

정기여객선 현장관측 시스템과 SeaWiFS 자료를 이용한 서해 연안 해수환경 모니터링

유주형[†] · 문정언 · 민지은 · 안유환

한국해양연구원 해양위성연구단

Monitoring the Coastal Waters of the Yellow Sea Using Ferry Box and SeaWiFS Data

Joo-Hyung Ryu[†], Jeong-Eon Moon, Jee-Eun Min, and Yu-Hwan Ahn

Ocean Satellite Research Group, Korea Ocean Research & Development Institute (KORDI)

Abstract : We analyzed the ocean environmental data from water sample and automatic measurement instruments with the Incheon-Jeju passenger ship for 18 times during 4 years from 2001 to 2004. The objectives of this study are to monitor the spatial and temporal variations of ocean environmental parameters in coastal waters of the Yellow Sea using water sample analysis, and to compare and analyze the reliability of automatic measurement sensors for chlorophyll and turbidity using in situ measurements. The chlorophyll concentration showed the ranges between 0.1 to 6.0 mg/m³. High concentrations occurred in the Gyeonggi Bay through all the cruises. The maximum value of chlorophyll concentration was 16.5 mg/m³ in this area during September 2004. The absorption coefficients of dissolve organic matter at 400 nm showed below 0.5 m⁻¹ except those in August 2001. During 2002-2003, it did not distinctly change the seasonal variations with the ranges 0.1 to 0.4 m⁻¹. In the case of suspended sediment (SS) concentration, most of the area showed below 20 g/m³ through all seasons except the Gyeonggi Bay and around Mokpo area. In general SS concentration of autumn and winter season was higher than that of summer. The central area of the Yellow Sea appeared to have lower value 10 g/m³. The YSI fluorometer for chlorophyll concentration had a very low reliability and turbidity sensor had a R² value of 0.77 through the 4 times measurements comparing with water sampling method. For the automatic measurement using instruments for chlorophyll and suspended sediment concentration, McVan and Chesea sensor was greater than YSI multisensor. The SeaWiFS SS distribution map was well spatially matched with in situ measurement, however, there was a little difference in quantitative concentration.

Key Words : Ferry box, SeaWiFS, Yellow Sea, Chlorophyll, Suspended sediment, Dissolved organic matter.

요약 : 2001년부터 2004년까지 인천-제주 정기여객선을 이용하여 18회에 걸쳐 자동관측과 함께 20-30분 간격으로 40여개의 정점에서 해수를 채수하여 클로로필, 용존유기물과 부유퇴적물의 농도를 분석하였다. 연구의 목적은 채수된 해수를 직접 분석하여 서해 한반도 연안의 해수 환경의 공간적 시간적 변화를

2007년 7월 23일 접수 ; 2007년 7월 31일 수리.

[†] 교신저자: 유주형(jhyu@kordi.re.kr)

모니터링 하는 것과 설치된 자동측정 센서가 신뢰성 있는 자료를 생산하는지 비교 분석하는 것이다. 18회에 걸친 서해 연안의 실시간 모니터링을 통하여 해수환경의 계절별 특성을 이해할 수 있었다. 클로로필의 경우, 0.1-6.0 mg/m³ 정도의 분포를 보였으며 경기만이 다른 지역에 비해 높게 나타났다. 2004년 9월에는 경기만에서 10 mg/m³의 높은 값을 보였다. 용존유기물의 흡광 특성은 대부분은 0.5 m⁻¹ 이하의 값 분포를 보였으나, 2001년 8-9월에 경기만과 목포 해역에서 높은 값을 보였으며, 2002년과 2003년은 다른 시기에 비해 계절별 변화가 적었다. 부유퇴적물의 경우, 대부분은 20 g/m³ 미만의 값을 보였으나 경기만과 목포 주변의 남쪽 해안은 농도가 모든 계절에서 높게 나타났으며 특히 가을·겨울철에 가장 높은 값을 나타냈다. 황해 중부 해역은 대부분 10 g/m³ 미만의 값을 보였다. YSI 센서의 클로로필 값은 신뢰도가 낮게 나타나 사용하기 어려웠으며 부유퇴적물의 농도는 4번의 조사 시기에 대해 R² 값이 0.77 정도의 값을 보였다. 부유퇴적물과 클로로필의 자동관측을 위해서는 단일 센서인 McVan과 ChelSea 사의 것이 우수한 것으로 분석되었다. 현장조사에 의한 부유퇴적물 분포는 비슷한 시기에 얻어진 SeaWiFS 분석 결과와 공간적인 분포는 잘 일치 하였으나 농도 값에서는 다소 차이를 보였다.

1. 서론

서해 연안은 갯벌이 넓게 발달하여 있고 최대조차가 9m에 달해서 조류에 의한 해수 유동이 심하여 저층의 재부유 작용이 활발하다. 따라서 유 무기 입자가 해수의 광특성을 좌우하는 Case-II water 해역으로 분류된다 (Gordon and Morel, 1983; Morel and Prieur, 1977). 그러므로 서해 연안 해역은 해색위성 원격탐사의 관점에서 보면 세계 어느 해역보다 다양한 광학적 특성을 가지고 있어서 기존의 원해양(open sea)을 중심으로 만들어진 위성자료의 분석 알고리즘으로는 큰 오차가 발생한다고 알려져 있다. 또한 북서계절풍의 영향으로 해황의 계절별 변화가 뚜렷하며 많은 대규모 간척사업과 인공구조물에 의해 직간접적으로 변화를 겪고 있다. 그러므로 이 지역은 지속적인 모니터링이 요구되나 넓은 지역에 대한 조사선을 이용한 현장조사는 한계가 있으며 또한 해색위성을 이용하기 위해서는 앞에서 언급한 문제로 인하여 알고리즘에 대한 검보정이 선행되어야 한다. 따라서 이 연구에서는 서해 연안 해수환경의 시공간적 모니터링을 위하여 현장조사에 정기여객선을 활용하고자 한다. 정기여객선의 장점은 선관측이 가능하여 점관측(부이나 고정관측점)에 비해 넓은 지역을 커버할 수 있으며, 해양조사선을 이용하는 것보다 경제적이며 주기적으로 자료를 획득할 수 있어 위성자료와 시기적으로 일치하는 자료를 얻기 쉽다는 것이다.

이 연구의 목적은 인천-제주 정기여객선을 이용하여 2001년부터 2004년까지 총 18회에 걸쳐 인천과 제주

사이의 황해 연안에서 20-30분 간격으로 40여개의 정점에서 채수된 해수로부터 클로로필과 부유퇴적물의 농도와 용존유기물 흡광특성을 분석하여 서해 연안의 해수 환경의 공간적 시간적 변화를 파악하는 것이다. 또한, 이들 자료를 이용하여 여객선에 설치된 자동측정 센서의 신뢰도를 검토함으로써 추후 해색위성자료의 검보정에 활용코자 한다. 채수되어 분석된 부유퇴적물 농도는 현장조사 시기와 비슷한 SeaWiFS 위성자료로부터 분석된 부유퇴적물의 분포도와 비교하였다.

서해 연안 해수환경에 대해서는 많은 해양지질학자나 해양생물학자에 의해 연구가 보고 되었으며, 현재도 많은 연구가 진행 중이다. 양한섭과 김성수(1990)는 제주도 주변 해역에 대해 여름철 표층의 클로로필과 영양염류 분포에 영향을 주는 물리적 과정에 대해 연구한 바 있으며, 조창환(1985)은 가을철 한국 주변해역에서의 플랑크톤의 클로로필 함량과 분포에 대해서 연구한 바 있다. 이들은 연구지역이 일부지역에 한정된데 비해 Wu *et al.*(1995)과 Choi *et al.*(1995)은 서해 전 해역에 대해 1992년 5월과 9월 두 시기에 얻어진 클로로필 분포와 기초생산량에 대해 보고 한 바 있다. 부유퇴적물에 대해서도 많은 연구가 수행되었는데, 박용안 등(1984)은 금강 하구 주변의 비교적 넓은 지역에 대해 연구하였고, 최진용(1993), 오재경(1995), 최진용과 박용안(1996, 1998), 추용식 등(2000)은 지질학적 연구를 위해 금강하구, 한강 염하수로, 태안반도와 함평만 등에서 부유퇴적물의 분포를 연구하였다. 이외에도 이용혁과 양재삼(1997)은 금강 하구역에서 엽록소와 부유물질을

500일간 연속 관측하였다. 이와 같이 많은 연구는 주로 해양학적 과정 자체를 이해하기 위한 수단으로 클로로필과 부유퇴적물의 농도에 대해 지역적이고 단기적으로 모니터링이 수행되었다. 국내에서 정기여객선을 이용한 해양환경 모니터링은 한국해양연구원에서 주관한 해양관측시스템 개발사업(2001-2004)이 최초로 이루어졌으나, 유럽 연합에서는 FerryBox라는 사업이 전 유럽에서 8개의 항로를 선택하여 90년대 후반부터 지속적으로 이루어져 왔으며 주로 해양환경적인 자료들을 지속적으로 획득, 해양환경 연구 및 위성자료의 검보정 등에 활용하였다(Doerffer *et al.*, 2002).

본 연구는 유럽의 Ferrybox 사업과 같이 해색위성자료의 검보정을 위한 기본 연구단계로서 자동관측센서의 신뢰도를 검증하고 서해 연안 해수 환경을 계절별/연도별로 정량적으로 분석함으로써 변화의 양상을 파악하였다. 이와 같은 과정은 우리나라가 해색위성 보유국으로서 국내 해색위성 자료의 검보정을 통하여 알고리즘을 개선함은 물론 해수환경에 대한 정밀한 분석 값을 제공함으로써 해색위성 자료에 의해 분석된 값과의 전체적인 경향을 비교할 수 있다. 추후 우리나라 연안의 해양환경을 위성과 현장관측 자료를 이용하여 상호보완하며 지속/안정적으로 해양환경 모니터링을 할 수 있는 시스템 구축하는데 기여할 것으로 기대한다.

2. 연구지역 및 방법

1) 일반사항

2001년 5월부터 2004년 11월까지 총 18회에 걸쳐 인천-제주 정기여객선에서 해수를 채수하여 선상에서 여과한 후 실험실에서 클로로필과 부유퇴적물의 농도를 측정하였으며, 용존유기물(dissolved organic matter, DOM)의 추정을 위하여 400 nm에서의 흡광특성을 파악하였다. 또한 해양환경을 자동 관측할 수 있는 센서를 설치하여 실험에 의해 분석된 자료들과 비교해보았다. 선박의 운항시간이 항상 밤(청해진호 인 경우는 당일 19:00 - 익일 10:00, 오하마나호인 경우는 당일 19:00 - 익일 08:00)에만 이루어졌고 빠르게 운항되는 선박이므로 해수색의 광학적 스펙트럼 측정은 수행할 수 없었

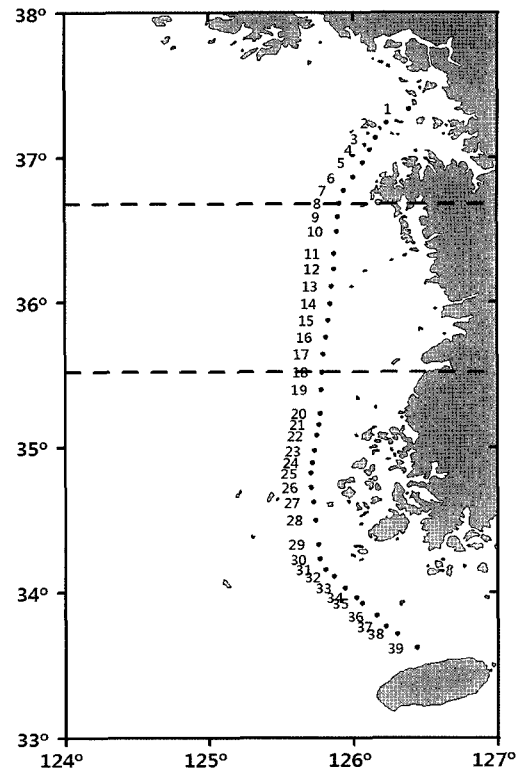


Fig. 1. Sampling points along the cruise line of Incheon-Jeju passenger ship.

다. 자동관측을 위한 클로로필 센서는 ChelSea와 YSI사의 형광 센서가 사용되었고, 탁도 측정을 위해서는 McVan과 YSI사의 센서를 이용하였다. YSI 센서는 하나의 기기 안에 클로로필 및 부유물 농도, 수온, 염분, 용존산소(DO) 등을 측정할 수 있는 멀티 센서이다. YSI 센서는 총 9회 관측하였으며, Chelsea와 McVan 센서는 각각 2회씩 관측하였다. 일반적으로 클로로필 센서의 측정방법은 해수를 펌핑하여 센서까지 빨아드린 후 청색 단파장(470 nm)의 LED 램프를 조사하면 해수의 식물성플랑크톤 세포에 들어있는 광합성색소인 클로로필에 의하여 650 - 700nm (685 nm) 근처에서 형광이 발생하는데 그 형광량으로 클로로필의 농도 값을 측정하는 것이다. 또한 탁도계의 원리는 830 - 890 nm 파장의 근적외선 발광 다이오드를 사용하여 조사광의 측면(90도)이나 역 반사광(180도)의 세기를 감지하여 그 값을 NTU (Nephelometric Turbidity Unit)로 산출한다. 해수 샘플은 출발 후 20분 간격으로 수행되었으며 개수는 당일의 선박 내 해수 샘플 작업의 상황에 따라

Table 1. Observation summary including period, instruments, items and vessels.

Year	Period	Instrument		Water Sample			Vessel
		Chl ¹	SS ²	Chl.	SS	DOM ³	
2001	May 23-24	C ⁴ , Y ⁵	Y	○	○	○	Chunghaejin
	Jul. 4-5	Y	Y	○	○	○	Chunghaejin
	Aug. 1-2	Y	Y	○	○	○	Chunghaejin
	Sep. 5-6	Y	Y	○	○	○	Chunghaejin
	Oct. 22-23	Y	Y	○	○	○	Chunghaejin
2002	Jun. 17-18			×	×	×	Chunghaejin
	Jul. 10-11			○	○	○	Chunghaejin
	Aug. 2-3	C, Y	Y	○	○	○	Chunghaejin
	Sep. 30-Oct. 1	Y	Y	○	○	○	Chunghaejin
	Oct. 28-29	Y	M ⁶ , Y	○	○	○	Chunghaejin
2003	May 27-28			○	○	○	Chunghaejin
	Jul. 1-2			○	○	○	Chunghaejin
	Sep. 18-19			○	○	○	Chunghaejin
	Oct. 16-17			×	×	×	Chunghaejin
	Nov. 13-14			○	○	○	Chunghaejin
2004	Aug. 23-24			○	○	○	Ohamana
	Sep. 20-21			○	○	○	Ohamana
	Nov. 15-16		M, Y	○	○	○	Ohamana

Chl¹: chlorophyll, SS²: suspended sediment, DOM³: dissolved organic matter, C⁴: ChelSea fluorometer sensor, Y⁵: YSI multisensor M⁶: McVan turbidity sensor

변동되었는데, 일반적으로 청해진호인 경우는 평균 40 여개 정점, 오하마나호인 경우는 평균 35개 정점이다.

2) 해수환경 분석 방법

선박에 장착된 펌핑 모터에 의하여 채수한 후, 선상에서 바로 다중 여과장치를 이용하여 여과하였다. 클로로필 분석을 위한 해수 샘플 양은 매 관측 정점마다 평균 약 2000 ml의 해수를 여과하였는데, 필터표면의 착색 정도와 여과 속도에 따라 정점별로 차이를 두었다. 분석에 사용한 여과지는 아세톤에 불용성인 GF/F (Glass Fiber Filter) 47 mm을 사용하였다. 여과 후 생성된 필터(착색된 필터)를 90% 아세톤 10 ml와 함께 20 ml vial에 넣고, 유리봉으로 착색된 필터와 90% 아세톤이 잘 반응하도록 휘저어준 후, vial에 빛이 들어가지 않도록 알루미늄 호일로 포장하여 약 5℃의 냉장실에 24 시간 동안 보관 색소를 추출하였다. 클로로필 색소 용액만을 분리하기 위하여 원심분리기를 사용하지 않고 아세톤에 녹지 않는 25 mm membrane PTFE type syringe filter를 주사기에 부착하여 불순물을 제거하였

다. 추출된 색소용액은 dual beam spectrophotometer에서 baseline correction을 한 후 400 nm에서 750 nm까지 스캐닝 하여 optical density (O.D)를 측정하여 Jeffrey and Humphrey (1975)의 식으로 클로로필 농도를 분석하였다. Jeffrey and Humphrey의 식은 다음과 같다.

$$\langle chl \rangle (\text{mg/m}^3) = \frac{C \times v}{V} \quad (1)$$

$$C = 11.85E_{664} - 1.54 E_{647} - 0.08 E_{630}$$

E_{λ} : spectrophotometer를 통해서 측정된 색소의 파장(λ)에 따른 O.D

v: the volume of acetone in ml

V: the volume of sea water in liter

해수 분석에 의한 총 부유입자의 농도 (TSS)는 분석하기 전에 66에서 4시간 동안 건조한 25 mm GF/F를 이용하여 해수의 여과 전후에 대한 필터무게 차를 이용하여 측정하였다. 여과한 해수의 양은 평균 약 500 ml인데, 해수의 탁도에 따라 여과량은 차이를 두었다. 본 연구에서는 부유입자 농도에 가장 큰 오차를 발생시킬

수 있는 염분을 제거하기 위하여 여과 마지막에는 증류수로 필터 내의 염분을 씻어냈으며, 필터상의 입자가 증류수와 함께 유실되지 않도록 유의하였다. 만약 증류수 세척에 의해 플랑크톤 세포질이 파괴되었을 경우, 색소의 유실은 최대 전체 증량의 약 0.5 - 2 % 이내로 추정되므로 이로 인한 효과는 무시하였다. 여과한 필터는 25 mm petri-dish에 보관하였다가 건조시킨 후 그 무게를 측정하였다.

용존유기물(DOM) 분석방법은 50 ml 주사기를 이용하여 해수를 채수한 후, 25 mm membrane syringe filter를 사용하여 채수한 해수를 여과하였다. 여과할 때 필터를 통과해서 나오는 해수는 두개의 20 ml vial에 오염되지 않도록 잘 넣는다. 이때 주사기 및 20 ml vial이 이물질에 오염되지 않도록 채수한 해수로 2 - 3번 세척하였다. 여과한 해수는 dual beam spectrophotometer에서 3차 증류수를 이용하여 baseline correction을 한 후, 10 cm optical cell을 이용하여 350 - 800 nm까지 스캐닝 하여 optical density (O.D)를 측정하였다. 이와 같은 방법으로 얻은 용존유기물의 O.D를 아래와 같은

식을 이용하여 용존유기물의 광흡수 계수(absorption coefficient of DOM(a_{dom}))로 전환하였다.

$$a_{dom}(\lambda) (m^{-1}) = \frac{O.D_{dom}(\lambda) \times 2.3025}{0.1} \quad (2)$$

O.D_{dom}(λ): 파장에 따른 용존유기물(DOM)의 optical density

2.3025: 상용대수 함수인 O.D를 자연대수 함수인 absorption coefficient로 전환해주기 위한 상수

0.1: 10 cm optical cell에 대한 optical path (광행로)로써, 'cm' 단위를 'm' 단위로 환산한 값

3) SeaWiFS 부유퇴적물 알고리즘

SeaWiFS는 1997년 OrbView-2 위성에 탑재된 대표적인 해색센서로서 밴드 특성은 Table 2와 같다. 밴드 1-6은 20 nm의 밴드 폭을 갖고 밴드 7과 8은 40 nm의 밴드 폭을 갖는다. 이 중에서 5번 밴드가 부유퇴적물을 감지하기에 좋은 밴드이다. 안유환과 문정연(2000)에 의하면 밴드비보다는 단일밴드를 이용하여 부유물 농도 알고리즘을 개발하는 것이 효율적이며, 실제

Table 2. Normal operating and radiometric parameters for SeaWiFS.

Normal operating parameters for SeaWiFS			
Scan Width	58.3°(LAC), 45.0°(GAC)		
Scan Coverage	2,800 km(LAC), 1,500 km(GAC)		
Pixels per Scan Line	1,285(LAC), 248(GAC)		
Spatial Resolution	1.1 km(LAC), 4.5 km(GAC)		
Scan Rate	6 scan lines/sec		
Scan Direction	West to East		
Tilt Capability	-20°, 0°, +20°		
Revisit Time	1 day		
Real-Time Data Rate	665 kbps		
Digitization (per pixel)	10 bits		
Normal radiometric parameters for SeaWiFS			
Band	Wavelength range (nm)	Center Wavelength (nm)	Primary Use
1	402 ~ 422	412	Gelbstoffe
2	433 ~ 453	443	Chlorophyll absorption
3	480 ~ 500	490	Pigment absorption (Case-II), K(490)
4	500 ~ 520	510	Chlorophyll absorption
5	545 ~ 565	555	Pigments, Optical properties, Sediments
6	660 ~ 680	670	Atmospheric correction (CZCS heritage)
7	745 ~ 785	765	Atmospheric correction, Aerosol radiance
8	845 ~ 885	865	Atmospheric correction, Aerosol radiance

LAC: Local Area Coverage, GAC: Global Area Coverage.

로 555 nm 단일밴드가 밴드비보다 상당히 높은 상관관계를 보인 바 있다. 우리나라 주변해역에서 1998년부터 2006년까지 야외분광측정기와 부유퇴적물 분석 결과를 이용하여 얻어진 경험적 방법을 이용한 알고리즘을 개발하였으며 아래의 식과 같다(해양수산부, 2007).

$$SS(g/m^3) = 441.6R_{rs}(555)^{0.96} \quad (3)$$

3. 연구결과

4년간 현장조사시 문제가 발생했던 2번을 제외하고 16회에 걸쳐 채수되어 여과된 필터를 실험실로 가져와서 분석함으로써 클로로필과 부유퇴적물의 농도와 용존 유기물의 흡광계수 값을 얻었다. Fig. 2는 클로로필 농도 분석결과이다. 4년간 대부분의 지역에서 5 mg/m³ 미만의 값을 보였는데, 5월에는 2001년과 2003년 모두 다른 지역에 비해 19번과 29번 정점 사이(백수조간대와 진도 앞바다)에서 분포가 높게 나타났다. 7월은 2001년부터 2003년까지 다른 달에 비해 비교적 낮은 클로로필 값을 보였다. 8월 자료에서 보면, 2001년과 2002년은 낮은 값을 나타낸 반면 2004년은 경기만에서 낮은 값을 보였지만 다른 지역은 다른 월에 비해 높은 값을 보였다. 2003년 9월에는 각각 경기만과 진도 근처에서 5 mg/m³ 이상의 높은 값을 보였으며 2004년 9월에는 경기만에서 10 mg/m³ 이상의 높은 값을 보였다. 이는 서해 남부 연안해역으로 조류 및 수온의 영향을 받아 일차 생산량이 왕성하게 이루어졌기 때문이라고 생각된다. 11월의 경향은 2002-2004년까지 비슷한 경향으로 클로로필이 매우 낮아지는 것을 알 수 있다. 이것은 시기적으로 초겨울이기 때문에 해수 온도가 낮아져서 일차 생산에 영향을 주었을 것이라고 생각된다. Wu *et al.* (1995)과 Choi *et al.* (1995)의 황해 전 해역에서 조사된 클로로필 농도의 범위는 1992년 5월에 0.1-5.2 mg/m³ 이었고 표층은 0.1-2.8 mg/m³ 정도로 낮게 분포하였다. 9월 조사에서는 표층이 0.4-17.4 mg/m³ 정도의 범위를 보였는데, 본 연구에서의 9월 분포와 유사한 경향을 보인다. 양한섭과 김성수(1990)의 연구에 의하면 제주도 주변 해역의 표층 클로로필 농도가 0.1-0.5 mg/m³ 정도의 분포를 보였는데, 본 연구에서도 2001

년과 2002년에는 비슷한 경향을 보였다. 그러나 앞에서 언급한 바와 같이 2004년에는 이 지역에서 2 mg/m³ 이상의 높은 값을 보였다.

용존유기물의 농도를 추정하기 위하여 400 nm에서의 흡광계수를 파악한 결과, 연도별로 차이를 보였다. 2001년은 다른 연도에 비해 값도 높았으며, 계절별 변화의 폭도 매우 크게 나타났다. 반면에 2002년과 2003년은 0.4 m⁻¹ 미만의 낮은 값을 보이며 계절별 변화도 뚜렷하지 않았다. 2004년에는 계절별로 뚜렷한 변화는 보이지 않았지만, 전체적으로 값들이 2002-2003년에 비해 높은 값을 보였다. 2001년 8월과 9월은 매우 높은 값을 보였으나, 2002년과 2004년 8월은 높지 않은 값을 보였다(Fig. 3).

부유퇴적물은 시공간적으로 뚜렷한 특성을 보였다. Fig. 4에서 보는 바와 같이 4년간 대부분의 지역에서 10 g/m³ 미만의 값을 보였으나, 법성포 앞바다인 20번 정점 주변부터 진도 부근에서는 모두 높은 값을 보였다. 이 부분은 10월과 11월에 뚜렷하게 높아지는 경향을 보였는데, 특이하게도 겨울철이 아닌 2001년 5월에는 이 지역에서 186 g/m³으로 4년간 조사된 자료 중 최고값을 보였다. 2002년 7월에도 59 g/m³의 높은 값을 보였으며, 2003년 7월에도 높은 값을 보였다. 일반적으로 강한 북서계절풍에 의해 겨울철에 우리나라 연안의 부유퇴적물 농도가 강해지고 분포가 확장되는 경향을 보이는데, 여름철의 고농도 지역은 조위나 여름철 집중호우에 의한 육상으로부터의 부유퇴적물 유입에 의한 것으로 추정된다. 최진용(1993)은 금강하구에서의 부유퇴적물의 계절적 변동을 연구하여 여름철 금강 입구에서는 100 g/m³ 이상의 높은 값을 보이거나 외해에서는 5 g/m³에서는 정도의 값을 보임을 보고하였다. 금강하구 외해역은 본 연구에서 정점 14-15에 해당하는 곳으로 본 연구에서도 대부분의 시기에서 5 g/m³ 정도의 값을 보여 매우 유사한 경향을 나타냈다. 또한 계절적으로 여름철에 비해 겨울철의 농도가 높으며 9월부터 농도가 높아지는 경향을 보임을 밝혔는데 본 연구의 결과와 잘 일치하였다. 연구지역 중 가장 낮은 부유퇴적물 농도를 보이는 서해 중부해역에 대해 연구한 박용안 등(1984)의 결과도 본 결과와 매우 잘 일치하였다.

해수 샘플에 의해 분석된 클로로필과 부유퇴적물 농도 값을 이용하여 정기여객선에 설치된 자동관측 기기

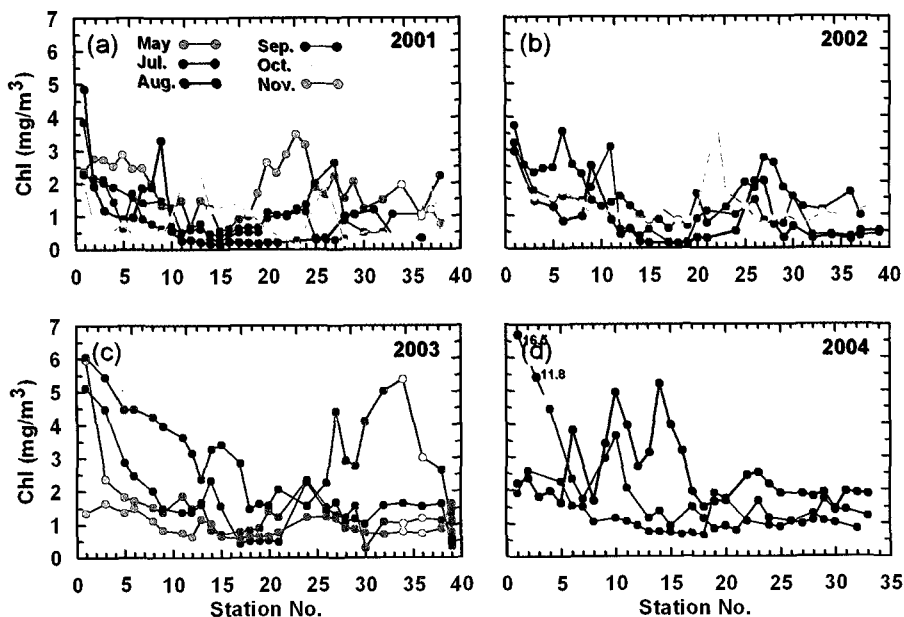


Fig. 2. Variation of chlorophyll concentration measured by spectrophotometer (a) May 23-24, Jul. 4-5, Aug. 1-2, Sep. 5-6 and Oct. 22-23, 2001 (b) Jul. 10-11, Aug. 2-3, Sep. 30 - Oct. 1 and Oct. 28-29, 2002 (c) May 27-28, Jul. 1-2, Sep. 18-19, Oct. 16-17, Nov. 13-14, 2003 (d) Aug. 23-24, Sep. 20-21, Nov. 15-16, 2004.

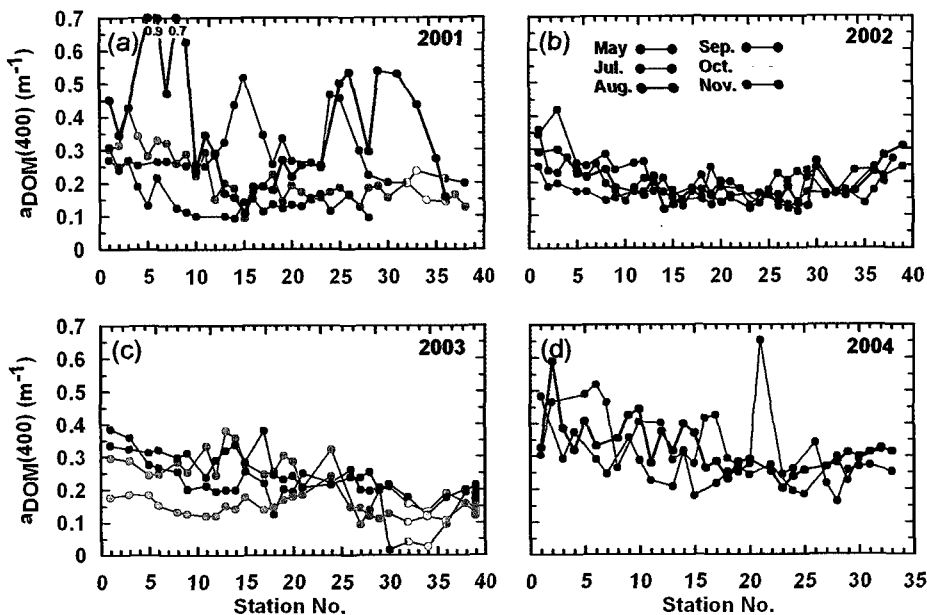


Fig. 3. Variation of absorption coefficients of DOM at 400 nm (a) May 23-24, Jul. 4-5, Aug. 1-2, Sep. 5-6 and Oct. 22-23, 2001 (b) Jul. 10-11, Aug. 2-3, Sep. 30 - Oct. 1 and Oct. 28-29, 2002 (c) May 27-28, Jul. 1-2, Sep. 18-19, Oct. 16-17, Nov. 13-14, 2003 (d) Aug. 23-24, Sep. 20-21, Nov. 15-16, 2004.

값과의 관계를 알아보고 변환식을 구하였다(조흥연과 김백운, 2003; Black and Rosenberg, 1994; Green

et al., 1993). Fig. 5 (a)는 2001년 7월, 9월, 10월과 2002년 10월에 여객선에 설치하여 측정된 YSI 탁도계

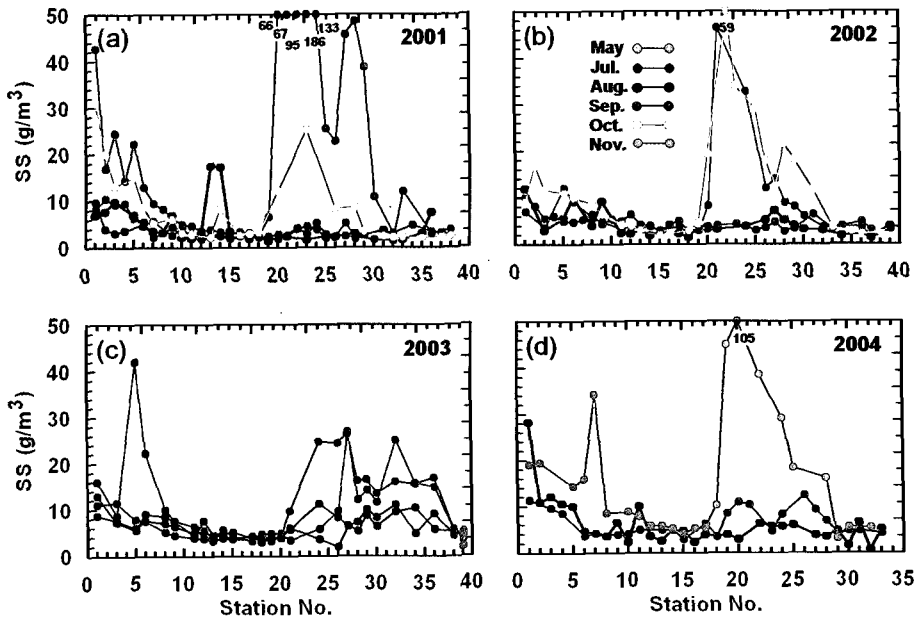


Fig. 4. Variation of suspended sediment concentration measured on (a) May 23-24, Jul. 4-5, Aug. 1-2, Sep. 5-6 and Oct. 22-23, 2001 (b) Jul. 10-11, Aug. 2-3, Sep. 30 - Oct. 1 and Oct. 28-29, 2002 (c) May 27-28, Jul. 1-2, Sep. 18-19, Oct. 16-17, Nov. 13-14, 2003 (d) Aug. 23-24, Sep. 20-21, Nov. 15-16, 2004.

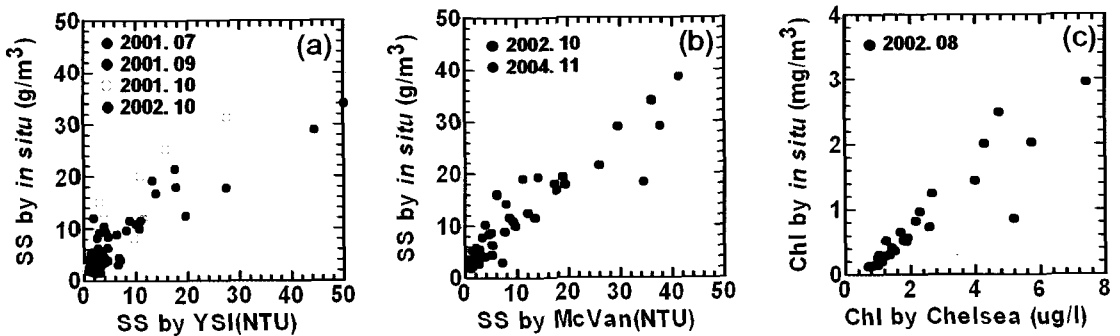


Fig. 5. Correlation between ocean environmental parameters concentration by water analysis method and automatic instruments (a) YSI turbidity sensor values (NTU) and SS concentration (g/m^3) measured at Jul. 4-5, Aug. 1-2, Sep. 22-23, 2001 and Oct. 28-29, 2002. (b) McVan turbidity sensor values (NTU) and SS concentration (g/m^3) measured at Oct. 28-29, 2002 and Nov. 15-16, 2004. (c) ChelSea fluorometer values ($\mu g/l$) and chlorophyll concentration (mg/m^3) measured at Aug. 2-3, 2002.

값과 해수자료를 처리하여 구한 부유퇴적물의 농도와 의 상관관계를 나타낸 것이다. 18 차례의 조사 중 9번에 걸쳐 YSI 센서의 탁도값을 얻었으나, 기기상의 문제로 인하여 3차례 정상 작동되지 않았으며 대부분의 자료값의 변동 폭이 너무 심해 사용하기 어려웠다. 또한 앞에서 언급한 바와 같이 대부분의 부유퇴적물 농도 값이 $10 g/m^3$ 정도의 낮은 값을 보였으므로 상관관계가 매우 낮게 나타났다. Fig. 5 (a)에서도 2001년과 2002년 10월 자료들만 0.1-50 g/m^3 정도의 다양한 범위를 가졌으며,

2001년 7월과 9월은 낮은 값을 보임을 알 수 있다. YSI 탁도계의 NTU 값을 정량적인 부유퇴적물 값으로 변환하기 위한 식은 $y = 0.73x + 2.84$ 로 R^2 값은 약 0.77 정도의 값을 얻었다. 또 다른 탁도 자동센서인 McVan 센서 값과 현장조사 자료 값을 비교한 것이 Fig. 5 (b)이다. 2002년 10월과 2004년 11월 자료를 이용하였는데, 2002년 10월 자료는 0.98의 매우 높은 R^2 값을 보였으며, 2004년 11월 자료와 합쳐도 0.85의 높은 값을 보였다. 변환식은 $y = 0.75x + 3.84$ 로 YSI와

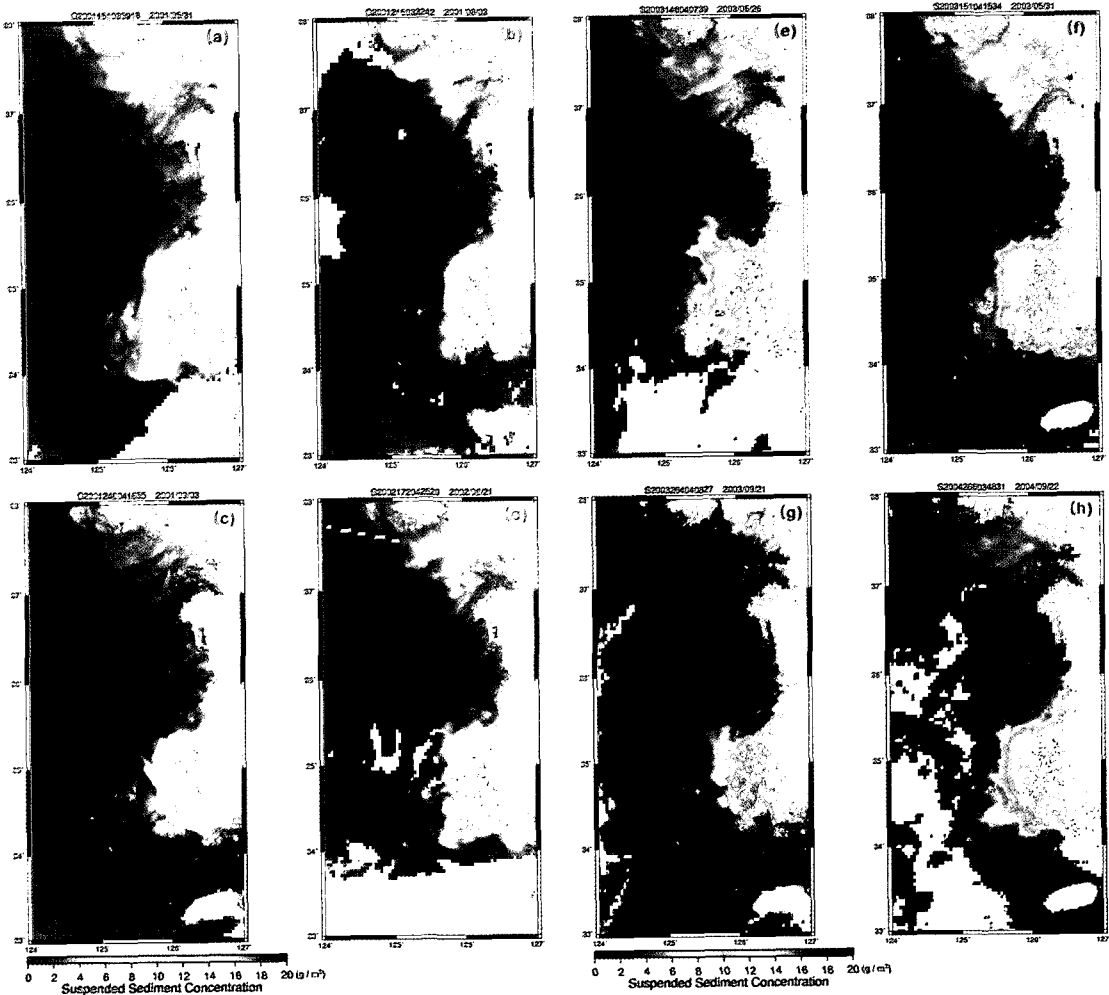


Fig. 6. The suspended sediment distribution maps of SeaWiFS acquired on (a) May 31, 2001, (b) Aug. 3, 2001, (c) Sep. 3, 2001, (d) Jun. 21, 2002, (e) May 26, 2003, (f) May 31, 2003, (g) Sep. 21, 2003, (h) Sep. 22, 2004.

비슷한 경향을 보였다.

클로로필 자동관측을 위하여 YSI와 ChelSea 센서를 이용하였는데, YSI 클로로필 센서로부터 얻어진 자료를 검토한 결과, 선박부착용으로 사용하기에는 신뢰도 매우 낮고 상당히 많은 문제를 발생시켰으므로 본 연구에서는 제외하기로 한다. ChelSea 센서로부터 2001년 5월과 2002년 8월 두 차례 자료를 얻었는데, 2001년 5월 자료는 해수 샘플로부터 분석된 클로로필 값과 상관관계를 보이지 않았으며 2002년 8월 자료는 Fig. 5 (c)와 같이 비교적 좋은 관계를 보였다($R^2 = 0.85$).

현장관측이 수행된 전후의 SeaWiFS 위성영상을 분석하여 부유퇴적물 분포를 파악함으로써 현장조사에 의한 부유퇴적물 농도 자료와 비교해보았다. 정기여객선

의 운항시간이 저녁 7시부터 다음날 8시까지이므로 시간적으로 현장조사와 일치하는 위성자료를 얻을 수는 없었다. Fig. 6은 현장조사와 비슷한 시기에 얻어진 총 8개의 구름이 없는 깨끗한 영상에 대해 한국해양연구원 해양위성연구단에서 1998년부터 2006년까지의 현장조사 자료를 이용하여 개발한 경험적 부유퇴적물 알고리즘을 적용한 부유퇴적물 농도 분포도이다. 전체적인 경향을 보면 경기만에서 해저지형을 따라 부유퇴적물의 분포가 나타나는 것을 알 수 있었으며 중부해역은 비교적 탁도가 낮게 나타나는 경향을 보였으며, 목포 앞바다 부근에서는 모든 영상에서 탁도가 매우 높게 나타났다. 이와 같은 결과는 정기여객선을 이용한 선관측 현장조사와 매우 잘 일치하였다. 3개의 5월 영상은 대부분 다

른 달에 비해 남부해역의 부유퇴적물 경향이 강하게 나타났는데, 이는 2001년 5월의 현장관측자료와 매우 잘 일치하는 결과이다. 또한 8월도 현장관측과 위성분석자료 모두에서 부유퇴적물의 농도가 낮게 나타났다. 부유퇴적물의 분포의 모양이 현장관측과 위성분석 모두에서 매우 유사하게 나왔지만 농도면에서는 위성영상의 결과가 현장관측값에 비해 상당히 낮게 나옴을 알 수 있었다. 이는 위성용 부유퇴적물 경험적 알고리즘이 연안의 높은 탁도 지점에서의 관측 자료가 부족하여 탁한 해역의 농도를 반영하지 않았기 때문으로 생각된다.

4. 결론 및 토의

인천-제주 정기여객선에 해수 채수 장치와 자동측정기기를 설치하여 일정한 루트에 대해 정기적으로 자료를 획득함으로써 황해 해수환경을 파악하였다. 18번의 조사 중 실험에 문제가 있었던 2번을 제외한 16번의 조사에서 얻어진 해수 샘플로부터 클로로필, 부유퇴적물과 용존유기물의 계절별/연별 공간적인 변화를 모니터링 하였다. 황해 연안에서 해색위성으로부터 분석 가능한 해양환경 변수들을 파악함으로써 해색위성에 의해 분석된 결과와 비교 가능하며 추후에는 위성자료의 검보정 자료로도 활용될 수 있을 것으로 기대한다. 또한 현장조사에 의한 자료는 정기여객선에 설치된 해수환경 자동관측 센서가 신뢰성 있는 자료를 생산하는지 비교 분석에도 활용되었다. YSI, McVan, ChelSea 사의 센서로부터 얻어진 자료의 정량화를 위한 변환식을 만들었으며, 센서의 한계를 파악할 수 있었다. 2001년부터 2003년 초반까지 사용된 YSI 센서는 수온, 염분, 탁도, 클로로필 농도 등을 종합적으로 측정할 수 있는 멀티 센서로, 도입 초기에는 많은 기대를 갖았으나 실제 설치하여 운용해 본 결과, 자료의 안정성에 많은 문제점이 발생하였다. 이번 연구에서 클로로필 단일센서인 ChelSea와 탁도 단일센서인 McVan은 많은 조사에 활용되지는 못하였으나, YSI에 비해 안정적인 것으로 나타났다. 또한 정기여객선을 이용한 해수환경 자동관측시스템을 만든다면 복합센서보다는 단일센서가 더 좋을 것으로 생각된다. 이외에도 자동센서로부터 신뢰성 있는 자료를 얻기 위해서는 사용 전에 실험실에서 자동

센서의 검보정이 이루어져야 하며, 정량화하기 위해서는 몇 개 정점에서 얻어진 해수 샘플의 분석에 의한 값이 필요할 것으로 생각된다. 인천-제주 정기여객선의 항로는 연안으로부터 어느 정도 떨어져 있어서 연안해수 환경의 농도 변화가 크지 않은 것으로 나타났다. 예를 들면 부유퇴적물의 경우, 겨울철을 제외하면 대부분 10 g/m^3 미만 값으로 변화가 미미하여 자동센서를 이용하기에는 변별력이 떨어지는 것으로 나타났다. 따라서 Fig. 5에서 센서 변환식에 사용된 자료는 대부분 가을-겨울 자료가 사용되었으며 부유퇴적물 농도가 낮은 다른 계절에는 자동관측 센서의 변환식을 유도하기 어려웠다. 이외에도 자동센서의 많은 오차는 펌핑하여 센서로 들어오는 해수가 많은 버블을 포함하고 있고 입자 사이즈가 큰 부유물을 걸러내지 않음으로서 센서의 정밀도를 낮추는 것으로 추정된다. 따라서 정기여객선을 이용한 자동관측을 위해서는 이와 같은 영향을 고려할 수 있는 시스템을 재설계 해야 될 것으로 생각된다.

비록 자동관측 장비의 정밀도에 문제가 있는 것으로 나타났지만, 4년간 18 차례에 걸쳐 직접 채수에 의해 분석된 클로로필, 부유퇴적물과 용존유기물 자료는 서해 연안 해수의 계절적 변동과 공간적 분포를 파악했다는 점에서 큰 의미가 있다. 클로로필의 농도는 경기만 중심 지역과 남쪽 해안에서 여름과 가을철에 걸쳐 높은 분포를 보였으며 겨울철에는 낮은 값을 나타냈다. 부유퇴적물의 경우, 경기만과 목포 주변 해안은 부유퇴적물이 모든 계절에서 높게 나타났으며 특히 가을-겨울철에 가장 높은 값을 나타냈다. 이와 같은 결과는 Fig. 6의 SeaWiFS에 의해 분석된 부유퇴적물 분포와도 잘 일치하였다. SeaWiFS 부유퇴적물 분포도가 서해 연안의 전반적인 경향을 잘 보이긴 하나 농도에서는 비교적 큰 차이를 보였는데, 이는 사용된 부유퇴적물 농도 경험적 알고리즘이 연안 탁도 높은 곳의 자료가 많지 않아 고농도 지역에서 실측값에 비해 낮게 나타났기 때문으로 생각된다. 따라서 연안에서의 정밀도를 높이기 위해서는 연안 탁수에서 얻어진 현장조사 자료를 이용한 알고리즘의 개선이 있어야 될 것으로 생각한다.

정기여객선을 이용한 자동관측 시스템은 추후 해색 위성자료의 검보정에 활용될 수 있을 것으로 생각되며, 이를 위해서는 낮에 운항하는 여객선을 선정함으로써 위성획득시간과 일치할 수 있도록 하여야 할 것이다. 또

한, 조류의 영향이 강한 우리나라 서해 연안에서는 남북 방향보다는 한국-중국 간의 동서 노선이 자료의 해석에 용이할 것으로 판단된다. 그리고 기 개발된 자동관측 센서의 철저한 검증과 운영 계획을 세워야 정기적인 모니터링이 가능할 것으로 생각된다. 이외에도 현장조사에 의해 얻어진 해수환경 자료를 종합적으로 분석하기 위해서는 조석, 조류, 해저지형, 해저퇴적상, 바람, 태풍 등의 영향에 대한 연구가 수반되어야 할 것이다.

사 사

이 연구는 해양수산부 “해양관측시스템 개발 (PM25801)”과 한국해양연구원 기본 연구 사업인 “하구역 관리 및 기능 회복 기술개발(PE97701)”의 지원으로 수행되었다. 청해진호와 오하마나호에 자동관측기기의 설치와 운용을 담당해준 (주)백년기술 오창룡씨와 (주)청해진 해운 관계자 및 기관장님께 감사를 표한다.

참고문헌

- 박용안, 김승찬, 최진혁, 1984. 한국 서해 금강하구와 인접 내대륙붕에서의 세립질 퇴적물의 분포와 이동, 대한지질학회지, 20(2): 154-168.
- 안유환, 문정언, 2000. 탁수의 remote reflectance 모델과 부유물 알고리즘 개발, Proceeding of the KSRS spring meeting pp 26 - 30.
- 양한섭, 김성수, 1990. 한반도 근해의 해류와 해수특성: 여름철 한국 남해 표층수중 클로로필과 영양염의 농도 분포에 영향을 주는 물리적 과정, 한국수산학회지, 23(6): 417-424.
- 오재경, 1995. 한강 하구 염하수의 부유퇴적물의 퇴적작용, 한국지구과학회지, 16(1): 20-29.
- 이용혁, 양재삼, 1997. 금강 하구역에서 영양염류, 염록소, 부유물질과 염분변화에 대한 500일간의 연속관측, 한국해양학회지 바다, 2(1): 1-7.
- 조창환, 1985. 가을철 한국주변해역의 microplankton 및 nanoplankton의 클로로필 함량과 분포, 한국수산학회지, 18(1): 63-66.
- 조홍연, 김백운, 2003. 포획된 부유물질의 입도분포를 고려한 탁도계 검교정, 한국해양학회지, 15(1): 33-38.
- 추용식, 이희준, 박은순, 이연규, 정갑식, 2000. 만 입구에서 부유퇴적물 거동과 플럭스: 한반도 서해 남부 함평만의 여름철 특성, 한국해양학회지 바다, 5(2): 105-118.
- 최진용, 1993. 금강하구 및 인근해역에서 부유퇴적물의 계절적 변동에 대한 연구, 한국해양학회지, 28(4): 272-280.
- 최진용, 박용안, 1996. 한반도 서해 태안반도 연근해 부유퇴적물의 기초 해양환경적 특성, 한국해양학회지 바다, 1(1): 46-54.
- 최진용, 박용안, 1998. 하계동안 한국 서해 태안반도 연근해에서 부유퇴적물의 운반 양상, 한국해양학회지 바다, 3(1): 45-52.
- 해양수산부, 2007. 통신해양기상위성 해양탐재체 자료 처리시스템 개발 사업, 한국해양연구원 보고서.
- Black, K. P. and Rosenberg, M. A., 1994. Suspended sand measurement in a turbulent environment: field comparison of optical and pump sampling techniques, *Coastal Engineering*, 24: 137-150.
- Choi Joong-Ki, Jae-Hoon Noh, Kyung-Soon Shin, and Ki-Hoon Hong, 1995. The early autumn distribution of chlorophyll-a and primary productivity in the Yellow Sea, 1992. *Journal of the Yellow Sea*, 1: 68-80.
- Doerffer, R., Schiller, H., Krasemann, H., Heymann, K., Cordes, W., Sch nfeld, W., R ttgers, R., Behner, I., and Kipp, P., 2002. MERIS Case 2 water validation: Early results North Sea / Helgoland / German bight. Proceeding of Envisat Validation Workshop, Frascati, Italy, 9-13 December 2002.
- Gordon, H. R. and A. Morel, 1983. Remote assessment of ocean color for interpretation of satellite visible imagery: a review. Lect. Notes on Coastal and Estuarine Studies. M. Bowman (ed.), Springer-Verlag. 114 pp.

- Green, M. O. and Boon, J. D., III, 1993. The measurement of constituent concentrations in nonhomogeneous sediment suspensions using optical backscatter sensors, *Marine Geology*, 110: 73-81.
- Jeffrey, S. W. and G. F. Humphrey, 1975. New spectrophotometric equations for determining chlorophylls a, b, c, and c in higher plants, algae and natural phytoplankton. *Biochimie Physiologie Pflanzen*, 167: 374-384.
- Morel, A. and L. Prieur, 1977. Analysis of variations in ocean color. *Limnol. Oceanogr.*, 22(4): 709-722.
- Wu Yu-Lin, Yu-Jie Guo, and Yong-Shan Zhang, 1995. Distribution characteristics of chlorophyll-a and primary productivity in the Yellow Sea, *Journal of the Yellow Sea* 1: 81-92.