

무인항공영상을 활용한 낙동강 녹조 탐지

김홍민* · 장선웅** · 윤홍주***

Utilization of Unmanned Aerial Vehicle(UAV) Image for Detection of Algal Bloom in Nakdong River

Heung-Min Kim* · Seon-Woong Jang** · Hong-Joo Yoon***

요약

하천에서 조류의 대량 번식은 녹조를 일으키고 수자원 안전에 대한 심각한 국가적 문제로 제기되고 있다. 따라서 깨끗한 용수를 확보하여 안정적인 수자원 공급을 위해 녹조로 인한 수질오염의 방제 기술 개발이 필요하다. 이에 본 연구는 무인항공기를 이용한 녹조 모니터링 기법을 적용하여 하천의 수질 관리 능력을 향상시키고자 하였다. 녹조현상이 빈번하게 발생하는 낙동강 중류의 도동 나루터를 대상으로 무인항공영상을 취득하였다. 또한 녹조시료 채취 및 수질검사를 통해 식물성 플랑크톤의 현존량을 조사하였다. 무인항공영상에 녹조 탐지 지수식을 적용한 결과와 식물성 플랑크톤의 현존량 간의 상관관계가 강한 양의 관계를 가지는 것으로 나타났다. 본 연구에서 제안된 원격탐사 기술은 하천 수질 오염 초기 대응 능력을 향상시킬 것으로 기대된다.

ABSTRACT

The large breeding of algae in rivers has caused the algal bloom and has becoming a serious national problem for the safety of water sources. Therefore, in order to supply stable water resources through securing clean water, it is necessary to develop technology for prevention of water pollution caused by algal bloom. The purpose of this study is to improve the water quality management ability of river by applying the algal bloom detection technique using UAV. Unmanned aerial images were acquired for the Dodong in the middle region of the Nakdong River where algal bloom are frequent. In addition, the phytoplankton concentration was acquired through the sampling of algal bloom and the examination of water quality. Correlation between phytoplankton concentrations and the results of applying the algal bloom index to the Unmanned aerial images showed a strong positive correlation. The remote sensing method suggested in this study is expected to improve the initial response capability of river water pollution.

키워드

Algal Bloom, Unmanned Aerial Vehicle, Monitoring, Spectral Reflectance
녹조, 무인 항공기, 모니터링, 분광반 사도

1. 서론

조류는(Algae) 1차생산자로서, 수생태계 유지에 중

요한 역할을 한다. 그러나 인구증가, 급속한 산업화와 오염원 증가 등에 따른 영양염류의 농도가 증가하여 많은 수체에서 부영양화를 유발하였다[1]. 또한 최근

* 부경대학교 지구환경시스템과학부(funwarm@naver.com)

** I-REM 기술개발(bearsd@naver.com)

*** 교신저자 : 부경대학교 지구환경시스템과학부

• 접수일 : 2017. 02. 14

• 수정완료일 : 2017. 05. 31

• 게재확정일 : 2017. 06. 16

• Received : Feb. 14, 2017, Revised : May. 31, 2017, Accepted : Jun. 16, 2017

• Corresponding Author : Hong-Joo Yoon

Division of Earth Environmental System Science Major of Spatial Information Engineering, Pukyong National University,,

Email : yoonhj@pknu.ac.kr

환경오염과 기후변화에 따른 다양한 자연 변화가 조류로 인한 환경오염을 야기하였으며, 사회적 문제로 대두되고 있다[2-3]. 조류의 대량증식은 수질을 악화시키는 요인 중 하나로 수화현상(Algal bloom)을 일으킬 수 있다[4]. 물꽃현상이라 칭하기도 하며 바다는 적조, 하천이나 호소에서는 녹조라 부른다.

녹조현상을 발생시키는 원인 중은 남조류, 녹조류, 유글레나조류, 외편모조류, 규조류 등이 있으며[5], 이중 독성을 가진 유해 남조류(cyanobacteria)가 우점하게 되면 이취미 발생, 산소 결핍 등 많은 문제를 유발시킨다. 최근 국내에서도 상수원 안전 문제에 대한 심각한 국민적 불안감 증폭으로 국가적 문제로 인식되고 있다[6-7]. 따라서 깨끗한 용수 확보를 통한 안정적인 수자원을 공급하기 위해서는 녹조현상에 따른 수질오염 예방과 방제를 위한 기술개발이 시급한 실정이다.

수환경에 변화가 일어나면 오염심화에 따른 친수기능 저해뿐만 아니라 관리 측면에서도 중요한 사항이므로 수환경의 모니터링은 매우 중요하다[8]. 현재 국내 녹조 모니터링은 현장 조사를 통한 지점별 샘플링, 유인항공기(Manned vehicle)를 이용한 항공 예찰(Aerial forecasting)을 시행하고 있다. 샘플링 조사는 녹조현상의 강도와 추세를 파악할 수 있지만 공간적 분포를 파악하는데 한계가 있다. 다음으로 유인항공기를 이용한 항공예찰의 경우 넓은 공간을 단시간에 관측할 수 있다. 하지만 이것을 운용하기 위해 많은 비용의 소모와 주기적인 이용이 어려운 한계가 있다[9]. 따라서 녹조현상 발생에 대한 사전 대응 능력 강화를 위해서는 기존 방식의 한계 극복이 가능한 새로운 형태의 예찰 및 모니터링 시스템이 필요하다.

기존의 원격탐사 방식을 보완하기 위해 무인항공기를 활용하여 다양한 데이터를 확보하고 있다. 최근 무인항공기를 이용한 원격탐사 기법은 지형공간정보를 비롯한 다양한 데이터 확보를 위한 틀로써 많은 분야에 적용되고 있다. 무인항공기를 이용한 원격탐사는 유인항공기와 위성에 비해 적은비용으로 필요에 따라 주기적인 운용이 가능하며, 고해상도의 시·공간적 데이터를 취득할 수 있다[10-11]. 이런 측면에서 무인항공기는 원격탐사와 현장조사의 단점을 보완할 수 있는 해결책이 될 수 있다.

이에 본 연구에서는 기존의 방법에 비해 적은 비용

이 들며 실시간으로 넓은 지역의 모니터링이 가능한 무인항공기를 이용하여 녹조 탐지 기법을 적용하였다.

II. 자료 및 방법

2.1 연구자료

본 연구의 대상 하천인 낙동강은 면적은 23,817 km²이며 길이 521.5 km로 국토 면적의 24%를 차지하는 대규모 하천이다[12]. 낙동강 유역에는 대구광역시, 부산광역시 등 대도시들이 위치하고 있으며 해당 지역에 상수원의 기능을 하고 있다. 낙동강은 이러한 대도시를 지나면서 오폐수 유입의 증가와 부영양화가 가속화되어 수질오염이 빈번하게 발생하고 있다. 특히 수온이 상승하는 봄부터 가을까지는 부영양화로 인해 정체수역에서 조류가 크게 번식하는 구간이 발생한다[4].

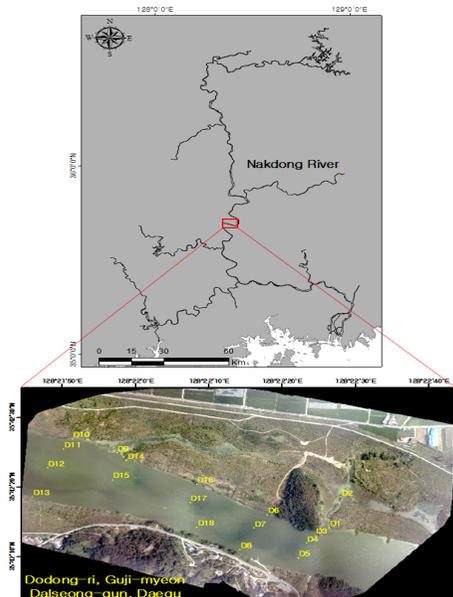


그림 1. 연구지역 및 시료채취 정점 위치
Fig. 1 Study site and water sampling points

본 연구에서는 낙동강 중류에 위치하여 녹조현상이 빈번하게 발생하는 대구광역시 달성군 구지면 도동리 일대를 연구지역으로 선정하였으며(그림 1), 녹조현상이 지속적으로 발생하던 2015년 7월 29일과 8월 18일 두 차례 자료를 취득하였다.

2.1.1 무인항공영상 취득

본 연구에서 사용된 무인항공기는 Sensefly Ltd.의 eBee 고정익 무인항공기이며(그림 2a), 장시간의 비행과 고해상도의 영상 획득이 가능하다. 해당 무인항공기는 탑재된 IMU(Inertial Measurement Unit), GPS(Global Positioning System)를 이용한 자동비행이 가능하다. 다음으로 영상 자료 획득을 위한 무인항공기 탑재 센서는 Canon Powershot S110 RGB와 NIR을 사용하였다(그림 2b). S110 RGB 센서는 기본적으로 디지털 카메라의 기능뿐만 아니라 Red(612 nm), Green(520 nm), Blue(450 nm)의 표준 밴드 자료를 제공하여 이미지 Visible spectrum 분석이 가능하다. S110 NIR 센서는 Red(625 nm), Green(550 nm)과 바이오매스(Biomass) 및 식물 상태 평가를 위한 식생지수 산출 등에 활용되는 NIR(850 nm)의 표준 밴드로 구성 되어 있다.



그림 2. (a) 고정익 무인항공기 (b) RGB(왼쪽), NIR(오른쪽) 센서
 Fig. 2 (a) Fixed-wing UAV (b) RGB(left), NIR(right) sensors

eBee는 무게가 가볍워 장시간 비행을 위해 두 개의 센서를 동시에 탑재할 수 없다. 따라서 모니터링 시 S110 RGB와 NIR을 각각 탑재하여 항공 영상을 취득하였다.

항공촬영의 경우 영상 병합을 위하여 영상 내 특징점을 추출하는 것이 중요하다. 하지만 수면의 경우 그

특징점의 구분에 한계가 있으므로 하천의 양안을 포함하여 촬영되도록 경로를 설정하였다. 무인항공기 촬영당시 매개변수는 표 1과 같다.

일반적으로 항공사진의 중복도는 종중복도 60%, 횡중복도 30% 으로 하지만 최근 영상의 정밀성이 높아지면서 중복도를 증가시켜 촬영한다. 이에 본 논문에서는 종중복도 70%, 횡중복도 75%로 설정하였다.

표 1. 무인항공영상 비행정보
 Table 1. Flight information of UAV image

Flight height	400 m
Distance	14 km
Lateral overlap	75%
Longitudinal overlap	70%
Flight strip	Rectangular route(11 line)
Camera pixel size	1.89 μ m
Focal length	4.4 mm

2015년 7월 29일과 8월 18일에 각 센서 당 55장의 영상을 취득하였다. 각각의 영상은 무인항공기에 탑재된 IMU, GPS로부터 자동으로 기록된 Flight log(Latitude, Longitude, Altitude, Accuracy Horz(m), Accuracy Vert(m) *et al.*)를 이용하여 지오태깅과 기하보정을 실시하였으며, 보정된 영상을 정합하여 한 장의 정사영상으로 제작하였다.

2.1.2 시료 채취

연구지역 내의 시료 채취는 무인항공 영상의 촬영 날짜와 같은 시간인 2015년 7월 29일에 실시하였다. 본 연구에서는 녹조 탐지 지수식의 탐지 결과 검증을 위하여 시각적으로 녹조현상이 발생한 지점과 상대적으로 양호한 지점을 분류, 총 18개의 정점에서 각각 1,000 mL씩 채수하여 정량분석을 수행하였다(그림 1).

2.2 연구방법

2.2.1 녹조 탐지 지수식

촬영된 영상에서 녹조현상을 탐지하기 위해 Jang *et al.*이 개발한 녹조 탐지 지수식(Algal Bloom Index)을 적용하였으며 녹조 탐지 지수식은 식 (1)과 같다[13].

$$AI_1 = \frac{R_{\lambda_1} - R_{\lambda_2}}{R_{\lambda_1} + R_{\lambda_2}} + \frac{R_{\lambda_1} - R_{\lambda_3}}{R_{\lambda_1} + R_{\lambda_3}} \quad (1)$$

여기서 R_{λ_1} 은 850 nm에서의 반사도, R_{λ_2} 은 660 nm

에서의 반사도, R_{λ_3} 은 625 nm에서의 반사도를 의미한다. 식 (1)을 이용하여 영상에서 계산된 지수 값과 식물성 플랑크톤의 현존량간의 상관성 분석 및 녹조현상의 공간적 분포를 파악하였다.

2.2.2 녹조현상의 공간적 분포 추정

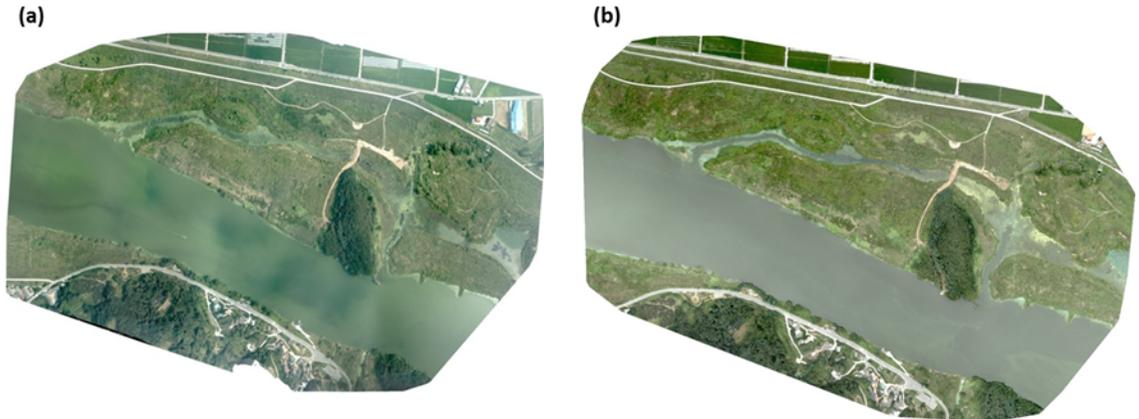


그림 3. 무인항공사진의 정사영상 (a) 2015년 7월 29일 (b) 2015년 8월 18일
 Fig. 3 Ortho images of unmanned aerial images in (a) 29 July 2015 (b) 18 Aug. 2015

환경부에서는 1998년부터 상수원의 안정성 확보를 위해 상수원으로 사용되는 호수 및 하천에 대해 조류 예보제를 운영하고 있다[14]. 측정기간은 조류 발생시기인 매년 4월부터 11월에 측정하며 측정항목은 수온, pH, DO, 클로로필-a, 남조류 세포수이다. 녹조현상의 발생을 쉽게 판별할 수 있는 클로로필-a의 농도와 독성물질을 함유하고 있는 남조류의 세포 수를 기준으로 조류주의보, 조류경보, 조류 대발생으로 구분한다(표 2). 본 연구에서는 취득된 영상에서 녹조현상의 공간적 분포를 파악하기 위하여 조류 예보 발령 기준을 탐지지수에 적용하였다.

표 2. 조류예보제 발령기준
 Table 2. Criteria of algae bloom warning system

	Chlorophyll-a (mg/m ³)	Cyanobacteria (cells/mL)
Watch	More than 15	More than 500
Warning	More than 25	More than 5,000
Algal bloom	More than 100	More than 1,000,000

III. 결 과

3.1 항공촬영

2015년 7월 29일과 8월 18일에 취득한 영상을 정합하여 한 장의 정사영상을 제작하였다(그림 3). 2015년 7월

29일의 촬영면적은 0.6291 km², 공간 해상도는 12.98 cm이다. 항공촬영 당시 조사선이 운항 중이었으며, 조사선이 지나간 항적을 정사영상에서도 확인할 수 있다. 8월 18일의 촬영면적은 0.5847 km², 공간 해상도는 12.9 cm이다. 8월 18일 영상의 경우 7월 29일 영상과 동일한 조건으로 항공촬영을 실시하였으나 결과에서 다소 차이를 보였다. 이는 항공촬영 당시에 바람의 방향이나 강도의 차이로 인해 무인항공기가 영향을 받았기 때문이다.

3.2 녹조현상 탐지 지수식 적용 결과

식물플랑크톤에 대한 정량 분석 결과 현존량이 총 9,639,001 cells/mL 이었으며, 이 가운데 남조류가 9,637,026 cells/mL(99.9%)로 대부분을 차지하였다. 채수 정점별 현존량을 비교하면 23,230 ~ 2,273,800 cells/mL로 정점 10에서 가장 많이 출현하였으며, 정점 15에서 가장 적게 출현하였다(표 3).

표 3. 정점별 식물 플랑크톤 농도 수
Table 3. The number of phytoplankton concentrations in each sampling sites

Sampling sites	Phytoplankton Concentrations (cells/mL)
St. 1	1,178,361
St. 2	227,207
St. 3	197,376
St. 4	78,668
St. 5	168,278
St. 6	77,544
St. 7	66,864
St. 8	1,888,080
St. 9	2,006,400
St. 10	2,273,700
St. 11	296,959
St. 12	212,486
St. 13	278,730
St. 14	199,260
St. 15	23,154
St. 16	109,838
St. 17	127,751
St. 18	169,442
Total	9,580,098

녹조현상 탐지 지수식의 적용 결과 0 ~ 1사이의 단위가 없는 지수 값으로 표시하였다. 녹조현상 탐지

지수와 식물성 플랑크톤 현존량간의 상관성 분석 결과 상관계수(R)가 0.8489로 강한 양(+)의 상관관계를 가지는 것으로 나타났다. 따라서 지수 값의 수치가 높을수록 녹조현상의 발생 강도가 강한 것으로 판단할 수 있다.

3.3 녹조현상의 공간적 분포

조류 예보 발령 기준을 녹조현상 탐지 지수에 적용하여 조사 수역 내 녹조현상의 공간적 분포를 파악하였다. 2015년 7월 29일의 경우 주의보(5,000 cells/mL 이하)의 면적은 0.06 km², 경보(5,000 ~ 1,000,000 cells/mL)의 면적은 0.22 km², 대발생(1,000,000 cells/mL 이상)의 면적은 0.01 km²로 나타났으며 하천의 양안에서 발생강도가 높게 나타났다(그림 4a).

2015년 08월 18일에는 주의보 수준에 해당하는 조류 농도의 면적이 0.02 km²로 7월 29일 보다 0.04 km² 감소한 반면, 경보 수준에 해당하는 면적은 0.26 km²로 증가하여 녹조현상의 발생이 더욱 심화되었음을 알 수 있었다. 그리고 하천 하류에 해당하는 영상 내 좌측 수역에서 발생 강도가 높게 나타났다(그림 4b).

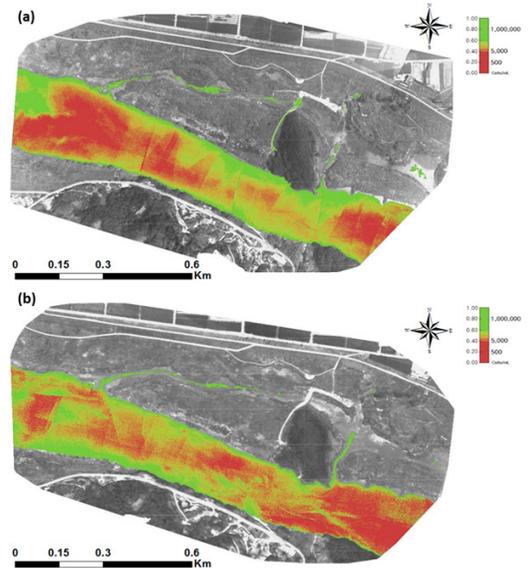


그림 4. 녹조현상의 공간적 분포 (a) 29 July 2015 (b) 18 Aug. 2015

Fig. 4 Spatial distribution of algal bloom (a) 29 July 2015 (b) 18 Aug. 2015

V. 결 론

본 연구는 저비용으로 효율적인 공간적 분포 해석이 가능한 무인항공기를 이용한 녹조탐지 기법을 적용하고자 하였다. 녹조현상이 빈번하게 발생하는 낙동강 중류 도동 나루터에서 무인항공영상 촬영을 실시하였으며, Jang *et al.* 이 제시한 녹조현상 탐지 지수를 적용하여 분석하였다. 또한 식물성 플랑크톤 현존량과 지수 값 간의 상관성 분석을 통하여 녹조현상 탐지 지수식을 검증하였으며, 조류예보제를 통해 녹조현상의 공간적 분포를 추정하였다. 그 결과 녹조현상 탐지 지수식의 결과 값과 18개 정점의 식물성 플랑크톤 현존량의 상관관계가 $R=0.8489$ 로 강한 양의 상관관계를 나타냈다. 이를 토대로 조류예보제를 기준으로 전체 조사 수역에 대한 녹조현상의 공간적 분포를 분석한 결과 $0.22 \text{ km}^2 \sim 0.26 \text{ km}^2$ 의 면적에서 조류예보제 발령 기준의 경보($5,000 \sim 1,000,000 \text{ cell/mL}$) 수준에 해당하는 강도를 보이는 것을 알 수 있었다. 이와 같은 결과는 본 연구에서 제시한 무인항공기를 이용한 녹조현상의 모니터링 기법이 하천 환경 관리에 충분히 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 논문은 2016년도 한국전자통신학회 가을철 종합학술대회 우수논문입니다.

감사의 글

본 논문은 2016년도 수자원공사의 항공영상 활용 하천 부유쓰레기 및 녹조 탐지기술 연구사업의 지원으로 수행되었음.

References

- [1] M. Kim, B. Moon, T. Kim, and K. Zoh, "A Study on Production & Removal of Microcystin, Taste & Odor Compounds from Algal bloom in the Water Treatment Processes," *The Korean J. of Public Health*, vol. 52, no. 1, 2015, pp. 33-42.
- [2] S. Oh, J. Park, and H. Yoon, "Prediction of Red Tide Occurrence by using Oceanic and Atmospheric Data by Satellite," *J. of the Korea Institute of Electronics Communication Sciences*, vol. 10, no. 2, 2015, pp. 311-318.
- [3] S. Bak and H. Yoon, "Analysis on optical property in the South Sea of Korea by using Satellite Image : Study of Case on red tide occurrence in August 2013," *J. of the Korea Institute of Electronics Communication Sciences*, vol. 11, no. 7, 2016, pp. 723-728.
- [4] E. Choe, J. Lee, and J. Lee, "Estimation of Chlorophyll-a Concentrations in the Nakdong River Using High-Resolution Satellite Image," *Korean J. of Remote Sensing*, vol. 27, no. 5, 2011, pp. 613-623.
- [5] Ministry of Environment, "Study on preparation a master plan for reduction of algal of freshwater in Korea," *Final Report*, Dec., 2010,
- [6] H. Kim, K. Ha, and G. Joo, "Eutrophication of the lower Nakdong River after the construction of an estuarine dam in 1987," *Int. Review of Hydrobiology*, vol. 83, 1998, pp. 65-72.
- [7] H. Paerl and J. Huisman, "Blooms like it hot," *Science*, vol. 320, no. 5872, 2008, pp. 57-58.
- [8] H. Kim, D. Hwang, S. Bak, S. Oh, S. Jang, and H. Yoon, "The Characteristics of Sea Water Quality Change of Fishing Port In East Coast of Korea Using GIS," *Int. J. of Software Engineering and Its Applications*, vol. 10, no. 11, 2016, pp. 415-428.
- [9] T. Hakala, J. Suomalainen, and J. Peltoniemi, "Acquisition of bidirectional reflectance factor dataset using a micro unmanned aerial vehicle and a consumer camera," *Remote Sensing*, vol. 2, no. 3, 2010, pp. 819-832.
- [10] R. Dunford, K. Michel, M. Gagnage, H. Piégay, and M. Trémelo, "Potential and constraints of Unmanned Aerial Vehicle technology for the characterization of Mediterranean riparian forest," *Int. J. of Remote Sensing*, vol. 30, no. 19, 2009, pp. 4915-4935.
- [11] S. Pozo, P. González, D. López, and B. García, "Vicarious radiometric calibration of a

multispectral camera on board an Unmanned Aerial System," *Remote Sensing*, vol. 6, no. 3, 2014, pp. 1918-1937.

- [12] S. Jang, H. Yoon, and W. Seo, "Analysis of the estuary outflow characteristics of floating debris in the downstream of Nakdong River using satellite location tracking buoys," *J. of the Korea Institute of Electronics Communication Sciences*, vol. 10, no. 2, 2015, pp. 157-164.
- [13] S. Jang, H. Yoon, S. Kwak, B. Sohn, S. Kim, and D. Kim, "Algal Bloom Monitoring using UAVs Imagery," *Next Generation Computer and Information Technology*, Harbin, China, Aug. 2016.
- [14] H. Yoo, B. Lee, and S. Rhee, "Correlation between Paldang Reservoir Discharge and Causes of Algal Blooming," *J. of Korea Organic Resource Recycling Association*, vol. 21, no. 3, 2013, pp. 61-66.



윤홍주(Hong-Joo Yoon)

1983년 부경대학교 해양공학과 졸업(공학사)

1985년 부경대학교 대학원 해양공학과 졸업(공학석사)

1997년 프랑스 그르노블 I 대학교 대학원 위성원격탐사전공 졸업(공학박사)

1999년~2002년 여수대학교 해양공학과 교수

2002년 ~ 현재 부경대학교 공간정보시스템공학 교수

※ 관심분야 : 해양원격탐사, GIS

저자 소개



김흥민(Heung-Min Kim)

2015년 부경대학교 공간정보시스템공학과 졸업(공학사)

2017년 부경대학교 대학원 공간정보시스템공학과 졸업(공학석사)

2017년 ~ 현재 부경대학교 공간정보시스템공학과 박사과정

※ 관심분야 : 해양원격탐사, GIS



장선웅(Seon-Woong Jang)

2008년 대구가톨릭대학교 지리교육과 졸업(지리학사)

2012년 부경대학교 대학원 위성정보과학과 졸업(공학석사)

2015년 부경대학교 대학원 공간정보시스템공학과 졸업(공학박사)

※ 관심분야 : 해양 원격탐사, GIS

