한국해양환경공학회지
Journal of the Korean Society
for Marine Environmental Engineering
Vol. 7, No. 4. pp. 164-173, November 2004

와편모조류 시스트 분포에 의한 한국 남서해역의 해양환경 특성 2. 가막만 주상퇴적물중 유기물 및 와편모조류 시스트의 분포특성에 의한 해양환경변화 추정

박종식 · 윤양호† · 노일현
여수대학교 대학원 수산과학과

Estimation on the Variation of Marine Environment by the Distribution of Organic Matter and Dinoflagellate Cyst in the Vertical Sediments in Gamak Bay, Korea

Jong Sick Park, Yang Ho Yoon† and Il Hyeun Noh
Department of Fisheries Science, Graduate School of Yosu National University, Yeosu 550-749, Korea

요 약

가막만 주상 퇴적물중의 유기물농도와 와편모조류 시스트의 분포특성을 파악하기 위해 만내 6개 정점을 대상으로 2000년 6월부터 2001년 4월까지 격월간으로 총 6회 현장조사를 실시하였다. 유기물 농도중 강열감량은 3.21~11.18%, 화학적산소요구량은 12.25~99.26 mgO_2/g dry, 황화물량은 nd~10.29 mgS/g dry, 입자성 유기탄소가 2.91~116.18 mgC/g dry, 입자성 유기질소가 0.53~2.82 mgN/g dry, 식물색소량이 2.49~116.18 μg/g dry로 나타났다. 와편모조류 시스트는 21속, 36종, 2미동정 종 등 총 38종이 동정되었으며, 출현세포수는 18~3,836 cysts/g dry의 범위를 보였다. 만내 주상퇴적물중의 유기물과 와편모조류 시스트의 연직적인 분포특성은 대부분의 정점에서 표층퇴적층에서 아래로 갈수록 농도가 감소하였다. 와편모조류 시스트중 종속영양종의 시스트 분포가 유기물량과 밀접한 관련성을 나타내었으며, 퇴적물중 유기물 농도와 와편모조류 시스트의 분포특성 및 기타 해양환경변화 자료로부터 가막만 북서부 해역은 약 1980년대 이후부터 부영양화가 급속히 진행되고 있는 것으로 판단되었다.

Abstract – Field survey on the marine environmental characteristics by the distribution of dinoflagellate cysts and organic matter was carried out bimonthly at 6 stations in Gamak Bay, the southern part of Korean Peninsula from June 2000 to April 2001. The range of environmental factors on vertical sediments such as ignition loss (IL), chemical oxygen demand (CODs), total sulfide (H_2S), particulate organic carbon (POC), particulate organic nitrogen (PON) and phaeopigment were 3.21~11.18%. 12.25~99.26 mgO_2/g dry, 2.49~116.18 μg/g dry, 2.91~116.18 mgC/g dry, 0.53~2.82 mgN/g dry and 2.49~116.18 μg/g dry, respectively. A total of 38 species dinoflagellate cysts belonged to 21 genera, 36 species, and 2 unidentified species. A cysts density were 18~3,836 cysts/g dry. Vertical distribution of organic matter and dinoflagellate cysts was rapidly decreased from surface to deeper sediment. The eutrophication in the northwestern parts of Gamak Bay might originated since 1980s.

Keywords: Sediment(퇴적물), Dinoflagellate cyst(와편모조류 시스트), Organic matter(유기물), Autotrophic and heterotrophic species(독립영양 및 종속영양종), Eutrophication(부영양화), Gamak Bay(가막만)

1. 서 론

해양 표영환경에서는 해양미생물을 포함한 다양한 물질들이 끊임없이 해저로 퇴적되게 되며(Sætre *et al.* [1997]), 특히 연안해역은 육상기원의 다양한 물질이 유입되어 해저로 침강 · 퇴적되는 과정에서 미생물 분해에 의해 표영환경 내에서 유기물은 무기물로 재생된다. 그렇지만 일부 침강, 퇴적된 유기물은 퇴적물내 간극수의 확산을 통해 무기염으로 환원되어 일차생산자에 의해 다시 유기물로 고정된다. 이러한 해양의 물질순환으로 연안해역은 풍부한

†Corresponding author: yhyoon@yosu.ac.kr

영양상태를 나타내어 다양한 생물의 서식장으로 생물생산성이 매우 높게 되기도 하지만, 퇴적환경은 해양 표영환경의 누진적인 결과를 나타내기 때문에, 해역의 장기적인 변화과정 등의 추적에 매우 효과적이다. 따라서 저서환경은 해양의 환경변화나 생·지화학적인 변화과정의 누진지표로서 흔히 이용된다(Sætre *et al.*[1997]).

특히, 최근에는 이러한 퇴적환경의 하나의 지표로서 와편모조류 휴면포자(시스트)가 널리 사용되고 있으며(Dale[1976], Reid and Harland[1977], Wall *et al.*[1977], Sætre *et al.*[1997], Dale *et al.*[1999], Kim and Matsuoka[1998], Matsuoka[1999]), 국내에서도 1990년 이후 시스트의 종 출현 특성에 의한 해양환경 연구가 수행되고 있다(이 등[1999], Kang *et al.*[1999], 박과 윤[2003]). 그러나 국내 대부분의 시스트 연구는 와편모조류에 국한된 분포현황 파악으로, 해양환경 변화와 관련한 시스트 연구는 매우 빈약한 실정이다.

따라서 본 연구는 한국 남해안 중앙부의 가막만을 대상으로 주상퇴적물중의 와편모조류 시스트와 유기물 분포특성으로부터 만내의 해양환경 변화과정을 규명하고자 한다(박과 윤[2003]).

2. 재료 및 방법

현장 조사는 2000년 6월부터 2001년 4월까지 6개 정점을 대상으로 격월로 총 6회 실시하였다(Fig. 1). 퇴적물 표본 채취는 와편모조류 시스트 분석을 위한 시료와 유기물 분석을 위한 시료로 나누어 실시하였다. 시스트용 표본 채취는 중력 코아(내경 20 mm)로 약 20 cm깊이까지 퇴적물을 채취하였으며, 채집된 표본은 현장에서 아크릴 튜브 내 해수와 같이 밀봉하여, 실험실로 운반한 뒤에 2 cm 간격으로 주상 분리하여 분석까지 약 4℃의 냉암소에 보관하였다. 시료의 처리는 퇴적물 1 g을 비이커에 넣고 여과해수를 이용하여 잘 현탁 시켜 초음파 분쇄기로 1분간 조사한다. 초음파 처리된 시료는 128 μm와 20 μm의 체를 중첩시켜 구분하고, 20 μm체에 채집된 시료를 샤레에 옮겨 여과해수를 이용하여 미세사질과 시스트의 비중 차를 이용하여 미세 사질을 제거하였다. 미세 사질이 제거된 표본은 여과해수로 10 ml가 되도록 하여 검경용 시료로 제공하였다. 검경은 농축된 샘플 1 ml를 Sedgwick-Rafter Chamber에 취해 전도현미경(Nikon, TE300)을 이용하여 종의 동정과 계수를 실시하였다(Matsuoka[1985], Matsuoka and Fukuyo [2000]). 유기물 분석을 위한 시료는 중력 코아(내경 45 mm)를 이용하여 기본적으로 10 cm까지 채취하였으며, 2001년 4월에는 Particulate Organic Carbon(POC), Particulate Organic Nitrogen(PON)을 제외한 Ignition Loss(IL), Chemical Oxygen Demand for sediment (CODs), Total Sulfide(H_2S), Phaeopigment등의 분석을 위하여 20 cm까지 채취하였다. 채집된 표본은 현장에서 2 cm 간격으로 주상 분리하여 Ice Box를 이용하여 실험실까지 운반하여 분석을 실시하였으며, 분석방법은 Table 1에 나타내었다.

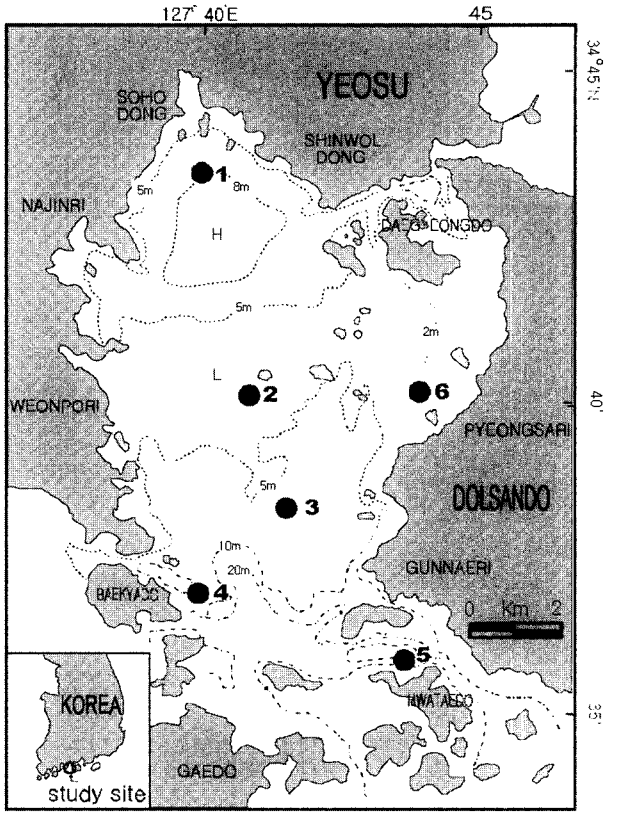

Fig. 1. Map showing the sampling stations and bathymetry.

3. 결 과

3.1 입도조성(grain size)

입도조성은 모든 정점에서 깊이에 따른 차이는 크지 않았다. 성분별로는 sand가 0.31~6.15%, silt가 19.37~62.99%, clay가 40.45~

Table 1. Parameters and analytical methods for sediments in Gamak Bay

Parameters	Analytical methods	References
· Ignition loss (IL)	· Two hours yielded at 600°C with GF/C weight ratio	JFRCA[1980]
· Chemical oxygen demand (CODs)	· $KMnO_4$ consumption method	"
· Total sulfide (H_2S)	· Gas Tec (detection tube)	"
· Phaeopigment	· 90% acetone extracts with spectrophotometeric method	SCOR Unesco[1966]
· Particulate organic carbon (POC)	· CHN Analyzer	Parsons *et al.*[1984]
· Particulate organic nitrogen (PON)		
· Grain size	· Micromeritics, sedigraph 5100	Ingram [1971]

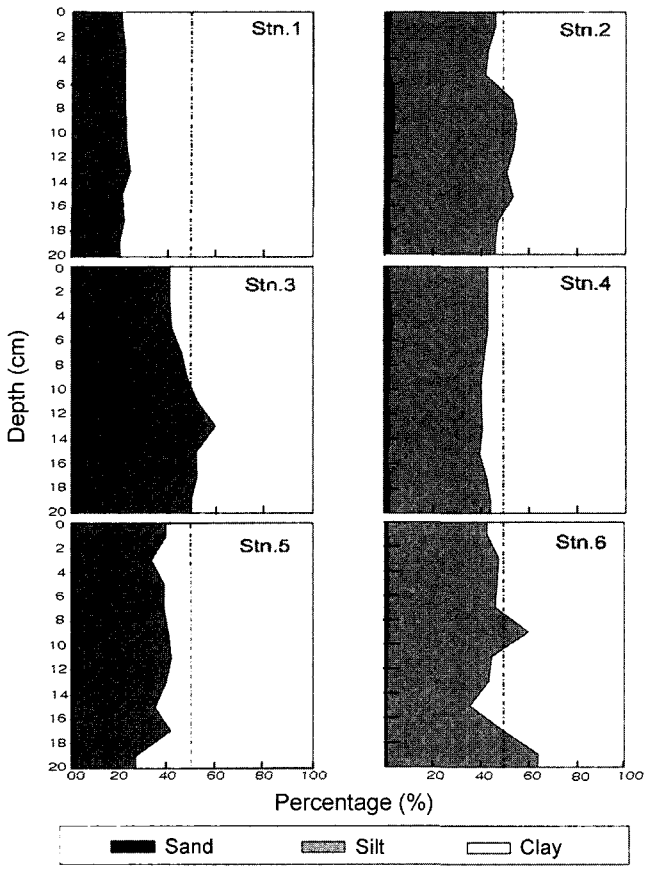

Fig. 2. Vertical profiles of grain-size at six stations in Gamak Bay.

79.53%를 나타내어 대부분 silt와 clay에 의한 펄 퇴적층을 나타내었다. 특히 오랜 기간 생활하수가 집중적으로 유입된 가막만 북서부에 위치한 정점 1에서는 clay가 75.61~79.53%를 나타내 매우 세립한 퇴적상을 나타내었으며, 기타 정점은 유사하였다(Fig. 2).

3.2 퇴적물중 유기물 분포

만 내 퇴적층을 표층(0-2 cm)과 8-10 cm 층으로 구분한 퇴적층의 강열감량(IL)은 3.21%에서 11.18%로 변화하여, 북서부 해역에 위치한 정점 1에서 가장 높고 만 남쪽 입구에 있는 정점 4에서 가장 낮은 농도를 보였다. 두 퇴적층 깊이에 따라서는 북서내만 해역인 정점 1을 제외하고는 퇴적층 사이에 큰 차이 없이 일정한 경향을 보였다. 시기적으로는 수온이 낮아 미생물분해 활성이 낮은 겨울에 북서부 해역에서 가장 높게 나타났으며, 기타 해역에서는 봄에 비교적 높은 농도를 나타내었다(Fig. 3A). 주상퇴적물중의 IL의 농도는 표층에서 높으나, 퇴적층이 깊어질수록 낮아지는 경향을 보였다. 다만, 표층에서 10 cm 깊이의 퇴적층까지는 큰 변화를 보이지 않으나, 10 cm보다 깊은 퇴적층에서 다소 불규칙한 경향을 나타내었다(Fig. 4A).

화학적 산소요구량(CODs)은 11.53 mgO_2/g dry에서 99.26 mgO_2/g dry로 변화하여, 북서부 해역에서 가장 높고, 만 중앙부의 정점 2에서 낮았다. 퇴적층 깊이에 따라서는 IL과 같이 북서부 해역을 제외하고는 층간에 큰 차이 없이 유사한 농도를 보였다. 시기적으로는 모든 해역에서 겨울에 높은 농도를 나타내나, 만 입구의 정점 5에서는 가을에 높았다. 특히 북서부해역의 표층 CODs 농도는 기타 정점보다 3~4배 높았다(Fig. 3B). 주상퇴적물의 경우는 표층(0-2 cm)에서 깊이에 따라 일정하게 감소하는 경향을 보였으며, 시기적인 변동폭도 퇴적층의 깊이에 따라 감소하였다. 그러나 대부분 정점에서 퇴적층 10 cm까지 CODs 농도가 양식장 적지기준인 20 mgO_2/g dry 이상의 농도를 나타내어, 가막만 퇴적물은 오랜 양식이용과 산업폐수 및 생활하수 등에 의해 상당부분 유기오염이 진행된 것으로 판단되었다. 특히 그 경향은 생활하수 유입이 많은 북서부해역과 가두리 양식장 시설이 많은 만입구 화태도 인근해역에서 뚜렷하게 나타났다(Fig. 4B).

총 황화물량(H_2S)은 미검출(nd)에서 10.29 mgS/g dry로 변화하

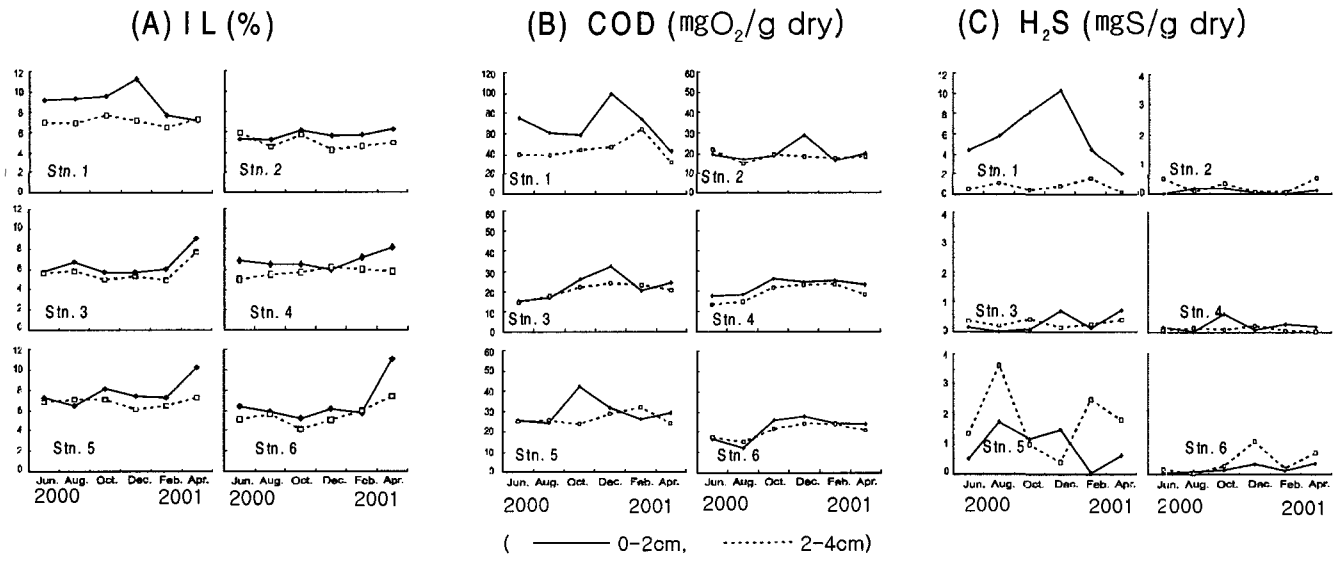

Fig. 3. Biomonthly variations of ignition loss (IL), chemical oxygen demand (CODs) and total sulfide (H_2S) at six stations in Gamak Bay.

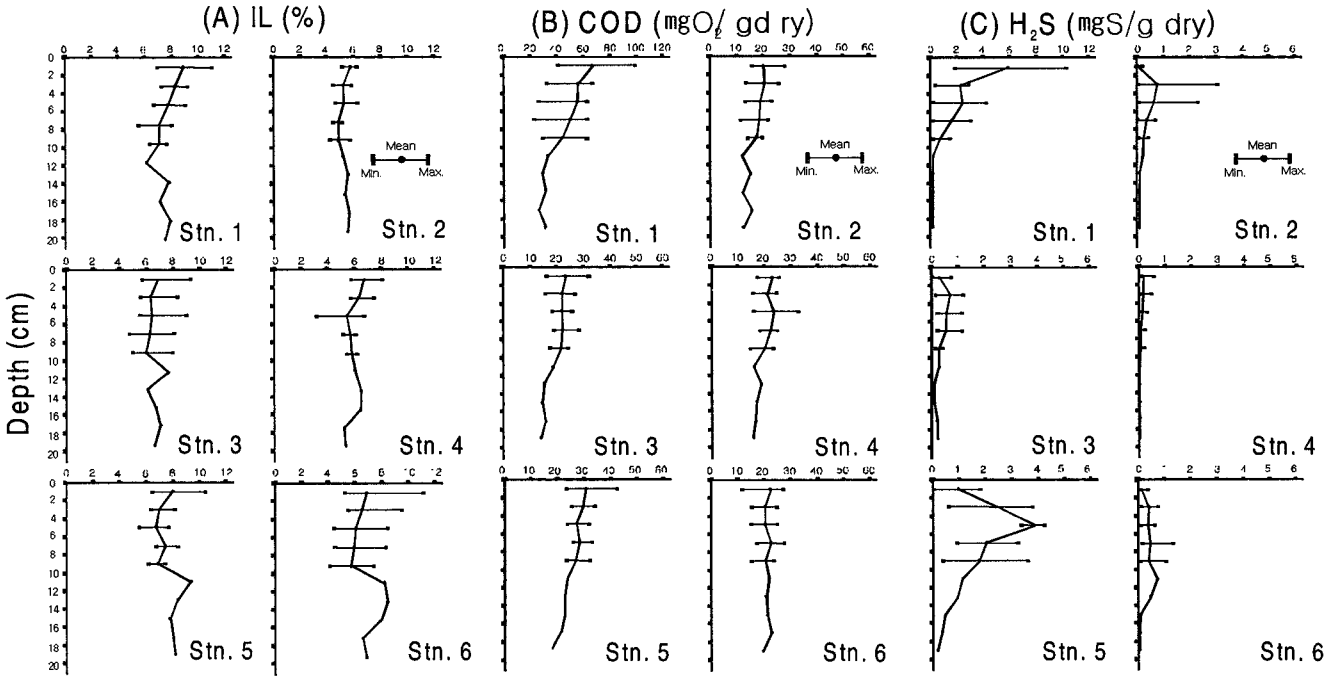

Fig. 4. Vertical profiles of ignition loss (IL), chemical oxygen demand (CODs) and total sulfide (H_2S) at six stations in Gamak Bay.

여, 북서부 해역에서 가장 높고, 수심이 얕은 만 중앙부 정점 2에서는 검진기에 의해 검출되지 않았다. 퇴적층 깊이에 따른 변화는 북서부 해역과 화태도 인근 해역에서 큰 차이를 보였다. 시기적으로도 북서부 해역은 겨울에 최대농도를 보이며, 농도의 증감이 일정한 규칙성을 나타내는 반면, 화태도 해역은 시기적으로 매우 큰 농도 변화를 보였다(Fig. 3, C). 주상퇴적물의 경우는 북서부 해역이 표층에서 깊이가 증가할수록 감소하는 경향을 보이는 것을 제외하고, 표층보다 2-6 cm 퇴적층에서 최대 농도를 나타내었다. 특히 북서부 해역은 다른 해역에 비하여 2~10배 이상의 농도를 나타내었다(Fig. 4C).

입자성 유기탄소(POC)는 2.91 mgC/g dry에서 116.18 mgC/g dry로 변화하여, 북서부 해역에서 연중 20 mgC/g dry이상으로 높고, 기타 해역에서는 연중 10 mgC/g dry 전후로 낮았다. 시기적으로 POC 농도는 큰 변화 폭을 보이며, 겨울에 가장 높은 농도를 보였다. 또한 층간의 변화 폭도 겨울에 가장 크게 나타났다. 그러나 8-10 cm 퇴적층의 경우는 표층과 달리 시기적인 변화 폭이 작고, 일정한 농도를 유지하였다(Fig. 5A). 주상퇴적물의 경우는 모든 정점에서 표층에서 깊이가 증가할수록 감소하였다(Fig. 6A). 또한 북서부 해역의 POC 농도는 기타 해역보다 4배 이상 높았지만, IL, CODs, H_2S의 농도보다는 그 차이가 적었다. 이는 IL, CODs 및 H_2S와 같은 총체적인 유기물량은 퇴적물 간극수 중의 용존형태의 물질에 의해 과대평가 되는 반면, POC, PON의 경우 퇴적물 입자상에 부착, 흡착된 보존성이 큰 유기물에 의해 그 값이 결정되기 때문인 것으로 판단된다.

입자성 유기질소(PON)는 0.53 mgN/g dry에서 2.82 mgN/g dry로 변화하여, 북서부 해역에서 연중 2.0 mgN/g dry 이상으로 높은 반면, 기타 해역에서는 연중 1.5 mgN/g dry 이하의 낮은 값을 나타내었다. 퇴적층 깊이에 따른 변화도 북서부 해역은 큰 변동 차를 보이는 반면, 기타 해역은 차이가 없이 일정하였다. 시기적으로는 북서부 해역에서 여름에 비교적 낮은 농도를 보이는 것을 제외하고는 일정하였다(Fig. 5B). 주상퇴적물의 경우 북서부 해역은 표층에서 퇴적층 깊이가 증가 할수록 급격히 감소하는 경향을 보이나, 기타 해역은 퇴적층 깊이에 따른 감소 폭이 완만하거나 차이가 없이 일정한 농도를 나타내었다(Fig. 6B).

식물색소량(Phaeopigment)은 2.49 μg/g dry에서 116.18 μg/g dry로 변화하여, 북서부 해역에서 높고, 기타 해역은 비슷한 농도를 나타내었다. 두 층간 비교에서 전체적으로는 표층에서 높았으나, 시기적으로는 일정한 규칙성 없이 불규칙한 변화 양상을 보였다. 특히, 북서부 및 중앙부 해역은 겨울에 높은 농도를 보이는 반면, 입구 해역은 비교적 여름에 높은 농도를 나타내었다(Fig. 5A). 주상퇴적물의 경우는 만 전체에서 표층에서 퇴적층이 깊어질수록 감소하며, 북서부 해역에서의 농도 감소 폭이 매우 크게 나타났다. 또한 북서부 해역의 표층 phaopigments 농도는 다른 해역에 비해 약 4배 정도 높았다(Fig. 6C).

3.3 와편모조류 시스트의 분포특성

가막만 주상퇴적물에서 출현이 확인된 와편모조류 시스트는 총 6개 그룹 21속 36종 2미동정이었다. 그룹별로는 Protoperidinioid group이 16종으로 전체의 40.0%를 점유하였고, Gonyaulacoid group이 13종으로 32.5%를 점유하여 두 그룹이 전체 72.5%를 차지하였다. 기타는 Gymnodinioid group이 6종으로 15.0%, Diplopsalid group이 3종으로 7.5%, 그리고 Tuberculodiniod group과 Calciodinellid

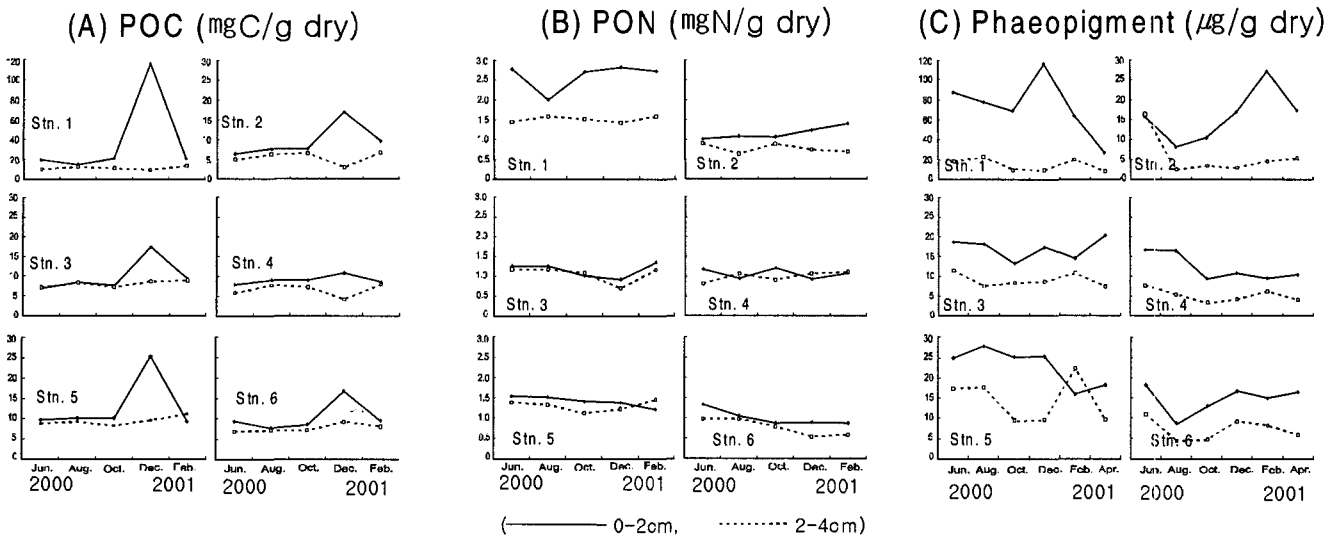

Fig. 5. Biomonthly variations of particulate organic carbon (POC), particulate organic nitrogem (PON) and phaopigments at six stations in Gamak Bay.

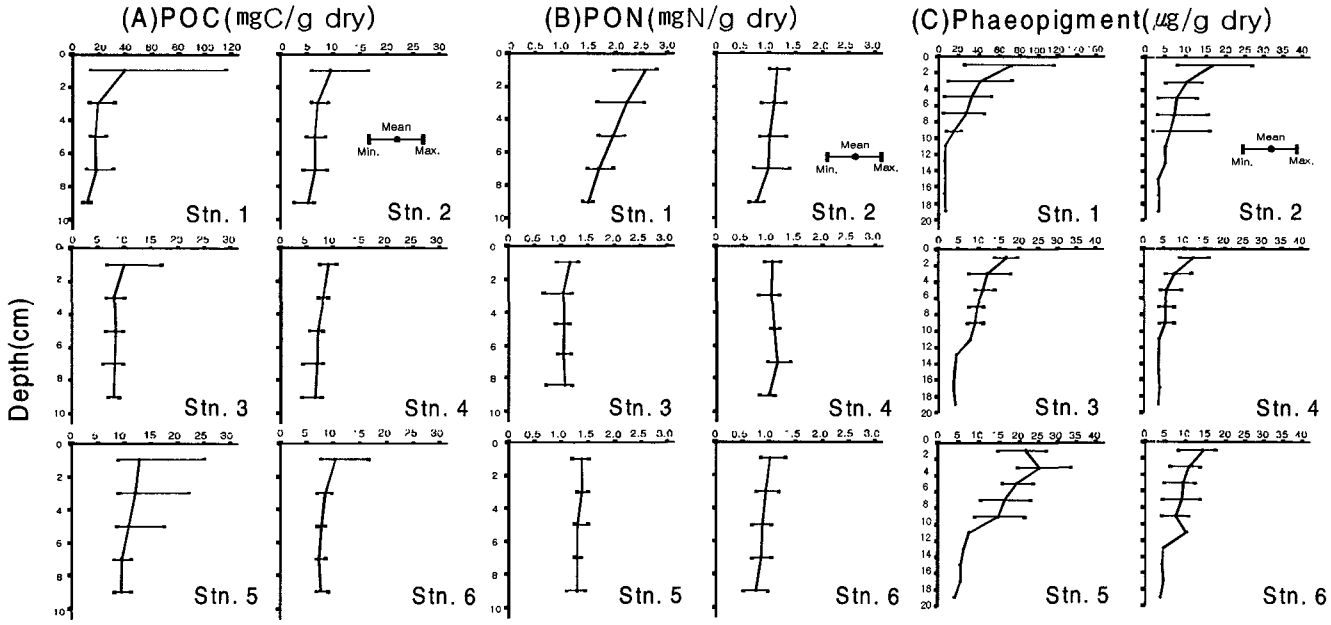

Fig. 6. Vertical profiles of particulate organic carbon (POC), particulate organic nitrogen (PON) and phaopigments at six stations in Gamak Bay.

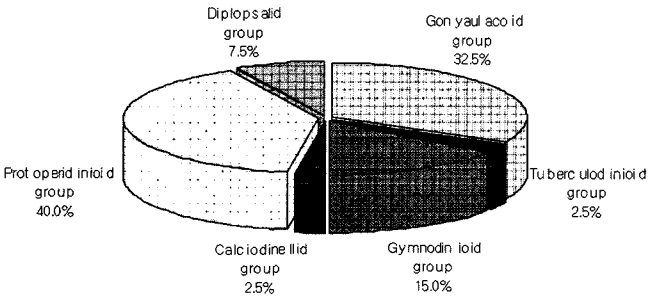

Fig. 7. Species composition of dinoflagellate cysts in Gamak Bay.

group이 각 1종으로 5.0%를 나타내었다(Fig. 7).

정점별로는 북서내만해역에서 38종으로 가장 많았고, 만중앙부와 화태도 인근해역에서 32종으로 가장 적어, 최대와 최소 차이는 6종으로 정점에 따른 출현 종수의 차이는 크지 않았다(Table 2).

표층퇴적물의 시스트 출현 세포수는 18 cysts/g dry에서 3,836 cysts/g dry의 범위를 나타내어, 시 · 공간적으로 큰 차이를 보였다. 즉, 시 · 공간적으로는 만의 동쪽 천해해역에서 7월에 21 cysts/g dry로 최소값을, 북서 내만해역에서 5월에 최고값인 3,836 cysts/g dry를 나타내었다. 정점별 평균 세포수는 324 cysts/g dry에서 2,329 cysts/g dry로 변화하여, 북서내만역을 제외하면 평균 세포수가 324~388 cysts/g dry로 비슷하였다. 시스트의 연직분포는 화태도 인근해역에서 10 cm보다 깊은 퇴적층에서 높은 시스트 세포수를 보이는 것을 제외하면, 기타 해역에서 표층에서 퇴적층의 깊이가 증가 할

Table 2. The occurrence species of dinoflagellate cysts at six stations in Gamak Bay

Species	Station	1	2	3	4	5	6
Autotrophic species	**Gonyaulacoid group**						
	Spiniferites spp.	*	*	*	*	*	*
	S. bentori	*	*		*	*	*
	S. bulloideus	*	*	*	*	*	*
	S. delicatus	*				*	
	S. elongatus	*	*	*	*		
	S. hypercanthus	*	*	*	*		*
	S. membranaceus	*		*	*		*
	S. mirabilis	*	*		*	*	*
	S. ramosus	*	*	*	*		*
	Alexandrium tamarense	*	*	*	*	*	
	Lingulodinium machaerophorum	*	*	*	*	*	*
	Operculodinium centrocarpum	*	*		*	*	*
	O. israelianum	*		*	*	*	*
	Tuberculodinioid group						
	Tuberculodinium vancampoae	*	*	*	*	*	*
	Calciodinellid group						
	Scrippsiella trochoidea	*	*	*	*	*	*
	Gymnodinioid group						
	Pheopolykrikos hartmanii	*	*	*	*	*	*
	Cochlodinium sp.				*	*	
	Gyrodinium instriatum	*	*		*		*
	Gymnodinium catenatum	*	*	*	*	*	*
Heterotrophic species	**Protoperidinioid group**						
	Bringatedinium spp.	*	*	*	*	*	*
	B. cariacoense	*	*	*	*	*	*
	B. Irregular	*	*	*	*		*
	B. simplex	*	*	*	*	*	*
	Selenopemphix nephroides	*	*	*	*	*	*
	S. quanta	*	*	*	*	*	*
	Stelladinium abeii	*					*
	S. reidii	*	*	*	*	*	*
	Trinovantedinium capitatum	*	*	*	*	*	*
	Quinquecusphix concretum	*	*	*	*	*	*
	Votadinium calvum	*	*	*	*	*	*
	V. spinosum	*		*	*	*	*
	Xandarodinium xanthium		*	*			
	Protoperidinium americanum	*	*	*	*	*	*
	P. latissimum	*	*	*	*	*	*
	P. minutum	*	*	*	*	*	*
	Diplopsalid group						
	Diplopsalis lenticula	*	*		*	*	
	Diplopelta parva	*	*	*	*	*	*
	Dubridinium caperatum	*	*	*	*	*	*
	Gymnodinioid group						
	Polykrikos kofoidii	*	*	*	*	*	*
	P. schwartzii	*	*	*	*	*	*
	Number of Species	**38**	**34**	**32**	**37**	**32**	**34**

수록 감소하였다. 특히 북서내만역에서는 표층에서 6 cm층까지는 4,000 cysts/g dry에서 1,000 cysts/g dry로 급격히 감소하나, 6 cm 보다 깊은 퇴적층에서는 완만히 감소하였다. 그러나 화태도 인근 해역에서는 다른 해역과는 달리 10-18 cm 깊이의 퇴적층에서 *Quinquecusphix concretum*의 생 시스트(living cyst)가 많이 출현하였다. 이와 같은 결과는 기타 정점에서 표층에서 퇴적층 깊이가

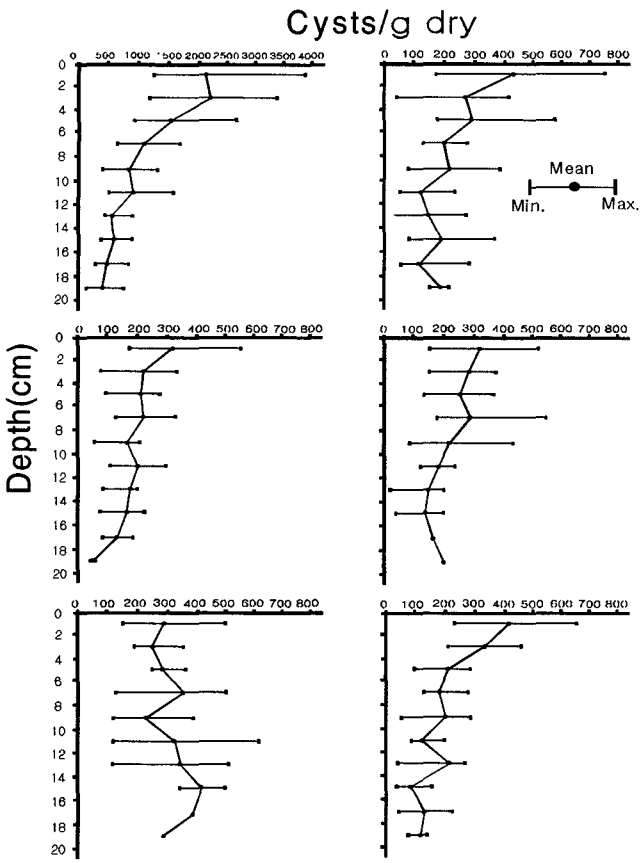

Fig. 8. Vertical profiles of the cell number of dinoflagellate cysts at six stations in Gamak Bay.

증가할수록 생 시스트 세포수가 급감하는 것과는 대조적이다(Fig. 8).

가막만 주상퇴적층에서 보여지는 와편모조류 시스트 출현양상은 전반적으로 표층에서 퇴적층 깊이가 증가할수록 세포수가 감소하는 경향을 보이고 있으며, 특히 유기물 집적이 매우 높은 북서 내만해역의 와편모조류 시스트 출현량이 다른 해역에 비해 약 5배정도 높으며, 연직적인 감소경향도 매우 급격하였다.

3.4 주성분분석에 의한 와편모조류 출현 특성

와편모조류 출현특성을 파악하기 위해 퇴적물 환경인자와 시스트 항목을 이용하여 주성분분석을 실시하였다. 누적기여율 70%를 기준으로 제 2주성분까지 도출하였으며, 도출된 주성분은

$$Z=11.23\ Z_1+2.22\ Z_2 \quad (1)$$

로 제2 주성분까지의 누적기여율은 74.73%였다(Table 3).

인자부하량의 분포로부터 제 1주성분은 silt, sand만 음의 관계를 나타내고 있으며, clay, CODs, POC, 자가 및 타가 영양종, PON 등과는 매우 강한 양의 관계를 나타내는 것으로부터 유기물 농도가 높고 니질 퇴적상을 구성하는 만의 "북서 내만해역의 환경특성"을 나타내는 것으로 판단되었다. 제 2주성분은 총황화물, 식물색소량 등에는 양의 관련성을 보이는 반면, clay나 자가영양을 실시하는 와편모조류에 음의 관련성을 나타내는 것으로부터 "부영양화 지표"를 나타내는 것으로 판단되었다(Fig. 10).

그림으로부터 가막만 주상퇴적물의 유기물 농도와 와편모조류 시스트분포는 북서내만역에 의해 지배되는 부분이 매우 큰 것을

Table 3. Results of eigenvalue, proportion, accumulative proportion, eigen vector and loading factor by the principal component analysis (PCA)

Principal Component	1st PC		2nd PC	
Eigenvalue	11.23		2.22	
Proportion (%)	62.41		12.32	
Accumulative proportion (%)	62.41		74.73	
Parameters	Eigen vector		Loading factor	
	1st	2nd	1st	2nd
Sand content	-0.183	0.259	-0.444	0.458
Silt content	-0.314	0.278	-0.763	0.492
Clay content	0.316	-0.292	0.768	-0.516
Ignition Loss	0.199	0.164	0.482	0.290
Chemical oxygen demand (CODs)	0.392	0.073	0.951	0.128
Total sufide (H_2S)	0.275	0.334	0.667	0.591
Particulate organic carbon (POC)	0.366	0.193	0.889	0.341
Particulate organic nitrogen (PON)	0.375	0.094	0.911	0.166
Phaeopigment	0.340	0.274	0.825	0.484
Gonyaulacoid group	0.309	-0.248	0.750	-0.438
Gymnodinioid group	0.273	-0.233	0.663	-0.412
Calciodinellid group	0.288	-0.036	0.700	-0.064
Tuberculodinioid group	0.254	-0.142	0.616	-0.251
Protoperidinioid group	0.381	0.091	0.926	0.160
Diplopsalid group	0.341	0.161	0.828	0.284
Autotrophic species	0.363	-0.191	0.881	-0.337
Heterotrophic species	0.383	0.085	0.929	0.150
Total cyst numbers	0.397	0.024	0.963	0.042

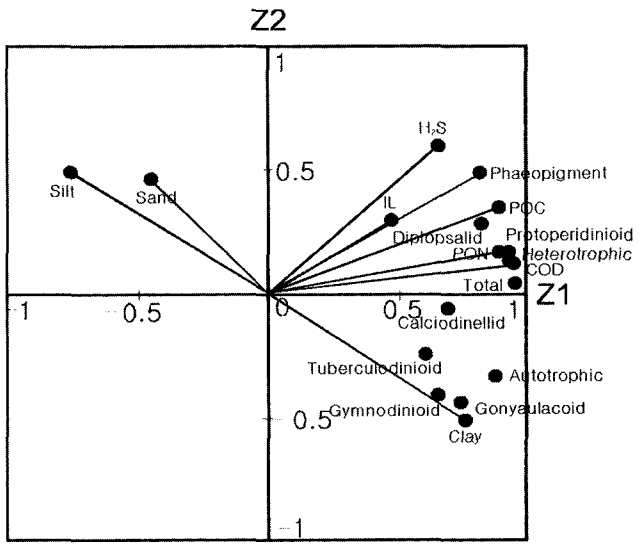

Fig. 9. Distribution of laoding factors in Gamak bay.

알 수 있으며, 부영양화가 진행된 해역에서는 높은 유기물 농도에 타가영양 와편모조류 시스트가 주로 분포하며, 타가영양 그룹인 Protoperidinioid group과 Diplopsalid group은 보다 부영양화된 해역에 높게 출현할 수 있음을 알 수 있었다. 반면 자가영양 그룹인 Gonyaulacoid group, Gymnodinioid group, Tuberculodinioid group 및 Calciodinellid group은 부영양화 해역보다는 영양급수가 낮은 해역에서 높게 출현하는 것으로 판단되었다. 즉, 이와 같은 결과는 남서해역의 연안해역을 조사한 결과와도 일치하는 내용이다(윤[2004]).

4. 고찰 및 결론

가막만내의 퇴적상은 주로 silt와 clay에 의한 mud 퇴적상을 나타내고 있으며, 특히 만 북서해역은 육상에서 유입되는 다양한 유기물질 및 폐쇄적 특성에 의해 매우 세립한 니질 퇴적상을 나타내었다. 가막만 주상퇴적물의 모든 유기물량과 와편모조류 시스트는 생활하수에 의해 극도의 부영양화가 진행된 북서 내만해역에서 가장 높았으며, PON을 제외한 모든 항목에서 다른 해역보다 2~6배의 높은 값을 나타내고 있다. 즉, 이러한 결과는 퇴적물 환경에서 퇴적상은 유기물과 시스트의 분포에 크게 영향을 미치게 된다는 기존의 연구결과(Lambert[1967]: Goodman[1987])와 가막만을 대상으로 실시되었던 퇴적환경의 연구결과와도 일치하는 내용이다(조 등[1994]: 해양수산부[2001]: 김[2002]: 노[2003]), 다만 POC, PON은 만의 생물생산에 의해 지배되는 항목으로 표영환경내의 무기질소 수지와 종합적인 고찰이 필요한 것으로 검토되었다.

또한 유기물량의 연직분포는 정점에 따라 다소 차이는 있으나, 표층에서 퇴적층 깊이가 증가함에 따라 감소하는 경향을 보였으

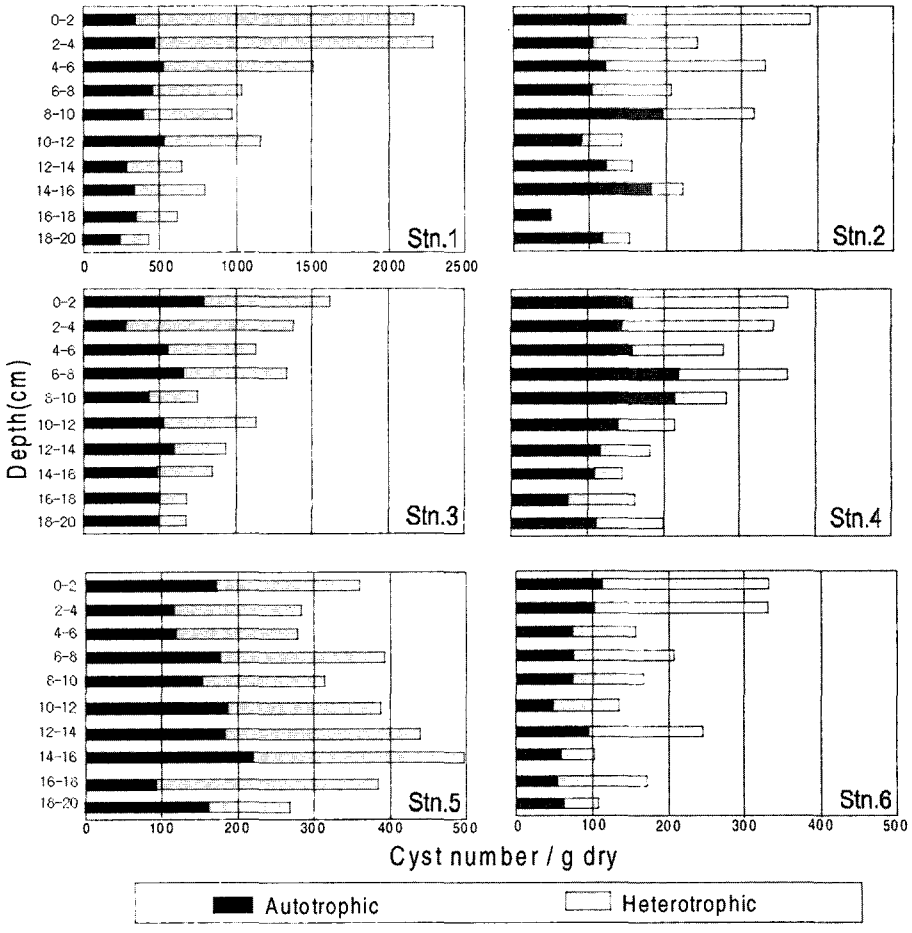

Fig. 10. Vertical profiles of the autotrophic and heterotrophic species in Gamak Bay.

며, 표층퇴적물 중에 높은 유기물 농도를 나타내는 해역일수록 감소 구배가 급격하였다. 다만, 층간의 변화 폭에 대해서는 대상해역이 활발한 양식시설과 수산생물 채집장으로 이용되고 있어, 어구나 저서동물에 의한 퇴적종의 교란정도에 대한 평가는 제외하였다.

주상퇴적물에서 와편모조류 시스트의 연직 분포는 표층에서 퇴적층 깊이가 증가함에 따라 감소하고 있으나, 다른 해역에 비해 5배 이상 높은 시스트 세포수를 나타내는 만의 북서해역에서 그 경향은 매우 크게 나타났다. 이와 같은 와편모조류 시스트의 분포는 유기물 지표와 일치하는 결과로서 기존의 연구들에서 부영양화된 퇴적물에서 와편모조류 출현종수와 현존량이 높게 나타난다는 내용과 일치하는 결과이다(Anderson and Keafer[1985]: Nehring [1994]: Yamaguchi *et al.*[1995]).

즉 Sætre *et al.*[1997] 및 Dale *et al.*[1999] 등은 퇴적층내 포함된 와편모조류 시스트는 부영영화와 매우 밀접한 관계를 가지며, 잠재적인 표영환경의 역사를 내포하고 있어 와편모조류 시스트 분석에 의해 해역의 부영양화 발전단계를 추정하고 있다. 또한 Matsuoka[1999]는 와편모조류 시스트의 영양형태의 차이에 의해 해역의 부영양화정도를 추정하여, 부영양화 해역에서 타가영양 와편모조류 시스트종이 보다 많이 출현하는 것으로 보고하였다(Kim and Matsuoka[1998]). 부영양 해역에서 타가영양종의 비율이 높게 나타나는 것은 타가영양종중 특히 Protoperidinioid group의 비율이 높게 나타나기 때문이다. 즉 Gains and Taylor[1984]는 Protoperidinioid group은 부영양화 지표를 나타내는 그룹으로 부영양화된 해역에서는 먹이가 되는 광합성 조류가 풍부하여 이들을 섭취하여 타가영양 편모조가 많은 양으로 출현한다고 하였다(Jacobson and Anderson[1986]). 이와 같은 결과는 본 연구의 주성분분석 결과와도 일치하는 내용이다.

가막만의 경우 화태도 인근해역을 제외하면 모든 해역에서 표층에서 퇴적층 깊이가 증가할수록 자가영양종은 거의 일정한 반면, 타가영양종은 감소하는 양상을 보여(Fig. 9), 최근에 형성된 표층 퇴적층에서 보다 부영양화가 진행되어 있다고 추정할 수 있다.

만입구 해역인 화태도 해역에서의 10-18 cm 퇴적층에서 표층퇴적층보다 *Quinquecusphix concretum*의 생 시스트가 많은 양으로 출현하는 이유는, 유영세포의 bloom후에 시스트가 많이 형성되는 것(Matsuoka and Takeuchi[1995])이나, 어구 및 저서동물군집에 의해 교란되기 때문이라 판단된다(JFRCA[1987]). 즉 Matsuoka and Takeuchi[1995]는 1985년 일본 Yokohama항에서 *Gyrodinium instriatum*에 의한 bloom이 발생한 직후에 10-11 cm 퇴적층에서 본 종에 의한 시스트가 우점하고 있음을 보고하고 있어, 가막만에서도 가능성을 생각할 수는 있으나, 아직 가막만에서는 *Q. concretum*에 의한 대발생이 보고되지 않은 점, 그리고 표면퇴적층에서 본 종에 의한 생 시스트가 많은 양으로 발견되고 있지 않은 점에서 대발생에 의한 영향으로 보기는 어려웠다. 또한 대상해역은 가두리 양식시설이 집중화되어 있어, 다양한 어구에 의한 교란 등도 보기 어려워, 10-18 cm 퇴적층에서 다량으로 보이는 생 시스트에 대한 고찰은 앞으로 다각적인 면에서 검토가 필요한 것으로 판단되었다.

Kim and Matsuoka[1998]는 대상해역의 퇴적률과 와편모조류 시스트 연직분포로부터 해양환경의 변화과정을 추적하고 있다. 기존의 문헌 등을 통해 가막만의 퇴적률을 살펴보면, 해양수산부[2001]는 북부 및 만 중앙부에서 약 0.51 mm/yr, 남해와 접하는 만입구에서 0.73 mm/yr을 보고하였으며, 김[2002]은 만의 북부해역에서 약 0.94 cm/yr, 만 중앙부에서 0.65-1.14 cm/yr 그리고 만 입구부에서 0.90 cm/yr을 산출해 평균 0.91 cm/yr로 보고하였다. 그러나 이 두 보고서는 같은 방법에 의해 동일 연구자들에 의해 산출되고 있지만, 다른 결과를 나타내어 퇴적률 산정과정에 다소 문제가 있을 수 있다(김성수, 사신). 특히 가막만은 굴양식장 및 어류양식장에서 퇴적물 교란이 일어나고 있어 정확한 퇴적률을 산정하는 데 어려움이 있으며(김[2002]), 기타 유사한 환경특성을 나타내는 남해안의 내만해역 퇴적률과 비교하면 수영만이 2.4-4.0 mm/yr (양과 김[1994]), 진해만 일원에서 3.1-4.8 mm/yr(양 등[1995]), 마산만과 울산만에서 4.0-4.9 mm/yr(Lee *et al.*[1988]). 광양만, 마산만, 울산만이 5.5-6.8 mm/yr(강[1994])에 비해 매우 낮은 값이다.

이에 가막만의 퇴적률을 남해 내만해역의 퇴적률과 유사한 결과로 2-5 mm/yr 정도의 값을 나타낼 것으로 가정하면, 가막만 북부해역은 퇴적률과 와편모조류 시스트 분포양상으로부터 기존의 해양환경 자료(해양수산부[2001])에서 보여지는 1980년대부터 부영양화가 급속히 진행된 것으로 추정 할 수 있었다. 이와 같은 결과는 1970~1980년대의 가막만 북부해역에서 급격한 산업화 과정과도 일치하는 것으로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R05-2002-000-000683-0)지원으로 수행되었으며, 연구진행 과정에 제주대학교 자연과학연구소 김형신 박사에게서 많은 도움을 받았기에 감사를 드립니다.

참고문헌

[1] 강화성, 1994, "임해공업단지 연안퇴적물중의 중금속 오염역사에 관한 연구", 한양대학교 대학원 석사학위논문, 53pp

[2] 김귀영, 2002, "가막만의 이화학적 환경특성과 퇴적물에서의 물질 거동 연구", 영남대학교 대학원 이학박사 학위논문, 133pp.

[3] 노일현, 2003, "가막만 양식장 주변해역 퇴적물중 유기물량 분포 및 기원", 여수대학교 대학원 석사학위 논문, 126pp.

[4] 박종식, 윤양호, 2003, "와편모조류 cyst 분포에 의한 한국 남서해역의 해양환경 특성. 1. 가막만 와편모조류 cyst의 시·공간적 분포", 한국수산학회지, 36(2), 151-156.

[5] 양한섭, 김성수, 김규범, 1995, "진해만 퇴적물의 퇴적속도와 중금속 오염", 한국환경학회지, 4, 489-500.

[6] 양한섭, 김성수, 1994, "수영만 퇴적물의 퇴적속도와 중금속 오염", 한국수산학회지, 27, 643-658.

[7] 이무형, 이준백, 이진애, 박종규, 1999, "가막만 일대 편모조류 군집구조의 휴면시스트의 동태", 한국조류학회지, 14(4),

255-266.

[8] 윤양호, 1995, "가막만 북부해역의 해양환경과 식물플랑크톤 군집의 변동특성. 1. 식물플랑크톤 군집의 계절변동과 적조원인생물", 여수수산대학교 수산과학연구소 연구보고, 4, 1-15.

[9] 윤양호, 2004, "와편모조류 cyst 분포에 의한 한국남서해역의 해양환경 특성", 한국과학재단 목적기초연구 보고서(R05-2002-000-00683-0), 65pp.

[10] 조현서, 유영석, 이규형, 1994, "가막만 수질 및 저질 환경의 계절별 변동특성", 여수수산대학교 수산과학연구소 연구보고, 3, 21-33.

[11] 해양수산부, 2001, "환경관리해역 시범해역관리 시행계획 수립연구(가막만 환경보전해역 현황)", 275pp.

[12] Anderson, D.M. and Keafer, B.A., 1985, "Dinoflagellate cyst dynamics in coastal and esturine water", In Toxic Dinoflagellate, Anderson, D.M., White, A.W. and Baden, D.G., eds. Elsevier, pp. 219-214.

[13] Dale, B., 1976, "Cyst formation, sedimentation, and preservation: factors affecting dinoflagellate assemblage in recent sediments from Trondheimsfjord", Norway. Rev. Palaeobot. Palynol., 22, 39-60.

[14] Dale, B., Thorsen, T.A. and Fjellsa, A., 1999, "Dinoflagellate cysts as indicators of cultural eutrophication in the Oslofjord, Norway Estuarine", Coastal and Shelf science, 48, 371-382.

[15] Dale, B, 2001, "Marine dinoflagellate cysts as indicators of eutrophication and industrial pollution: a discussion", Sci. Total Environ., 264, 235-240.

[16] Gains, G. and Taylor, F.R., 1984, "Extracelluar digestion in marine dinoflagellate", J. Plankton Res., 6, 1057-1061.

[17] Goodman, D.K., 1987, "Dinoflagellate cysts in ancient and modern sediments": The Biology of Dinoflagellate, (Taylor, F.J.R. (Ed.). Blackwell Scientific Publications, pp. 649-722.

[18] Ingram, R.L., 1971, Sieve analysis: In Carver. R.E.(ed.). "Process in sedimentary peterology", Willey-Inter Science. 49-67.

[19] Kang, Y.J., KO, T.H., Lee, J.A. and Chung, K.I., 1999, "The community dynamics of phytoplnkton and distribution of dinoflagellate cysts in Tongyoung Bay, Korea", Algae, 14, 43-54.

[20] Kim, H.S. and Matsuoka, K., 1998, "Process of eutrophication estimated by dinoflagellated cyst assemblage in Omura Bay, Kyushu, West Japan", Bull. Plankton Soc. Japan, 45, 133-147 (in Japanese).

[21] Jacobson, D.M. and Anderson, D.M., 1986, "Thecate heterotrophic dinoflagellate: feeding behavior and mechanics", J. Phycol., 22, 249-258.

[22] Japan Fisheries Resource Conservative Association (JFRCA, 日本水産資源保護協會), 1980. 新編 水質汚濁調査指針. 恒星社厚生閣, 東京, 552pp.

[23] Japan Fisheries Resource Conservative Association(JFRCA), 1987, A Guide for studies of red tide organisms, Shuwa, Tokyo.

[24] Lambert, S. M., 1967, "Functional relationship between sorption in soil and chemical structure", J. Agric. Foodchem, 15, 572-576.

[25] Lee, K.W., Lee, D.S., Lee, S.H. and Matsumoto, E., 1988, "History of heavy metal pollution in Masan and Ulsan Bay sediments", Ocean Res., 10, 7-13.

[26] Lee, J.B. and Matsuoka, K., 1996, "Dinoflagellates cysts in surface sediments of southern Korean warters", In; T. Yasumoto, Y. Oshima and Y. Fukuyo(eds.). Harmful and Toxic Algal Blooms, IOC of UNESCO, Paris, 173-176.

[27] Lee, J.B., Kim, D.Y., Lee, J.A., 1998, "Community dynamics and distribution of dinoflagellates and their cysts in Masan-Chinhae Bay, Korea", J. Fish. Sci. Tech. 1, 283-292.

[28] McMinn, A., 1991, "Recent dinoflagellate cysts from estuaries on the central coast of New South Wale, Australia", Micropaleontology, 37, 269-287.

[29] Matsuoka, K., 1985, "Organic-walled dinoflagellate cysts from surface sediments of Nsgasaki Bay and Senzaki Bay, West Japan", Bull. Fac. Liberal Arts Nagasaki Univ. Nat. Sci. 25, 21-115.

[30] Matsuoka, K., 1999, "Eutrophication process recorded in dinoflagellate cyst assemblages - a case of Yokohama Port, Tokyo Bay, Japan", Sci. Total Environ., 231, 17-35.

[31] Matsuoka, K. and Takeuchi, T., 1995, "Productivity of vegetative cells, planozygotes and resting cysts of dinoflagellate *Alexandrium catenella* (Whedon et Kofoid) Balech based on the field observation", Fossils 59, 32-46 (in Japanese).

[32] Matsuoka, K. and Fukuyo, Y., 2000, Technical guide for modern dinoflagellate cyst study. WESPAC-HAB, Asian Natural Environmental Science Center, Tokyo, pp. 29.

[33] Nehring, S., 1994, "Spatial distribution of dinoflagellate resting cysts in sediment of Kiel Bight, Germany (Baltic Sea)", Ophelia, 39, 137-158.

[34] Parsons, T.R., Maita, Y. and Lalli, C.M., 1984, "A manual of chemical and biological methods for seawater analysis", Pergamon Press, Oxford, pp. 173.

[35] Reid, P.C. and Harland, R., 1977, "Studies of quarternary dinoflagellate cysts from the North Atlantic", Amer. Ass. Strat. Palynol., 5, 147-169.

[36] Sætre, M.M.L., Dale, B., Abdullah, M.I. and Sætre, G.P., 1997, "Dinoflagellate cysts as potential indicators of industrial pollution in a Norwegian Fjord", Mar. Environ. Res., 44, 167-189.

[37] SCOR-Unesco, 1966, "Determination of photosynthetic pigments", In "Unesco(ed.), Determination of photosynthetic pigments in sea water, Paris", 10-18.

[38] Wall, D., Dale, B., Lohmann, G.P., Smith, W.K., 1977, "The environmental and climate distribution of dinoflagellate cyst in modern marine sediments from regions in the North and South Atlantic Oceans and adjacent seas", Mar. Micropaleontol., 2, 121-200.

[39] Yamaguchi, M., Itakura, S., Imai, I. and Ishida, Y., 1995, "A rapid and precise technique for enumeration of resting cysts of *Alexandrium* spp. (Dinophyceae) in natural sediments", Phycologia, 34, 207-214.

2004년 6월 2일 원고접수
2004년 10월 21일 수정본 채택