초분광 원격탐사 기반 항공관측 및 현장자료를 활용한 선박탐지

박재진¹ · 오상우² · 박경애^{3,*} · Pierre-Yves Foucher⁴ · 장재철¹ · 이문진² · 김태성² · 강원수²

¹서울대학교 과학교육과, 08826, 서울특별시 관악구 관악로 1

²선박해양플랜트연구소 해양안전연구부, 34103, 대전광역시 유성구 유성대로 1312-32

³서울대학교 지구과학교육과/해양연구소, 08826, 서울특별시 관악구 관악로 1

⁴ONERA, Theoretical and Applied Optics Department, 2 Avenue Edouard Belin, 31400 Toulouse, France

The Ship Detection Using Airborne and In-situ Measurements Based on Hyperspectral Remote Sensing

Jae-Jin Park¹, Sangwoo Oh², Kyung-Ae Park^{3,*}, Pierre-Yves Foucher⁴, Jae-Cheol Jang¹,
Moonjin Lee², Tae-Sung Kim², and Won-Soo Kang²

¹Department of Science Education, Seoul National University, Seoul 08826, Korea

²Maritime Safety Research Division, Korea Research Institute of Ships and Ocean engineering,
Daejeon 34103, Korea

³Department of Earth Science Education/Research Institute of Oceanography,
Seoul National University, Seoul 08826, Korea

⁴Theoretical and Applied Optics Department, ONERA, 31400 Toulouse, France

Abstract: Maritime accidents around the Korean Peninsula are increasing, and the ship detection research using remote sensing data is consequently becoming increasingly important. This study presented a new ship detection algorithm using hyperspectral images that provide the spectral information of several hundred channels in the ship detection field, which depends on high resolution optical imagery. We applied a spectral matching algorithm between the reflection spectrum of the ship deck obtained from two field observations and the ship and seawater spectrum of the hyperspectral sensor of an airborne visible/infrared imaging spectrometer. A total of five detection algorithms were used, namely spectral distance similarity (SDS), spectral correlation similarity (SCS), spectral similarity value (SSV), spectral angle mapper (SAM), and spectral information divergence (SID). SDS showed an error in the detection of seawater inside the ship, and SAM showed a clear classification result with a difference between ship and seawater of approximately 1.8 times. Additionally, the present study classified the vessels included in hyperspectral images by presenting the adaptive thresholds of each technique. As a result, SAM and SID showed superior ship detection abilities compared to those of other detection algorithms.

Keywords: remote sensing, hyperspectral, ship detection, spectrum

요 약: 한반도 주변 해상사고가 증가함에 따라 원격탐사 자료를 활용한 선박탐지 연구의 중요성이 점점 더 강조되고 있다. 이 연구는 고해상도 광학영상에 의존하는 기존 선박탐지 분야에 수백 개 채널의 분광정보를 포함하는 초분광영상을 활용하여 새로운 선박탐지 알고리즘 제시하였다. 두 차례의 현장관측을 통해 측정한 선박 선체의 반사 스펙트럼과

*Corresponding author: kapark@snu.ac.kr

Tel: +82-2-880-7780

Fax: +82-2-874-3289

AVIRIS (Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer) 초분광센서 영상의 선박 및 해수 반사 스펙트럼 간의 분광정합 기법을 적용하였다. 총 다섯 개의 탐지 알고리즘 spectral distance similarity (SDS), spectral correlation similarity (SCS), spectral similarity value (SSV), spectral angle mapper (SAM), spectral information divergence (SID)를 사용하였다. SDS는 선박 일부가 해수로 탐지되는 오차를 나타내었고, SAM은 선박과 해수 사이에 약 1.8배의 차이를 나타내어 명확한 분류 결과를 보여주었다. 이와 더불어 본 연구에서는 각 기법의 최적 임계값을 제시하여 초분광 영상에 포함되어 있는 선박을 분류하였으며 그 결과 SAM, SID가 다른 탐지 알고리즘에 비해 우수한 선박탐지 능력을 보여주었다.

주요어: 원격탐사, 초분광, 선박탐지, 스펙트럼

서론

최근 들어 해양 및 연안에서의 사람들의 활동량이 증가함에 따라 해상 물동량 및 교통량도 시간이 지남에 따라 급격히 증가하고 있는 추세이다(Lee et al., 2012). 이로 인해 선박 간의 충돌 등 여러 종류의 사건 사고가 빈번해지고 있다. 우리나라 서해안에 사상 초유의 유류오염인 2007년 12월 태안의 허베이 스프리트 사고와 2014년 여수 기름유출 사고는 대량의 원유를 인근 해양으로 유출시켜 해양 환경에 막대한 피해를 초래하였다(Kim et al., 2010; Kim et al., 2015; Lee et al., 2016).

선박 침몰사고 발생 시 일차적으로 선박을 이용한 현장감시를 수행해 왔으나 이는 시·공간적 측면에서 한계가 있고 신속한 수색을 필요로 하는 사고 특성상 비효율적이다. 따라서 실시간 모니터링이 가능하고 광역의 범위를 고해상도로 관측할 수 있는 원격탐사 자료를 이용해야 한다. 따라서 인공위성, 항공 이미지를 활용한 해상 교통감시, 선박탐지는 최근 원격탐사 분야에서 중요하게 다루어지고 있다(Eldhuset, 1996; Corbane et al., 2010; Proia and Page., 2010).

인공위성 센서는 보통 5-6개 채널의 분광정보만 활용하는 다중분광센서와 기존 파장대를 좁고 연속적인 수백 개의 채널로 구분하여 다채로운 물체의 반사특성을 활용하는 초분광센서로 구분할 수 있다. 초분광센서는 해상도가 낮다는 단점이 있지만 영상의 분광특성을 수백 개의 채널로 분석하므로 지질, 대기, 해양, 생태 등 여러 분야에서 활용도가 높다(Datt et al., 2003; Govender et al., 2007).

초분광센서 연구는 1970년대 National Aeronautics and Space Administration (NASA)에서 시작된 이래로 1983년 NASA/JPL (Jet Propulsion Laboratory)의 Airborne Imaging Spectrometer (AIS)와 1987년 Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS)가 개발되었다(Goetz, 2009). 이후 미국 및

유럽의 여러 국가에서 항공기 탑재 초분광센서들이 개발되었으며, 2000년에 들어서야 초분광센서를 탑재한 인공위성이 발사되었다. 2000년 11월 Hyperion 초분광센서를 탑재한 Earth Observing-1 (EO-1) 위성을 시작으로 2001년 10월 Compact High Resolution Imaging Spectrometer (CHRIS) 초분광센서를 탑재한 Project for On-Board Autonomy (PROBA-1) 위성이 발사되었다(Goodenough et al., 2003; Barnsley et al., 2004).

초분광센서를 활용한 연구 사례들은 지질, 광물, 생태 기반의 육상 연구가 주를 이루었으며 상대적으로 해양 선박탐지 연구는 극히 제한되었다. Lu et al. (2013)는 중국 보하이 해 기름유출 사고 당시 Hyperion 센서로 촬영한 위성영상을 통해 기름, 선박이동체적, 해수 영역을 구분하여 반사도를 비교하였다. Yan et al. (2015)는 NH-7 초분광센서 항공영상을 통해 서핑보드 및 사람 등의 물체를 무감독 분류기법을 사용하여 각 스펙트럼을 추출하였다. 위 방법은 사전에 탐지할 물체의 개수를 미리 선정 후 스펙트럼을 추출하는 것으로 영상의 파장별, 공간별 특성이나 사전에 지정한 개수에 따라 크게 좌우되는 한계가 있다.

초분광센서 외 다른 센서를 활용한 선박탐지 연구도 많이 진행되었다. Mattyus (2013)은 5 m 이하의 초고해상도 Satellite Pour l'Observation de la Terre-5 (SPOT-5) 광학 위성영상에 Adaboost 분류기법을 적용하여 선박을 분류하였고, Yang et al. (2014)는 Worldview-1/2 광학위성영상에 선박과 해수의 강도차이를 비율로 제시함으로써 새로운 분류지수를 제시하였다. 마이크로파 센서의 경우, 합성 개구 레이더(Synthetic Aperture Radar, SAR)를 이용한 선박탐지 연구가 주를 이루는데 이는 선박 구조물이 이중 산란으로 인해 후방 산란 에너지가 크다는 점에 착안하여 일정 오탐지율(Constant False Alarm Rate, CFAR) 임계값을 설정 후 선박을 분류하는 기법이다(Wackerman et al., 2001; Liao et al., 2008; Gao, 2011).

본 연구에서는 현장관측을 통해 취득한 선박 복사휘도 스펙트럼과 AVIRIS 초분광센서 영상의 선박 및 해수 복사휘도 스펙트럼을 분광특성 정합 알고리즘을 이용하여 영상과 실제 선박의 스펙트럼 정확도를 비교 분석하였다.

자 료

실측자료

현장관측을 수행한 지역은 인천 영종도의 삼목여객터미널과 여수 연안여객터미널이다(Fig. 1). 현장관측에 활용한 광학관측장비(FieldSpec 4 Wide-Res Field Spectroradiometer)는 350 nm부터 2500 nm 파장대의 선박 복사휘도 (radiance) 측정이 가능하다. 샘플링 간격은 1.4 nm (1000 nm 이하), 1.1 nm (1001 nm 이상)로 전 구간을 2151개로 나누어 각 채널에서의 분광정보를 제공한다(Table 1). Fig. 2a는 현장실측 방법을 도식화 한 것으로 태양광이 존재하는 낮 시간대에 선박에 탑승하여 목표로 하는 물체의 지면을 기준으로 상위 30° 방향으로 빔을 향하게 한 후 복사휘도를 측정하였다. 이 연구에서는 서로 다른 다섯 척의 선박 선체 복사휘도를 측정하였다.

현장관측

선체의 복사휘도를 측정하기 위하여 총 다섯 척의 선박을 활용하였다. 편의상 각 선박에 기호를 붙여서 S1(세종 7호), S2(세종 9호), S3(동양방제호), S4(동양호), S5(한성호)로 나타내었다. 2017년 8월 28일 11시부터 14시까지 인천 영종도와 신도 사이를 운행하는 여객선(S1, S2)의 선체 복사휘도를 측정하였다. 삼목여객터미널에서 출항하여 신도 선착장에 입항하는 S2 여객선은 선체 대부분이 주차장을 포함해 초록색 도로로 도포되어 있으며 중간에 노란색 및 하얀색 도로도 일부 존재하였다. S2 선체 중 오염이 적고 그늘이 없는 지점을 선정하여 매 지점마다 복사휘도를 세 번씩 측정한 후 평균하였다. 이번에는 신도 선착장을 출항하여 삼목여객터미널로 입항하는 S1 여객선을 탑승하여 동일한 방법으로 복사휘도를 측정하였다. S1은 2010년, S2는 2017년에 건조된 선박으로 두 여객선의 전체적인 규격 및 선체 구조는 유사하다.

2017년 9월 4일 10시부터 13시까지 여수 연안여객터미널에 정박해 있는 S3, S4, S5의 선체 복사휘도를 측정하였다. S3 및 S5는 방제를 목적으로 건조된 선박으로 선체 대부분이 초록색 도로로 칠해져

Fig. 1. (a) Coastal lines of the Korean Peninsula and enlarged portions of (a) near the stations at (b) Youngjongdo and (c) Yeosu.

Table 1. Specification of the ASD spectroradiometer used in the field campaign and the airborne hyperspectral sensor, airborne visible/infrared imaging spectrometer (AVIRIS), of the NASA/Jet Propulsion Laboratory

Instrument	ASD Spectroradiometer	AVIRIS (NASA/JPL)
Scan type	Point	Nadir-viewing, Whiskbroom
Number of bands	2151	224
Spectral range (nm)	350-2500	400-2500
ASD Sampling interval (nm)	1.4 (350-1000)	10
AVIRIS Bandwidth (nm)	1.1 (1001-2500)	
ASD Wavelength accuracy (nm)	0.1	20 (high altitude)
AVIRIS Spatial resolution (m)		4 (low altitude)
FOV (deg)	1.5 m fiber optic (25° field of view)	30

Fig. 2. (a) Schematic diagram and (b) in-situ measurements of spectral radiance using an ASD spectroradiometer on the ship deck.

있으며, 검정 오일 기둥, 노랑 크레인, 주황색 오일펜스 등 일부 구조물들도 포함되어 있다. S4는 경비선으로 S3보다 약 6배 작은 규모의 선박으로 마찬가지로 선체 대부분이 초록색 도료로 도포되어 있다. 차례로 각 선박에 탑승하여 상대적으로 오염되지 않은 지점을 선정하고 세 번의 복사휘도 측정 후 평균하여 사용하였다.

항공 초분광센서 자료

미국 NASA/JPL에서 개발한 AVIRIS 초분광센서는 400-2500 nm 파장 구간을 가지며, 대역폭은 약 10 nm로 전 구간을 224개 채널로 분류하여 분광정보를 제공한다. 지상해상도는 약 11 km의 높은 고도에서 촬영하였을 경우 약 20 m, 약 1.9 km의 낮은 고도로 촬영하였을 경우 약 4 m 정도이다(Green et al., 1998).

2014년 4월 14일 미국 해안가에서 촬영된 초분광 영상 중 기상 상태가 양호하고 선박이 포함되어 있는 영상을 선택하여 분석하였다. Fig. 3a는 224개의 채널 중 644.86, 557.77, 480.38 nm에 해당하는 영상으로 세 영상의 RGB 합성 과정을 통해 Fig. 3b에

나타난 육지, 선박, 해수 등의 분포를 확인할 수 있다. Fig. 3c는 특정 선박을 포함한 해수의 확대 영상이다. 이러한 초분광 영상 자료는 디지털 기기값(digital number)으로 저장되어 있어 복사휘도와 같이 물리적으로 유의미한 값으로 변환시켜주는 복사보정(radiometric calibration)을 수행해야 한다.

방 법

정규화 복사휘도

선박 선체로부터 방출되는 복사휘도는 동일 지점이라도 측정 당시 태양광 조건이나 측정 입사각도에 따라 변하므로 이를 정규화하는 과정이 필요하다. 식 (1)은 정규화 방법으로 전 채널에서의 복사휘도 제곱을 합산한 후 제곱근을 본래의 실측 복사휘도에 나누어 줌으로써 관측 조건에 따른 오차를 보정하였다(Sridhar et al., 2009). 여기서 NR 는 임의의 파장 i 번째의 정규화 복사휘도, R 는 각 채널에 해당하는 실측 복사휘도, N 은 전체 채널의 개수이고 이 연구에서는 224개이다.

Fig. 3. (a) Example of hyperspectral images at three bands of red, green, and blue, (b) an RGB composite image, and (c) an enlarged portion of (b) including the green ship.

$$NR_i = \frac{R_i}{\sqrt{\sum_{j=1}^N R_j^2}} \quad (1)$$

분광특성 분석 방법

분광특성 정합(Spectral matching)은 두 스펙트럼 간의 유사성을 정량적으로 측정하는 것으로 크게 다섯 개의 방법으로 분류할 수 있다. 첫 번째 방법은 SDS로 대상 스펙트럼과 기준 스펙트럼 사이의 분광적 거리를 유사성의 척도로 사용하는 방법이다 (Homayouni and Roux, 2004). 두 점 사이의 거리를 계산할 때 쓰는 유클리드 거리(Euclidean distance, Ed)를 활용한다. 식 (2)는 정규화 된 SDS로 t_i 는 대상 스펙트럼, p_i 는 기준 스펙트럼, n 은 총 채널의 개수이다.

$$SDS = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (t_i - p_i)^2}}{\sqrt{n}} \quad (2)$$

두 번째 방법은 SCS로 대상 스펙트럼과 기준 스펙트럼 사이의 분광적 상관 계수를 유사성의 척도로 사용하는 방법이다(Kumar et al., 2010). 분광적 상관 계수는 오로지 양의 상관관계일 경우에만 사용하므로 SCS는 0과 1사이의 값을 갖게 되고 1에 가까울수록 대상 스펙트럼과 기준 스펙트럼이 유사하다고 판단할 수 있다. 식 (3)은 SCS로 t_i 는 대상 스펙트럼, r_i 는 기준 스펙트럼, μ_t 는 대상 스펙트럼의 평균, μ_r 은 기준 스펙트럼의 평균, σ_t 는 대상 스펙트럼의 표준편차,

σ_r 은 기준 스펙트럼의 표준편차, n 은 총 채널의 개수이다.

$$SCS = \frac{1}{n-1} \left[\frac{\sum_{i=1}^n (t_i - \mu_t)(r_i - \mu_r)}{\sigma_t \sigma_r} \right] \quad (3)$$

세 번째 방법은 SSV로 대상 스펙트럼과 기준 스펙트럼 사이의 분광적 거리와 상관계수 모두를 유사성의 척도로 사용하는 방법이다(Sweet, 2003). 여기서는 두 점 사이의 거리를 계산할 때 쓰는 유클리드 거리와 두 변수 사이의 관련성의 정도를 나타내는 상관계수를 활용한다.

$$SSV = \sqrt{SDS^2 + (1 - SCS)^2} \quad (4)$$

네 번째 방법은 SAM으로 대상 스펙트럼과 기준 스펙트럼 사이의 밴드별 사잇각을 유사성의 척도로 사용하는 방법이다(Schwarz and Staenz, 2001). 밴드 i, j 를 축으로 하는 2차원 좌표계에서 기준 스펙트럼과 대상 스펙트럼의 산점도를 그렸을 때 두 선형회귀선이 이루는 각도를 SAM으로 정의한다. 두 스펙트럼 사이의 각도는 0° 에서 90° 사이에 위치하며 0° 에 가까울수록 두 스펙트럼의 유사성은 높고 90° 에 가까울수록 두 스펙트럼의 유사성은 낮다. 식 (5)에서 t_i 는 대상스펙트럼, r_i 은 기준스펙트럼, n 은 총 채널의 개수이다. SAM에 $2/\pi$ 를 곱하여 0부터 1 사이의 정규화된 SAM을 사용할 수도 있다.

$$SAM = \arccos \left[\frac{\sum_{i=1}^n t_i r_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^n t_i^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n r_i^2}} \right] \quad (5)$$

다섯 번째 방법은 SID로 대상스펙트럼과 기준 스펙트럼 간의 확률분포 거리를 유사성의 척도로 사용하는 방법이다. 이 방법은 각 화소(pixel)를 임의의 확률 변수로 가정하고 두 스펙트럼 간의 분리도를 측정한다(Chang, 1999). 대상 및 기준 스펙트럼을 각각의 총 합으로 나누어 확률 벡터를 구한 다음 서로 간의 상대적 엔트로피를 합산한다. 식 (6)의 x_i , y_i 는 대상 및 기준 스펙트럼, 식 (7)은 0에서 1사이의 값을 가지는 확률벡터, 식 (8), (9)는 서로 간의 상대적 엔트로피와 총합이다.

$$x = (x_1, \dots, x_L)^T, y = (y_1, \dots, y_L)^T \quad (6)$$

$$p_j = \frac{x_j}{L}, q_j = \frac{y_j}{L} \quad (7)$$

$$D(x||y) = \sum_{i=1}^L p_i \log\left(\frac{p_i}{q_i}\right), D(y||x) = \sum_{i=1}^L q_i \log\left(\frac{q_i}{p_i}\right) \quad (8)$$

$$SID(x, y) = D(x||y) + D(y||x) \quad (9)$$

Fig. 4는 초분광 탐지 알고리즘 순서도로 선박이 포함된 AVIRIS 초분광영상이 취득되면 방사보정을 거쳐 영상의 2-D 복사휘도 스펙트럼을 산출할 수 있다. 이와 동시에 현장관측을 통해 측정된 정규화된 평균 복사휘도 스펙트럼 간에 초분광 특성 정합 알고리즘인 SDS, SCS, SSV, SAM, SID의 기법을 적

Fig. 4. Flow chart of analysis methods of a hyperspectral image using in-situ spectral measurements.

용한다. 그리고 기법의 정확도 평가에 따라 최적의 탐지 알고리즘을 선택한다. 이 순서도는 현장관측을 통해 다양한 종류의 선박 스펙트럼 라이브러리를 축적하였을 경우 초분광영상의 스펙트럼 정보만으로 영상에 포함되어 있는 다양한 선박을 높은 정확도로 분류해 낼 수 있는 장점이 있다.

연구 결과

선박 스펙트럼 복사휘도 변환

Fig. 5a는 현장관측을 통해 취득한 다섯 척의 선체

Table 2. Information of in-situ measurements using the ASD spectroradiometer during the two experimental periods

	Experiment I	Experiment II
Date	28 Aug. 2017	04 Sep. 2017
Location	Youngjongdo 126.43-126.51°E 37.50-37.54°N	Yeosu 127.73-127.82°E 34.69-37.73°N
Ship Type	Passenger Ship	Water Surface Cleaner Ship Guard Ship
Ship Structure Measurement	Sejong-7 Ship Deck Sejong-9 Ship Deck	Dongyang oil Ship Deck Dongyang Ship Deck Hansung Ship Deck

Fig. 5. (a) In-situ spectral radiance of the decks of five ships as a function of wavelength and (b) normalized radiance of each ship in (a) and seawater in an airborne visible/infrared imaging spectrometer (AVIRIS) hyperspectral image.

평균 복사휘도 스펙트럼으로 동일 색상이라도 선박의 종류에 따라 크기 차이를 나타낸다. 예시로 530 nm 파장에서 S3는 0.032, S5는 0.007로 최대 약 4.5배의 차이가 난다. 이러한 차이는 적외 구간으로 갈수록 감소하는데 특히 1350-1400 nm, 1800 nm 이상 구간에서는 선박에 따른 복사휘도 차이가 크게 감소하였다. 각 선박별로 비교해 보면 전반적으로 S2, S3, S1, S4, S5 순으로 복사휘도 크기가 감소하는 것을 알 수 있다. 하지만 이를 정규화 복사휘도로 변환하면 다섯 척의 선박 모두 전 파장구간에서 크기 및 증감 형태가 유사함을 보인다. 특히 520, 880, 1020, 1240, 1550 nm 주변에서는 AVIRIS 선박과 실측 선박 모두 복사휘도가 상승하는 경향이 나타난다.

실측 선박 및 초분광영상상 선박 유사성 판별

Fig. 6a는 AVIRIS 초분광영상상의 RGB 합성으로 영상에 존재하는 선박 및 해수의 복사휘도 스펙트럼과 현장관측을 통해 수집한 선박 선체의 복사휘도 스펙트럼 간의 분광특성 정합 알고리즘을 적용하여 유사도를 평가하였다. Fig. 6b는 유클리드 거리 차에 의해 계산되는 SDS 방법으로 선박 및 해수의 평균 SDS는 각각 0.0113, 0.0141이며 선박과 해수 사이의 약 1.2배 정도 수치 차이를 보인다. SDS 방법의 최댓값인 1을 기준으로 보았을 때 절대적 수치 차이가 다른 방법에 비해 작으며 또한 선박 내부에서는 해수로 판별되는 화소가 일부 분포하고 있어 이는 오차요인으로 간주되었다. Fig. 6c는 전 파장구간의 증감경향성만 고려하는 SCS 방법으로 선박끼리는 0.89, 실측 선박과 해수는 0.70 상관관계를 나타냈다.

Fig. 6. (a) RGB composite image and results of hyperspectral image classification for five representative methods, namely (b) spectral distance similarity (SDS), (c) spectral correlation similarity (SCS), (d) spectral similarity value (SSV), (e) spectral angle mapper (SAM), and (f) spectral information divergence (SID).

선박과 해수 사이에 약 1.2배 차이를 보이지만 선박 및 해수 모두 반응하지 않는 특정 파장대가 존재하

Table 3. Results of accuracy assessments of the methods used in the study, namely spectral distance similarity (SDS), spectral correlation similarity (SCS), spectral similarity value (SSV), spectral angle mapper (SAM), and spectral information divergence (SID)

Data		SDS	SCS	SSV	SAM	SID
In-situ Ship	AVIRIS Ship	0.0113	0.89	0.1150	0.2399	0.2160
	AVIRIS Seawater	0.0141	0.70	0.3004	0.4450	0.8344

Fig. 7. Frequency histogram of (a) RGB composite image and hyperspectral image classification for five representative methods, namely (b) spectral distance similarity (SDS), (c) spectral correlation similarity (SCS), (d) spectral similarity value (SSV), (e) spectral angle mapper (SAM), and (f) spectral information divergence (SID).

기 때문에 실제 유효 구간을 설정하고 동일한 방법을 적용하면 더 높은 정확도로 분류될 것으로 판단된다. Fig. 6d는 앞의 두 알고리즘을 동일 비율로 합산하는 방법으로 선박 간의 (1-SCS)가 SDS에 비해 약 10배의 절대 수치 차이를 보이므로 SSV는 (1-SCS)와 유사한 결과를 나타낼 수 있다. Fig. 6e는 두 스펙트럼 간의 밴드별 사잇각을 유사성의 척도로 사용하는 SAM 방법으로 선박 간에는 0.2399, 선박과 해수 사이에는 0.4450으로 약 1.8배의 차이를 나타내었고 선박과 해수 사이에도 명확한 분류를 보여주었다. 마지막으로 Fig. 6f는 두 스펙트럼 간의 확률분포 거리를 계산하는 SID 방법으로 선박 간에는 0.2160, 선박과 해수 사이에는 0.8344로 다른 방법들에 비해 약 3.8배의 큰 차이를 보여주었다. 하지만

해수의 경우 특정 패턴이 없는 노이즈 형태의 분포를 나타내고 있다. 각 분광특성 정합 알고리즘을 적용 결과를 Table 3에 정리하였다.

초분광영상 선박 탐지

Fig. 7은 탐지기법 적용 영상(Fig. 6)의 빈도수로 해수에 비해 선박이 차지하고 있는 영상 내 비율이 극히 작아 상용로그로 표시하였다. Fig. 7a는 RGB 합성 영상 중 Green에 해당하는 DN으로 8-14 구간이 전체의 96%를 차지하고 있다. 이는 대부분 해수에 해당하는 구간으로 판단할 수 있다. Fig. 7b는 SDS 방법으로 0.0140-0.0141 구간에서 최대빈도수를 보이며 이는 해수에 해당한다. SDS는 절대적 거리를 비교하므로 상대적 수치가 작을수록 선박으로, 수치가

Table 4. Thresholds of the detection methods used in the study, namely spectral distance similarity (SDS), spectral correlation similarity (SCS), spectral similarity value (SSV), spectral angle mapper (SAM), and spectral information divergence (SID), to classify the image into two categories (ship and non-ship including seawater)

Detection Method	SDS	SCS	SSV	SAM	SID
Ship	<Thr	>Thr	<Thr	<Thr	<Thr
Adaptive Threshold (Thr)	0.01315	0.7980	0.2500	0.3740	0.4500
Seawater	>Thr	<Thr	>Thr	>Thr	>Thr

Fig. 8. (a) RGB composite image and results of hyperspectral image classification using adaptive threshold for five representative methods, namely (b) spectral distance similarity (SDS), (c) spectral correlation similarity (SCS), (d) spectral similarity value (SSV), (e) spectral angle mapper (SAM), and (f) spectral information divergence (SID), as well as the difference in each detection result: (g) SDS-SAM, (h) SCS-SAM, and (i) SSV-SAM.

클수록 해수로 구분할 수 있다. Fig. 7c는 SCS 방법으로 해수에 해당하는 0.69-0.70 구간에서 최대빈도수를 나타낸다. SCS는 상관관계를 비교하므로 상대적 수치가 작을수록 해수에 가깝고 클수록 선박과 유사하다. Fig. 7d는 SSV 방법으로 해수에 해당하는 0.3000-0.3030 구간과 선박에 해당하는 0.1110-0.1140 구간의 최대빈도수를 나눌 수 있다. Fig. 7e는 두 밴

드의 사잇각을 측정하는 SAM 방법으로 상대적 수치가 작을수록 선박에 가깝다. 해수에 해당하는 0.4440-0.4470 구간과 선박에 해당하는 0.2310-0.2400 구간에서 각각 최대빈도수를 보인다. Fig. 7f는 SID 방법으로 0.8300-0.8400 구간에서 해수의 최대빈도수를 보이며 0.2700-0.2800 구간에서 선박 최대빈도수를 나타내었다.

초분광영상의 선박을 탐지하기 위해서 각 기법의 최적 임계값을 제시하였다. Table 4는 최적 임계값으로 SDS는 0.01315, SCS는 0.79, SSV는 0.2500, SAM은 0.3740, SID는 0.4500으로 빈도수 변곡점을 기준으로 선정하였다. Fig. 8은 최적 임계값 기준으로 선박을 0, 해수를 1로 구분하여 영상내의 분포를 나타낸 것이다. SDS는 선박과 주변 해수는 구분되었지만 선박 내부에 해수로 판별되는 화소가 존재하였다. SCS, SSV, SAM, SID 방법들은 선박과 해수를 명확히 분류하였고, 특히 SAM, SID 방법은 동일한 선박 및 해수 화소를 보여주었다. 또한 SAM을 기준으로 서로 간의 차이를 분석한 결과 SDS 방법은 주로 선수 및 주변부에서, SCS는 선미 부분에서 차이를 나타내었다.

요약 및 결론

이 연구에서는 선박 현장관측 자료를 기반으로 초분광 특성 정합 알고리즘 기법들의 정확도를 평가하였다. 현장관측을 통해 서로 다른 종류의 선체 복사휘도 스펙트럼을 측정하고, 이와 동시에 다수의 선박 및 해수를 촬영한 AVIRIS 초분광 항공 영상을 수집하여 비교 분석하였다. AVIRIS 초분광 영상은 복사보정을 거친 선박 및 해수 영상을 사용하였으며 현장자료는 광학관측기기를 활용하여 선박 선체를 여러 번 측정한 후 평균하여 사용하였다. 또한 현장자료는 전 파장구간에 대한 정규화 과정을 수행하였으며 그 결과 다섯 척의 선박 모두 유사한 증감 형태의 복사휘도를 보여주었다.

초분광 특성 정합 기법으로 많이 사용되는 SDS, SCS, SSV, SAM, SID 방법을 실제 선박의 스펙트럼과 초분광영상 선박 및 해수 스펙트럼에 적용한 결과 SDS는 다른 기법에 비해 상대적으로 작은 차이를 보이면서 선박 내부에 해수로 판별되는 화소가 분포하였다. SCS, SSV는 유사한 분류 형태를 보여주었고, SAM은 약 1.8배로 선박과 해수 사이에 명확한 분류를 나타내었다. SID 기법은 선박과 해수 사이에 약 3.8배의 큰 수치 차이를 보였으나 해수에서 특정한 패턴이 없는 노이즈 형태가 나타났다. 이와 더불어 각 기법의 새로운 최적 임계값을 제시함으로써 초분광 영상의 선박을 분류하고자 하였다. 그 결과 SDS, SCS를 제외한 SSV, SAM, SID 기법들이 선박과 주변 해수를 명확히 구분하였다. SDS는 선수

및 선박 주변부에서, SCS는 일부 선미 부분에서 타 방법들과 다른 탐지결과를 보여주었다.

이 연구에서는 불연속적인 영역에서 소수 채널의 분광정보를 제공하는 다중분광 영상에 비해 좁고 연속적인 밴드에서 수백 개의 분광특성을 제공하는 초분광센서 항공영상을 활용하여 영상에 존재하는 선박 및 해수를 분류하였다. 현장관측을 통해 취득한 실측자료와 초분광영상 사이에 분광특성 정합 알고리즘을 적용하여 각 탐지기법의 정확도 및 장·단점을 제시하였다. 이 연구를 기반으로 다수의 현장관측을 통한 각종 선박 및 도료, 해수 분광 라이브러리를 구축한다면 기존의 고해상도 광학영상으로만 판별 가능했던 선박탐지를 스펙트럼 기반의 초분광 탐지 알고리즘을 활용하여 선박의 종류 및 색상, 기타 구조물 등의 분류까지도 가능할 것으로 사료된다.

사 사

이 논문은 선박해양플랜트연구소의 주요사업인 “해양사고 신속 수색구조 지원 기반기술 개발”에 의해 수행되었습니다(PES8980).

References

- Barnsley, M.J., Settle, J.J., Cutter, M.A., Lobb, D.R., and Teston, F., 2004, The PROBA/CHRIS mission: A low-cost smallsat for hyperspectral multiangle observations of the earth surface and atmosphere. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 42(7), 1512-1520.
- Chang, C.I., 1999, Spectral information divergence for hyperspectral image analysis. In *Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS'99 Proceedings*, 1, 509-511.
- Corbane, C., Najman, L., Pecoul, E., Demagistri, L., and Petit, M., 2010, A complete processing chain for ship detection using optical satellite imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 31(22), 5837-5854.
- Datt, B., McVicar, T.R., Van Niel, T.G., Jupp, D.L., and Pearlman, J.S., 2003, Preprocessing EO-1 Hyperion hyperspectral data to support the application of agricultural indexes. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(6), 1246-1259.
- Eldhuset, K., 1996, An automatic ship and ship wake detection system for spaceborne SAR images in coastal regions. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 34(4), 1010-1019.
- Gao, G., 2011, A parzen-window-kernel-based CFAR

- algorithm for ship detection in SAR images. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 8(3), 557-561.
- Goetz, A.F., 2009, Three decades of hyperspectral remote sensing of the Earth: A personal view. *Remote Sensing of Environment*, 113, S5-S16.
- Goodenough, D.G., Dyk, A., Niemann, K.O., Pearlman, J.S., Chen, H., Han, T., and West, C., 2003, Processing Hyperion and ALI for forest classification. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(6), 1321-1331.
- Govender, M., Chetty, K., and Bulcock, H., 2007, A review of hyperspectral remote sensing and its application in vegetation and water resource studies. *Water SA*, 33(2), 145-151.
- Green, R.O., Eastwood, M.L., Sarture, C.M., Chrien, T.G., Aronsson, M., Chippendale, B.J., and Olah, M.R., 1998, Imaging spectroscopy and the airborne visible/infrared imaging spectrometer (AVIRIS). *Remote Sensing of Environment*, 65(3), 227-248.
- Homayouni, S. and Roux, M., 2004. Hyperspectral image analysis for material mapping using spectral matching. In *ISPRS Congress Proceedings*, Vol(20).
- Kim, M., Yim, U.H., Hong, S.H., Jung, J.H., Choi, H.W., An, J., and Shim, W.J., 2010, Hebei Spirit oil spill monitored on site by fluorometric detection of residual oil in coastal waters off Taean, Korea. *Marine Pollution Bulletin*, 60(3), 383-389.
- Kim, T.S., Park, K.A., Li, X., Lee, M., Hong, S., Lyu, S.J., and Nam, S., 2015, Detection of the Hebei Spirit oil spill on SAR imagery and its temporal evolution in a coastal region of the Yellow Sea. *Advances in Space Research*, 56(6), 1079-1093.
- Kumar, A.S., Keerthi, V., Manjunath, A.S., van der Werff, H., and van der Meer, F., 2010, Hyperspectral image classification by a variable interval spectral average and spectral curve matching combined algorithm. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 12(4), 261-269.
- Lee, E.B., Yun, J.H., and Chung, S.T., 2012, A study on the development of the response resource model of hazardous and noxious substances based on the risks of marine accidents in Korea. *Journal of Navigation and Port Research*, 36(10), 857-864.
- Lee, M.S., Park, K.A., Lee, H.R., Park, J.J., Kang, C.K., and Lee, M., 2016, Detection and dispersion of thick and film-like oil spills in a coastal bay using satellite optical images. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 9(11), 5139-5150.
- Liao, M., Wang, C., Wang, Y., and Jiang, L., 2008, Using SAR images to detect ships from sea clutter. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 5(2), 194-198.
- Lu, Y., Tian, Q., Wang, X., Zheng, G., and Li, X., 2013, Determining oil slick thickness using hyperspectral remote sensing in the Bohai Sea of China. *International Journal of Digital Earth*, 6(1), 76-93.
- Mattyus, G., 2013, Near real-time automatic vessel detection on optical satellite images. In *ISPRS Hannover Workshop*, 233-237 pp.
- Proia, N. and Pagé, V., 2010, Characterization of a bayesian ship detection method in optical satellite images. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 7(2), 226-230.
- Schwarz, J. and Staenz, K., 2001, Adaptive threshold for spectral matching of hyperspectral data. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 27(3), 216-224.
- Sridhar, B.M., Vincent, R.K., Witter, J.D., and Sponberg, A.L., 2009, Mapping the total phosphorus concentration of biosolid amended surface soils using LANDSAT TM data. *Science of the Total Environment*, 407(8), 2894-2899.
- Sweet, J. N., 2003, The spectral similarity scale and its application to the classification of hyperspectral remote sensing data. In *Advances in Techniques for Analysis of Remotely Sensed Data*, 2003 IEEE Workshop, 92-99 pp.
- Wackerman, C.C., Friedman, K.S., Pichel, W.G., Clemente-Colón, P., and Li, X., 2001, Automatic detection of ships in RADARSAT-1 SAR imagery. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 27(5), 568-577.
- Yan, L., Noro, N., Takara, Y., Ando, F., and Yamaguchi, M., 2015, Using hyperspectral image enhancement method for small size object detection on the sea surface. In *Image and Signal Processing for Remote Sensing XXI*, 9643 pp.
- Yang, G., Li, B., Ji, S., Gao, F., and Xu, Q., 2014, Ship detection from optical satellite images based on sea surface analysis. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 11(3), 641-645.

Manuscript received: November 13, 2017

Revised manuscript received: November 30, 2017

Manuscript accepted: December 14, 2017