

## 고해상도 위성영상 및 기후·지형 데이터를 이용한 DMZ 불모지의 유형화

이아영<sup>1)</sup> · 신현탁<sup>2)</sup> · 박기쁨<sup>1)</sup> · 정지영<sup>3)</sup> · 성찬용<sup>4)</sup>

<sup>1)</sup> 국립수목원 DMZ자생식물원 연구원 · <sup>2)</sup> 국립수목원 DMZ자생식물원 연구관

<sup>3)</sup> 국립수목원 DMZ자생식물원 연구사 · <sup>4)</sup> 한밭대학교 도시공학과 교수

### Classification of the damaged areas in the DMZ (demilitarized zone) using high-resolution satellite images and climate and topography data

Lee, Ah-Young<sup>1)</sup> · Shin, Hyun-Tak<sup>3)</sup> · Bak, Gi-Ppeum<sup>1)</sup> · Jung, Ji-Young<sup>3)</sup> and Sung, Chan-Yong<sup>4)</sup>

<sup>1)</sup> DMZ Botanic Garden, Korea National Arboretum, Researcher fellow,

<sup>2)</sup> DMZ Botanic Garden, Korea National Arboretum, Researcher,

<sup>3)</sup> DMZ Botanic Garden, Korea National Arboretum, Senior researcher,

<sup>4)</sup> Department of Urban Engineering, Hanbat National University, Professor.

#### ABSTRACT

In this study, we 1) identified the damaged areas along the south limit line (SLL) of the demilitarized zone (DMZ) by the military's 'DMZ barren land campaign', and 2) categorized the identified damaged areas into a few ecological types. Using high-resolution satellite images, we delineated the total damaged areas to be 1,183.2 ha, which accounted for 50.1% of the 100-m northern buffer regions from the SLL. Of the total damaged areas, 16% were severely damaged, i.e., they had been damaged until recently and so remained barren without vegetation cover. In other areas, the levels of damage were either moderate (59.9%) or slight (24.1%), due to natural succession that turned those areas to grassland or forest. Using satellite image-derived land cover maps and climatic and topographic data, we categorized the damaged areas into seven types: lowland grassland (19.8%), western lowland forest (21.4%), low-altitude forest (25.5%), mid-altitude forest (18.4%), high-altitude forest (6.8%), vicinity in east coast (7.9%), and waterbody (0.2%). These types can be used to identify proper measures to restore ecosystems in the DMZ for now and after Korean reunification.

**First author** : Lee, Ah-Young, DMZ Botanic Garden, Researcher fellow, 916-70, Punchbowl-ro, Haean-myeon, Yanggu-gun, Gangwon-do, 24564, Republic of Korea,  
Tel : +82-33-480-3037, Email : ahyoungs@korea.kr

**Corresponding author** : Sung, Chan-Yong, Dept. of Urban Engineering, Hanbat National University, Professor, 125, Dongseo-daero, Yuseong-gu, Daejeon, 34158, Republic of Korea  
Tel : +82-42-821-1186, Email : cysung@hanbat.ac.kr

**Received** : 29 October, 2019. **Revised** : 19 February, 2020. **Accepted** : 18 February, 2020.

*Key words* : DMZ barren land campaign, DMZ restoration, Vegetation reintroduction, Ecosystem classification

## I. 서 론

남북한 접경지역의 DMZ(demilitarized zone; 비무장지대)는 한국전쟁 이후 60여 년 동안 인간의 접근이 통제되어 다양한 야생 동·식물이 서식하는 생물다양성의 보고이다(Shin et al., 2016; National Institute of Environmental Research, 2017). DMZ는 남북한 분단이라는 정치적 상황이 만들어낸 특이한 생태환경으로 국내뿐만 아니라 세계적인 관심을 받고 있다. 이에 정부도 DMZ를 국가 핵심생태축으로 지정하였고(Ministry of Environment, 2015), 유네스코 생물권보전지역(Biosphere Reserve)과 IUCN(International Union for Conservation of Nature; 세계자연보전연맹)의 KBA(Key Biodiversity Area; 핵심생물다양성지역)로 지정하려는 등, DMZ 지역의 생물다양성을 보존하기 위한 다양한 노력이 이루어지고 있다(Korea National Arboretum, 2017). 이와 같은 노력에도 불구하고 DMZ 내부와 인근 지역 생태계는 남북한 군의 군사작전과 자연적·인위적 산불 등으로 심각하게 훼손된 상태이다(Kim, 2010). 국군은 ‘DMZ 불모지 작전’이라는 이름으로 DMZ 철책과 초소 등 군사시설 인접 지역에서 시야 확보를 위해 주기적으로 식생을 제거하고 있고, 북한군도 비슷한 군사 활동을 수행하고 있는 것으로 보인다. 이로 인해 DMZ 인근에는 식생 훼손지가 형성되어, 주변 생태계에 심각한 영향을 주고 있을 뿐만 아니라, 강우시 심각한 토사 유출로 군사시설 유지와 관리도 어려운 상황이다(Kim and Cho, 2005). 따라서, DMZ 내 군사시설 인접 지역에 형성되어 있는 불모지에 대한 체계적인 식생 복원이 시급한 실정이다.

이러한 DMZ 불모지 복원을 위해서는 DMZ 내 군사작전으로 식생이 훼손된 ‘불모지’의 환경

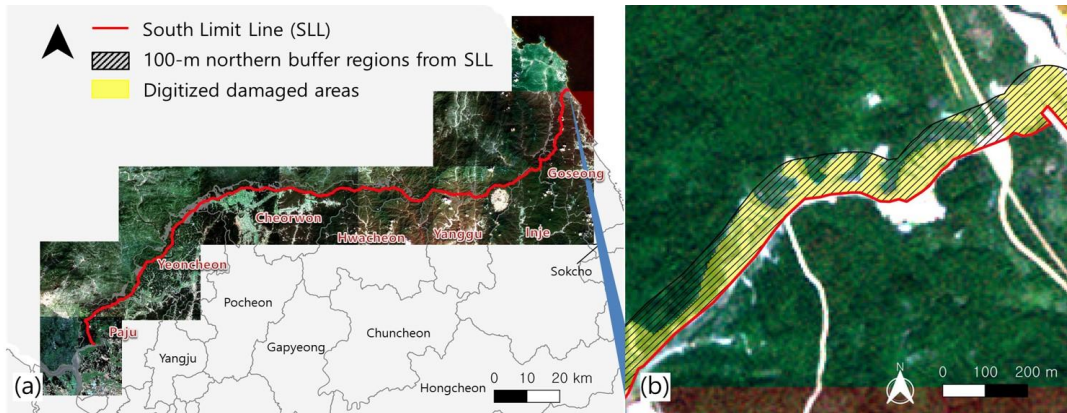
여건에 맞는 복원기법을 도입하여야 한다. 하지만 불모지의 규모가 워낙 커 모든 불모지를 개별적으로 분석하여 적정 복원기법을 도입하는 것은 불가능하기 때문에, 대신 불모지의 환경요인을 고려하여 불모지를 몇 개의 유형으로 분류함으로써 유형별 적정 복원기법을 도입하는 것이 현실적인 대안이다. 하지만 DMZ는 지역 특성상 수치지형도와 같은 기초적인 공간 데이터조차 구축되어 있지 않을 뿐만 아니라(Korea National Arboretum, 2017), 민간인 출입이 엄격하게 제한되고 유실 지뢰들로 현장조사 또한 사실상 불가능하여(Sung, 2015), 불모지 유형화를 위한 환경변수 데이터 확보가 쉽지 않다. 지금까지의 관련 선행연구를 살펴봐도, DMZ 인접 지역 훼손지에 관한 연구는 일부 있으나, DMZ 내부에 관한 연구는 거의 없음을 알 수 있다(Lee et al., 2015; Choi et al., 2016; Sung et al., 2016, 2017).

이에 본 연구에서는 고해상도 위성영상인 Rapideye 영상을 활용하여 DMZ 남방한계선 철책을 따라 형성된 DMZ 내부 불모지를 파악하고, 이들 불모지의 환경적 특성을 고려한 불모지 유형화를 수행하여, 향후 불모지 복원 계획 수립을 위한 기초자료를 제공하였다.

## II. 재료 및 방법

### 1. 연구대상지

본 연구의 연구 대상은 DMZ 전 구간 남방한계선 철책을 따라 군의 불모지 작전으로 식생이 심각하게 훼손된 ‘불모지’이다(Figure 1a). 단, 불모지가 어느 정도 규모로 형성되어 있는지 파악하기 위해서 전체 연구대상지 면적 대비 불모지 면적비율을 산정하였는데, 이때 면적 산정을 위해 전체 연구대상지를 ‘DMZ 남방한계선 북



**Figure 1.** (a) a map showing the entire study area, and (b) an enlarged map with digitized damaged areas

쪽 100m 지역'으로 설정하였다(Figure 1b). 군의 불모지 작전의 정확한 규모는 알 수 없으나 1968~1969년 사이에 DMZ 일대를 불모지화하기 위해 비무장지대 남측 철책 양쪽 100m, 전술도로, 초소 등 총면적 72.7km<sup>2</sup>에 달하는 지역에 제초제를 살포하여 식생을 제거하였다는 기록이 있어(Lim, 2000), DMZ 남방한계선 북쪽 100m 지역까지를 군의 불모지 작전의 대상으로 간주하여 연구를 진행하였다.

DMZ 남방한계선은 연구대상지의 서쪽 경기도 파주시 장단면 임진강 하류에서 시작하여 경기도 연천군, 강원도 철원군, 화천군, 양구군, 인제군을 거쳐 강원도 고성군 현내면 해안에서 끝나며, 연구대상지 철책의 총 길이는 224km이다(Figure 1a). 휴전 협정에 따른 남방한계선은 군사분계선에서 남쪽으로 2km 지점을 연결하는 선이지만(Shin et al., 2016), 실제로는 군에서 설치한 철책이 남방한계선 역할을 하고 있다. 이 철책은 Rapideye 위성영상에서 쉽게 구분할 수 있으므로, 본 연구에서는 남방한계선을 Rapideye 영상에서 직접 디지털화하여 구획하였다(Figure 1b).

## 2. 데이터

### 1) 고해상도 위성영상

「국가공간정보에 관한 법률」에 따라 제정된 '위성정보 보안관리 규정'에서는 국가보안시설

이 촬영된 고해상도 위성영상(공간 해상도 4m 초과)의 공개를 제한하고 있다(Ministry of Public Administration and Security, 2008). 이에 따라 국내에서 고해상도 위성영상을 활용하려면 보안당국의 검열을 통해 군사보안시설을 암영 처리한 영상을 이용하여야 하는데, 군사시설들이 대부분인 DMZ 특성상, 검열 후 고해상도 영상은 데이터로서 가치를 상실한다. 이에 국내법상 검열 없이 활용할 수 있는 가장 고해상도 영상인 Rapideye 위성영상을 이용하여 DMZ 내 불모지 분석을 수행하였다. Rapideye 정사영상(level 3A)의 지상표본거리는 5m이다(Planet Labs, 2016). Rapideye 영상은 가시광선에서 근적외선 영역(440~850nm)을 5개의 밴드에 분광하여 저장하는데, 이 중 690~730nm 영역을 감지하는 Red Edge 밴드는 식생의 분광반사율 곡선(spectral curve)이 급격히 변하는 영역을 감지하도록 설계되어, 식생 분석에 특히 유용하다(Planet Labs, 2016).

본 연구에서는 2017년 이후 촬영된 Rapideye 영상 중 불모지와 식생 피복도가 쉽게 구분되는 여름철 연구대상지 상공에 구름이 없는 영상을 선정하여 분석하였다. 최종 선정된 영상은 2017년 9월 13일부터 9월 14일까지 촬영된 영상이다(Table 1). 연구대상지는 동서로 길어 Rapideye의 촬영 영역(swath width)인 77km를 초과하기

**Table 1.** Specification of the three Rapideye images used in this study

Properties	Images		
	West	Central	East
Location	West coast to Choerwon-gun	Cheorwon-gun to Yanggu-gun	Yanggu-gun to east coast
Date / Time (UTC)	14-Sep-2017, 02:43:39 AM	13-Sep-2017, 02:42:08 AM	13-Sep-2017, 02:23:13 AM
Sensor	Rapideye-4	Rapideye-3	Rapideye-4
Sensor incident angle	15.7°	15.7°	15.1°
Solar angle azimuth / elevation	100.7°/53.9°	162.0°/54.2°	155.0°/52.7°

**Table 2.** Environment variables used for the damaged area classification

Environmental variables	Notes
Altitude	(m)
Slope	(%)
Annual solar radiation	(KWH/m <sup>2</sup> )
Solar radiation in the growing season	Solar radiation during Apr and Oct (KWH/m <sup>2</sup> )
Streamline	Streamlines whose catchment areas >0.3km <sup>2</sup>
Normal temperature in the coldest month	Normal temperature in Jan (°C)
Normal temperature in the warmest month	Normal temperature in Aug (°C)
Average normal temperature in the growing season	Average normal temperature during Apr and Oct (°C)
Annual precipitation	Annual normal precipitation (mm)
Precipitation in the growing season	Normal precipitation during Apr and Oct (mm)
Ratio of forest in 500-m buffer	(%)
Ratio of grassland in 500-m buffer	(%)
Ratio of waterbody in 10-m buffer	(%)

때문에, 연구대상지 전역을 세 구간으로 나눠 촬영한 영상을 모자이크하여 사용하였다.

## 2) DMZ 불모지 구획

DMZ 남북한계선 철책 인접 불모지는 Rapideye 영상을 디지털화하여 구획하였다. 연구 초기에는 영상 분류 알고리즘으로 Rapideye 영상에서 불모지를 추출하려 하였으나, 군의 불모지 작전으로 형성된 불모지라 하더라도 실제로는 작전 후 식생이 활착된 곳이 많아, 분류 알고리즘이 불모지와 초지를 혼동하는 경우가 많았다. 따라서 분류 알고리즘 대신 Rapideye 영상을 육안으로 판독하여 불모지를 구획하였다(Figure 1b).

## 3) DMZ 환경변수

DMZ 내 불모지 유형 분류를 위해서는 불모지 내부와 인근 지역에 대한 환경 데이터가 필요하다. DMZ 특성상 정부 등 국내 기관에서 공식적으로 제공하는 환경변수는 거의 없는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 Rapideye 영상에서 추출한 토지피복현황과 해외에서 제작한 각종 데이터를 최대한 수집하여 불모지 유형 분류에 활용하였다(Table 2).

연구대상지 내 표고 데이터는 ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) 위성영상을 기반으로 제작한 GDEM(Global Digital Elevation Model) version

2(National Aeronautics and Space Administration Jet Propulsion Laboratory, 2017)를 활용하였고, 이 데이터를 분석하여 경사와 연간 일조량, 생장기(4-10월) 일조량, 하천 유선(streamline)을 추출하였다. 일조량은 ArcMap 10.5 Solar Radiation 모듈을 이용해 GDEM 셀 단위로 산정하였다. 연간 일조량은 2018년 1월 1일부터 12월 31일까지, 생장기 일조량은 같은 단위로 2018년 4월 1일부터 10월 31일까지 매일(daily interval=1day), 30분 단위(hourly interval=0.5)로 설정하여 산정하였다. 또한, 하천 유선은 ArcMap 10.5의 Hydrology 모듈을 이용하여 셀의 유역 면적이 30만<sup>m</sup> 이상(flow accumulation이 10,000셀 이상)인 셀만 하천으로 분류하여 추출하였다.

연구대상지 내 기온과 강수량 데이터는 World Clim version 2 데이터로부터 추출하였다. 이 데이터는 1970년부터 2000년까지 기후 평년값을 월 단위로 30arc초(지상표본거리 약 1 km)의 해상도로 추정된 데이터로(Fick and Hijmans, 2017), 본 연구에서는 이 데이터로부터 식물 생장에 영향을 주는 최한월(1월) 평년기온, 최난월(8월) 평년기온, 생장기(4-10월) 평년기온, 연간 평년강수량, 생장기(4-10월) 평년강수량을 산정하였다.

불모지로부터 반경 500m 내 산림면적 비율과 반경 500m 내 초지면적 비율은 Rapideye 영상에서 추출한 토지피복현황도를 이용하여 산정하였다. 또한 반경 10m 내 수역 면적 비율은 Rapideye 영상에서 추출한 토지피복현황도와 ASTER GDEM version 2 데이터를 분석하여 추출한 하천 면적을 합산하여 산정하였다. 토지피복현황도 분석 방법은 다음 절(3.1. 토지피복현황 분류)에 설명하였다.

### 3. DMZ 불모지 유형 분류 방법

#### 1) 토지피복현황 분류

연구대상지에 대한 토지피복현황은 Rapideye

영상을 분류하여 추출하였다. 본 연구에서는 기계학습(machine learning) 방법의 하나인 SVM(Support Vector Machine)을 활용하여(Burges, 1998), 연구대상지의 토지피복유형을 산림과 초지, 농경지, 나지, 건조지(포장도로 및 건축물), 수역의 6개 유형으로 분류하였다. SVM은 기본적으로 선형 분류함수를 이용하나, 다양한 비선형 커널을 적용하여 분류정확도를 높일 수 있다(Burges, 1998). 본 연구에서는 기본 SVM에 비선형 커널 중 RBF(radial-based function)를 적용하여 Rapideye 영상을 비선형 분류하였다.

SVM은 감독분류법(supervised classification method) 중 하나로, 토지피복유형의 분광반사율 곡선을 SVM이 학습할 수 있도록 실제 토지피복유형을 대표하는 픽셀을 선정하여야 한다. 본 연구에서는 각 토지피복유형별로 100개씩의 학습용 픽셀(ground truth pixel)을 선정하여 SVM을 학습시켰다. 본 연구에서 이용한 Rapideye 영상은 3개로, 각 영상의 촬영 시점에 따라 태양 에너지 입사량과 대기 상태들이 각기 다르므로, SVM도 영상별로 개별적으로 학습시켜야 한다. 따라서 각 영상별로 6개 유형별로 100개씩 총 1,800개의 학습용 픽셀을 선정하여 SVM을 학습시켜 각 영상별 토지피복현황을 분류한 다음, 분류된 토지피복현황도를 이미지 모자이크하여 연구대상지 전체에 대한 토지피복현황도를 도출하였다. SVM-RBF의 두 사용자 파라미터인  $\gamma$ 와  $\epsilon$ 은 영상별로 5겹 교차검증(5-fold cross-validation)을 통해 결정하였다.

#### 2) DMZ 불모지 훼손도 분석

DMZ 불모지의 훼손 정도는 Rapideye 영상에서 추출한 토지피복현황을 바탕으로 약간 훼손, 보통 훼손, 매우 훼손의 3단계로 구분하였다. 본 연구에서는 구획된 불모지의 토지피복현황이 산림인 곳을 훼손도가 '약간 훼손'인 곳으로 정의하였는데, 이 유형은 군의 불모지 작전 이후 상당한 시간이 지나 자연천이가 진행되어 관목층

**Table 3.** Confusion matrices of the three SVM classification

<b>West image</b>		<b>Referenced</b>						Total	User's accuracy (%)
		Barren land	Built-up	Farmland	Forest	Grass land	Water body		
<b>Predicted</b>	Barren land	100	0	0	0	0	0	100	100
	Built-up	0	100	0	0	0	0	100	100
	Farmland	0	0	84	1	5	0	90	93.3
	Forest	0	0	1	97	2	0	100	97
	Grassland	0	0	15	2	93	0	110	84.5
	Waterbody	0	0	0	0	0	100	100	100
	Total	100	100	100	100	100	100	600	
	Producer's accuracy (%)	100	100	84	97	93	100		

 $\varepsilon=11.0$ ,  $\gamma=1.2$ 

Overall accuracy=95.7%

Kappa coefficient=0.948

<b>Central image</b>		<b>Referenced</b>						Total	User's accuracy (%)
		Barren land	Built-up	Farmland	Forest	Grass land	Water body		
<b>Predicted</b>	Barren land	90	8	0	0	2	0	100	90
	Built-up	6	91	0	0	0	0	97	93.8
	Farmland	2	0	87	0	2	0	91	95.6
	Forest	0	0	0	98	1	0	99	99
	Grassland	2	0	13	2	95	3	115	82.6
	Waterbody	0	1	0	0	0	97	98	99
	Total	100	100	100	100	100	100	600	
	Producer's accuracy (%)	90	91	87	98	95	97		

 $\varepsilon=12.0$ ,  $\gamma=1.0$ 

Overall accuracy=93%

Kappa coefficient=0.916

<b>East image</b>		<b>Referenced</b>						Total	User's accuracy (%)
		Barren land	Built-up	Farmland	Forest	Grass land	Water body		
<b>Predicted</b>	Barren land	83	7	1	0	2	0	93	89.2
	Built-up	7	93	0	0	0	0	100	93
	Farmland	1	0	89	1	4	0	95	93.7
	Forest	0	0	0	96	0	1	97	99
	Grassland	9	0	9	2	94	1	115	82.6
	Waterbody	0	0	1	1	0	98	100	98
	Total	100	100	100	100	100	100	600	
	Producer's accuracy (%)	83	93	89	96	94	98		

 $\varepsilon=5.0$ ,  $\gamma=5.0$ 

Overall accuracy=93%

Kappa coefficient=0.916

**Table 4.** Land cover status and levels of damage in the study area

Land cover types	Entire study area		Damaged area only		
	ha	%	ha	%	Level of damage
Forest	1,227.7	51.9	285.0	24.1	Slight
Grassland	914.8	38.7	708.7	59.9	Moderate
Barren land	136.4	5.8	129.4	11	Severe
Built-up	72.3	3.1	59.4	5	Severe
Waterbody	12.6	0.5	0.7	0	
Total	2,363.8	100	1,183.2	100	

과 아교목층이 형성된 곳이다. 또한, 토지피복현황이 초지인 곳은 ‘보통 훼손’인 곳으로 군의 작전이 수행된 후 얼마 지나지 않아 초본류가 활착된 정도로 자연천이가 진행된 곳이다. 마지막으로 토지피복현황이 나지 또는 건조지인 곳은 ‘매우 훼손’된 곳으로, 이 유형은 군에 의한 훼손이 아주 최근까지 진행되어 나지가 그대로 드러나 있는 곳 또는 포장도로나 건물이 있는 곳이다.

3) DMZ 불모지 유형화

본 연구에서는 K-Means Clustering(KMC)을 이용하여 Table 2의 13개 환경변수를 특성(feature)으로 하는 특성 공간(feature space)에서 DMZ 불모지의 자연적 군집을 찾아 불모지를 유형화하였다. KMC는 군집 수가 K로 주어지면, K 집단의 중심과 데이터와의 거리의 합이 최소가 되도록 K 군집의 중심과 데이터의 소속 군집을 반복적으로 재계산하는 알고리즘으로, 데이터가 특성 공간에서 자연적인 군집을 형성하고 있을 때 이를 찾아주는 방법이다(Hartigan and Wong, 1979). 본 연구에서는 Rapideye 영상에서 구획한 불모지를 Rapideye 영상의 셀 크기에 맞춰 5m의 래스터 데이터로 변환한 다음, 각 셀이 어떤 군집에 속하는지를 KMC를 이용해 결정하였다. KMC는 특성 공간에서의 상호 배타적인 K개의 군집이 있다고 가정하는데, 여기서 K값은 데이터의 특성을 고려하여 연구자가 결정하여야 한다(Hartigan and Wong, 1979). 본 연구에서는 K값을 3부터 20까지 변경하면서 불모지를 분류해보고, 이 중 실제 현장 상황을 가장 잘 반

영하는 결과가 도출된 K값으로 설정하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 연구대상지 내 토지피복현황

SVM-RBF를 통해 Rapideye 영상을 분류한 결과, 분류정확도가 3개 영상 모두 93% 이상, Kappa 계수도 모두 0.9 이상으로 높게 나타나, 분류된 토지피복현황도가 신뢰할 수 있는 데이터임을 알 수 있었다(Table 3).

연구대상지인 DMZ 남방한계선 철책 북쪽 100m 지역의 토지피복현황은 산림이 1,227.7ha, 초지가 914.8ha로, 각각 전체 대상지의 51.9%와 38.7%를 차지하여, 산림과 초지의 비율이 상대적으로 높음을 알 수 있었다(Table 4). 초지 중 일부는 군의 불모지 작전으로 형성된 것으로 보이나, 하천이나 습지 인근 자연 초지와 전쟁 후 버려진 목논이 천이된 초지도 상당수 있는 것으로 판단된다. 기타 나지와 건조지, 수역이 각각 136.4ha(5.8%), 72.3ha(3.1%), 12.6ha(0.5%)의 비율로 분포하고 있었다.

2. DMZ 불모지 현황

Rapideye 영상에서 연구대상지에 대한 토지피복현황을 추출한 결과, DMZ 불모지 작전으로 형성된 불모지의 전체 면적은 1,183.2ha였다(Table 4). 이는 연구대상지인 DMZ 남방한계선 철책 북쪽 100m 지역의 50.1%에 해당하여, 철책 인근 지대에 불모지가 상당한 비율로 분포하고 있음을 알 수 있었다.

**Table 5.** Classification of the damaged areas through K-means clustering

Types (Abbr.)	Area	
	ha	%
Lowland grassland (LG)	234.5	19.8
Western lowland forest (WLF)	253.5	21.4
Low-altitude forest (LAF)	302.0	25.5
Mid-altitude forest (MAF)	217.4	18.4
High-altitude forest (HAF)	79.9	6.8
Vicinity in east coast (VEC)	93.4	7.9
Waterbody (WB)	2.5	0.2
Total	1,183.2	100

불모지로 구획된 지역의 토지피복현황을 살펴 보면, 나지로 남아있는 지역이 129.4ha로 전체 불모지의 11%를 차지하고 있었고, 59.9%인 708.7ha는 초지, 24.1%인 285.0ha는 산림으로 분류되어, 전체 불모지 중 80% 이상의 지역에서 초지나 산림으로의 자연천이가 진행되어 식생이 활착되고 있음을 알 수 있었다. 특히 24.1%에 이르는 불모지는 산림으로 분류되어, 전체 1/4 가량의 불모지는 불모지화된 이후 상당한 시간이 경과하여 관목 또는 교목이 자라고 있었다. 기타 불모지 중 59.4ha(5%)는 건조지, 0.7ha(0%)는 수역이었다.

이를 바탕으로 DMZ 내 불모지의 훼손도를 판단하면, 식생이 활착되지 않아 나지로 남아 있거나 건조지로 이용되어 훼손도가 ‘매우 훼손’인 불모지는 188.8ha로 전체 불모지의 16%를 차지하였다(Table 4). 이들 지역은 토사유출로 인한 산사태 등의 위험이 크고, 인근 생태계에 미치는 영향 또한 커, 군의 작전에 영향을 주지 않는 최소한의 범위에서라도 복원 대책이 시급히 요구된다. 토지피복유형이 초지인 708.7ha가 ‘보통 훼손’인 불모지로, 이들 지역은 나지에 비해 빈도는 낮으나 여전히 산사태 위험이 있는 지역이었다. 토지피복현황이 산림으로 현재 훼손도가 ‘약간 훼손’인 불모지는 285.0ha로, 군의 시야 확보 필요성이 있는 한 이들 지역에 대한 추가적인 복원은 불가능하다. 하지만 통일 후까지 고려하면 이들 지역도 장기적으로는 극상 생

태계로 복원되어야 할 것이므로, 이들 지역에 대한 지속적인 모니터링과 추가 훼손 방지가 필요하다. 전체 불모지 중 0.7ha는 식생이 자라지 않는 수역으로 훼손도를 따로 판단하지 않았다.

### 3. DMZ 남방한계선 인접 불모지 유형화

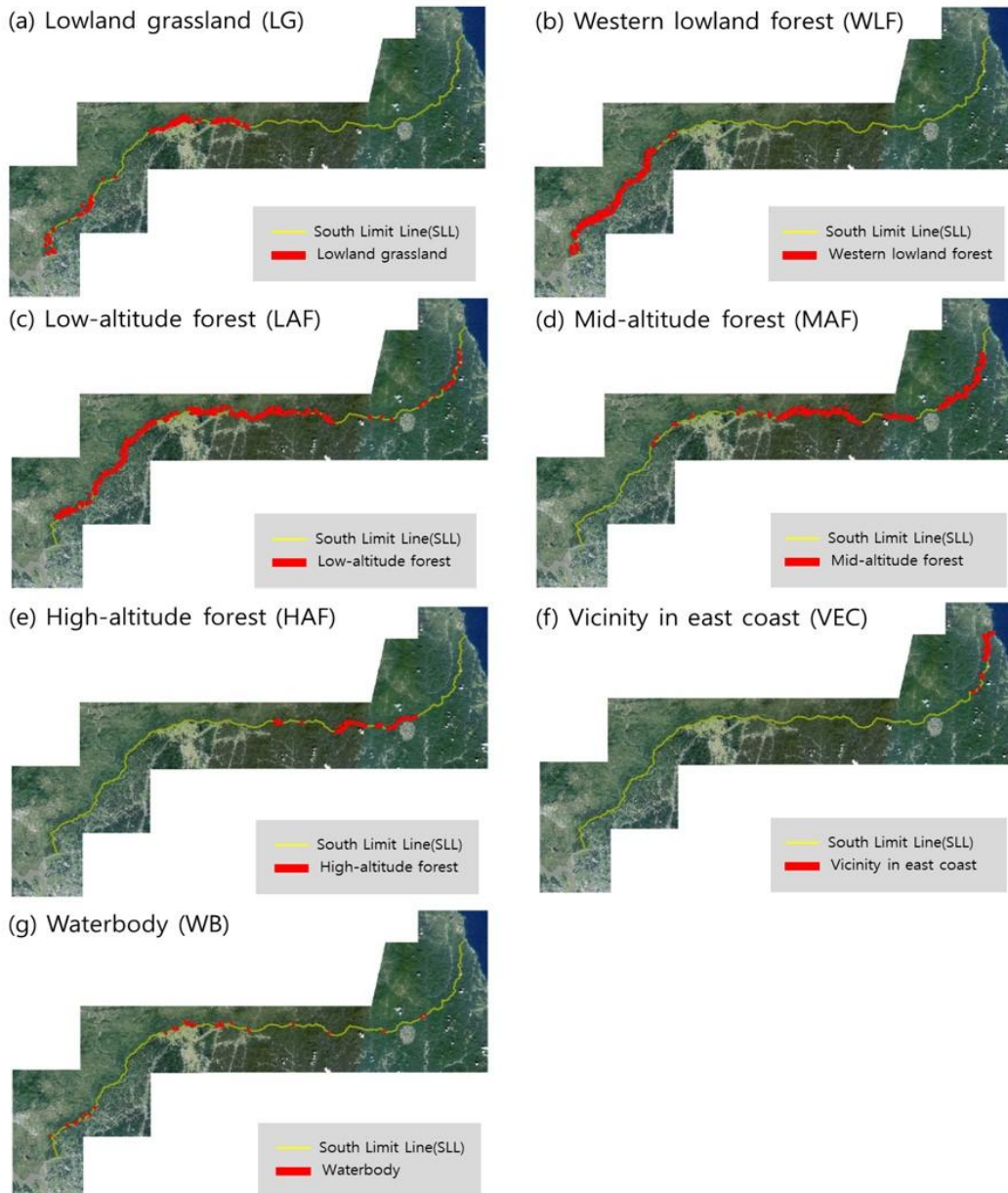
분석 결과, KMC가 불모지를 15개로 분류하도록 설정하였을 때 가장 실제 현장 상황에 맞는 결과가 도출되었다. 15개로 분류하는 것이 가장 현실적인 분류 결과를 도출하기는 하였지만, 분류 결과 15개 유형 중 7개 유형은 면적 1ha 미만의 소규모 유형인 것으로 나타났다. 이들 7개 유형의 위치를 살펴보면, 모두 수역 또는 수역에 인접한 습지에 분포하고 있어, KMC가 육상과 수상 간 추이대(ecotone)의 급격한 환경 변화를 반영하여 수역-습지 생태계를 서로 다른 특성을 가진 별개의 생태계로 구분한 것으로 보인다. 하지만 7개 수역-습지 추이대 유형의 면적이 넓지 않아 개별 유형별 복원 방법을 제시하는 것이 현실적이지 않으므로, 본 연구에서는 7개 유형을 병합하여 하나의 유형(수역)으로 분류하였다(Table 5). 또한, 도출된 유형 중 2개 유형은 실제로는 명확히 구분되지 않아 하나의 유형(저고도 산지 유형)으로 병합하였고, 같은 이유로 다른 2개 유형도 하나(중고도 산지 유형)로 병합하였다. 최종적으로 DMZ 내 불모지를 7개의 유형으로 분류하였고, 각각 저지대 초지,



서부 저지대 산지, 저고도 산지, 중고도 산지, 고지대 산지, 동해안 인근, 수역으로 명명하였다 (Table 5).

저지대 초지 유형(LG) : 저지대 초지 유형은 DMZ 중서부 일대(경기도 파주시 장단면 도라

산역 일대와 연천군 장남면 사미천 일대, 강원도 철원군 철원평야 일대)의 경사가 완만한 초지 경관에 주로 분포하였다(Figure 2a). 이 유형은 최한월(1월) 평년기온은 낮고 최난월(8월) 평년기온은 높은 유형으로(Figure 3), 총면적은



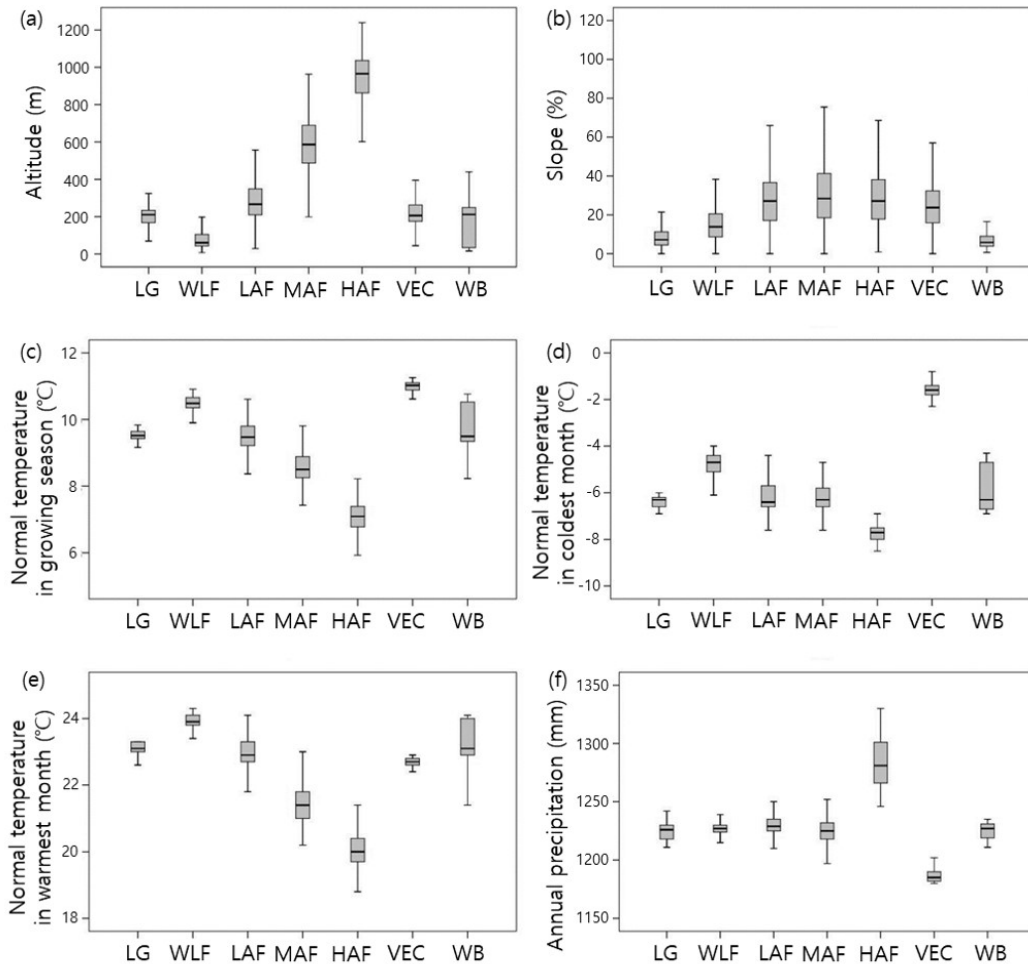
**Figure 2.** Maps of the damaged areas for each type (Abbr. LG; Lowland grassland, WLF; Western lowland forest, LAF; Low-altitude forest, MAF; Mid-altitude forest, HAF; High-altitude forest, VEC; Vicinity of east coast, WB; Waterbody)

234.5ha로 전체 불모지 면적의 19.8%를 차지하였다(Table 5). 이 유형은 보통 훼손의 비율이 가장 높았는데, 이는 이 지역이 판문점 등 군사지역이 많은 지역에 분포하여 불모지 작전으로 식생 훼손이 빈번히 일어났기 때문으로 보인다(Figure 4).

서부 저지대 산지 유형(WLF) : DMZ 서부 저지대 산지 경관에 분포하는 서부 저지대 산지 유형은 경기도 파주시와 연천군에만 집중적으로 분포하며, 철원평야에서 동쪽으로는 분포하

지 않았다(Figure 2b). 이 유형도 최한월(1월) 평년기온은 낮고 최난월(8월) 평년기온은 높은 유형으로(Figure 3), 총면적 253.5ha로 7개 유형 중에 두 번째로 면적이 넓어, 전체 불모지의 21.4%를 차지하였다(Table 5). 이 유형도 저지대 초지 유형과 함께 보통 훼손인 불모지의 비율이 가장 높은 유형 중 하나로, 판문점 등 시설 인근에 대한 불모지 작전이 빈번한 것으로 추정된다(Figure 4).

저고도 산지 유형(LAF) : 이 유형은 서부 및



**Figure 3.** Averages of environmental variables for seven types of the damaged areas (Abbr. LG; Lowland grassland, WLF; Western lowland forest, LAF; Low-altitude forest, MAF; Mid-altitude forest, HAF; High-altitude forest, VEC; Vicinity in east coast, WB; Waterbody)

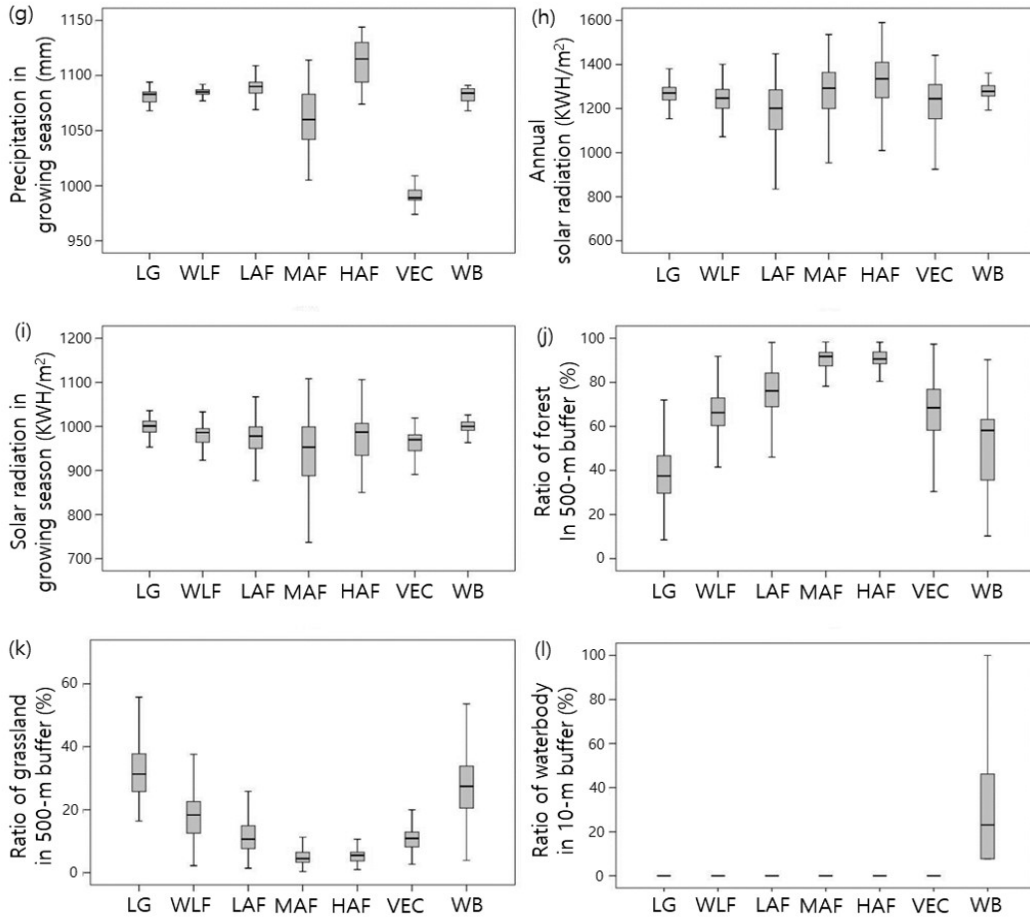


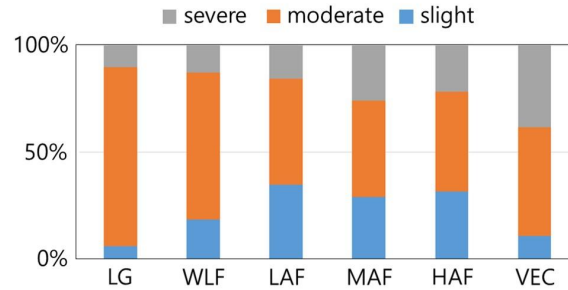
Figure 3. continued

동부 해안지역과 강원도 양구군 일대 고지대를 제외한 DMZ 전역 산지 경관에 고루 분포하였다(Figure 2c). 이 유형은 대부분의 환경변수가 전체 대상지의 평균값에 가까워 DMZ의 가장 일반적인 유형으로(Figure 3), 면적도 302.0ha로 전체 불모지의 25.5%를 차지하여 7개 유형 중 가장 면적이 넓으며, 분포지역도 가장 넓었다(Table 5). 이 유형은 산림으로의 천이가 진행되어 훼손도가 낮은 지역이 많았는데, 이는 서부나 동부 해안지역과 달리 주요 군사시설이 적어 불모지 작전도 자주 수행되지 않았기 때문으로 추정된다(Figure 4).

중고도 산지 유형(MAF) : 중동부 일대 산지

경관에 분포하는 중고도 산지 유형은 철원군 근북면에서 고성군 수동면 구간 중 강원도 양구군 천미산 일대, 가칠봉 인근 고지대 일대의 고지대를 제외한 지역의 불모지들로 구성되어 있다(Figure 2d). 이 유형은 고도가 높고 기온이 낮으며, 백두대간의 서사면에 위치하여 강수량이 낮은 특징을 보였다(Figure 3). 또한, 대부분 산지에 위치하여 반경 500m 내 산지 비율이 높다. 총면적은 217.4ha로 전체 불모지의 18.4%를 차지하였다(Table 5).

고지대 산지 유형(HAF) : 이 유형은 해발 800m 이상의 고지대(철원군 원동면 일대와 철원군 임남면에서 양구군 해안면 고지대)에 제한



**Figure 4.** The levels of damage for seven types of the damaged areas (Abbr. LG; Lowland grassland, WLF; Western lowland forest, LAF; Low-altitude forest, MAF; Mid-altitude forest, HAF; High-altitude forest, VEC; Vicinity in east coast, WB; Waterbody)

적으로 분포하였다(Figure 2e). 전체 유형 중 해발고도가 가장 높으며 기온 또한 가장 낮았다(Figure 3). 이 유형은 백두대간의 동사면에 위치하여 쾨 현상으로 인해 강수량이 높은 특성을 보인다. 총면적은 79.9ha로, 전체 불모지의 6.8%를 차지하였다(Table 5). 이 유형은 앞의 중고도 산지 유형과 함께 훼손도가 약간 훼손인 지역과 매우 훼손인 지역 비율이 모두 높았는데(Figure 4), 이는 이 지역의 지형이 험준해 불모지 작전도 자주 수행되지 않지만, 고도가 높고 기온이 낮아 일단 식생이 훼손되면 식생 활착이 타지역에 비해 느리게 진행되기 때문으로 보인다.

동해안 인근 유형(VEC) : 이 유형은 동해안 일대 고성군 수동면에서 현내면 일대 초지와 산지가 혼재된 해발 300m 이하 저지대에 제한적으로 분포하였다(Figure 2f). 이 유형은 최한월(1월) 평년기온이 가장 높고 강수량은 가장 낮았다(Figure 3). 총면적은 93.4ha로, 전체 불모지의 7.9%를 차지하였다(Table 5). 이 지역은 훼손도가 심각한 지역의 비율이 가장 높았는데(Figure 4), 이는 2016년 이 지역에서 발생한 대규모 산불의 영향인 것으로 보인다.

수역(WB) : 수역 유형은 경기도 파주시 사미천 유역과 강원도 철원군 철원평야 일대 저수지, 철원군 원동면 북한강 상류 유역 및 인제군 인북천 인근 등 DMZ 전역의 하천 및 저수지 인접 지역에 걸쳐 분포하였다(Figure 2g). 이 유형

은 반경 10m 이내 수공간 면적으로 다른 유형과 확연히 구분되었고(Figure 3), 총면적은 2.5ha로 전체 불모지의 0.2%를 차지하였다(Table 5).

#### IV. 결론

DMZ 남방한계선 인근 지역은 군의 불모지 작전으로 인해 훼손되어 있었다. DMZ 남방한계선 북쪽 100m 지역의 불모지는 1,183.2ha로, DMZ 남방한계선에서 북쪽으로 100m 이내 지역의 절반을 차지하였다. 이들 지역 중 59.9%와 24.1%는 초지와 산림으로 자연천이가 진행되고 있었지만, 16%는 식생이 활착되지 않고 나지가 드러나 있어 산사태가 우려되는 등 훼손이 매우 심한 지역이었다. DMZ 불모지의 환경 특성을 고려하면, 불모지는 저지대 초지, 서부 저지대 산지, 저고도 산지, 중고도 산지, 고지대 산지, 동해안 인근, 수역의 7개 유형으로 분류할 수 있었다. 7개 유형 중 저고도 산지가 전체 불모지 면적의 25.5%를 차지하여 가장 넓게 분포하였으며, 서부 저지대 산지(21.4%), 저지대 초지(19.8%), 중고도 산지(18.4%)의 순으로 분포하고 있었다.

DMZ 남방한계선 철책 인접 지역은 오랜 기간 군의 작전으로 지속적인 생태계 훼손이 이루어져 왔기 때문에, 복원 또한 쉽지 않을 것이고, 이에 따라 통일 후 이 지역을 효과적으로 복원

하기 위한 준비가 필요하다. 불모지 복원을 위해서는 대상지별 생태 특성을 고려하여 적정 복원 식물종을 선정하는 것이 중요한데, 본 연구에서 제시한 불모지 유형 분류 결과가 향후 이 지역 복원을 위한 방법 설정에 중요한 기초자료가 될 수 있을 것이다. 본 연구결과를 활용하여 단기적으로는 매우 훼손된 불모지에 토양 침식을 막기 위한 식생 복원 사업을 진행하여야 하고, 장기적으로는 통일 후 DMZ 생태계 복원 및 보전 계획을 수립하여야 한다.

## References

- Burges CJC. 1998. A Tutorial on Support Vector Machines for Pattern Recognition. *Data Mining and Knowledge Discovery*. 2 : 121-167.
- Choi J, Lee S, Lee SA, Ji SY and Lee PSH. 2016. Evaluation Method Development for Ecological Restorations by Damaged Types. *Journal of the Korean Society of Environmental Restoration Technology*. 19(1) : 121-133. (in Korean with English summary)
- Fick SE and Hijmans RJ. 2017. WorldClim 2 : new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*. 37(12) : 4302-4315.
- Hartigan JA and Wong MA. 1979. Algorithm AS 136: A K-Means Clustering Algorithm. *Journal of the Royal Statistical Society. Series C(Applied Statistics)*. 28(1) : 100-108.
- Kim KG. 2010. Land of Peace and Life, DMZ. Dreammedia. p. 471. (in Korean)
- Kim KG and Cho DG. 2005. Status and ecological resource value of the Republic of Korea's De-militarized Zone. *Landscape and Ecological Engineering*. 1 : 3-15.
- Korea National Arboretum. 2017. Plan for establishing Key Biodiversity Areas(KBAs) of DMZ area. p. 144. (in Korean)
- Lee PSH, Lee S, Lee SA and Choi J. 2015. Development of Evaluation Indices for Ecological Restoration of Degraded Environments Near DMZ in the Republic of Korea. *Journal of the Korean Society of Environmental Restoration Technology*. 18(1) : 135-151. (in Korean with English summary)
- Lim JH. 2000. Management and health effects of veterans exposed to agent orange. *Environmental Forum of National Assembly in Korea*. p.282-297.
- Ministry of Environment. 2015. 3rd Basic Plan for Natural Environment Conservation 2016-2025. Nature Conservation Bureau, Ministry of Environment. p. 175. (in Korean)
- Ministry of Public Administration and Security. 2008. Geographic Information Security Management Regulations authorized by Ministry of Public Administration and Security. URL: <http://www.law.go.kr/admRulInfoP.do?admRulSeq=2000000005158#AJAX> (in Korean)
- National Aeronautics and Space Administration Jet Propulsion Laboratory. 2017. ASTER Global Digital Elevation Map Announcement. URL: <https://asterweb.jpl.nasa.gov/gdem.asp>
- National Institute of Environmental Research. 2017. Survey of ecosystem in DMZ area; Central zone of North area of the Civilian Control Line. National Institute of Environmental Research. p. 233. (in Korean)
- Planet Labs. 2016. Rapideye Imagery Product Specifications. URL: <https://www.planet.com/products/satellite-imagery/files/160625-RapidEye%20Image-Product-Specifications>.

- pdf
- Shin HT, Kwon YH, Kim NG, et al. 2016. DMZ 155 miles. Korea National Arboretum. p. 352. (in Korean)
- Sung CY. 2015. Simulation of crane habitat fragmentation in the North and South Korean border region after Korean reunification. *Landscape and Urban Planning*. 134: 10-18.
- Sung HC, Kim SR, Kang DI, Seo JY and Lee SM. 2016. Analysis on the Type of Damaged Land in DeMilitarized Zone(DMZ) Area and Restoration Direction. *Journal of the Korean Society of Environmental Restoration Technology*. 19(1) : 185-193. (in Korean with English summary)
- Sung HC, Seo JY and Lee SM. 2017. Study on Database Construction of Demilitarized Zone. *Journal of the Korean Society of Environmental Restoration Technology*. 20(1) : 143-150. (in Korean with English summary)