

## Landsat TM/ETM+ 연안 부유퇴적물 알고리즘 개발

- 새만금 주변 해역을 중심으로 -

민지은\*\*\* · 유주형\*† · 안유환\* · 이규성\*\*

한국해양연구원 해양위성연구단\*, 인하대학교 지리정보공학과\*\*

### Development of Suspended Sediment Algorithm for Landsat TM/ETM+ in Coastal Sea Waters

- A Case Study in Saemangeum Area -

Jee-Eun Min\*\*\*, Joo-Hyung Ryu\*†, Yu-Hwan Ahn\*, and Kyu-Sung Lee\*\*

Ocean Satellite Research Group, Korean Ocean Research & Development Institute (KORDI)\*

Department of Geoinformatic Engineering, Inha University\*\*

**Abstract :** The Median Resolution Sensors (MRSs) for land observation such as Landsat-ETM+ and SPOT-HRV are more effective than Ocean Color Sensors (OCSs) for studying of detailed ecological and biogeochemical components of the coastal waters. In this study, we developed suspended sediment algorithm for Landsat TM/ETM+ by considering the spectral response curve of each band. To estimate suspended sediment concentration (SS) from satellite image data, there are two difference types of algorithms, that are derived for enhancing the accuracy of SS from Landsat imagery. Both empirical and remote sensing reflectance model (hereafter referred to as  $R_{rs}$  model) are used here. This study tried to compare two algorithm, and verified using *in situ* SS data. It was found that the empirical SS algorithm using band 2 produced the best result.  $R_{rs}$  model-based SS algorithm estimated higher values than empirical SS algorithm. In this study we used  $R_{rs}$  model developed by Ahn (2000) focused on the Mediterranean coastal area. That's owing to the difference of oceanic characteristics between Mediterranean and Korean coastal area. In the future we will improve that  $R_{rs}$  model for the Korean coastal area, then the result will be advanced.

**Key Words :** Landsat ETM+, suspended sediment algorithm, remote sensing reflectance, Saemangeum.

**요약 :** 연안 해역에서 공간적으로 미세한 생태학적, 생지화학적 변화를 파악하기 위해서는 저해상도의 해상위성보다 Landsat ETM+나 SPOT HRV와 같은 중간 해상도의 육상관측 위성을 이용하는 것이 더 효과적이다. 이 연구에서는 각 밴드의 spectral response curve를 고려하여 Landsat TM/ETM+용 부유퇴적물 농도 추정 알고리즘을 개발하였다. Landsat 영상으로부터 연안 부유퇴적물 알고리즘을 향상시키기 위하여 두 가지 타입의 알고리즘 사용하였는데, 현장관측에 의한 경험적 모델과 원격반사도 모델이다. 본 연구에서는 이 두 가지 방법으로 연안 지역에서의 부유퇴적물 농도추정 알고리즘을 만들어보고, 현장 관측 자료를 이용하여 두 알고리즘을 검증 및 비교해 보았다. 그 결과 2번 밴드를 사용한 경험적 알고리즘이 현장조사

자료와 가장 잘 일치하였다. 원격반사도 모델 기반의 알고리즘은 경험적 모델에 비해 높은 값을 추정하는 결과를 얻을 수 있었다. 이 연구에서 사용된 모델은 안유환(2000)에 의해 개발된 것으로서 지중해 해역의 특성에 맞도록 개발된 것이다. 따라서 해수성분요소 등의 해역 특성이 매우 다른 우리나라 해역에 맞지 않아서 생긴 결과라 생각된다. 차후에 이 모델을 우리나라 해역 특성에 맞도록 개발한다면 좋은 결과를 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

## 1. 서론

해양에서 반사되어 나오는 가시광 영역의 특성을 이용하여 해색의 변화를 원격으로 감지하고 분석하는 기술을 해색원격탐사라고 한다. 해색관측용 센서들은 해수 중에 포함된 부유퇴적물(Suspended sediment; SS), 클로로필(Chlorophyll; chl)과 용존 유기물(Dissolved organic matter; DOM) 등의 농도에 따라 미세하게 변하는 분광 특성을 효과적으로 감지하기 위하여 10~20 nm 정도의 좁은 스펙트럴 파장 영역으로 구성되어 있다. 사용되는 파장 폭이 좁아지면 센서에 감지되는 에너지가 적어지므로 공간해상도를 낮추어야 하며, 관측 폭(swath)은 넓어지게 되고 관측주기를 의미하는 시간적 해상도는 증가하게 된다. 광역 관측용 해색 센서의 이러한 특성은 대양에서의 대규모 해양환경 변화를 모니터링 하기에는 매우 효과적이지만 연안에서 공간적으로 미세한 변화를 감지하기 위해서는 보다 고해상도인 육상관측용 센서가 더 효과적일 수 있다. 다만 육상관측 고-중해상도 위성은 전문 해색위성보다 센서의 S/N 값이 낮아서 정밀 관측이 어렵다는 단점이 있다. 대표적인 육상관측용 센서인 Landsat TM/ETM+ 영상은 가시광-적외선 파장 영역에서 30 m 공간 해상도를 갖기 때문에 미세한 연안환경 변화 파악이 가능하며, 1982년부터 현재까지 축적된 많은 자료를 이용하여 시계열 모니터링이 가능하다. 이와 같은 특성은 우리나라 서해안과 같이 큰 조수간만의 차이로 인한 자연적 변화와 많은 대규모의 연안 간척사업과 기타 연안 토목 공사 등의 인공적인 연안환경 변화에 따른 부유퇴적물의 농도를 주기적이고 장기적으로 파악하기 적합하다.

위성영상을 이용한 부유퇴적물 농도 분석은 초기에는 CZCS나 SeaWiFS와 같은 해색 위성 영상의 2개 밴드의 비를 이용한 알고리즘을 사용하여 이루어졌다(Clark *et al.*, 1980). 하지만 Ahn *et al.* (2001)은 단일

밴드 즉, SeaWiFS 5번 밴드(중심 파장: 555 nm)를 이용하는 것이 두 밴드의 비(SeaWiFS 2번 밴드와 5번 밴드의 비) 값을 이용하는 알고리즘 보다 더 높은 상관관계가 있다는 것을 밝혔으며, 현장 관측된 부유퇴적물 농도 값과 해수 광학 자료를 이용하여 단일밴드 부유퇴적물 농도 알고리즘을 개발하였다. 그러나 해색 위성에 의한 연안에서의 부유퇴적물 분석은 수 백미터에 달하는 공간해상도로 인하여 많은 연구가 이루어지지 못했다. 이러한 연안 해수 분석의 한계성 때문에 중해상도인 육상관측 위성을 이용한 연안 환경 분석이 요구되었으나, 지금까지는 해상도가 좋은 육상 관측 위성(Landsat 시리즈와 SPOT 등)을 이용하여 정성적으로 그 분포만을 파악하는 것이 대부분이었다. 하지만 이동 경로나 상대적 분포만을 보는 분석에는 한계가 있으므로 정량적인 분석이 요구된다. 해수의 광학적 특징을 이용하여 부유퇴적물 농도를 추정하기 위해서는 얻어지는 해수의 분광특성에 대한 정확한 분석이 필요하다. Froidefond *et al.* (2002)은 프랑스 Guiana 연안에서 원격반사도(Remote sensing reflectance:  $R_{rs}$ ) 스펙트럼을 분석하여 현장에서 얻어진 해수의 광학적 스펙트럼의 형태에 따라서 네 가지 타입으로 분류하였다. 2002년에 분석된 탁도와 광학 스펙트럼 결과를 바탕으로 Froidefond *et al.* (2004)은 SPOT 용 실험적 부유퇴적물 알고리즘을 만들었으며 이와 유사하게 Miller *et al.* (2004)은 MODIS 용 부유퇴적물 농도 알고리즘을 개발하였다.

이와 같이 위성영상을 이용한 부유퇴적물 농도 추정을 위한 알고리즘 개발은 주로 현장 관측 값과 광학 측정값 사이의 관계식을 얻어내는 방법으로 이루어졌다. 하지만 이와는 다르게 안유환(2000)은  $R_{rs}$ 와 해수 중 물질의 성분별 광 특성 및 농도가 연결된 원격 반사도 모델을 개발하였다. 이 모델은 해수의 원격반사도로부터 해수 성분의 농도를 추정할 수도 있고, 반대로 해수 성분의 농도 값으로부터 원격반사도를 추정할 수 있는

Forward와 Inverse의 분석이 가능한 모델이다. 이 모델을 이용하여 해수의 원격반사도와 해수의 광 특성 및 농도를 발생시켜, 육상 관측 위성인 Landsat TM 용 부유퇴적물 농도 알고리즘을 개발하였다(Ahn *et al.*, 2006). 이처럼 해수의 부유퇴적물 농도를 추정하는 알고리즘은 현장에서 관측된 값을 이용하는 경험적 방법의 알고리즘과 광학적 모델인 해수의 원격반사도 모델을 이용한 알고리즘으로 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 대부분의 알고리즘은 현장에서 관측된 값을 이용하여 경험적으로 만들어지고 있고, 한편으로는 육상관측 위성의 밴드별 response curve를 고려하여 원격반사도 모델을 이용한 알고리즘에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다(Ahn *et al.*, 2006).

본 연구에서는 위의 두 가지 알고리즘 방법들을 이용

하여 새만금 해역에 대한 부유퇴적물 농도 알고리즘을 만들어 보고 현장관측 시기에 얻어진 위성자료를 이용하여 어느 알고리즘이 잘 맞는지 비교 분석해 보고자 한다. 개발된 알고리즘은 2006년에 발사될 예정인 Kompsat-II에 탑재된 MSC (Multi-Spectral Camera) 센서와 2008년 발사 예정인 통신해양기상위성 해양탐재체의 각 밴드의 spectral response curve만을 고려한다면 활용이 가능할 것으로 기대된다.

## 2. 연구 자료 및 방법

본 연구는 Fig. 1에서 보는 것과 같이 경험적 방법의 알고리즘 개발과 원격반사도 모델 기반의 알고리즘 개

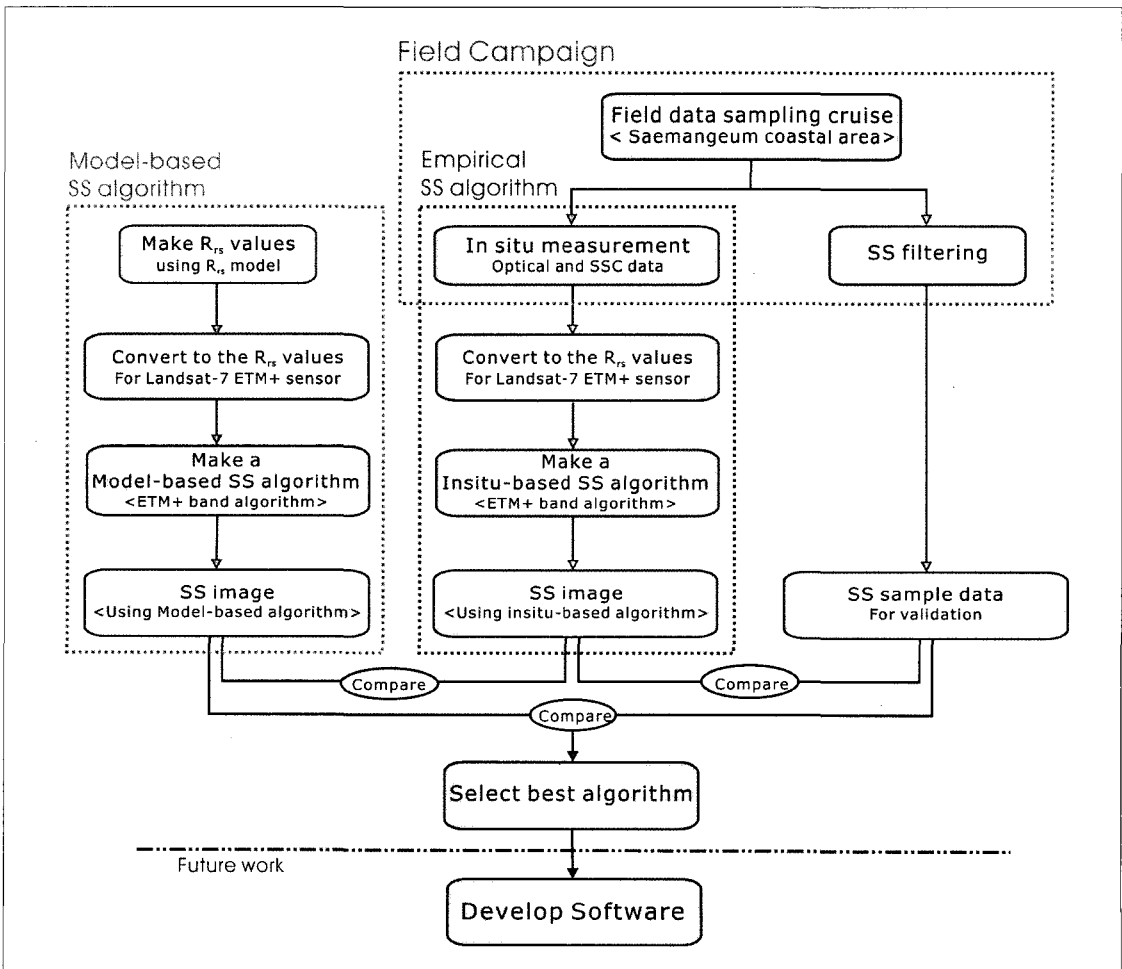


Fig. 1. Flowchart of this study.

발의 두 부분으로 이루어졌다. 우선 경험적 방법의 알고리즘 개발을 위하여 현장 조사가 실시되었고, 현장 샘플링을 통해 얻어진 자료를 이용하여 경험적 방법으로 알고리즘을 개발하였다. 다음으로 원격반사도 모델을 이용하여 알고리즘을 개발하기 위하여 우리나라 해역 특성에 맞도록 해양환경요소를 입력하여 원격반사도 값을 얻어내었다. 그렇게 얻어진 자료를 이용하여 원격반사도 모델 기반의 알고리즘을 개발하였다. 마지막으로 이렇게 얻어진 두 알고리즘을 이용하여 부유물질 영상을 그 영상과 일치하는 현장관측 자료를 이용하여 결과를 비교·분석하여 보았다.

1) 연구지역

연구 지역은 남한의 서해 연안 중간 부분에 위치한 새만금 지역이다(Fig. 2). 서해는 중국대륙 동해 연안과 우리나라 서해 연안으로 둘러싸여 있는 반 폐쇄적인 해역으로, 육지로부터 다량의 부유퇴적물을 공급하는 강과 하천이 많이 인접해 있는 해역이다. 또한 강한 조류가 발생하여 저층의 부유퇴적물들이 표층으로 재부유하는 매우 탁한 해역이다. 따라서 부유퇴적물의 공급원이 많고 다양하기 때문에, 시·공간적으로 부유물 농도 분포가 다양하게 나타난다(최용규와 권정노, 1998). 새만금 지역은 1991년 11월 28일에 방조제 공사가 착공된 이후 현

재까지 총 길이 33 km에 달하는 대규모의 방조제가 건설되고 있기 때문에 이 공사에 의해 부유퇴적물 농도와 분포가 방조제 안과 밖을 중심으로 다양하게 변화하고 있다(http://www.saemangeum.re.kr). 만경강과 동진강을 통해 많은 양의 담수가 유입되고 있으며 이 두 강의 하구에서는 담수와 함께 육상 기원 쇄설물을 포함한 토사들이 새만금 유역으로 다량 유입되고 있고, 또한 북쪽에 위치한 금강을 통해서도 많은 양의 퇴적물들이 새만금 유역으로 유입되고 있다(이상호 등, 2003). 또한 2003년 말에 4호 방조제가 완공됨에 따라 많은 변화가 예상되며 지속적인 모니터링이 요구되는 지역이다.

2) 현장조사 및 위성 자료

본 연구를 위하여 Landsat-7 위성이 새만금 지역을 관측하는 날짜에 맞추어 다섯 차례 현장관측을 실시하였다. 그 중 2005년 3월 26~27일 그리고 5월 29일 두 번에 걸쳐서 현장-위성 매칭 자료를 얻을 수 있었다. 관측정점은 3월에 30개, 그리고 5월에 10개로 총 40개 정점이며, 각 정점별로 해수성분 자료를 얻기 위해서 채수와 광학관측이 동시에 이루어졌다. 채수된 물을 이용하여 클로로필 농도(Chlorophyll concentration; <chl>)와 총 부유퇴적물 농도(Suspended solid particles concentration; <SS>), 식물성 플랑크톤 (Phytoplankton)과 SS 및 DOM

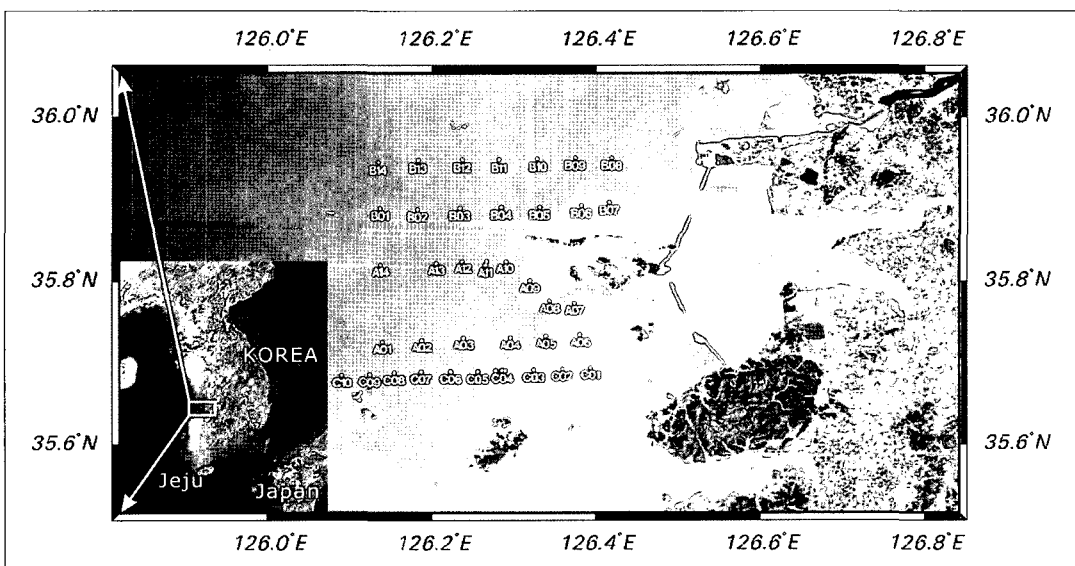


Fig. 2. A Landsat ETM+ image of Saemangeum area with a location map. The yellow circles represent the positions of sampling water and measuring the field spectroradiometer. A and B groups were acquired on March 2005 to derive empirical algorithm and C group was conducted on May 2005 to verify empirical and model-based algorithms.

에 의한 흡광계수(Absorption coefficient) 값인  $a_{ph}$  (Absorption coefficient of phytoplankton),  $a_{ss}$  (Absorption coefficient of suspended sediment) 그리고  $a_{DOM}$  (Absorption coefficient of DOM)을 측정하였고, 해수 광학자료로서 dual beam spectroradiometer에 의한 downwelling irradiance ( $E_d$ ), total water leaving radiance ( $L_{wT}$ ), sky radiance ( $L_{sky}$ )를 측정하였다.

〈chl〉 측정을 위하여 불용성 필터인 GF/F (Glass Fiber Filter) 47 mm를 이용하여 필터가 녹색으로 충분히 착색될 때까지 1~2 l를 여과하였다. 이 필터에서 클로로필만 분리해 내기 위해 20 ml 유리병에 90% 아세톤 10 ml와 함께 넣어 냉장실에 24 시간 정도를 보관한 다음 색소 용액만을 추출해 내기 위해서 25 mm membrane PTFE 타입 (Model MFS-25) 필터를 이용하여 여과하였다. 이렇게 추출된 색소용액을 dual beam spectrophotometer를 이용하여 350~900 nm 까지 스캐닝 하여 광학적 두께(Optical density)를 측정하고 Jeffrey and Humphrey (1975)의 식에 의해 농도를 분석하였다. 〈SS〉를 계산하기 위해서는 25 mm GF/F를 이용하는데, 해수를 여과하기 전에 미리 잘 건조된 필터의 무게를 측정하고, 이 필터를 이용하여 채수해 온 해수를 여과한 후 잘 건조하여 무게를 측정하였다. 여과량은 클로로필과 마찬가지로 해수의 부유 입자 농도에 따라 100~500 ml 까지 달리 하였다. 흡광계수의 측정을 위하여 채수한 해수를 25 mm GF/F를 이용하여 여과하고 여과된 필터는 Dual beam spectrophotometer를 이용하여 광학적 두께 값을 구하였다. 여과한 필터를 가지고 측정한 값은 해수 중의 모든 입자에 대한 값으로써  $O.D_{total}$  값이 된다. 총 값을 측정하고 난 다음, 색소를 제거하기 위해 100%의 메탄올에 약 1 시간 정도 담가 둔 다음 무색 입자의 손실을 막기 위해 다시 한번 여과해 주었다. 그런 다음 spectrophotometer로 다시 측정하면 무색 입자(부유퇴적물)에 대한  $O.D_{ss}$  값을 얻게 된다. 메탄올에 의해서 제거된 식물성 플랑크톤에 의한 값은 총 값과 부유퇴적물 값의 차이로 구할 수 있다. spectrophotometer로 측정된  $O.D_{ph}$ 와  $O.D_{ss}$ 값은 샘플의 광학적 두께에 좌우되는 상대적인 값이므로, 전환식을 이용하여 광 흡수 계수 값인  $a_{ph}$ 와  $a_{ss}$ 로 전환하였

다(한국해양연구원, 1999).  $a_{DOM}$ 을 구하기 위해서 채수해 온 해수를 필터를 이용하여 50 ml를 여과한 다음 dual beam spectrophotometer를 이용하여 400~750 nm 범위를 1 nm 간격으로  $O.D_{DOM}$  값을 측정하고  $a_{DOM}$  값으로 전환하여 주었다.

해수의 반사도를 측정하기 위해서 ASD (Analytical Spectral Devices Co.) 사의 FieldSpec Dual RS<sup>3</sup> Spectroradiometer를 사용하였다(이하 ASD라 함). ASD 광학장비는 1 nm 밴드 폭의 701개 채널을 가지고 있으며, 측정할 수 있는 파장의 범위는 350~1050 nm 까지이다. 측정 시 태양반사점(Sun glint)의 효과를 최소화하기 위해서 선상에서 태양을 바라보고 시계방향으로 135° 되는 방향을 향하여 측정하였다. 해수표면으로부터의 복사량을 측정하기 위하여 해수 표면을 보는 각도는 관측자의 수직 연장선에 대해서 해수표면에 대한 각(입사각)이 30°가 되도록 해수표면에 잘 조준한 다음 총 수출광량( $L_{wT}$ )을 측정하였다. 대기로부터 해수표면에 입사되는 광량을 측정하기 위해서 ASD의 foreoptic을 창공으로 조준하는데, 관측자의 수직 연장선에 대하여  $L_{wT}$  관측지점 방향에서 바라본 대기에 대한 각이 30°가 되도록 잘 조준한 다음,  $L_{wT}$  관측할 때의 입사각과 동일한 각도를 이루고, 관측상공 시야를 방해하는 인위적인 물체가 없도록 주의해서 Sky radiance ( $L_{sky}$ )를 측정하였다.  $E_d$  ( $W/m^2/nm$ )를 측정하기 위해서, ASD에서는 Remote Cosine Receptor (RCR)라는 광센서창(Window)을 이용하는데, 이 창은 해수표면에 대한 반구상태로 입사되는 모든 광량을 측정한다. 이와 같이 ASD 장비를 이용하여 " $L_{wT} - E_d$ ", " $L_{sky} - E_d$ "의 방법으로 복사도와 irradiance를 동시에 측정할 수 있으며, 측정된 값들은 ASD 광학장비에 연결된 노트북 컴퓨터에 자동으로 저장하였다.

새만금 주변 해역에서의 해수환경 특성을 분석한 결과, 클로로필 농도는 0.3~10.2  $mg/m^3$ 로 분포하고 있고, 부유물 농도는 4.2~55.0  $g/m^3$ 으로 분포하고 있었으며,  $a_{DOM}(400)$ 는 본 관측해역에서 0.1~0.5  $m^{-1}$ 로 나타났다. 관측해역은 낮은 수심과 육지로부터 공급되는 육상기원 퇴적물이 하천 등을 통해 바다로 유입되는 연안 해역이므로 부유퇴적물 농도가 대체적으로 높게 나타나고 있었다. 전체적으로 개방 구간이 존재하는 고군산군도의 남쪽에 위치하는 A 정점 군들이 개방구간이

없는 북쪽의 B 정점 군들에 비해서 높은 부유퇴적물 농도를 나타냈다. 각 정점 군별 분포 특성을 보면 육상에서 먼 정점(A01, B01)에서 농도가 낮고 육상에 가까운 정점(A07, A08, B09, B10)으로 올수록 농도가 높아졌다가 육상에서 멀어질수록(A14, B14) 그 값이 다시 낮아지는 것을 볼 수 있다.

Fig. 3은 관측해역에서 측정된  $R_{rs}$  스펙트럼들을 나타내는 그래프로서 CASE-II water 해역에서 나타나는 전형적인 스펙트럼 형태들인 것을 알 수 있다. 전체적으로 비슷한 형태의 스펙트럼이 얻어진 것을 볼 수 있는데, 570 nm에서 최고점을 나타냈으며, 이 최고점 이후로부터 600 nm까지 급격하게 값이 감소하였다. 600 nm부터 680 nm까지 다시 완만하게 감소하다가 680 nm 근처에서 작은 피크를 볼 수 있는데 이는 클로로필 색소가 주로 단파장에서 흡수된 에너지의 일부를 다시 682~688 nm에서 방출하는 형광 신호 때문이다 (Ahn, 1999). 이 두 번째 피크 값 이후에 또 다시 값이 급격히 감소하였고, 730 nm부터 이후로는 거의 비슷한 값을 나타내면서 조금씩 감소하였다. 그리고 근적외선 영역인 820 nm에서 마지막 피크 값을 보였다. 560 nm의 가장 높은 피크는  $9.25 \sim 55.0 \text{ g/m}^3$ 의 다소 높은 부유퇴적물 농도에서는 뾰족하고 높은 피크 값을 보인 반면,  $4.20 \sim 8.12 \text{ g/m}^3$ 의 낮은 부유퇴적물 농도에서는 완만하고 낮은 피크 값을 보였다.

현장관측을 실시한 3월 26일과 5월 29일의 위성영상을 확인해 본 결과, 3월 26일은 구름이 얇게 끼여 있는 날씨였기 때문에 알고리즘 확인에 사용할 수 없었다. 그러므로 개발된 알고리즘의 검증을 위하여 5월 29일 획득

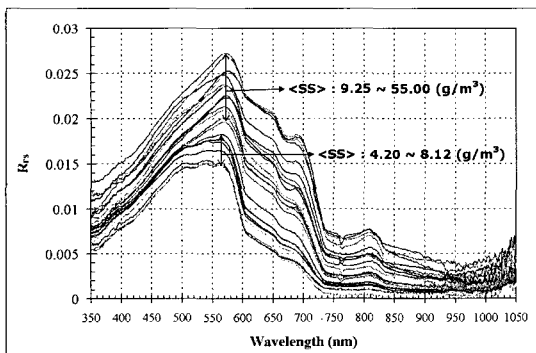


Fig. 3. *In situ*  $R_{rs}$  values acquired by ASD dual beam spectroradiometer around Saemangeum coastal area on 26 ~ 27 March 2005.

된 Landsat ETM+ 영상을 이용하였다. 1:5,000과 1:25,000 축척의 지형도를 이용하여 기하보정 된 IRS 위성영상을 이용하여 영상 대 영상 (image to image) 방법으로 0.5 픽셀 이내의 오차로 지형보정을 실시하였다.

### 3. 연구의 이론적 배경

해양에서의 신호 값은 육상에서의 신호보다 상대적으로 매우 작은 값을 갖는다. 높은 반사도 값을 가지고 있는 육상의 경우 대기에 의한 영향은 10% 미만으로 작은 값을 가지지만, 육상의 10분의 일 정도의 아주 작은 반사도를 가지고 있는 해양의 경우 대기에 의한 영향은 거의 절반 이상의 아주 많은 부분을 차지하고 있다. 따라서 해양의 경우 대기 효과를 얼마나 효과적으로 제거하였는지에 따라 해수 환경 분석의 정밀도가 결정되게 된다. 이러한 필요성 때문에 해색관측위성에는 일반적으로 대기 보정을 위하여 근적외선 파장 영역대의 밴드가 구성되며 이들 밴드를 이용하여 대기보정을 실시한다(Gordon, 1997). 하지만 해색위성용 대기보정 알고리즘들은 맑은 CASE-I water 해역에는 잘 맞지만 본 연구의 연구지역과 같이 연안의 탁도가 높은 CASE-II water 해역에는 잘 맞지 않기 때문에 적용이 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 영상 자료 값을 이용하는 path extraction 방법의 일종인 COST (Cosine approximation model) 방법을 사용하였다(Chavez, 1996).

영상 자료의 처리는 Fig. 4에서와 같은 순서로 이루어졌다. 우선 기하 보정된 DN (digital number) 값의 영상을 아래의 식 (1)을 이용하여 절대 에너지 (radiance) 값으로 변환하여 주었다.

$$L(\lambda) = \frac{(L_{MAX}(\lambda) - L_{MIN}(\lambda))}{Q_{calMAX} - Q_{calMIN}} \times (Q_{cal} - Q_{calMIN}) + L_{MIN}(\lambda) \quad (1)$$

여기서  $L_{MAX}$ 와  $L_{MIN}$ 은 각 영상의 헤더에서 제공하는 에너지 범위를 나타내는 계수 값이다(Landsat 7 Handbook).  $Q_{cal}$  값은 변환될 영상의 DN 값이고,  $Q_{calMIN}$ 과  $Q_{calMAX}$ 는 각 영상에서 나타나는 DN의 최대와 최소값이다.

이렇게 변환된 복사도 값에서 대기의 영향을 받은 복사도( $L_{sky}$ )를 제거하고 반사도 값으로 변환하였다.  $L_{sky}$  값의 계산은 위의 수식 (1)을 이용하는데, 이때의  $Q_{cal}$

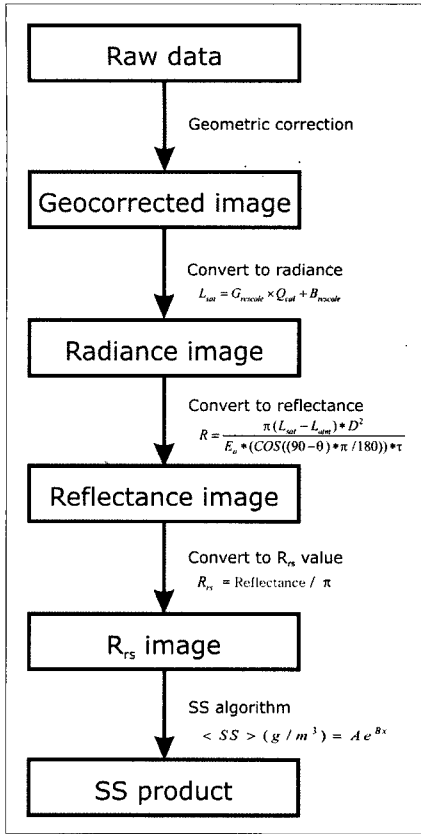


Fig. 4. Image processing flow chart.

의 입력 값은 영상에서 추출된 dark pixel의 값이다. dark pixel의 추출 시, 각 밴드의 히스토그램에서 1% 이하의 분포를 갖는 값들은 이상(error)점으로 배제하고 1%가 넘는 값들 중에서 갑자기 증가하는 값을 사용하였다(Chavez, 1996). 이때 영상 전체를 이용하는 것보다는 해양만을 선택한 영상에서 추출하는 것이 더 좋은 결과를 보였기 때문에 해양 부분을 자른 영상에서 dark pixel을 추출하였다(Min et al., 2004). 반사도 값으로의 변환은 아래의 수식을 이용하였다.

$$\rho(\lambda) = \frac{\pi \times (L(\lambda) - L_{sky}(\lambda)) \times D^2}{E_{sun}(\lambda) \times (\cos((90 - \theta) \times \pi / 180)) \times \tau} \quad (2)$$

여기서  $L_\lambda$ 는 각 밴드의 복사도 값이고  $L_{sky}(\lambda)$ 는 각 밴드의 대기에 의한 복사도 값이다. D는 지구와 태양간의 거리를 천문단위로 나타낸 것이고,  $E_{sun}(\lambda)$ 는 대기권 밖에서의 태양 방사도(irradiance)값이다(Landsat 7 Handbook).  $\theta$ 는 태양의 고도 값을 나타내고  $\tau$ 는 대기 투과도를 나타내는데, 대기 투과도는  $\cos\theta$ 로 적용하였

다. 마지막으로 복사도 값을 위성에서 얻은 원격반사도 값으로 변화하여 주기 위하여  $\pi$ 로 나누어 준 다음, 개발된 알고리즘을 적용하여 부유퇴적물 농도 분포 영상을 얻었다.

위성영상을 이용하여 연안 부유퇴적물 농도 추정 알고리즘을 개발하는 방법은 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 첫째는 현장에서 측정된 반사도 값과 해수환경자료를 이용한 경험적 알고리즘이고, 두 번째는 원격반사도 모델(Remote sensing reflectance model;  $R_{rs}$  model)을 이용한 모델 기반의 알고리즘이다. 첫 번째 방법은 현장에서 측정된 반사도 값과 부유퇴적물 농도 자료를 이용하여 상관관계 분석을 통해 관계식을 얻어내는 방법으로 현장관측 값에 의존적이라는 한계가 있지만, 좁은 해역에 대해서 다양한 현장관측 값을 얻는다면 그 현장을 대표할 수 있는 알고리즘을 만들 수 있다는 장점이 있다. 반면에 원격반사도 모델을 이용하여 부유퇴적물 알고리즘을 만드는 경우, 현장관측 없이 모델을 이용하여 반사도 값과 이에 상응하는 부유퇴적물 농도 값을 구할 수 있다는 장점이 있긴 하지만 모델에 의존적이기 때문에 모델이 실제 현장의 환경을 반영하지 못한다면 큰 오류를 범할 수 있다는 단점이 있다.

해수의 원격반사도 모델은 Morel and Prieur(1976)에 의해서 처음 개발되었으며, 안유환(2000)에 의해서 발전되었는데, 본 연구에서는 안유환(2000)에 의해 개발된 원격반사도 모델을 사용하였다. 해수의 일반적인 반사도(Irradiance reflectance 혹은 Diffuse reflectance; R)는 해수에 입사되는 광에너지(Downwelling irradiance;  $E_d$ )에 대한 해수를 벗어 나오는 광에너지 (Upwelling irradiance;  $E_u$ )의 비 값으로 정의된다. 그리고 원격반사도  $R_{rs}$ 는 water leaving radiance ( $L_w$ )와  $E_d$ 의 비 값으로 다음의 식 (3)과 같이 정의된다. 여기서는  $L_w$ 와  $E_d$  값은 해수며 바로 위( $0^+$ ) 관측선 위에서 측정된 값인  $E_d(0^+, \lambda)$  값을 사용하였다.

$$R_{rs}(0^+, \lambda) = \frac{L_w(\lambda)}{E_d(0^+, \lambda)} [sr^{-1}] \quad (3)$$

해수의 반사도 (R)는 해수의 고유광특성인 총 흡광계수(a)와 역산란계수 (backscattering coefficient;  $b_b$ )의 함수로 이루어진다. 해수 내에 입사된 광자의 순차적인 광 산란에 대한 많은 연구가 이루어졌다(Joseph,

1950; Gordon and Brown, 1975; Morel and Prieur, 1977).

$$R(\lambda) = \frac{E_u(\lambda)}{E_d(\lambda)} = f \frac{b_b(\lambda)}{a(\lambda) + b_b(\lambda)} \quad (4)$$

위 식에서 f는 해수의 광 특성이나 태양고도 등에 따라 변할 수 있는 광 환경변수로 일반적인 해양에서 0.33 정도의 값을 가지며, 그 변화는 5% 미만이다(Morel and Prieur, 1977). f는 해수의 광학적 상태를 나타내는 평균코사인(average cosine)값인  $\mu$ 와 파장에 의한 함수이다. 만약 해수의  $b_b/(a + b_b)$ 의 값이 증가하면(광산란을 일으키는 물질이 많은 경우) 이  $\mu$ 값은 감소하고 반대로 흡광 물질이 많으면 증가하는 특성을 갖는다. 안유환은 f값으로 0.044를 사용하였으며 결론적으로 얻어진 원격반사도 모델은 다음의 식 (5)와 같다.

$$R_{rs} = 0.044 \frac{b_b}{a + b_b} \quad (5)$$

식 (5)는 모델의 일반적인 표현을 나타내고 있다. 그러나 해수의 각각의 물질별 항목에 관하여 구체적인 광학적 특성의 값을 알아보면, 해양의 반사도는 앞에서 보았듯이 해수의 총 흡광계수(a)와 역산란계수( $b_b$ )로 모델화한다. 이들 인자는 해수의 고유 광특성(Inherent optical property)이므로 해수 중 물질의 개개 성분의 합으로 표현할 수 있다. 해수의 광특성에 영향을 미치는 항목으로는 기본 물질 5종(Sea water; w, Phytoplankton; ph, Non chlorophyllous particle; NC, Dissolved organic matter; DOM, Heterotrophic plankton; he) 과 1개의 알려지지 않은 성분(Unknown components; ?)으로 구분하였다.

위의 식 (5)는 주어진 파장에서의 개개 성분 항목으로 분리하여 표현하면 다음과 같다.

$$\frac{b_b}{a + b_b} = \frac{b_{bw} + b_{bhe} + b_{bph} + b_{bNC} + b_{b?}}{a_w + a_{he} + a_{ph} + a_{NC} + a_{?} + b_{bw} + b_{bhe} + b_{bph} + b_{bNC} + b_{b?}} \quad (6)$$

위에서 역 산란 항목에서  $b_{b?}$ 은 해양에서 규명되지 못한 역산란계수이다. 식 (6)에서 개개 성분의 흡광 계수와 역산란계수를 비흡광계수(Specific absorption coefficient;  $a^*$ )와 비역산란계수(Specific backscattering coefficient;  $b_b^*$ )로 바꾸면 다음과 같이 표현할 수 있다(분모의  $b_b$ 항은 ...로 표시하였음).

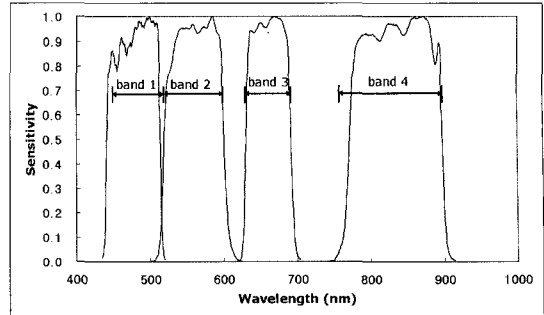


Fig. 5. Spectral responsibility graph for ETM+ band 1 ~ 4.

$$\frac{b_b}{a + b_b} = \frac{b_{bw} + b_{bph}^* \langle chb \rangle + b_{bNC}^* \langle NC \rangle + b_{bhe}^* \langle cell \rangle + b_{b?}}{a_w + a_{ph}^* \langle chb \rangle + a_{NC}^* \langle NC \rangle + a_{he}^* \langle cell \rangle + a_{?} + \dots} \quad (7)$$

비흡광계수와 비역산란계수는 단위농도당 흡광계수와 역산란계수를 의미하는 것으로, 이렇게 표현함으로써 구하고자 하는 각 해수성분의 농도와  $R_{rs}$ 의 함수로 나타낼 수 있다. 모델의 입력 변수인  $a^*$ 과  $b_b^*$ 은 해역 특성에 따라 많은 차이를 보이기 때문에 연구해역에서 관측된 값을 넣어야 하는 것이 맞지만, 이 연구에서는 Ahn *et al.* (2006)에서 사용한 값을 그대로 이용하였다. 특히, 부유물질의 특성인  $a_{NC}^*$ 의 경우에는 지중해에서 샘플링된 자료를 이용하였다.

현장 관측된 반사도 값 또는 모델에 의해 얻어진 반사도 값 모두 1 nm 간격으로 생성된 자료이기 때문에 얻어진 스펙트럼을 ETM+ 밴드에 맞는 값으로 변환해 주었다. Fig. 5는 ETM+ 밴드의 파장에 따른 광반응 특성을 나타내는 그래프이다. 밴드별 Spectral response function을 이용하여 각각의 파장대에서 갖는 sensitivity 특성을 고려하여 각 밴드에 맞는 값으로 변환하였다. 아래의 식 (8)은 Hyper spectral 센서에서 얻어진 신호 값들이나 또는 모델로 얻어진 1nm 간격의 원격반사도( $R_{rs}$ )를 ETM+의 밴드 폭 범위 내에서의 누적 평균값을 얻는 데에 사용되는 것이다.

$$\bar{R}(\lambda) = \frac{S(\lambda_1) \times R_{rs}(\lambda_1) + S(\lambda_2) \times R_{rs}(\lambda_2) + \dots + S(\lambda_n) \times R_{rs}(\lambda_n)}{S(\lambda_1) + S(\lambda_2) + \dots + S(\lambda_n)} \quad (8)$$

이 식에서,  $S(\lambda)$ 는 각 파장별 sensitivity 값이고  $R_{rs}(\lambda)$ 는 파장별 원격반사도 값이다.



Table 1. Input parameter range of Model-based SS algorithm.

Water components	Case-II water
<chl> (mg/m <sup>3</sup> )	0.5 ~ 10
<SS> (g/m <sup>3</sup> )	2 ~ 100
a <sub>DOM</sub> (400)	0.1 ~ 1.0

### 4. 결과

#### 1) <SS> 알고리즘 개발

원격반사도 모델 기반의 <SS> 알고리즘을 개발하기 위하여 CASE-II water인 새만금 해역의 특성에 맞게 Table 1의 기준에 따라 Forward/Inverse 모델을 이용하여 각각 500 개의 R<sub>rs</sub>와 성분 농도 값을 얻었다. R<sub>rs</sub> 값들은 1 nm 간격의 값이므로 ETM+의 밴드별 sensitivity

값을 고려하여 밴드 폭에 맞게 값을 변환하였다. 이렇게 만들어진 R<sub>rs</sub> 값과 <SS> 값을 이용하여 상관관계를 분석하였다. 또한 경험적 <SS> 알고리즘을 만들기 위하여 현장에서 야외 스펙트로라디오미터를 이용하여 관측된 R<sub>rs</sub> 값과 현장에서 채수되어 실험실에서 측정된 <SS> 값을 이용하여 상관관계 분석을 실시하였다. Fig. 6은 이렇게 만들어진 원격반사도 모델 기반의 <SS> 알고리즘과 현장 관측 값을 이용한 경험적 방법의 <SS> 알고리즘을 비교한 것이다.

모델에 의한 값을 이용한 것이 현장관측값을 사용한 것에 비해 SS값을 약간 높게 추정하는 것을 볼 수 있는데 이는 모델의 변수 중 a\*<sub>NC</sub> 값을 한반도 주변해역에서의 값으로 사용하지 않았기 때문으로 판단된다.

원격반사도 모델 기반의 알고리즘은 ETM+ 밴드 2와

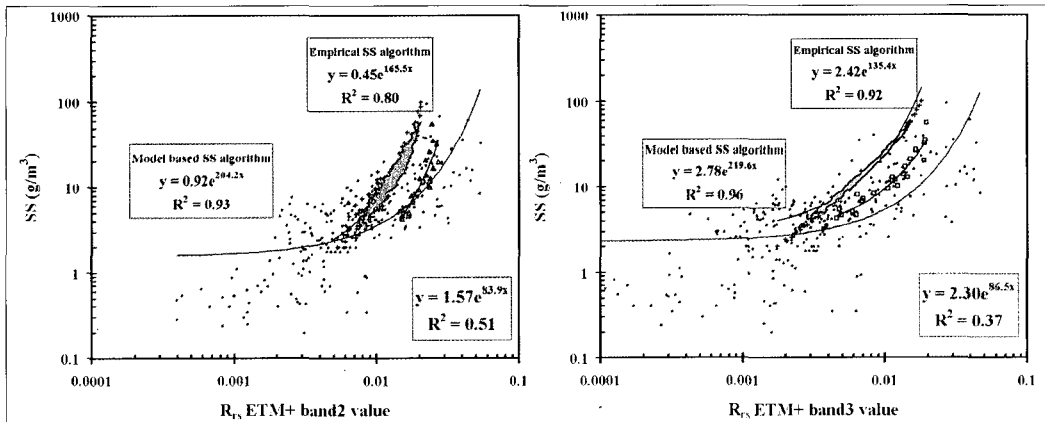


Fig. 6. Comparison of empirical algorithm and model-based algorithm. The gray circles show *in situ* data collected around Korean waters during 1998 ~ 2005. The blue circles represent data from Forward/Inverse remote reflectance model and pink points represent *in situ* data used in this study. (a) ETM+ band 2 (b) ETM+ band 3

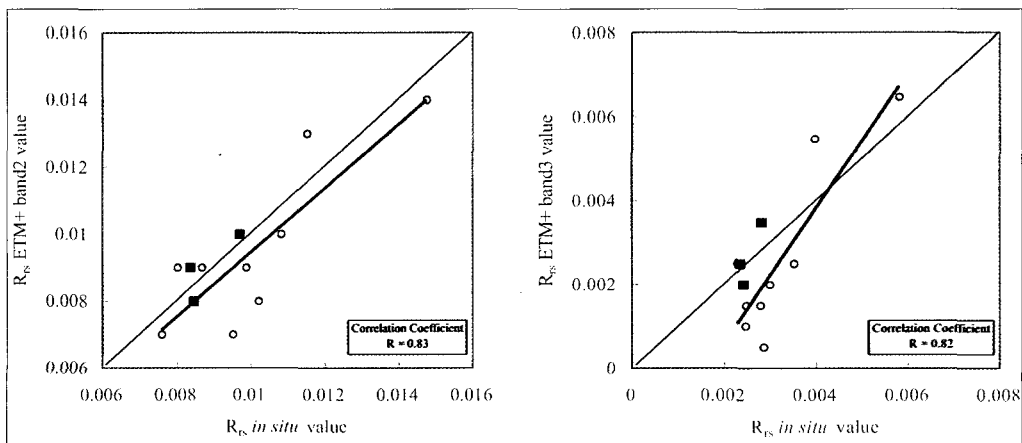


Fig. 7. Comparison of *in situ* R<sub>rs</sub> value and ETM+ band 2 and band 3 R<sub>rs</sub> value.

Table 2. Suspended sediment algorithms for ETM+ band 2 and band 3.

	ETM+ Band 2	ETM+ Band 3
Model based SS algorithm	$\langle SS \rangle = 0.92e^{204.2x}$	$\langle SS \rangle = 2.78e^{219.6x}$
R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> = 0.93	R <sup>2</sup> = 0.96
Empirical SS algorithm	$\langle SS \rangle = 0.45e^{165.5x}$	$\langle SS \rangle = 2.42e^{135.4x}$
R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> = 0.80	R <sup>2</sup> = 0.92

3에서 0.9 이상의 높은 R<sup>2</sup> 값을 보였는데 밴드 2보다는 밴드 3이 약간 높은 상관관계를 나타냈다. 하지만 Fig. 3에서 보는 바와 같이 밴드 2에 해당하는 560~570 nm 파장 영역에서 부유퇴적물의 R<sub>rs</sub> 값이 최대 피크를 보이는 반면, 밴드 3에 파장 영역에 속하는 670~680 nm 영역은 클로로필의 형광에 의한 흡광이 발생하는 파장대이므로 밴드 3 보다는 밴드 2가 <SS> 알고리즘에 더 적합하다고 판단된다. 실제로 현장관측 <SS> 값과 알고리즘에 의한 추정 값을 비교해본 결과, Fig. 8에서 보는 것과 같이 2번 밴드를 사용한 알고리즘이 현장관측 값에 더 잘 일치하는 것을 볼 수 있었다. 경험적 알고리즘의 경우 R<sup>2</sup> 값이 모델을 이용한 알고리즘보다 약간 낮게 나왔지만 0.8 이상의 높은 상관관계를 보였다. 본 연구에서 개발된 경험적 알고리즘은 새만금 해역에서 한 차례의 현장조사를 통해서 얻어진 것으로서 특정지역의 적은 자료를 이용하여 개발되었다. 따라서 검증 을 위하여 우리나라 주변 해역을 대상으로 1998년부터 2005년까지 현장 관측된 자료를 Fig. 6에서 회색으로 표시해본 결과, 본 연구에서 개발된 경험적 알고리즘이 전 해역에서의 결과에 포함되는 것으로 나타났으며, 모델 기

반의 알고리즘에 비해서 경험적 알고리즘이 더 유사하게 나온 것을 볼 수 있었다. 밴드 2를 이용한 모델 기반과 경험적 알고리즘을 비교해보면 상관곡선의 형태가 매우 유사하게 나타남을 알 수 있었으며 모델 기반의 알고리즘이 경험적 알고리즘에 비해 농도가 높게 추정될 것으로 예상된다. 두 알고리즘 간에 차이는 사용된 Forward 모델이 우리나라 주변 해역의 해양환경과 광 특성을 완벽하게 표현하지 못했기 때문으로 생각된다. 무기입자의 경우, 변수로서 미네랄 입자만을 고려하고 다른 유기 입자들을 고려하지 않기 때문에 실제 해수의 특성과는 약간의 차이를 보이는 것으로 판단된다. 그러나 앞에서 언급한 바와 같이 밴드 2의 경우 경험적 방법과 모델 기반의 알고리즘의 형태가 매우 유사한 것으로 보아 매우 우수한 모델이며 추후 우리나라 해역의 해수 환경과 광 특성 연구를 통하여 입력 변수들을 늘리고 개선한다면 보다 좋은 결과를 얻을 것으로 기대된다.

2) <SS> 알고리즘 검증

위성자료 <SS> 알고리즘의 정밀도는 대기보정과 해석 알고리즘에 의해서 결정된다. 따라서 COST 모델에

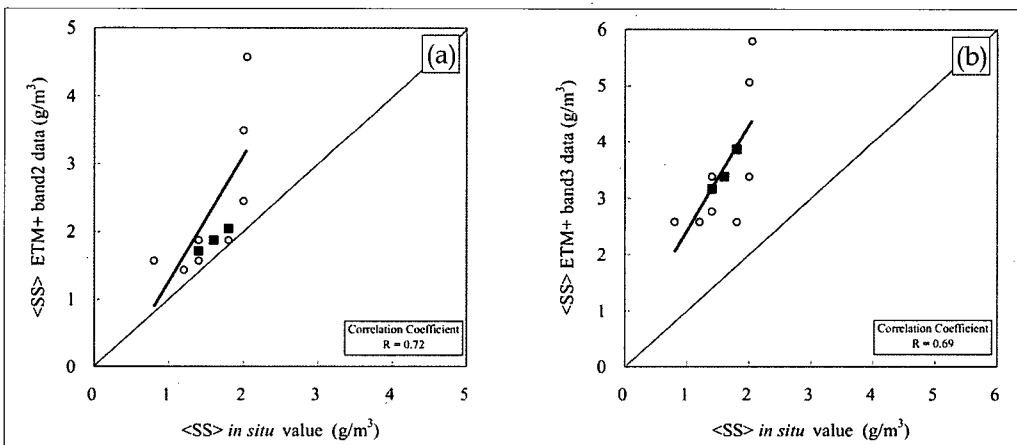


Fig. 8. Comparison of *in situ* <SS> data and <SS> values extracted from ETM+ band 2(a) and band 3(b) images.

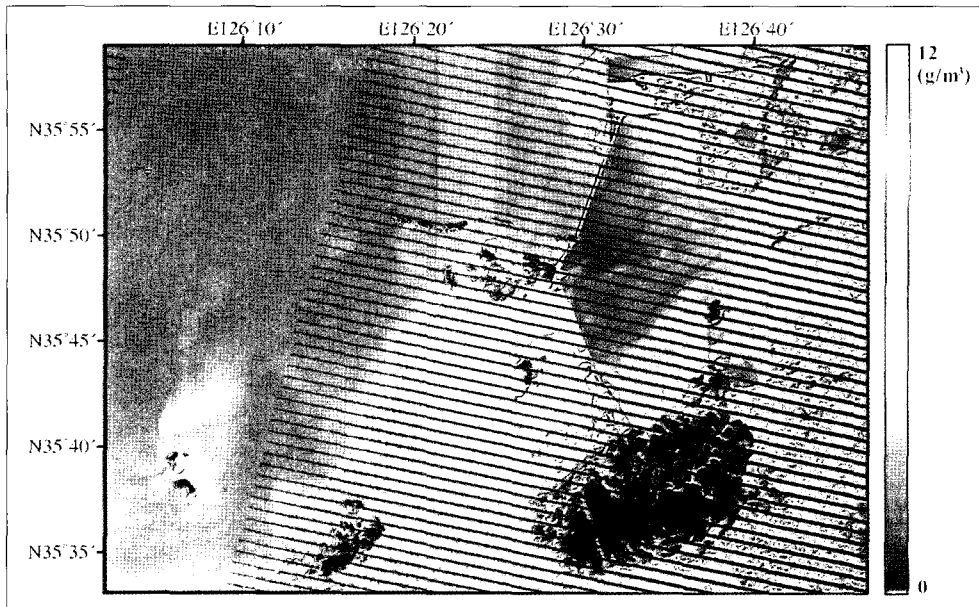


Fig. 9. The suspended sediment distribution map derived from the Landsat ETM+ image collected on 29 May 2005 using empirical SS algorithm based on band 2.

의해 대기보정이 얼마나 잘 이루어졌는지 파악하기 위하여 2005년 5월 29일 획득된 Landsat ETM+ 위성자료로부터 대기의 효과가 제거된  $R_{rs}$  값과 같은 날 현장 실측된  $R_{rs}$  값을 비교함으로써 대기보정의 결과를 확인하였다. Fig. 7은 밴드 2와 밴드 3에 대한 두  $R_{rs}$  값의 상관관계를 구한 것으로 R값이 각각 0.83과 0.82로 나타났다. 특히 위성획득 시기인 오전 11시 전후에 얻어진 사각형으로 표시된 세 점들은 기울기 1인 보조선에 아주 근접한 결과를 보이는 것으로 미루어보아 대기보정이 효과적으로 시행되었다고 판단되며 나머지 점들의 오차는 위성획득 시간과 해양 실측 시간차에 의한 해수 신호의 변화로 분석된다.

대기 보정이 이루어진 영상을 가지고 경험적 알고리즘과 모델 기반의 알고리즘으로 <SS> 영상을 만들었다. 그 결과 영상의 전체적인 값으로 봤을 경우 2번 밴드를 이용하여 경험적 알고리즘으로 구한 부유퇴적물 농도 값의 범위가  $1.43 \sim 4.57 \text{ g/m}^3$ 로 가장 낮게 추정되었고, 3번 밴드를 이용한 경험적 알고리즘의 경우에는  $2.58 \sim 5.80 \text{ g/m}^3$ , 2번 밴드를 이용한 모델 기반의 알고리즘의 경우에는  $3.84 \sim 16.05 \text{ g/m}^3$  정도의 범위로 분석되었다. 현장관측 값의 범위인  $0.8 \sim 2.05 \text{ g/m}^3$ 과 비교하여 보면 경험적 알고리즘이 더 좋은 결과를 나타내고

있음을 알 수 있다. 모델 기반의 알고리즘과 경험적 알고리즘 사이의 이러한 편차는 모델의 입력 변수인  $a^*_{NC}$ 의 값이 한반도 해역특성에 맞는 것이 아니라 지중해 해역의 샘플링자료를 이용하였기 때문으로 생각된다. Fig. 8은 경험적 알고리즘으로 추정된 <SS> 값과 현장 관측 값을 비교한 그래프이다. 2번 밴드를 이용한 경험적 알고리즘이 3번 밴드를 이용한 경우보다 좋은 결과를 나타내고 있었다. 특히 위성 획득 시점의 관측 값(사각형 심볼)이 현장관측 값과 거의 유사한 값을 보였다. 클로로필 형광 흡수 밴드의 영향을 받는 3번 밴드의 경우에는 현장관측 값보다 약간 높은 값을 추정하는 것을 볼 수 있었다. Fig. 9는 2005년 5월 29일 획득된 Landsat-7 ETM+ 밴드 2 영상에 경험적 알고리즘을 적용하여 분석한 <SS> 분포도이다.

## 5. 결론 및 토의

본 연구에서는 연안의 해수 <SS> 추정을 위하여 중해상도 육상관측위성 영상인 Landsat TM/ETM+ 위성용 <SS> 알고리즘을 개발하였다. 기존의 경험적 방법과 원격반사도 모델을 이용하는 두 가지 방법으로 각각 알고

리즘을 만들었다. 이를 위하여 안유환 (2000)이 개발한 원격반사도 모델을 이용하여  $R_{rs}$ 와 입력 부유퇴적물 농도 값의 상관관계를 분석하는 방법으로 모델 기반의 <SS> 알고리즘을 만들었고, 또한 새만금 주변 해역 30개 정점에서 관측된  $R_{rs}$  값과 부유퇴적물 농도 값의 상관관계를 분석하는 방법으로 경험적 알고리즘을 만들었다.

두 알고리즘 모두 현장관측 원격반사도 값과 <SS> 값 사이에 0.9 정도의 높은 상관관계를 나타냈다. 모델 기반의 알고리즘보다는 경험적 알고리즘이 현장 관측 값과 잘 일치하였다. 이는 이 연구에서 사용된 원격반사도 모델이 지중해 연안 해역에 맞도록 개발된 것이기 때문에 해양성분 구성 등의 해양 특성이 매우 다른 우리나라 해역에 적용한데서 온 오차라고 생각된다. 하지만 모델에 의한 값이 우리나라 해역 샘플링 자료와 매우 유사한 패턴을 보이는 것으로 보아 앞으로 우리나라 해역 특성에 맞도록 개선한다면 좋은 결과를 얻을 수 있을 것으로 기대된다. 또한 밴드 별로 비교하여 보았을 경우에는 밴드 2를 사용한 알고리즘 보다는 밴드 3을 사용한 알고리즘의 상관관계 값이 더 높게 나왔지만, 위성영상으로 <SS> 값을 구하여 본 결과 밴드 2를 이용한 값이 현장 관측 값과 유사하였으며, 밴드 3을 이용하여 구한 값은 약간 높게 추정되었다.

이 연구에서 사용된 알고리즘은 새만금이라는 매우 좁은 해역에 대해서 30개 정도의 샘플링 자료를 사용하여 만들어졌기 때문에 본 연구 해역의 특성을 완벽하게 잘 반영하고 있다고 단정하기는 어렵다. 연구 해역인 새만금 지역은 특히 조석 간만의 차가 크기 때문에 조위에 따른 부유물질의 환경 변화가 매우 민감함으로 다양한 조위의 자료를 얻는 것이 매우 중요할 것이다. 따라서 앞으로 본 해역에 대해서 다양한 시기 및 조석환경에서 많은 샘플링을 실시하여 알고리즘이 해역 특성을 잘 반영할 수 있도록 만들고, 또한 넓게는 CASE-II water 해역인 황해 연안에 적용될 수 있도록 보다 많은 해역에 대한 현장관측을 실시하여 우리나라 황해에 맞는 알고리즘으로 발전시킬 계획이다.

알고리즘의 개발과 더불어 개발된 알고리즘의 검증 역시 중요한 사항이다. 이 연구에서는 한 번의 현장관측 값을 이용하여 알고리즘 검증을 실시하였지만 보다 확실한 검증을 위해서는 영상과 일치되는 많은 현장관측 자료가 필요하다. 현장관측 시 영상 획득 시간과 일치되

는 자료를 얻는 것이 매우 중요한데, 조석에 따른 해양 환경의 변화가 심하기 때문에 위성획득 전후의 2~3개의 샘플만이 검증에 활용 가능하다. 따라서 정량적 검증을 위해서는 여러 선박을 이용하여 농도가 다양한 여러 지역에서 단시간에 다양한 샘플을 얻는 것이 효과적일 것이다.

검증된 알고리즘을 활용하여 영상으로부터 부유물질의 농도를 추정하기 위해서는 영상으로부터 대기에 의한 효과를 제거하는 것도 매우 중요하다. 이 연구에서는 영상 전체 지역에서 대기에 의한 영향 값을 하나로 추정하여 수평적으로 동일한 값으로 제거하여 주었다. 하지만 연안의 지역적 해무와 같이 수평적으로 다른 매질의 대기가 존재하기 때문에 지역별 에어로졸의 특성을 고려하여야만 대기효과를 효과적으로 제거할 수 있을 것으로 생각된다. 따라서 앞으로 이 분야에 대한 연구를 통하여 수평적인 대기영향을 효과적으로 제거한다면 <SS> 추정 값의 정밀도를 높일 수 있을 것으로 생각된다.

본 연구에서 개발된 경험적 알고리즘은 지속적으로 업데이트된다면 국내에서 발사 예정인 다목적 위성 시리즈의 고해상도 광학 탑재체와 통신해양기상위성 해양 탑재체 자료의 부유퇴적물 기본 알고리즘으로 사용이 가능할 것이다. 또한 우리나라 해역 특성에 맞도록 원격 반사도 모델을 개선한다면 모델을 이용한 분석적인 방법으로 위성이 발사되기 전에 미리 해수환경 분석 알고리즘 개발 연구를 진행할 수 있도록 활용될 수 있을 것으로 생각된다.

## 사 사

본 연구는 해양수산부 통신해양기상위성 해양자료처리시스템 개발사업(PM34700)과 과학기술부의 다목적 실용위성 2호의 연안 해수환경분석기술 및 SW개발사업(PN54100)의 지원으로 수행되었다.

## 참고문헌

안유환, 2000. 해색 원격탐사를 위한 원격반사도 및 수출광 모델의 개발, 대한원격탐사학회지, 16(3):

243-260.

- 이상호, 최현용, 손영태, 권효근, 김영곤, 양재삼, 정해진, 김종구, 2003. 하계 서해안 새만금 연안역 주변 저염수의 순환, *한국해양학회지*, 8(2): 138-150.
- 최용규, 권정노, 1998. 황해 남동해역 투명도의 계절 변화, *한국수산학회지*, 31(3): 323-329.
- 한국해양연구원, 1999. 위성에 의한 적조 및 해수 탁도 원격탐사 기술개발, *한국해양연구원 보고서*.
- 한국해양연구원 새만금해양환경연구센터 홈페이지 <http://www.saemangeum.re.kr/>
- Ahn, Y. H., 1999. Development of an inverse model from ocean reflectance, *Marin Technology Society Journal*, 33: 69-80.
- Ahn, Y. H., J. E. Moon, and S Gallegos, 2001. Development of suspended particulate matters algorithms for ocean color remote sensing, *Korean Journal of Remote Sensing*, 17: 285-295.
- Ahn, Y. H., Shanmugam P. and J. E. Moon, 2006. Retrieval of ocean colour from high resolution multi-spectral imagery for monitoring highly dynamic ocean features, *International Journal of Remote Sensing*, 20: 367-392.
- Chavez, P. S. Jr., 1996. Image based atmospheric corrections - Revisited and improved, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 62: 1025-1036.
- Clark, D. K., E. T. Baker and A. E. Strong, 1980. Upwelling spectral radiance distribution in relation to particulate matter in sea water, *Boundary-Layer Meteorology*, 18(3): 287-298.
- Froidefond, J. M., L. Gardel, D. Guiral, M. Parra, and J. -F. TERNON, 2002. Soetrak remote sensing reflectance of coastal waters in French Guiana under the Amazon influence, *Remote Sensing of Environment*, 80: 225-232.
- Froidefond, J. M., F. Lahet, C. Hu, D. Doxaran, D. Guiral, M. T. Prost, and J. -F. TERNON, 2004. Mudflats and mud suspension observed from satellite data in French Guiana, *Marine Geology*, 208: 153-168.
- Gordon, H. R. and O. B. Brown 1975. A multiphase monte carlo technique for simulation of radiative transfer, *J. Quant, Spectrosc. Radiat. Transfer*, 15: 419-422.
- Gordon, H. R., 1997. Atmospheric correction of ocean color imagery in the earth observing system era, *Journal of Geophysical Research*, 102: 17081-17106.
- 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. *Biochemie Physiologie Pflanzen*, 167: 374-384.
- Joseph, J., 1950. Untersuchungen ber Ober- und Unterlichtmessungen in Meere und ber ihren Zusammenhang mit Durchsichtigkeitsmessungen, *Deut, Hydrograph.*, 3: 324-335.
- Landsat 7 Science Data User Handbook [http://ltpwww.gsfc.nasa.gov/IAS/handbook/handbook\\_toc.html](http://ltpwww.gsfc.nasa.gov/IAS/handbook/handbook_toc.html)
- Miller, R. L. and Brent A. M., 2004. Using MODIS Terra 250 m imagery to map concentrations of total suspended matter in coastal waters, *Remote Sensing of Environment*, 93: 259-266.
- Min, J. E., J. H. Ryu, P. Shanmugam, Y. H. Ahn, and K. S. Lee, 2004. Monitoring suspended sediment distribution using Landsat TM/ETM+ data in coastal waters of Saemangeum, Korea, *International Symposium on Remote Sensing*, Jeju, Oct. 27-29: 340-343.
- Morel, A. and L. Prieur, 1976. Eclaircissements sous marins, *Résultats des Campagnes à la mer*, 10: 1-256. Publications CNEXO.
- Morel, A. and L. Prieur, 1977. Analysis of variations in ocean color, *Limnology of oceanography*, 22: 709-722.