 분석 자료를 이용하여 상관성 유무를 살펴본 후, 유의한 항목들 중에서 가장 상관성이 높은 인자를 각각 선택하였다. 이 인자들을 이용하여, 현재 국내 남해안 패류 양식장에 있어 어장환경을 객관적으로 평가할 수 있는 기준 설정값을 제시하고자 한다.

3. 결과 및 고찰

3.1 만별 특성

GIS spatial analyst(ArcGIS 10.0)에 의한 고성·자란만의 해역 면적은 약 81.9 km², 이 중 패류양식어업이 차지하는 면적은 어업면허권 기준 3.6 km²로서 약 4.4%의 점유율을 보였다(Fig. 1). 연안 해역의 물질 분포에 큰 영향을 미치는 잔차류의 분포는 고성만 내측의 유속이 2 cm/sec 이하로 정체 현상을 보였고, 고성만 입구 쪽으로 빠져 나오는 유속은 5 cm/sec로 빠른 흐름을 보였다. 자란만의 경우 만의 좌측에서 3~4 cm/sec로 비교적 큰 유속을 보이나 만의 중앙으로 갈수록 점점 작아져 1 cm/sec 미만의 유속을 보였다(NFRDI, 2002). 퇴적물 환경인자의 연평균을 살펴보면 모든 항목에서 고성만이 높게 나타났으며(Table 1), 이는 상대적으로 만의 폐쇄성이 높은 고성만에서 양식의 영향에 따른 오염원의 높은 정체성에 기인하는 것으로 추정된다. 저서 다모류의 출현 종 수는 만 안쪽에서 낮고, 만 외곽으로 가면서 증가하였으며, 밀도는 안쪽이 높고 외곽이 낮아 종 수와 반대되는 현상을 보였다. 생태학적 지수인 다양도와 균등도의 경우 종 수와 동일하게 만 안쪽이 낮고 외곽으로 가면서 증가하였다. 이처럼 종 수와 생태학적 지수는 만 안쪽이 낮고 밀도는 이와 반대되는 현상은 만 내 일부 종이 우점한 결과로 보인다. 고성·자란만 다모류군집의 우점종은 *Lumbrineris longifolia*, *Aphelochaeta monilaris*, *Amaeana occidentalis*, *Sigambra tentaculata* 등으로 *L. longifolia*와 *A. monilaris*는 유기물이 풍부한 해역에서 우점하는 종이며, 특히 이 종들이 만 안쪽에 높은 밀도로 분포하여, 유기물에 의해 영향을 받고 있는 것으로 판단된다.

거제·한산만의 해역면적은 약 96.3 km², 이 중 패류양식장 면적은 어업면허권 기준 7.1 km²로서 약 7.4%에 해당한다(Fig. 1). 잔차류 분포를 살펴보면, 한산만의 남쪽경계인 협수로에서 10 cm/sec 유속으로 외해 방향으로 유출하며, 송도와 비산도 부근 수역에서는 5 cm/sec 내외의 유속으로 북서방향 흐름이 진행되어 유출한다. 거제만 중앙부의 흐름 형태는 만 내측에서 한산만측으로 유출하는 형태이나 유속의 크기는 3 cm/sec 이하로 작으며, 산달도 뒤편 수역의 흐름은 거의 나타나지 않았다(NFRDI, 2002). 이러한 유동흐름을 반영하여 퇴적물 환경인자의 연평균 역시 거제만에서 한산만보다 높게 나타났다. 이 해역의 저서 다모류 군집의 우점종은 *L. longifolia*와 *A. monilaris*로 이들은 국내 내만의 대표적인 잠재적 또는 기회주의적 유기물 오염 지표종들로서 이 해역이 유기물 오염 상황 하에 있음을 암시하였다.

진해만의 해역면적은 약 552.0 km², 이 중 패류양식장의 면적은 어업면허권 기준 15.9 km²로서 약 2.9%에 해당한다(Fig. 1). 진해만의 경우 칠천도, 가조도, 원문만에 양식장이 밀집

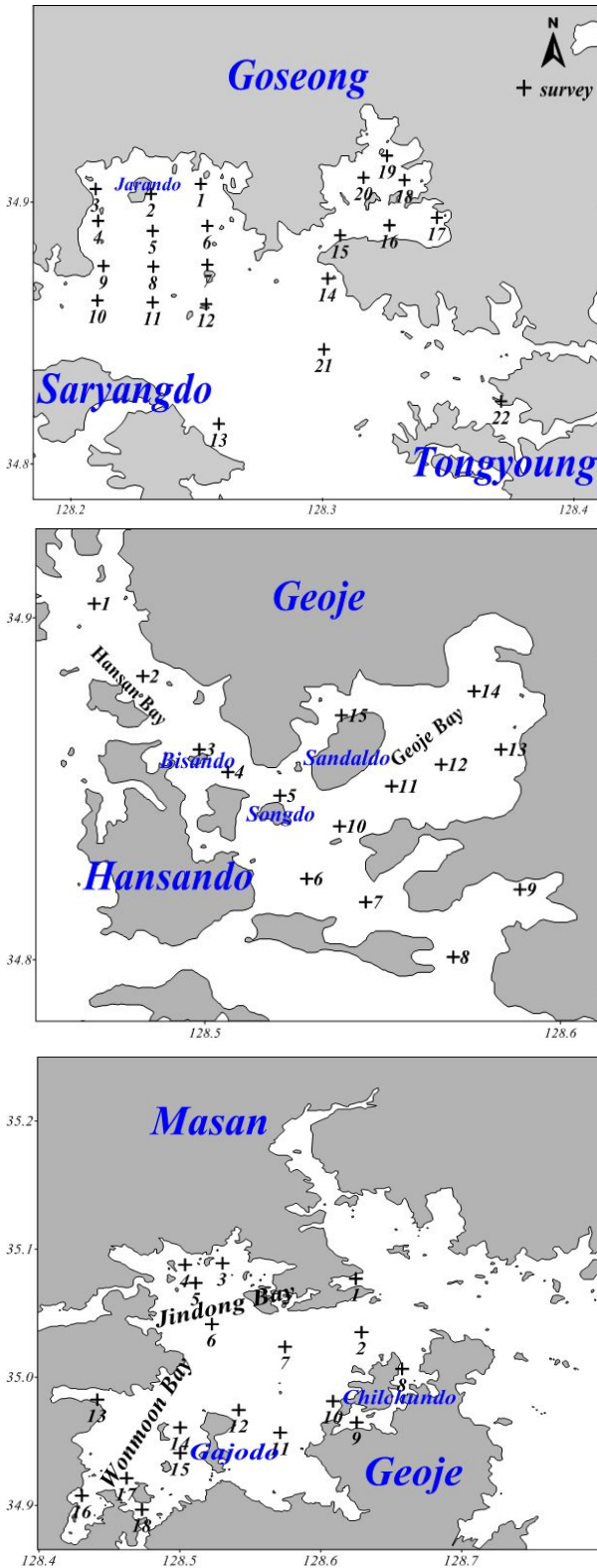


Fig. 1. Study area and sampling stations in the south coasts of Korea.

퇴적물 총유기탄소와 저서 다모류 군집을 이용한 패류양식장의 환경평가 기준설정

되어 있고 개방수위가 넓은 관계로 양식장 차지 면적의 객관적 비교는 어려울 것으로 보인다. 진해만의 잔차류는 대부분 3 cm/sec 이하로 유속자체는 빠르지 않으나 흐름 형태를 볼 때 진동만으로 유입되는 오염물질은 서서히 만 입구 쪽으로 이동하여 침강하고 하층에 도달하면 만 내측으로 이동하여 내측의 수질을 더욱 악화시킬 수 있는 형태를 보여 준다(NFRDI, 2002). 퇴적물 환경인자의 연평균을 보면 상대적으로 안쪽에 위치하며 양식장이 밀집되어 있는 가조도에서 높은 농도를 나타내었다. 저서다모류 군집의 우점종은 *Paraprionospio pinnata*, *Capitella capitata*, *Lumbrineris longifolia*,

Spiochaetopterus koreana 등의 잠재적 또는 기회주의적 유기물 오염지표종이었으며, 특히 *C. capitata*는 극심한 유기물 오염 환경에서 높은 개체밀도를 보이는 것으로 알려진 종이다. 현재 양식이 진행 중인 진해만 어장 주변의 저서생태계는 유기물 오염과 계절적인 빈산소 형성에 의해 저서환경 및 동물군집 모두에서 질적 저하가 발생하는 것으로 판단된다. 고성·자란만, 거제·한산만, 진해만에 대하여 계절별 조사 및 분석에 의한 최대·최소값과 평균값을 다음과 같이 나타내었다(Table 1).

Table 1. Sediment environmental parameters and biotic parameters of polychaete community in shellfish farms, the south coasts of Korea

	Goseong-Jaran Bay st.1-22 (mean)		Geoje-Hansan Bay st.1-15 (mean)		Jinhae Bay st.1-18 (mean)			
	Goseong st.15-20 (mean)	Jaran st.1-12 (mean)	Geoje st.10-15 (mean)	Hansan st.1-8 (mean)	Chilcheon st.8-10 (mean)	Gajo st.12,14,15 (mean)	Wonmun st.16-18 (mean)	
Sediment environ- mental parameters	4.81~27.83 (16.83)		17.16~55.75 (31.44)		10.64~51.85 (29.32)			
	COD (mg/g dry)	9.93~27.83 (18.07)	4.81~25.38 (16.55)	17.16~55.75 (33.16)	18.41~42.81 (29.82)	14.52~35.82 (25.02)	14.24~45.44 (33.11)	18.04~49.87 (30.64)
	IL (%)	4.37~8.78 (7.18)		5.67~12.93 (8.72)		7.10~13.27 (9.73)		
		4.57~8.78 (7.55)	5.41~8.77 (7.06)	7.40~12.93 (9.19)	5.67~12.37 (8.46)	7.45~10.54 (8.69)	9.14~12.60 (10.58)	8.62~12.31 (10.17)
	AVS (mg/g dry)	ND~0.48 (0.08)		ND~0.78 (0.13)		0.08~3.01 (0.66)		
		ND~0.48 (0.11)	ND~0.25 (0.08)	ND~0.78 (0.20)	ND~0.41 (0.08)	0.10~0.84 (0.47)	0.19~3.01 (0.87)	0.16~1.37 (0.54)
TOC (mg/g dry)	7.24~21.53 (14.49)		12.90~27.64 (18.73)		14.66~49.44 (27.71)			
	8.44~20.12 (15.14)	7.24~21.53 (14.39)	13.96~27.64 (20.08)	12.90~23.01 (17.99)	15.77~28.69 (21.15)	22.67~47.19 (34.64)	22.42~49.44 (30.99)	
TN (mg/g dry)	1.20~2.83 (2.03)		1.70~4.70 (2.61)		1.71~7.74 (3.69)			
	1.30~2.80 (2.16)	1.20~2.81 (1.97)	1.82~4.70 (2.88)	1.70~3.67 (2.44)	1.98~4.23 (2.82)	2.75~7.05 (4.74)	2.69~7.74 (4.33)	
Biotic parameters of polychaete community	6~42 (21)		12~69 (36)		1~48 (14)			
	Number of species	8~32 (19)	6~42 (22)	12~60 (30)	16~66 (38)	9~43 (23)	2~22 (9)	2~48 (18)
		17~527 (163)		70~1574 (555)		2~700 (242)		
	density (ind./ 0.2 m ²)	35~506 (157)	44~527 (184)	70~1318 (458)	270~1574 (639)	131~663 (377)	4~700 (201)	8~678 (289)
	diversity (H')	1.23~2.97 (2.29)		0.85~3.11 (2.26)		0.21~2.88 (1.35)		
		1.23~2.68 (2.17)	1.49~2.91 (2.32)	0.85~2.67 (2.26)	1.05~3.03 (2.21)	1.09~2.88 (2.02)	0.21~2.30 (1.08)	0.21~2.49 (1.18)
evenness (J')	0.42~0.95 (0.77)		0.34~0.78 (0.64)		0.19~1.00 (0.58)			
	0.42~0.93 (0.75)	0.61~0.92 (0.77)	0.34~0.78 (0.67)	0.38~0.78 (0.61)	0.40~0.85 (0.65)	0.25~0.98 (0.57)	0.19~1.00 (0.53)	

3.2 퇴적물 환경인자와 저서 다모류 인자의 상관성 비교

양식장의 자정 능력을 초과하지 않는 오염 부하의 범위는 간단히 유기물 부하량, 조류소통, 수심 등의 관계에 의하여 성립될 수 있다. 여기서 양식장주변의 조류소통과 수심은 양식장을 포함하고 있는 만의 폐쇄성 여부, 만의 모양, 조석의 크기 등 물리적 환경용량(McKindsey et al., 2006)에 의존적이며, 이를 인위적으로 제어하는 것은 매우 곤란하다. 따라서 양식장에 주어진 물리적 조건에 따라 자정 능력을 초과하지 않기 위해서는 유기물 부하량을 제어할 필요성이 대두된다(JFRCA, 2006).

양식장 환경은 양식장 주변의 수질, 퇴적물, 저서생물을 지표로 평가가 가능하다. 최근 들어 환경인자를 기반으로 한 농도 중심의 정적인 관점에서 유입·반응의 관점으로 진화하고 있다(Cloern, 2001). 수질의 경우, DIN, DIP와 같은 영양염과 적정 유기물 부하는 패류 양식생물의 주요 먹이원으로 필수불가결하다. 그러나, 과도한 영양염 유입은 chl.a 증가와 같은 양식장 주변 생태계의 건강도를 감소시켜 결과적으로 수층의 투명도 감소, DO 감소와 같은 악영향을 초래하게 된다. 따라서 DIN, DIP, chl.a, 투명도, DO 등의 다섯 인자는 수질 평가에 이용 가능하지만(EPA, 2012; Rho et al., 2012), 어장환경 평가에 이용시 계절변화 및 강우량 변동과 특정 이벤트에 따른 변화폭이 커 지수산정에 어려움이 있는 것도 사실이다. 퇴적물은 양식어장에서 물질순환 상태를 잘 나타내며, 수질에 비하여 공간적으로 이동의 제약성, 시간적으로 어장 주변환경에 대한 변화이력, 장시간의 정보 등을 내포하고 있기 때문에 어장환경 평가에 효과적으로 이용될 수 있다. 저서생물(Benthos)은 이동성이 작고 그 조성과 생물량을 통하여 양식장환경의 상태를 잘 나타내어 준다. 특히, 생활사가 수개월에서 수년에 걸치는 대형저서동

물(macrozoobenthos)은 출현 장소의 환경을 잘 반영하는 지표가 될 수 있다. 양식장에서 양식활동에 의해 유래하는 유기물이 해저에 침강하면 저서생물에 의하여 섭취되며, 그 결과 유기물의 부하가 적은 해역에서는 양식 초기에는 양식활동에 의해 적당한 유기물이 공급되므로 저서동물의 출현종수, 생물량 및 서식밀도가 증가하게 되고, 그러한 단계를 초과하면 저서동물의 수치는 감소하고 최종적으로 무생물의 단계로 접어들게 된다. 따라서 퇴적물의 유기물 부하를 나타내는 인자들과 저서동물의 건강도를 나타내는 인자들 사이에는 일련의 상관성이 있는 것으로 판단된다.

패류 양식장 주변의 퇴적물 환경인자와 저서 다모류 인자의 각 변수의 상관관계를 Table 2에 나타내었다. 퇴적물 환경인자간은 유의한 양의 상관성(P<0.01)을 보였으며, 특히 IL, AVS, TOC, TN 상호간에 0.6이상의 높고 유의한 양의 상관성을 보였다. COD는 유의한 양의 상관성을 보였지만, 상관계수가 0.390~0.616으로서 높지는 않았다. 저서 다모류 인자간은 출현종수와 균등도 간의 상관성을 제외한 모든 항목에서 유의한 상관성을 보였다.

퇴적물 환경인자와 저서 다모류 인자간의 상관성을 살펴보면, 유의한 상관성(P<0.05 혹은 P<0.01)을 보였으나, 출현종수와 COD 그리고 서식밀도와 AVS, TOC, TN간에는 유의한 상관성이 나타나지 않았다. 즉, 출현 종수와 서식밀도는 유의하지 않거나 상관성이 낮았다. 군집의 다양성 및 안정성을 보여주는 두 지수(H', J')는 퇴적물의 유기물 함량을 보여주는 IL, AVS, TOC, TN 등과 높은 상관관계를 보였다. 특히 TOC와 저서 다모류 다양도가 가장 높은 역의 상관성(r=-0.610, P<0.01)을 보여, 어장환경평가를 위한 두 가지 인자로 설정하였다.

Table 2. Correlation matrix between environmental parameters and biotic parameters of polychaete community (significance level : * for 0.05, ** for 0.01)

		COD	IL	AVS	TOC	TN	No. of species	density	H'	J'
Environmental parameter	COD	1								
	IL	0.616**	1							
	AVS	0.390**	0.624**	1						
	TOC	0.518**	0.756**	0.725**	1					
	TN	0.538**	0.746**	0.726**	0.964**	1				
Biotic parameters of polychaete community	No. of species	0.000	-0.157*	-0.293**	-0.293**	-0.209**	1			
	density	0.247**	0.191**	-0.009	0.068	0.121	0.716**	1		
	H'	-0.362**	-0.492**	-0.483**	-0.610**	-0.504**	0.724**	0.230**	1	
	J'	-0.441**	-0.432**	-0.402**	-0.502**	-0.459**	0.104	-0.313**	0.635**	1

3.3 어장환경평가

선진외국에서는 어장환경 관리방안으로 ‘진단·평가·관리’ 프로그램으로 구별하여 운영하고 있으며, 어장의 적절한 활성을 위하여 다양한 어장환경 평가기법이 활용되고 있다. 최근의 추세는 어장주변의 단순한 모니터링과 그 결과의 항목별 평가에 그치는 것이 아니라, 각 항목이 가지는 의미를 다른 항목 모니터링 결과와 함께 해석하여 통합적 관점에서 어장환경을 이해하고 평가하는 노력들이 수행되고 있다(Carballeira et al., 2012). Keely et al.(2012)는 연안환경 평가기법인 생태학적 평가 지수를 노르웨이 연어 양식장에 적용하여 그 유용성을 진단·평가하고 있다. 일본에선 어장환경을 수질과 퇴적물로 나누어 환경 악화의 원인 파악을 진행하고 있다. 수산용수는 DO를 기준으로 수질을 진단하며, 퇴적물은 AVS, COD, 노르말·핵산 추출물로 진단 항목을 설정하여 어장환경을 조사하고 있다. 이들 진단기법은 목표 기준치로서도 활용되며, 저서동물을 이용한 어장환경 평가기법으로 사전 진단에 활용하고 있다. 국내의 경우, 어장환경모니터링 및 어장환경실태조사를 통하여 어장환경에 대한 다양한 조사 항목으로 모니터링하고 있으나, 지속적인 양식활동 가능여부와 어장환경 악화를 판단할 수 있는, 국내 양식여건에 적합한 어장환경평가 기법이 개발되어 있지 않은 상황이다.

Tett et al.(2007)에 따르면, 어장생태계의 건강도에 있어서 양식장 운전초기 영양염에서 동화된 기초생산력이나 외부의 추가적 유기물 공급에 의한 압력부하가 형성됨에 따라 부영양 상태(eutrophic state)로 변해간다. 저서생물은 양식장 주변 퇴적물에 침강·퇴적하는 유기물 분해에 큰 역할을 수

행한다. 즉, 양식초기 양식기인 유기물은 저서생물의 먹이원이 되어 저서동물군집의 확장에 기인한다. 유기물 부하가 증가하면서 저서생물의 최대량인 최적상태(optimal state)에 접어들게 되고, 유기물 부하 증가가 진행될수록 동화능력을 초과하는 단계에 접어들게 된다. 이는 저서생물에 악영향을 끼치게 되어 저서생태계가 붕괴되는 상태(polutrophic state)로 보고하고 있다. 유럽의 물관리기본지침(European Water Framework Directives)에서는 유기물 부하에 따른 저서생물의 영양단계 변화를 good or high, moderate, poor, bad로 분류하였으며 good or high를 저서생물의 최대 생체량, 최대 다양도를 보이는 최적단계로 분류하였다(Borja et al., 2010).

세 개 만내 패류 양식장 주변의 퇴적물 환경인자와 저서 다모류 인자간 가장 높은 상관성을 보였던 TOC와 다양도의 상관성을 Fig. 2에 도시하였다. 고성·자란만의 패류양식장 주변 퇴적물의 연평균 TOC는 14.49 mg/g dry(이하 mg/g)이었으며, 저서 다모류의 다양도는 2.29로 나타났다. Fig. 2를 살펴 보았을 때, 이는 양식장 운전초기의 빈영양단계를 거쳐 유기물 부하의 증가와 함께 저서 다모류의 최대량인 최적단계에 도달해 있는 상태로 추정될 수 있다. 거제·한산만의 패류 양식장 주변 퇴적물의 연평균 TOC는 18.73 mg/g으로 고성·자란만보다 유기물 부하가 증가하였으며, 저서 다모류의 다양도는 2.26으로 나타나 고성·자란만보다 감소하였다. 이는 유기물 부하의 증가에 따라 저서 다모류의 최적단계를 지나 동화능력 초과단계에 접어든 것으로 볼 수 있다. 진해만의 연평균 TOC는 27.71 mg/g, 저서 다모류 다양도는 1.35로 유기물 부하는 더욱 가중되었고 이에 따른 저서 다모류 다양도 저하와 같은 악영향을 잘 보여주고 있다.

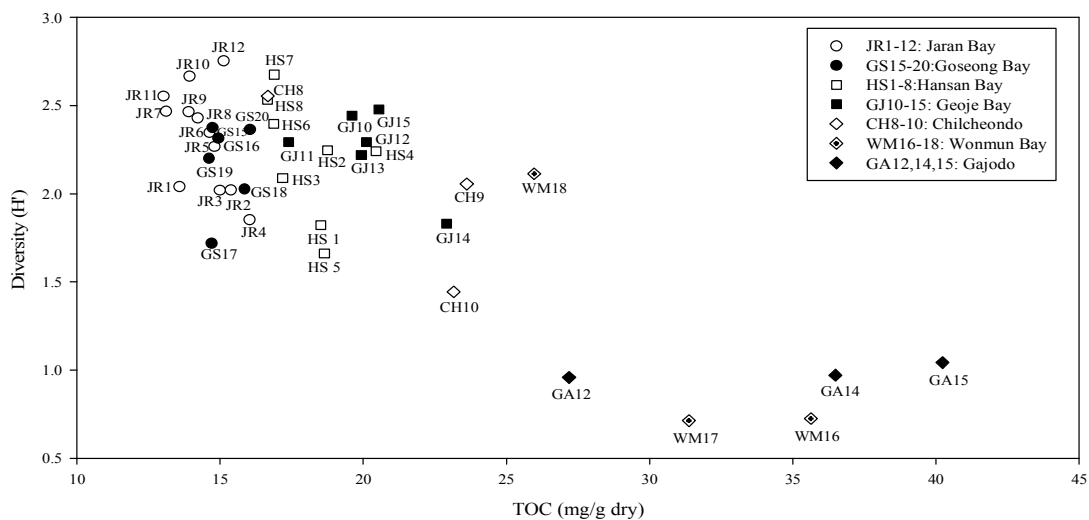


Fig. 2. Correlation between sediment total organic carbon and polychaete diversity in shellfish farms, south coast of Korea.

3.4 총유기탄소와 저서 다모류 다양도를 이용한 어장 환경 평가 기준설정

Takashi(2008)는 양식어장에서 유기물부하에 대한 좋은 환경지표는 첫째, 유기물부하를 적절하게 반영할 수 있는 수치일 것, 둘째, 대형저서생물의 증감에 밀접한 관계를 보여야 함을 제시하였으며, 퇴적물의 AVS와 저서생물의 생물량과의 상관성을 이용하여 어류양식장의 평가기준을 마련하였다. 퇴적물의 두 인자(TOC, AVS)와 대형저서동물의 생물량 사이의 상관성 분석을 통하여, 양식장 환경을 네 유형으로 분류하였다. 생물량이 최고치에 달하는 AVS 0.25 mg/g은 'Peak Point(이하 PP)'로 간주하였으며, 생물량이 급격하게 저하한 지점인 AVS 0.48 mg/g은 'Warning Point(이하 WP)', 무생물 구간에 도달한 AVS 0.87 mg/g은 'Critical Point(이하 CP)'로 기준값을 설정하였다. 그러나, 이 연구에서 AVS는 부하되는 유기물의 양과 그에 동반하는 환원상태를 잘 반영하고, 검지관법으로 간편하게 측정가능한 이점이 있지만 현장에서 바로 측정하지 않으면 측정오차를 유발할 가능성이 높다고 판단된다. 또한, 유기물 부하의 직접적 지표인 TOC와 대형저서동물의 생물량의 관계를 기준으로 한 회귀직선식을 통하여 AVS값을 산출하였기 때문에, TOC의 설정기준인 PP는 6.2 mg/g, WP는 10.3 mg/g, 그리고 CP는 16.4 mg/g에 해당한다.

저서동물 다양도의 경우, 유럽의 물관리기본지침(European Water Framework Directive)을 살펴보면, 퇴적물이 나질인 경우 저서동물의 다양도를 생태학적 상태에 따라, $H' \geq 3.3$ 은 High, $3.3 > H' \geq 2.5$ 는 Good, $2.5 > H' \geq 1.8$ 은 Moderate, $1.8 > H' \geq 1.1$ 은 Poor, 그리고 $H' < 1.1$ 는 Bad로 분류한다(Carletti and Heiskanen, 2009).

본 연구에서는, 모든 조사 정점에 대하여 TOC와 저서 다모류 다양도의 평균값을 파선으로 연결하였으며, 계절에 따른 영향을 고려하기 위하여 X축 및 Y축 방향에 평균값 \pm 표준편차를 추가하였다(Fig. 3). 이러한 결과에 따라, 패류양식장에 대한 어장환경평가 기준 TOC는 Peak Point 15 mg/g, Warning Point는 26 mg/g, 그리고 Contaminated Point 31 mg/g으로 제안할 수 있다. 즉, X축인 TOC가 증가함에 따라 저서 다모류의 다양도가 최고로 높아지는 PP에서의 TOC는 15 mg/g이며, 이 지점 이후 유기물 부하의 증가에 따른 저서 다모류 다양도의 감소지점인 WP에서의 TOC는 26 mg/g으로 볼 수 있다. 마지막의 Contaminated Point는 Takashi가 제안한 무생물구간인 Critical Point와는 다른, 다모류 다양도 1.2 이하의 양식장 오염이 심화된 구간으로 보았으며, 오염구간을 의미하는 Contaminated Point로 변경·명명하여 31 mg/g으로 제안하였다.

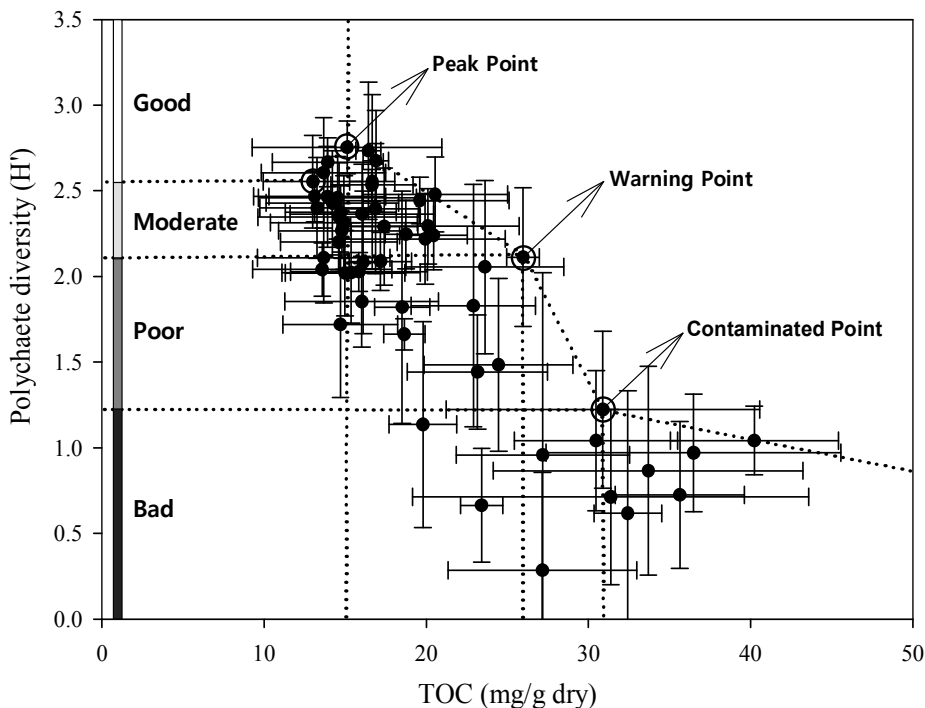


Fig. 3. Criteria using the correlation between TOC and polychaete diversity(●: The mean value of each station group, ○: points for the environmental assessment, X-bar: standard deviation of TOC, Y-bar: standard deviation of polychaete diversity).

퇴적물 총유기탄소와 저서 다모류 군집을 이용한 패류양식장의 환경평가 기준설정

이러한 결과는 Takashi(2008)의 퇴적물 TOC에 대한 어장환경평가기준에 비하여 월등히 높은 값을 보였는데, 이는 국내 양식장의 집약적으로 높은 어장밀집도에 기인하는 것으로 판단된다. 또한, Y축에 해당하는 저서 다모류의 다양도에 기준한 생태학적 상태를 살펴보면, 초기 상승 및 감소구간인 $H' \geq 2.6$ 이상의 구간을 Good의 생태학적 상태로 분류할 수 있다. 저서 다모류의 다양도 2.6~2.1(WP) 구간은 TOC가 높아 질수록 다양도가 감소를 보이지만 TOC가 낮을 경우 일정값 이상의 다양도를 보여주어 Moderate의 생태학적 상태로 볼 수 있다. 다양도 2.1(WP)~1.2(CP) 구간에서는 Poor로, 1.2(CP) 이하 구간은 무생물 구간인 Bad의 생태학적 상태로 판단된다. 따라서, $H' \geq 2.6$ 는 Good, $2.6 > H' \geq 2.1$ 은 Moderate, $2.1 > H' \geq 1.2$ 는 Poor, 그리고 $H' < 1.2$ 은 Bad로 분류하였다.

Takashi(2008)의 연구에서 조사정점 및 조사시기의 경우 47개 정점에 대하여 하계조사를 수행하였으나, 본 연구에서는 55개 정점에 대하여 춘·하·추·동계의 계절별 조사를 수행하였다. 연구 초기의 의도는 조사정점을 저서생물군집의 특성에 따라 그룹으로 나누어 결과의 직관성을 높이고자 하였으나, 각 그룹의 계절별 분류가 동일한 패턴을 보이지 않아 연평균으로 Fig. 3의 결과를 도출하였다. 양식장의 주변환경과 서식생물 간의 상관성은 대단히 높지는 않으나, 양식활동에 의한 피드백에 의하여 서식생물에 영향을 미치는 것은 분명한 것으로 판단된다. 본 연구에서 다른 총유기탄소량과 저서 다모류 다양도 외에도 과학적이며 보편타당한 상관인자들을 모색하여야 하며, 여기서 제시한 기준값 역시 좀 더 신뢰성 있는 결과를 도출하기 위해서는 지속적인 연구·조사가 수행되어야 할 것으로 판단된다. 국내 패류양식장이 밀집되어 있는 고성·자란만, 거제·한산만, 진해만 등을 대상으로 연구를 진행하였으며, 추후 좀 더 실용적이며, 신뢰성 있는 어장환경평가기준 설정을 위해서는 어류양식장, 해조류양식장 등에도 적용가능한 연구가 수행되어야 할 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구는 국내 패류양식장이 밀집되어 있는 고성·자란만, 거제·한산만, 진해만의 어장환경 평가를 위한 기준값을 설정하고자 시도되었다. 우선, 4계절의 퇴적물 환경인자(화학적산소요구량, 강열감량, 산취발성황화물, 총유기탄소)와 저서 다모류 인자(출현 종 수, 서식밀도, 다양도, 균등도)에 관한 분석 자료를 이용하여 각각의 상관성을 비교하였다. 양식장의 주변환경과 서식생물 간의 상관성은 높지는 않으나, 양식활동에 의한 피드백에 의하여 서식생물에 분명한 영향을 미치는 것으로 판단되며, 환경인자 총유기탄소와 저서 다모류 다양도 간의 상관계수가 0.61로 가장 높고 유의한

상관성을 보여, 어장환경평가를 위한 대표인자로 설정하였다. 환경인자 총유기탄소와 저서 다모류 다양도간의 상관성에 의한 어장환경평가 기준 총유기탄소는 Peak Point 15 mg/g dry, Warning Point 26 mg/g dry, Contaminated Point 31 mg/g dry 이었으며, 저서 다모류 다양도는 $H' \geq 2.6$ 은 Good, $2.6 > H' \geq 2.1$ 은 Moderate, $2.1 > H' \geq 1.2$ 는 Poor, $H' < 1.2$ 는 Bad로 분류되었다. 이러한 결과는 Takashi(2008)의 퇴적물 TOC에 대한 어장환경평가기준에 비하여 높은 값을 보였으며, 이는 국내 양식장의 집약적으로 높은 어장밀집도에 기인하는 것으로 판단된다. 본 연구결과는 어장 환경평가 기준설정에 유용한 방법으로 사용될 수 있으며, 추후 폭넓은 양식품종별 어장환경평가 연구를 통하여 어장환경관리와 지속적인 생산성 확보에 기여할 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

이 연구는 국립수산과학원의 사업과제(연안어장 생태계 통합 평가 및 관리 연구, RP-2013-ME-081)의 일환으로 수행되었습니다.

참고 문헌

- [1] Apitz, S. E., M. Elliott, M. Fountain and T. S. Galloway (2006), European Environmental Management: Moving to an ecosystem approach, Integrated Environmental Assessment and Management, Vol. 2, pp. 80-85.
- [2] Borja, A., M. Elliott, J. Carstensen, A. S. Heiskanen and W. van de Bund(2010), Marine management - Towards an integrated implementation of the European Marine Strategy Framework and the Water Framework Directives, Marine Pollution Bulletin, Vol. 60, pp. 2175-2186.
- [3] Borja, A., S. B. Bricker, D. M. Dauer, N. T. Demetriades, J. G. Ferreira, A. T. Forbes, P. Hutchings, X. Jia, R. Kenchington, J. C. Marques and C. Zhu(2008), Overview of integrative tools and methods in assessing ecological integrity in estuarine and coastal systems worldwide, Marine Pollution Bulletin, Vol. 56, pp. 1519-1537.
- [4] Carballeira, C., J. Ramos-Gomez, M. L. Martin-Diaz, T. A. Delvalls and A. Carball(2012), Designing and integrated environmental monitoring plan for land-based marine fish farms located at exposed and hard bottom coastal areas, J. Environ. Monit., Vol. 14, pp. 1305-1316.
- [5] Carletti, A. and A. S. Heiskanen(2009), Water Framework Directive intercalibration technical report, Part 3: Coastal and

- Transitional waters, Office for Official Publications of the European Community, p. 240.
- [6] Cloern, J. E.(2001), Our evolving conceptual model of the coastal eutrophication problem, *Marine Ecology Progress Series*, Vol. 210, pp. 223-253.
- [7] 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.
- [8] JFRCA(2006), A Guide Book for the Improvement Plan in Aquaculture(instructor), Japan Fisheries Resource Conservation Association, p. 79.
- [9] Keely, N. B., B. M. Forrest, C. Crawford and C. K. Macleod(2012), Exploiting salmon farm benthic enrichment gradients to evaluate the regional performance of biotic indices and environmental indicators, *Ecological Indicators*, Vol. 23, pp. 453-466.
- [10] McKindsey, C. W., H. Thetmeyer, T. Landry and W. Silvert(2006), Review of recent carrying capacity models for bivalve culture and recommendations for research and management, *Aquaculture*, Vol. 261, pp. 451-462.
- [11] MLTM(2010), Marine environment standard methods, Ministry of land, transport and maritime affairs, p. 495.
- [12] NFRDI(2002), Environmental research of aquaculture farm 2002, National Fisheries Research & Development Institute, p. 401
- [13] NFRDI(2009a), Environmental research of aquaculture farm 2008, National Fisheries Research & Development Institute, p. 243.
- [14] NFRDI(2009b), Benthos monitoring in environment conservation sea area, National Fisheries Research & Development Institute, p. 192.
- [15] NFRDI(2010), Environmental research of aquaculture farm 2009, National Fisheries Research & Development Institute, p. 443.
- [16] Pielou, E. C.(1966), The measurement of diversity in different types of biological collections, *T. Theoret. Biol.* Vol. 13, pp. 131-144.
- [17] Rho, T. K., T. S. Lee, S. R. Lee, M. S. Choi, C. Park, J. H. Lee, J. Y. Lee, and S. S. Kim(2012), Reference values and water quality assessment based on the regional environmental characteristics, 「The Sea」 *Journal of the Korean Society of Oceanography*, Vol. 17, pp. 45-58.
- [18] Shannon, C. E. and W. Weaver(1949), The mathematical theory of communication, University of Illinois Press, Urbana, p. 117.
- [19] Takashi, U.(2008), Validity of acid volatile sulfide as environmental index and experiment for fixing its standard value in aquaculture farms along the coast of Wakayama prefecture, Japan, *NIPPON SUISAN GAKKAISHI*, Vol. 74, pp. 402-411.
- [20] Tett, P., R. Gowen, D. Mills, T. Fernandes, L. Gilpin, M. Huxham, K. Kennington, P. Read, M. Service, M. Wilkinson and S. Malcom(2007), Defining and detecting undesirable disturbance in the context of Eutrophication, *Marine Pollution Bulletin*, Vol. 53, pp. 282-297.
- [21] Yokayama, H.(2003), Environmental quality criteria for fish farms in Japan, *Aquaculture*, Vol. 226, pp. 45-56.
- [22] Yoon, S. P., Y. J. Kim, R. H. Jung, C. H. Moon, S. J. Hong, W. C. Lee and J. S. Park(2008), Benthic environments and macrobenthic polychaete community structure in the winter of 2005-2006 in Gamak Bay, 「The Sea」 *Journal of the Korean Society of Oceanography*, Vol. 13, pp. 67-82.

원고접수일 : 2013년 08월 14일

원고수정일 : 2013년 10월 11일 (1차)

2013년 10월 21일 (2차)

게재확정일 : 2013년 10월 25일