Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies, 23(3) 2020, pp.252-262 ISSN 1226-9719(Print)On
https://doi.org/10.11108/kagis.2020.23.3.252 ISSN 2287-6952(Online)

심층신경망 모델을 이용한 고해상도 KOMPSAT-3 위성영상 기반 토지피복분류*

문갑수[1] · 김경섭[1] · 정윤재[2※]

Land Cover Classification Based on High Resolution KOMPSAT-3 Satellite Imagery Using Deep Neural Network Model*

Gab-Su MOON[1] · Kyoung-Seop KIM[1] · Yun-Jae CHOUNG[2※]

요 약

원격탐사 분야에서 토지피복분류에는 머신러닝 기반의 SVM 모델이 대표적으로 활용되고 있는 한편, 신경망 모델을 이용한 연구도 지속적으로 수행되고 있다. 다목적실용위성의 고해상도 영상을 이용한 연구는 미흡한 실정이며, 따라서 본 연구에서는 고해상도 KOMPSAT-3 위성영상을 이용하여 신경망 모델의 토지피복분류 정확도를 평가하고자 하였다. 경주시 인근 해안지역의 위성영상을 취득하여 훈련자료를 제작하고, 물과 식생 및 육지의 세 항목에 대해 SVM, ANN 및 DNN 모델로 토지피복을 분류하였다. 분류 결과의 정확도를 오차 행렬을 통해 정량적으로 평가한 결과 DNN 모델을 활용한 토지피복분류가 92.0%의 정확도로 가장 우수한 결과를 나타냈다. 향후 다중시기의 위성영상을 통해 훈련자료를 보완하고, 다양한 항목에 대한 분류를 수행 및 검증한다면 연구의 신뢰성을 높일 수 있을 것으로 판단된다.

주요어 : 고해상도 KOMPSAT-3 위성영상, 토지피복분류, SVM, ANN, DNN

ABSTRACT

In Remote Sensing, a machine learning based SVM model is typically utilized for land cover classification. And study using neural network models is also being carried out continuously. But study using high-resolution imagery of KOMPSAT is insufficient.

2020년 09월 04일 접수 Received on September 04, 2020 / 2020년 09월 13일 수정 Revised on September 13, 2020 / 2020년 09월 18일 심사완료 Accepted on September 18, 2020
* 본 결과물은 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음(과제번호 20SIUE-B148326-03).
1 ㈜지오씨엔아이 공간정보기술연구소 연구원 Geospatial Research Center, GEO C&I., Ltd., Researcher
2 ㈜지오씨엔아이 공간정보기술연구소 연구소장 Geospatial Research Center, GEO C&I., Ltd., Director
※ Corresponding Author E-mail : choung12osu@gmail.com

Therefore, the purpose of this study is to assess the accuracy of land cover classification by neural network models using high-resolution KOMPSAT-3 satellite imagery. After acquiring satellite imagery of coastal areas near Gyeongju City, training data were produced. And land cover was classified with the SVM, ANN and DNN models for the three items of water, vegetation and land. Then, the accuracy of the classification results was quantitatively assessed through error matrix: the result using DNN model showed the best with 92.0% accuracy. It is necessary to supplement the training data through future multi-temporal satellite imagery, and to carry out classifications for various items.

KEYWORDS : High Resolution KOMPSAT-3 Satellite Imagery, Land Cover Classification, Support Vector Machine, Artificial Neural Network, Deep Neural Network

서 론

원격탐사 분야에서 토지피복분류는 전형적인 응용 방법의 하나로, 지표면의 물리적 상황을 여러 기법을 통해 분류하는 것이다(Yang *et al.*, 2002). 토지피복분류 수행에 있어서 전통적으로 화소 기반(pixel-based) 분류 기법이 주류를 이루었지만(Yoon *et al.*, 2007), 최근에는 영상의 공간해상도가 급격히 향상됨에 따라 대표적인 고해상도 위성인 IKONOS 영상을 사용하여 토지피복분류를 수행한 연구(Ku, 2007)와 6.5m의 공간해상도를 갖는 RapidEye 위성영상을 이용한 연구(Kim and Yeom, 2012; Na and Lee, 2014)를 비롯하여 무인이동체 영상을 사용한 연구(Xu *et al.*, 2018; Kim, 2020) 등 객체 기반(object-based) 분류 기법을 이용한 토지피복분류 연구가 활발히 수행되고 있다. Lee *et al.*(2010)은 대전광역시 유성구를 대상으로 KOMPSAT-2 위성영상을 이용해 객체 기반 토지피복분류를 수행하여 정밀 주제도 제작에 있어서 서브미터(Sub-meter)급 위성영상의 적용 가능성을 확인하기도 하였다.

한편으로 토지피복분류의 정확도는 분류 기법에 의존하는데(Lim *et al.*, 2005), 다양한 분류 기법 중 머신러닝(Machine Learning) 기반의 서포트 벡터 머신(Support Vector Machine, SVM) 모델이 대표적으로 활용되고 있다. Kang *et al.*(2012)은 전라북도 고창군 일대를 대상으로 한 고해상도 위성영상인 IKONOS 영상을 이용한 토지피복분류에 전통적인 최대 우도 분류(Maximum Likelihood Classifier, MLC)와 SVM, 그리고 인공신경망(Artificial Neural Network, ANN) 기법을 적용하여 SVM을 이용한 분류가 가장 정확한 결과물을 도출한 것을 확인하였다. 또한 Elhag and Boteva(2016)는 지중해의 엘라포니소스(Elafonisos) 섬 일대를 대상으로 Sentinel-2 위성영상을 이용한 토지피복분류에 MLC, SVM, ANN 및 최근접 이웃(Nearest Neighbour) 기법을 비교하여 SVM 모델의 분류 결과가 가장 높은 정확도를 보인 것을 분석하였다. Kim(2020)은 무인이동체(Unmanned Aerial Vehicle) 영상을 사용하여 충청북도 청주시 오송읍 일대를 대상으로 토지피복분류에 SVM, k-최근접 이웃(k-Nearest Neighbour, k-NN), 랜덤 포레스트(Random Forest), ANN 모델을 적용 및 분석하여 SVM 분류기의 성능이 가장 우수한 것을 확인하였다.

또한 분류항목이 혼재되어 있거나 분류항목 간의 경계인 곳 특히 물과 인공구조물의 경계 설정에 있어서 신경망 분류법이 통계학적 분류 방법보다 분류 정확도를 높일 수 있으며(Yang *et al.*, 2002), 신경망 모델을 활용한 토지피복분류 연구도 지속적으로 이루어지고 있다. 신경망 모델 연구 초기에는 ANN 모델을 이용한 토지피복분류 연구가 주로 수행되었으나(Jeon and Cho, 2000; Lee *et al.*, 2005; Kang *et al.*, 2006), 최근에는 합성곱 신경망(Convolutional

Neural Network) 모델을 활용하여 위성영상 및 초분광영상 기반의 토지피복을 분류하는 연구들이 발표되고 있다(Ko *et al.*, 2016; Song and Kim, 2017; Jo *et al.*, 2019). 특히 Chakaraborty *et al.*(2019)은 방글라데시의 대도시 중 하나인 쿨나(Khulna) 일대를 대상으로 Landsat TM 위성영상을 이용한 토지피복분류에 SVM, k-NN, 심층신경망(Deep Neural Network, DNN), 의사결정나무(Decision Tree) 모델을 적용해 저해상도 위성영상 기반 토지피복분류에 있어서 DNN 모델이 가장 효과적인 것을 확인하였다.

분류 기법이 발달하면서 다양한 연구들이 수행되었음에도 고해상도 위성영상, 특히 국내위성인 KOMPSAT 위성영상 기반의 해안지역 토지피복분류에 신경망 모델을 활용한 연구는 미흡한 실정이다. 해안지역의 경우 물과 육지의 경계이므로 신경망 분류법에 의해 분류 정확도를 높일 수 있을 것으로 판단되며, 따라서 본 연구에서는 고해상도 국내위성인 KOMPSAT-3 위성영상을 바탕으로 한 해안지역 토지피복분류에 있어서 대표적인 분류 기법인 SVM과 비교하여 기본적인 신경망 모델인 ANN 및 DNN의 분류 정확도 평가를 시도하고자 하였다.

연구 방법

1. 연구 대상 지역 및 연구 자료

본 연구의 대상지역은 경상북도 경주시 인근 감포읍 감포리와 오류리 일대로, 좌상단 35° 50′ 21.32″, 129° 29′ 38.35″, 우하단 35° 47′ 55.92″, 129° 31′ 34.30″의 해안지역이다. 해당 지역은 산지의 식생과 도시지역 및 바다가 혼재되어 있고 육지와 해양의 경계인 해안선이 포함되어 있어 신경망 모델의 분류 정확도 평가에 적합한 곳이라고 판단하였으며, 흑백 0.7m, 컬러 2.8m급 공간해상도를 가지는 국내 고해상 위성인 KOMPSAT-3의 2019년 1월 23일 촬영된 다중분광영상을 연구자료로 활용하였다. 본 연구의 대상 지역과 그에 해당하는 KOMPSAT-3 위성영상은 그림 1과 같다.

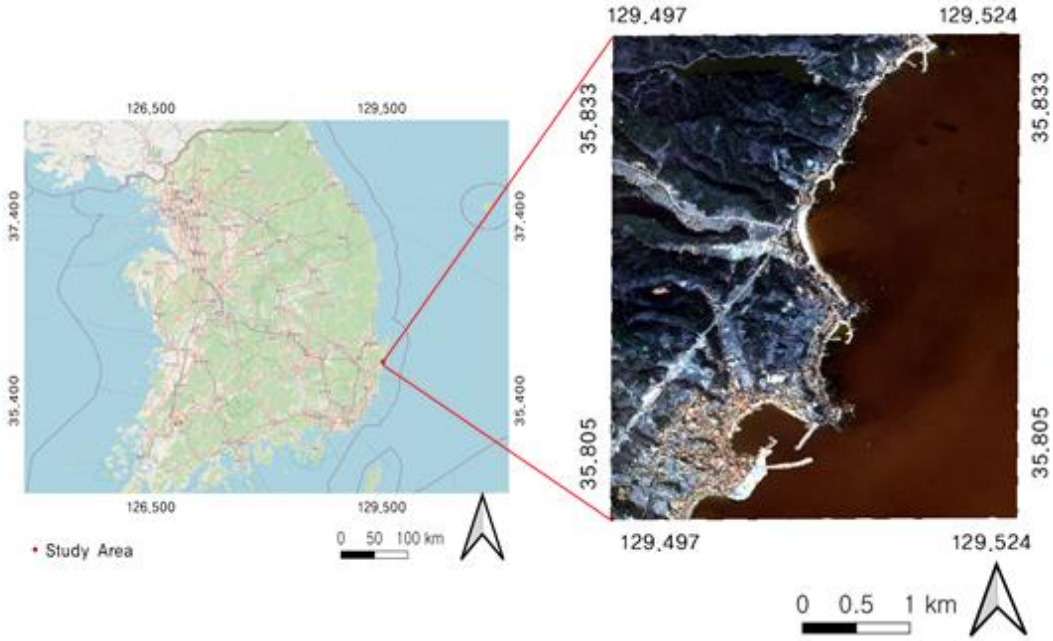

FIGURE 1. Study area and KOMPSAT-3 satellite image

2. 연구 방법

본 연구에서는 해안지역의 토지피복을 SVM, ANN 및 DNN 모델로 각각 분류하여 토지피복도를 생성하고, 대표적인 분류기인 SVM과 비교하여 신경망 모델의 분류 정확도를 평가하고자 하였다. 고해상도 KOMPSAT-3 위성영상을 활용하여 토지피복을 분류하고 정확도를 평가하는 과정은 그림 2에서 확인할 수 있다.

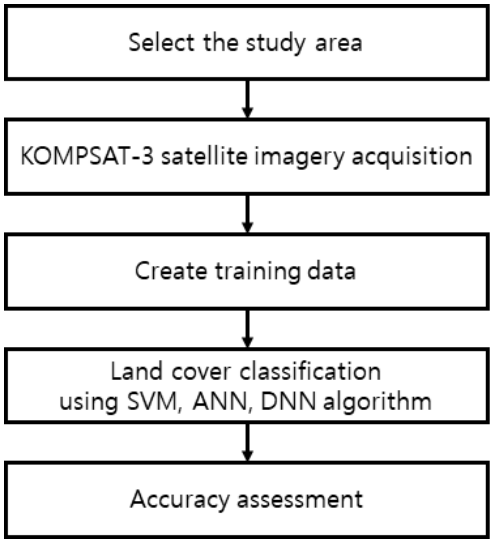

FIGURE 2. Flowchart showing the procedure carried out in this study

연구 대상 지역을 선정한 후 그에 대한 KOMPSAT-3 위성영상을 취득하였으며, 해당 영상을 바탕으로 분류 모델의 훈련자료(Training Dataset)를 제작하였다. 지리정보의 분석 및 처리가 가능한 오픈소스 기반의 QGIS를 이용하여 KOPMSAT-3 영상에서 샘플(Sample)을 취득하였으며, 해안선 경계 분류에 있어 SVM 및 신경망 모델의 차이점을 판단하기 용이하도록 물(Water)과 식생(Vegetation) 및 그 외의 육지(Land)의 주요 세 가지 항목만을 구분하였다. 샘플은 화소 단위로 추출하였고 각 항목당 1,000개 이상의 화소를 포함한 영역을 잘라 항목별로 분류하여 SHP 파일을 생성하였다. 그림 3은 KOMPSAT-3 영상에서 지정한 샘플 영역의 예시이다.

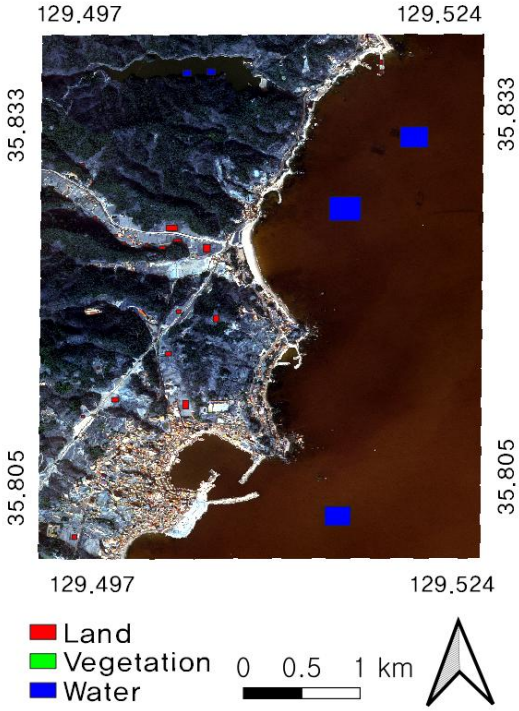

FIGURE 3. Training sampling example

이후 문법 구조가 간단 · 명확하며 풍부한 라이브러리를 제공하여, 생산성이 높은 프로그래밍 언어인 Python을 이용해 각 화소들의 RGB 값을 취득 및 정렬해 훈련자료로 삼았으며 Training Data와 Test Data는 7:3의 비율이 되도록 하였다. 이를 바탕으로 세 가지 모델에 동일한 훈련자료를 적용해 대상지역의 토지피복을 분류하였다.

SVM은 주어진 데이터를 두 개의 영역으로 분류하는 이진 분류기로, 두 영역의 경계에 존재하는 데이터 사이의 거리(margin)을 최대로 하는 결정 경계 또는 초평면(hyperplane)을 찾는 것이 목표이다. 직접 분류 결과에 대한 예측만 수행하므로, 분류 효율 자체만을 보면 확률 추정 방법보다 예측력이 전반적으로 높다는 장점이 있다(Heo *et al.*, 2018).

ANN은 인간 두뇌의 생물학적 뉴런의 작용을 모방하여 여러 뉴런들로부터 들어오는 입력을 일정한 함수를 거쳐 출력 노드를 통해 결과를 얻는 네트워크로, 자신이 가진 데이터로부터의 반복적인 훈련 과정을 거쳐 데이터에 숨어 있는 패턴을 찾아내는 모델링 기법이다(Lee *et al.*, 2012). 복잡한 수식을 필요로 하지 않고 컴퓨터로 단순 반복계산만 수행해 주면 되기 때문에, 학습용 데이터만 제대로 수집되었다면 매우 정밀도가 높은 예측이 가능하여(Moon, 2000) 문자인식, 음성인식, 영상인식, 자연어 처리 등 여러 분야에 이용되고 있다.

1989년 LeCun 등에 의해 소개된 DNN은 학습에 소요되는 시간이 오래 걸린다는 단점으로 인해 침체하였으나(Kim *et al.*, 2019), 최근 CPU와 GPU의 성능 향상 및 모델의 발전 등으로 대규모 데이터의 학습을 위한 딥 러닝(Deep Learning)의 핵심 모델로 주목받고 있다. 기본적으로 여러 개의 은닉층(Hidden Layer)이 사용되며, 다양한 비선형적 관계를 학습할 수 있어 패턴 인식에 뛰어난 모습을 보인다. 높은 정확도의 토지피복을 분류하기 위해 본 연구에서는 4개의 은닉층을 사용하였는데, 보다 많은 개수의 은닉층을 사용한 실험을 거쳤으나 정확도 측면에서 유의미한 차이를 보이지 않아 최종적으로 4개의 은닉층으로 DNN 모델을 구성하였다. 각 은닉층의 노드 수는 100개로 지정하였으며, 입력 노드의 개수는 영상의 밴드수와 동일한 4개, 출력 노드의 개수는 분류할 클래스(물, 식생 육지) 수와 같은 3개로 설정하였다.

상기 세 가지 모델을 적용하여 대상 지역의 토지피복을 물과 식생 및 육지의 항목으로 분류한 결과는 그림 4~6과 같다.

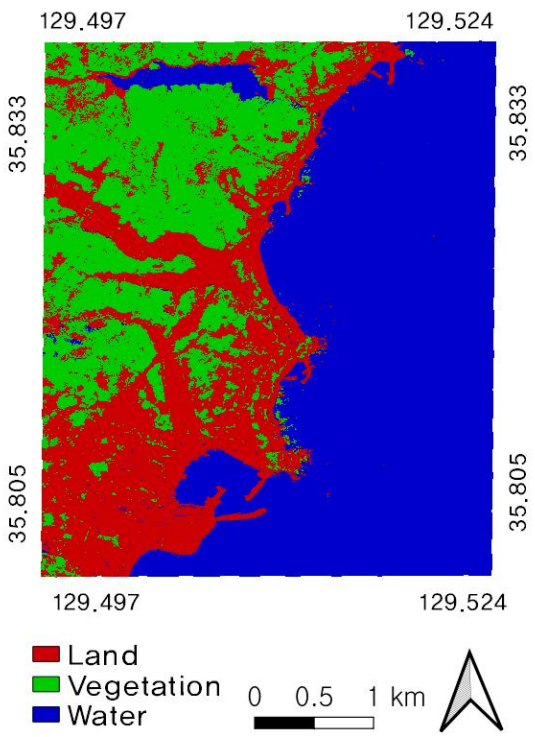

FIGURE 4. Result from classification by SVM model

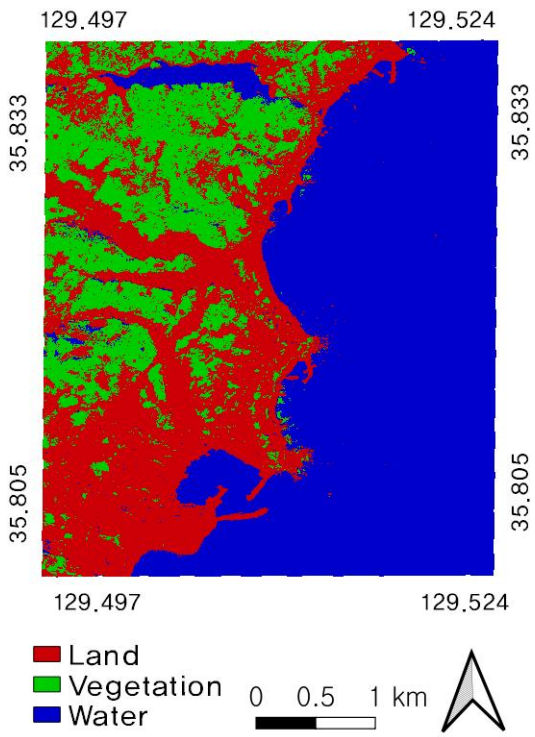

FIGURE 5. Result from classification by ANN model

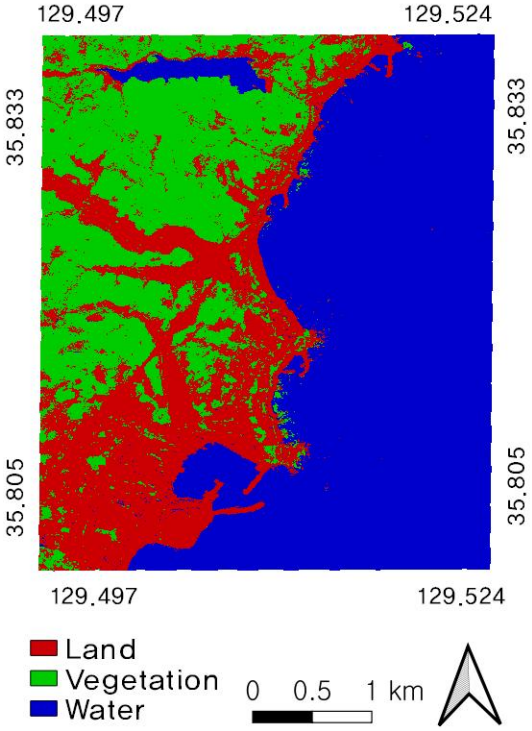

FIGURE 6. Result from classification by DNN model

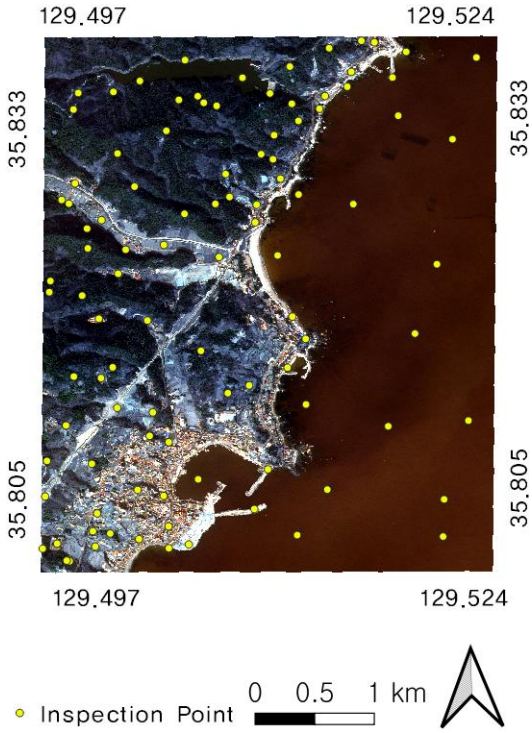

FIGURE 7. Randomly extracted Inspection Point

각 모델에 의해 분류된 결과의 정확도를 평가하기 위한 정량적인 분석 방법으로 오차 행렬(Error Matrix)를 활용하였다. 오차 행렬은 분석된 분류값과 참고자료를 바탕으로 수치화한

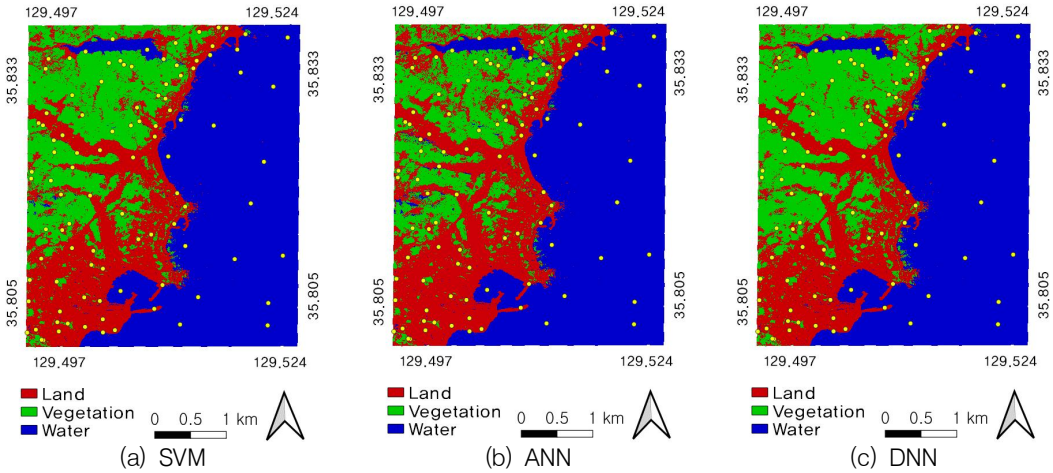

FIGURE 8. Inspection points on the results classified by each model

도표로(Kang *et al.*, 2012), 본 연구에서는 100개의 검사 지점을 임의로 추출하여 각 지점의 자료를 바탕으로 평가를 수행하였다(그림 7). 추출된 검사 지점을 세 가지 모델에 의해 도출된 토지피복도에 동일하게 적용하여(그림 8) 오차 행렬을 생성해 정확도를 평가하였다.

결과 및 고찰

본 연구에서는 고해상도 KOMPSAT-3 위성 영상을 활용하여 SVM, ANN 및 DNN 모델의 토지피복분류 정확도를 평가하기 위해 오차 행렬을 사용하여 전체 정확도와 생산자 및 사용자 정확도를 비교하였다. 전체 정확도는 일반적인 정확도를 의미하고, 생산자 정확도는 토지피복도를 만든 분석가의 관점에서 분류 모델이 얼마나 정확하게 분류해 내느냐의 관점에서의 정확도를 의미하며, 사용자 정확도는 토지피복도를 사용하는 관점에서 생성된 토지피복도가 실제 지표 피복과 얼마나 일치하느냐 하는 관점에서의 정확도를 뜻한다. 각 모델의 토지피복분류 결과에 기반하여 제작한 오차 행렬은 표 1~3과 같다.

분류 정확도가 높은 대표적인 모델인 SVM의 전체 정확도는 91.0%로 우수하였으며, 물과 식생 및 육지의 분류에 있어서 대체적으로 고른 정확도를 보였다. 그러나 물을 분류하는 데 있어서 사용자 정확도가 80.0%로 상대적으로 낮게 나타났다. ANN의 전체 정확도는 76.9%로, 상대적으로 저조한 모습을 보였다. 일부 항목에서 90.0% 이상의 정확도를 나타내기도 하였으나, 특히 식생의 생산자 정확도가 52.6%로 매우 낮았다. DNN의 전체 정확도는 92.0%로 SVM에 비해서도 1.0% 높은 정확도를 나타냈다. 또한 전체 항목에 대해 88.6% 이상의 분류 정확도를 확보하여 세 가지 모델 중 상대적으로 가장 우수한 분류 결과를 보였다.

본 연구에서는 고해상도 KOMPSAT-3 위성

TABLE 1. The accuracy through the error matrix using SVM

Class	Water	Vegetation	Land	Total	User Acc(%)
Water	16	3	1	20	80.0
Vegetation	1	33	1	35	94.3
Land	1	2	42	45	93.3
Total	18	38	44	100	
Prod Acc(%)	88.9	86.8	95.5		91.0

TABLE 2. The accuracy through the error matrix using ANN

Class	Water	Vegetation	Land	Total	User Acc(%)
Water	16	7	3	26	61.5
Vegetation	0	20	1	21	95.2
Land	2	11	40	53	75.5
Total	18	38	44	100	
Prod Acc(%)	88.9	52.6	90.9		76.0

TABLE 3. The accuracy through the error matrix using DNN

Class	Water	Vegetation	Land	Total	User Acc(%)
Water	16	0	2	18	88.9
Vegetation	1	37	3	41	90.2
Land	1	1	39	41	95.1
Total	18	38	44	100	
Prod Acc(%)	88.9	97.4	88.6		92.0

영상을 활용한 토지피복분류에 있어서 대표적으로 우수한 SVM 모델과 비교하여 신경망 모델인 ANN 및 DNN의 토지피복분류 정확도를 평가하였다. ANN 모델에 의한 피복분류는 상대적으로 저조한 정확도를 나타내었지만, DNN 모델에 의한 피복분류는 SVM 모델을 이용한 분류에 비해 전체 정확도는 1.0% 향상되고, 전체 항목에 있어서는 88.6% 이상의 정확도를 확보하는 우수한 분류 결과를 확인하였다.

그러나 본 연구에서는 단일시기 위성영상만을 사용하였고 분류 항목을 물과 식생, 육지의 세 가지로 한정하였다는 한계점이 있으며, 향후 연구를 통해 보다 많은 데이터와 은닉층을 이용하여 다양한 항목을 분류 및 검증해야 할 것으로 판단된다.

결 론

원격탐사 분야에서 토지피복분류는 전형적인 응용 연구 방법의 하나이며, 머신러닝 기반의 SVM 모델이 대표적으로 활용되고 있다. 한편으로 신경망 모델을 이용한 피복분류에 대한 관심이 높아지고 있으나 저해상도 위성영상을 이용한 연구가 대부분이며 특히 고해상도 국내위성인 KOMPSAT 영상을 이용한 연구는 미흡한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 고해상도 위성인 KOMPSAT-3 영상을 이용하여 대표적인 분류 기법인 SVM 모델과 신경망 모델인 ANN 및 DNN의 토지피복분류 정확도를 비교 · 평가하였다. 경주시 인근 해안지역의 고해상도 KOMPSAT-3 위성영상을 취득하여 훈련자료를 제작하고, 물, 식생, 육지의 세 가지 항목을 SVM, ANN 및 DNN의 세 가지 모델로 분류하였다. 분류 결과에 대해 오차행렬을 이용한 정량적 평가 결과 DNN 모델을 통한 토지피복분류가 상대적으로 가장 우수한 결과를 나타냈다는 것을 확인하였다. DNN 모델의 분류 결과는 전체 정확도가 92.0%로 SVM 모델에 비해 1.0% 높았으며, 전체 항목에 있어서도 88.6% 이상으로 상대적으로 높은 정확도를 확보하였다.

그러나 단일시기 위성영상만을 사용하였고 피복분류 항목을 한정하였으며, 검사 지점이 임의의 100개에 불과하다는 점이 한계로 지적될 수 있다. 향후 다중시기의 위성영상을 통해 훈련자료를 보완하고 보다 많은 은닉층을 활용해 다양한 항목을 분류 및 평가한다면 연구의 신뢰성을 높일 수 있을 것이다. KAGIS

REFERENCES

Chakraborty, T., M.S. Alam and M.D. Islam. 2019. Land cover classification from multispectral remote sensing image using k-nearest neighbor, deep neural network, decision tree and SVM Algorithms: a machine learning-based comparison approach. Conference paper of 1st International Conference on Urban and Regional Planning 2019. Dhaka, Bangladesh, Oct. 5, 2019. pp.1-10.

Elhag, M. and S. Boteva. 2016. Mediterranean land use and land cover classification assessment using high spatial resolution data. World Multidisciplinary Earth Sciences Symposium, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Prague, Czech Republic, Sep. 5-9, 2016. Vol. 44(4), 042032.

Heo, S.Y., J.Y. Kim and T.H. Moon. 2018. Predicting crime risky area using machine learning. Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies 21(4): 64-80 (허선영, 김주영, 문태헌. 2018. 머신러닝기반 범죄발생 위험지역 예측. 한국지리정보학회지 21(4):64-80).

Jeon, H.S. and G.S. Cho. 2000. A comparison of neural networks and maximum likelihood classifier for the classification of land-cover. Journal of Korean Society

for Geospatial Information System 8(2):23-33 (전형섭, 조기성. 2000. 토지피복분류에 있어 신경망과 최대우도분류기의 비교. 한국지형공간정보학회지 8(2):23-33).

Jo, W.H., Y.H. Lim and K.H. Park. 2019. Deep learning based land cover classification using convolutional neural network: a case study of korea. Journal of the Korean Geographical Society 54(1):1-16 (조원호, 임용호, 박기호. 2019. 합성곱 신경망을 이용한 딥러닝 기반의 토지피복 분류: 한국 토지피복을 대상으로. 대한지리학회지 54(1):1-16).

Kang, M.S., S.W. Park and K.S. Yoon. 2006. Land cover classification of image data using artificial neural networks. Journal of Korean Society of Rural Planning 12(1):75-83 (강문성, 박승우, 윤광식. 2006. 인공신경망 모형을 이용한 영상자료의 토지피복분류. 한국농촌계획학회 논문집 12(1):75-83).

Kang, N.Y., J.G. Pak, G.S. Cho and Y. Yeu. 2012. An analysis of land cover classification methods using IKONOS satellite image. Journal of Korean Society for Geospatial Information System 20(3):65-71 (강남이, 박정기, 조기성, 유연. 2012. IKONOS 영상을 이용한 토지피복분류 기법 분석. 한국지형공간정보학회지 20(3):65-71).

Kim, D.H., K.Y. Hwang and Y. Yoon. 2019. Prediction of traffic congestion in seoul by deep neural network. The Journal of The Korea Institute of Intelligent Transport Systems 18(4):44-57 (김동현, 황기연, 윤연. 2019. 심층인공신경망(DNN)과 다각도 상황 정보 기반의 서울시 도로 링크별 교통혼잡도 예측. 한국ITS학회논문지 18(4):44-57).

Kim, H.O. and J.M. Yeom. 2012. A study on object-based image analysis methods for land cover classification in agricultural areas. Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies 15(4):26-41 (김현옥, 염종민. 2012. 농촌지역 토지피복분류를 위한 객체기반 영상분석기법 연구. 한국지리정보학회지 15(4):26-41).

Kim, Y.K. 2020. A study on urban land cover classification using object-based image analysis(OBIA) techniques. Journal of The Korean Cadastre Information Association 22(1):122-144 (김윤기. 2020. 객체기반영상분석기법을 이용한 도시토지피복분류에 관한연구. 한국지적정보학회지 22(1):122-144).

Ko, S.Y., G. Jun and J.H. Won. 2016. HyperConv: spatio-spectral classication of hyperspectral images with deep convolutional neural networks. The Korean Journal of Applied Statistics 29(5):859-872 (고세윤, 전구, 원중호. 2016. 심층 컨볼루션 신경망을 사용한 초분광 영상의 공간 분광학적 분류 기법. 응용통계연구 29(5):859-872).

Ku. C.Y. 2007. Generation of the land cover map with high resolution satellite image. The Geographical Journal of Korea 41(1):83-94 (구자용. 2007. 고해상도 위성영상을 이용한 토지피복도 제작기법 연구. 국토지리학회지 41(1):83-94).

Lee, H.J., J.H. Ru and Y.G. Yu. 2010. Extracting high quality thematic information by using high-resolution satellite imagery. Journal of Korean Society for Geospatial Information Science 18(1):73-81 (이현직, 유지호, 유영걸. 2010. 고해상도 위성영상을 이용한 정밀 주제 정보 추출. 대한공간정보학회지 18(1):73-81).

Lee, M.B., N.S. Kim, G.R. Lee and U. Han.

2005. A study on the environmental changes of coastal area in oncheon gun of pyeongnam province by neural network classification using satellite images, West Coast of North Korea. Journal of the Korean association of regional geographers 11(2):278-290 (이민부, 김남신, 이광률, 한욱. 2005. 위성영상의 신경망 분류에 의한 평안남도 온천군 해안지역의 환경 변화 연구. 한국지역지리학회지 11(2):278-290).

Lee, M.J., S.R. Lee and S.W. Jeon. 2012. Landslide hazard mapping and verification using probability rainfall and artificial neural networks. Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies 15(2):57-70 (이명진, 이사로, 전성우. 2012. 미래 확률강우량 및 인공신경망을 이용한 산사태 위험도 분석 기법 개발 및 검증. 한국지리정보학회지 15(2):57-70).

Lim, H.Y., H.S. Kim, J.S. Choi and S.H. Song. 2005. A study on efficient topography classification of high resolution satelite image. Journal of Korean Society for Geospatial Information System 13(3):33-40 (임혜영, 김황수, 최준석, 송승호. 2005. 고해상도 위성영상의 효율적 지형분류기법 연구. 한국지형공간정보학회지 13(3):33-40).

Moon, T.H. 2000. Integrated simulation system of GIS and ANN for land price appraisal. Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies 3(2):1-10 (문태헌. 2000. GIS 기반 지가산정 및 시뮬레이션 시스템. 한국지리정보학회지 3(2):1-10).

Na, H.S. and J.S. Lee. 2014. Analysis of land cover characteristics with object-based classfication method -focusing on the DMZ in Inje-gun, Gangwon-do-. Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies 17(2):121-135 (나현섭, 이정수. 2014. 객체기반 분류기법을 이용한 토지피복 특성분석 -강원도 인제군의 DMZ지역 일원을 대상으로-. 한국지리정보학회지 17(2):121-135).

Song, A.R. and Y.G. Kim. 2017. Deep learning-based hyperspectral image classification with application to environmental geographic information systems. Korean Journal of Remote Sensing 33(6):1061-1073 (송아람, 김용일. 2017. 딥러닝 기반의 초분광영상 분류를 사용한 환경공간정보시스템 활용. 대한원격탐사학회지 33(6):1061-1073).

Yang, I.T., S.M. Han and J.K. Park. 2002. An application of artificial intelligence system for accuracy improvement in classification of remotely sensed images. Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry, and Cartography 20(1):21-31 (양인태, 한성만, 박재국. 2002. 원격탐사 영상의 분류 정확도 향상을 위한 인공지능형 시스템의 적용. 한국측량학회지 20(1):21-31).

Yoon, Y.S., Y.S. Kim and Y.S. Kim. 2007. A study on the object-based classification method for wildfire fuel type map. Aerospace Engineering and Technology 6(1):213-221 (윤여상, 김윤수, 김용승. 2007. 산불연료지도 제작을 위한 객체기반 분류 방법 연구. 항공우주기술 6(1):213-221).

Xu, C.X., J.H. Lim, X.M. Jin and H.C. Yun. 2018. Land cover mapping and availability evaluation based on drone images with multi-spectral camera. Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography 36(6):589-599 (서춘욱, 임재형, 김형매, 윤희천. 2018. 다중분광 카메라 탑재 드론 영상 기반

토지피복도 제작 및 활용성 평가. 한국측량학회지 36(6):589-599).