

# 다중시기 Landsat 위성영상으로부터 산출한 토양 수분 지수를 활용하여 지진 발생으로 인한 토양 액상화 모니터링에 관한 연구: 포항시를 사례로\*

박인선<sup>1</sup> · 김경섭<sup>1</sup> · 한병철<sup>1</sup> · 정윤재<sup>2\*</sup> · 구본엽<sup>3</sup> · 한진태<sup>4</sup> · 김종관<sup>5</sup>

## A Study for Monitoring Soil Liquefaction Occurred by Earthquakes Using Soil Moisture Indices Derived from the Multi-temporal Landsat Satellite Imagery Acquired in Pohang, South Korea\*

Insun PARK<sup>1</sup> · Kyoung-Seop KIM<sup>1</sup> · Byeong Cheol HAN<sup>1</sup> ·  
Yun-Jae CHOUNG<sup>2\*</sup> · Bon Yup GU<sup>3</sup> · Jin Tae HAN<sup>4</sup> · Jongkwan KIM<sup>5</sup>

### 요 약

최근 자연재해로 인한 많은 피해가 발생하고 있으며, 특히 국내 지진 발생 추이를 보면 규모 3 이상의 강도 높은 지진이 발생하는 빈도가 증가하고 있다. 2017년 발생한 규모 5.4의 포항 지진에서는 이례적으로 진앙지 인근에서 액상화 현상이 발견되었다. 토양 액상화에 따른 토양 수분지수의 증가를 간접적으로 파악하기 위해서 액상화가능성지수 자료와 다중시기 Landsat-8 위성영상을 활용하여 지진 전후의 토지피복별 원격탐사지수 변화를 분석하였다. 해당 기간의 위성영상을 취득해 정규식생지수(NDVI)와 지표면온도(LST)를 계산하고 액상화 가능 지역에 대해 토양수분지수(SMI)를 산출하여 각 영상을 구성하고 있는 픽셀의 평균값을 분석한 결과 지진 직후 토양 액상화 현상에 따른 토양 수분지수의 증가를 확인할 수 있었다.

2021년 03월 09일 접수 Received on March 09, 2021 / 2021년 03월 17일 수정 Revised on March 17, 2021 /  
2021년 03월 18일 심사완료 Accepted on March 18, 2021

\* This research was supported by Reginal Demand-Specific R&D Support Program from Ministry of Science and ICT (Republic of Korea) (CN20120GB001)

1 ㈜지오씨엔아이 공간정보기술연구소 선임연구원 Senior Researcher, Geospatial Research Center, GEO C&I., Ltd.

2 ㈜지오씨엔아이 공간정보기술연구소 연구소장 Geospatial Research Director, Research Center, GEO C&I., Ltd.

3 ㈜지오씨엔아이 공간정보기술연구소 전무이사 Executive Director, Geospatial Research Center, GEO C&I., Ltd.

4 한국건설기술연구원 인프라안전연구본부 지진안전연구센터 연구위원 Research Fellow, Korea Institute of Civil

Engng. and Building Technology

5 한국건설기술연구원 인프라안전연구본부 지진안전연구센터 수석연구원 Senior Researcher, Korea Institute of Civil Engng. and Building Technology

\* Corresponding Author E-mail : chounge12osu@gmail.com

**주요어** : 자연재해, 지진, 토양 액상화, 액상화가능성지수, 토양수분지수, Landsat-8 위성영상

## ABSTRACT

Recently, the number of damages on social infrastructure has increased due to natural disasters and the frequency of earthquake events that are higher than magnitude 3 has increased in South Korea. Liquefaction was found near the epicenter of a 5.4 magnitude earthquake that occurred in Pohang, South Korea, in 2017. To explore increases in soil moisture index due to soil liquefaction, changes in the remote exploration index by the land cover before and post-earthquake occurrence were analyzed using liquefaction feasibility index and multi-cyclical Landsat-8 satellite images. We found that the soil moisture index(SMI) in the liquefaction region immediately after the earthquake event increased significantly using the Normal Vegetation Index(NDVI) and Surface Temperature(LST).

**KEYWORDS** : *Natural Hazard, Earthquake, Soil Liquefaction, Liquefaction Potential Index(LPI), Soil Moisture Index(SMI), Landsat-8 satellite image*

## 서 론

최근 경주 지진(6. 9.12.)에 이어 포항 지진(17.11.15.)과 같이 국내 지진 발생의 빈도가 증가하면서 자연재해로 인한 많은 피해가 나타나고 있다. 2017년 발생한 포항지진에서는 진앙지 인근인 포항시 북구 흥해읍 망천리와 흥안리 일대에서 액상화(liquefaction)에 기인하는 샌드 보일링(Sand Boiling) 현상이 다수 발생하였다(kim *et al.*, 2020). 토양액상화(Soil liquefaction)란 토양이 응력을 받았을 때 강상과 전단강도를 상실하여 땅속의 물이 빠지지 않고 고여 흙이 마치 액체처럼 반응하는 현상이다(Hazen, 1920). 토양이 액상화 되면 지반이 침하되어 구조물의 붕괴 위험이 커지고 건물이 손상될 가능성이 높아진다. 액상화는 얇은 지하수, 모래와 실트지로 구성된 연약지반, 큰 지진 등으로 인한 충격하중에 의해 지반진동이 가해지는 경우 발생하는 것이 일반적이나, 지진 규모가 작더라도 진앙거리가 가깝고 토사층이 두꺼워 지반이 증폭될 수 있는 조건인 경우에는 포항 지진과 같은 리히터 규모 5.4 이하의 지진에 대해서도 이례적으로 발생할 수 있으며 두터운

토층이 분포한 부울경(부산, 울산, 경남) 동남권 지역에서 과거 액상화 의심 사례(304년 경주, 1643년 울산)가 역사 지진기록에도 나타나 있다 (Ha *et al.*, 2018).

현재 국내에서는 액상화 평가 방법으로 간편 예측법과 액상화가능성지수(LPI, Liquefaction Potential Index)를 사용하고 있다. 간편예측법이 특정 지점에서 깊이에 따른 액상화 여부를 판단하는 것이라면(Seed and Idriss, 1971) 액상화가능성지수(LPI)는 대상지반(Ground surface)에 대한 종합적인 액상화 위험도를 판정하는 방법으로 액상화 발생의 깊이와 발생 가능 층의 두께가 액상화 정도에 미치는 영향을 고려할 수 있다(Iwasaki *et al.*, 1978; Iwasaki *et al.*, 1982).

인공위성의 경우 동일한 지역을 주기적으로 관측한 축적된 데이터를 획득할 수 있기 때문에(Thomas *et al.*, 2007) 위성영상을 활용해서 자연재해를 모니터링 하는 연구는 국내외에서 지속적으로 수행되었다. Sentinel-2 위성영상을 자료를 기반으로 집중호우 전후의 토지피복별 원격탐사지수 변화를 분석하였고(Kim *et al.*, 2020), 열적외선 센서를 탑재한 MODIS 위성 영상을 활용해서 화재를 모니터링 하는 연구

가 수행되었으며(Giglio *et al.*, 2003; Kaufman *et al.*, 1998) Sentinel-1 위성레이더 영상을 활용하여 차분간섭기법(DinSAR)을 적용하여 지진으로 인한 지표변위를 관측하고자 하였다(Salvia *et al.*, 2012).

한편, 국외에서는 MODIS 위성영상을 이용하여 가뭄이 예상되는 지역을 선별하는 연구와(Marcelo *et al.*, 2018) Landsat ORI/TIRS 위성영상으로부터 원격탐사지수를 분석해 정규식생지수(NDVI, Normalized Difference Vegetation Index)와 지표면온도(LST, Land Surface Temperature)를 통해서 토양수분지수(SMI, Soil Moisture Index)를 산출하고 홍수를 예측하는 연구가 진행되었다(Abderrazak *et al.*, 2018).

위와 같이 가뭄과 홍수에 관련하여 토양수분지수(SMI)를 분석한 사례는 있지만 아직까지 지진 전후의 토양수분 변화 및 토양 액상화의 상관관계에 대한 연구는 이루어지지 않았다. 따라서 본 연구에서는 Landsat-8 위성영상을 활용하여 포항 지진 전후로 토양수분지수 변화를 분석하고, 이를 통해 지진과 연관된 토양 액상화 현상을 모니터링 할 수 있는 방안을 제시하고자 한다.

## 연구 방법

### 1. 연구 대상 지역 및 범위

본 연구에서는 공간적 범위로 경상북도 포항시 북구 흥해읍을 설정하였다(그림 1). 포항시 북구(위도: 36.11, 경도: 129.37)에서는 2017년 11월 15일 14시 29분 31초에 리히터 규모 5.4의 지진이 발생하였다. 본진을 기준으로 진앙지는 포항시 북구 북쪽 8km 지점이며, 진원 깊이는 4km이다(KMA(Korea Meteorological Administration), 2017). 포항 지진에서는 국내 지진 관측 사상 처음으로 진앙 주변에서 액상화 현상이 발견되었기 때문에(NDMI(National Disaster Management Research Institute), 2017) 향후 추가 피해 가능성이 잠재되어있는 지역으로 추정해볼 수 있으며 액상화 여부 및 그 정도를 규명하기 위해서 국립재난연구원과 기상청이 공동으로 시추조사를 통하여 확인한 액상화 발생 가능 지반 중 하나가 흥해읍 망천리 논이며 액상화 위험도가 높은 것으로 나타났다(Jung *et al.*, 2018). 흥해 지역은 남쪽을 제외하고는 대부분 산지로 둘러싸여 있으며 망천리는 동-서 방향으로 흐르는 큰 하천인 곡강천과 그 지류인 남쪽으로부터 유입되는 초곡천 사이의 배후지역으로 논, 밭 등의 경작지로 활용

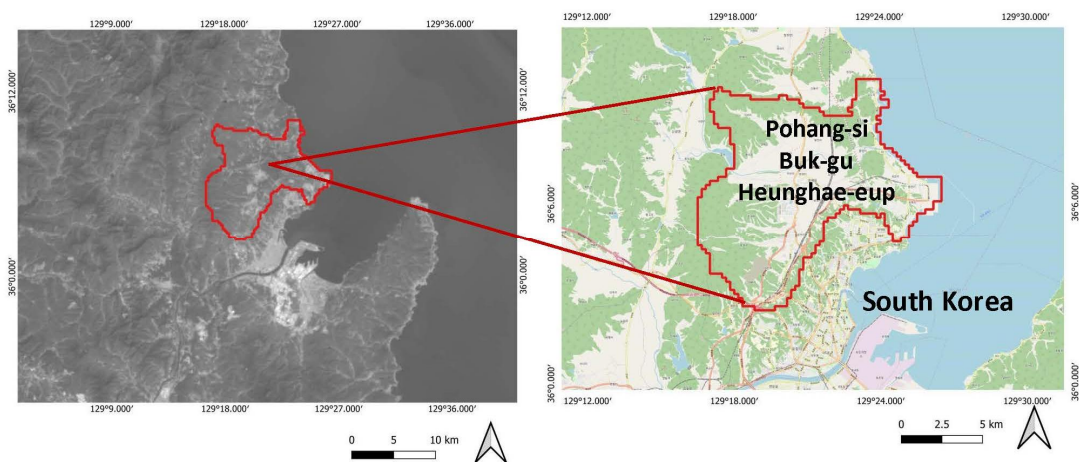


FIGURE 1. Landsat-8 ORI/TIRS Satellite image(left) and study area in Pohang, South Korea(right)

되고 있다(Lee *et al.*, 2017). 지진 피해 범위가 해당 액상화 지역의 면적을 포함하여 반경 약 15km 이내에 분포하고 있기때문에 포항시 북구 흥해읍을 연구 대상 지역으로 선정하였다.

## 2. 연구 자료

액상화 평가는 포항시 북구 흥해읍을 대상으로 총 면적 약 105.3km<sup>2</sup> 이내에 있는 총 202공의 시추 조사 자료를 바탕으로 하였다. 액상화 가능성지수(LPI)는 지표면에서부터 심도 20m 까지 각 깊이에서 산정된 액상화에 대한 안전율(FS, Factor of Safety)인  $F(z)$ 와 액상화 발생 깊이를 고려하기 위한 가중치 함수인  $W(z)$ 를 곱한 값을 적분하여 산정하며 식 1과 같다(Iwasaki *et al.*,1982; Seo *et al.*, 2009).

$$LPI = \int_0^{20} F(z)w(z)dz \quad (1)$$

LPI 범위에 따른 액상화 피해 정도는 다음의 네 가지 단계로 분류하였다. (1) 관심단계는 파랑색(Blue)으로 LPI 값이 0인 지역이며 액상화 위험도가 매우 낮다. (2) 주의단계는 노랑색(Yellow)으로  $0 < LPI \leq 5$ 에 해당하고 액상화 위험도가 낮다. (3) 경계단계는 주황색(Orange)으로  $5 < LPI \leq 15$ 에 해당하고 액상화 위험도가 높다 (4) 심각단계는 빨강색(Red)으로  $LPI > 15$ 에 해당하고 액상화 위험도가 매우 높다. 이와

같이 분류된 액상화 평가 결과를 바탕으로 500년(500Y), 1000년(1000Y), 2400년(2400Y)에 해당하는 지진 재현주기별 액상화 위험도를 250m×250m 격자 형태의 shp 파일로 표현하여 그림 2와 같은 액상화 위험 지도를 만들었다.

### 2) Landsat-8 위성영상

연구지역 탐지를 위해 USGS(United States Geological Survey)의 EarthExplorer(<https://earthexplorer.usgs.gov/>)에서 제공하는 Landsat-8 위성영상을 이용하였다(USGS, 2015). Landsat-8 위성은 2013년부터 발사되어 운영 중이며 16일의 재방문주기를 갖고 있어서 포항지진이 발생한 2017년 11월 15일 전후와 그 비교 대상이 되는 2013년 11월 전후에 해당하는 월별 데이터를 확보하는 데 무리가 없다고 판단하였다. 본 연구에서는 지진 발생 전후 3일의 강우를 조사한 결과 2017년과 2013년의 총 강우량 차이가 미미하였고(차이: 1mm) 위성영상 촬영일 전날 일강수량은 없는 것으로 확인되었다(KMA (Korea Meteorological Administration), 2021). 그러므로 강수량이 지진 전후에 측정된 토양수분지수에 미치는 영향이 적다는 가정하에 연구를 진행하였다. 연구 대상지를 중심으로 관측되는 자료에 대하여 두 년도 모두 운량이 20% 이내인 조건에서 최종적으로 표 1과 같은 위성영상을 수집하였다.

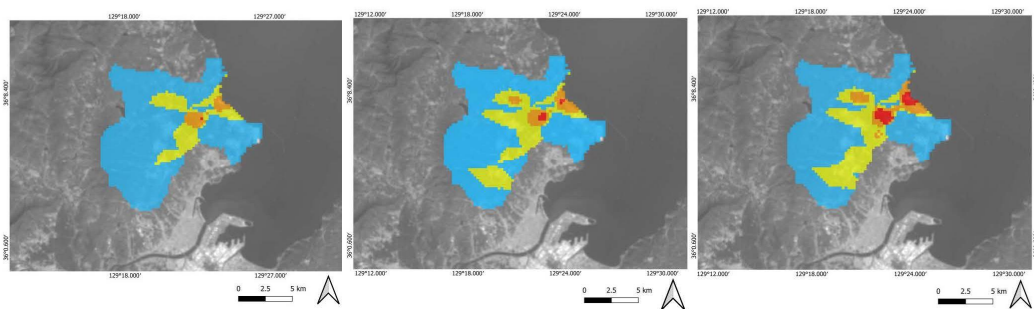


FIGURE 2. Liquefaction potential index(LPI) map for the earthquake frequency of 500 years (left), 1000 years (middle), and 2400 years (right) in Pohang, South Korea.

TABLE 1. Landsat-8 imagery dataset before and after the Pohang earthquake event in 2013 and 2017

Dataset	Date	Platform	ID
I	2017-10-31	Landsat-8	LC08_L1TP_114035_20171031_20171109_01_T1
	2017-11-16	Landsat-8	LC08_L1TP_114035_20171116_20171122_01_T1
	2017-12-02	Landsat-8	LC08_L1TP_114035_20171202_20171207_01_T1
II	2013-10-04	Landsat-8	LC08_L1TP_114035_20131004_20170429_01_T1
	2013-11-05	Landsat-8	LC08_L1TP_114035_20131105_20180204_01_T1
	2013-12-23	Landsat-8	LC08_L1TP_114035_20131223_20180204_01_T1

### 3. 연구 방법

본 연구에서는 포항지진 전후 포항시 북구 흥해읍 일대의 토양수분지수 변화를 분석하였다. 액상화 평가 자료와 Landsat-8 위성 영상을 활용하여 원격탐사지수 영상을 제작하고, 통계를 산출하여 지진 전후의 토양수분지수를 비교하는 과정은 그림 3에서 확인할 수 있다.

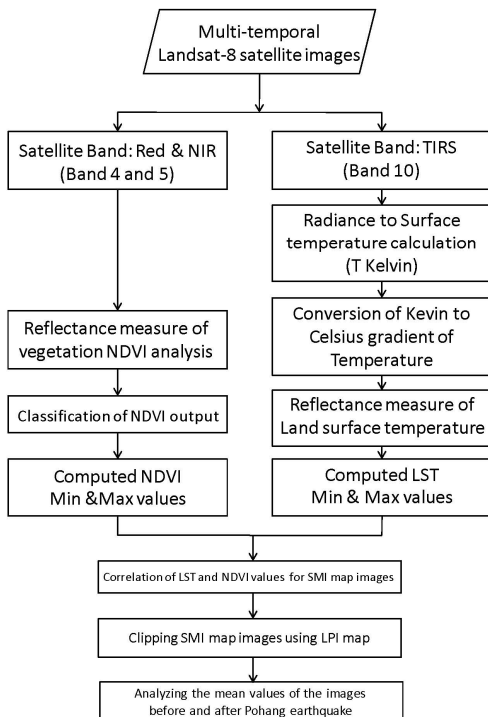


FIGURE 3. Flowchart of the proposed methodology

포항지진 전후에 해당하는 2017년도 Landsat-8 위성 영상(Dataset I)과 그 비교대상으로 같은 시기에 해당하는 2013년도 Landsat-8 위성 영상(Dataset II)을 획득하였고 이를 바탕으로 원격탐사지수의 변화를 분석하기 위해 원격탐사지수 영상을 생성하였다. Landsat-8 위성영상은 가시광선과 근적외선 및 열적외선 밴드를 포함하는 다중분광밴드를 보유하고 있으며 이러한 분광 특성을 이용하면 육안으로 식별이 가능한 객체와 식생의 활성도 및 지표온도 등 육안으로 식별이 불가능한 다양한 정보를 획득할 수 있다(Choung *et al.*, 2020). 또한 Landsat 8 위성의 다양한 관측 파장 중에서 대기의 창 영역에 해당되는 11 μm(Band 10) 자료를 이용하여 지표면온도(LST)를 산출할 수 있다(Choung *et al.*, 2018; Guha *et al.*, 2018).

본 연구에서는 열적외선 밴드인 Band 10으로부터 지표면온도(LST)를 산출하기 위해 아래의 식 2를 통해서 Landsat-8 위성 센서에 도달하는 복사량을 계산하고 식 3을 이용하여 밝기 온도를 계산하였다(NIMS, 2016).

$$L_{\lambda} = M_L \times Q_{cal} + A_L \quad (2)$$

위 식에서  $L_{\lambda}$ 는 Landsat-8 위성 센서에 도달하는 스펙트럼 복사량,  $M_L$ 은 열적외선 밴드(Band 10)에 대한 Radiance multiplicative scaling factor,  $Q_{cal}$ 은 해당 밴드에 대한 Radiance additive scaling factor, 그리고  $A_L$ 은 열적외

선 밴드의 픽셀의 화소 값을 의미한다.

$$T = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_\lambda} + 1\right)} \quad (3)$$

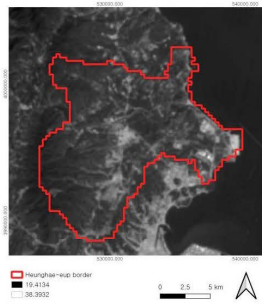
여기에서  $T$ 는 밝기 온도(켈빈 온도),  $K_1$ 과  $K_2$ 는 Landsat-8 위성영상의 열적외선 밴드(Band 10)에 적용되는 상수로서 각각 774.89, 1321.08을 사용한다. 식 3을 통해 밝기 온도를 계산한 후 지표면 방출률(Land Surface Emissivity(LSE))을 계산하는데 일반적으로 지표면 방출률(LSE)은 정규식생지수(NDVI, Normalized Difference Water Index)의 값의 범위에 따라 결정된다(NIMS, 2016; Choung et al., 2020).

정규식생지수(NDVI)는 Landsat-8 위성영상

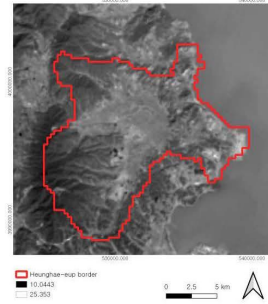
에서 가시광선 중 적색(Red)에 해당하는 Band 4와 근적외선(NIR, Near infrared)인 Band 5를 이용하여 아래의 식 4에 통해 계산할 수 있다. 정규식생지수(NDVI)는 -1에서 +1까지의 값을 가지며 높을수록 식생 분포가 좋고 밀집되어 있음을 나타낸다.

$$NDVI = \frac{Band_5 - Band_4}{Band_5 + Band_4} \quad (4)$$

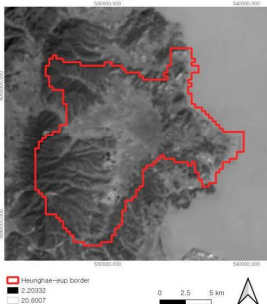
정규식생지수(NDVI) 값의 범위에 따라 지표면 방출률(LSE)을 결정한 후, 식 3에서 산출한 밝기온도( $T$ )를 활용하여 아래의 식 5를 통해 최종적으로 지표면온도(LST)를 절대온도에서 섭씨온도(°C)로 변환하여 최댓값( $LST_{max}$ )과 최솟값( $LST_{min}$ )을 추출하였다.



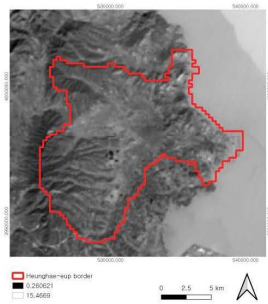
(a) LST image on September 13



(b) LST image on October 31



(c) LST image on November 16



(d) LST image on December 12

FIGURE 4. Land Surface Temperature(LST) map of study area before and after Pohang earthquake in 2017.

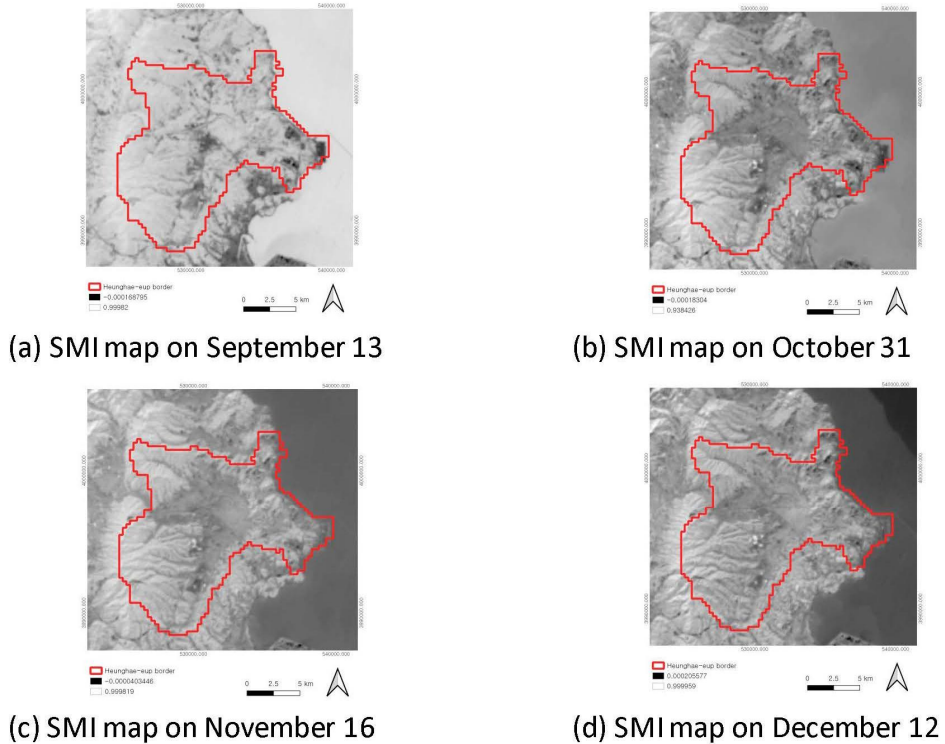


FIGURE 5. Soil Moisture Index(SMI) map of study area before and after Pohang earthquake in 2017.

$$LST = LSE^{1/4} T - 273.15 \quad (5)$$

식 1~5를 통해 2017년도 Landsat-8 위성 영상의 다중 분광 밴드를 활용하여 산출된 지표 온도(LST) 영상은 그림 4에서 확인할 수 있다.

그런 다음 해당 영상들로부터 아래의 식 6을 통해서 토양수분지수를 계산하였다(Hunt *et al.*, 2009).

$$SMI = \frac{LST_{max} - LST}{LST_{max} - LST_{min}} \quad (6)$$

정규식생지수(NDVI)와 지표면온도(LST) 사이의 경험적 매개 변수에 의해 영향을 받는 토양 수분지수(SMI)는 0에서 1까지의 결괏값을

가지며, 1에 가까울수록 토양수분함량이 많고 0에 가까울수록 토양수분함량이 낮은 영역으로 볼 수 있다(Saha *et al.*, 2019). 2017년도 포항지진 발생 전후에 해당하는 토양수분지수 맵(Soil Moisture Index Map, SMI map)은 그림 5에서 확인할 수 있다.

위 과정에 의해 생성된 각 원격탐사지수 영상은 500년, 1000년, 2400년 지진재현주기별 액상화 피해정도에 따라 네 가지 단계에 해당하는 범위로 잘라(Clipping) 액상화 위험도에 따른 영상으로 제작하고 그 평균값을 분석하였다. 포항지진 발생 직후인 2017년 11월 16일자 Landsat-8 위성영상에 대한 2400년 지진재현주기에 따른 액상화 위험 지도 영상은 그림 6과 같다.

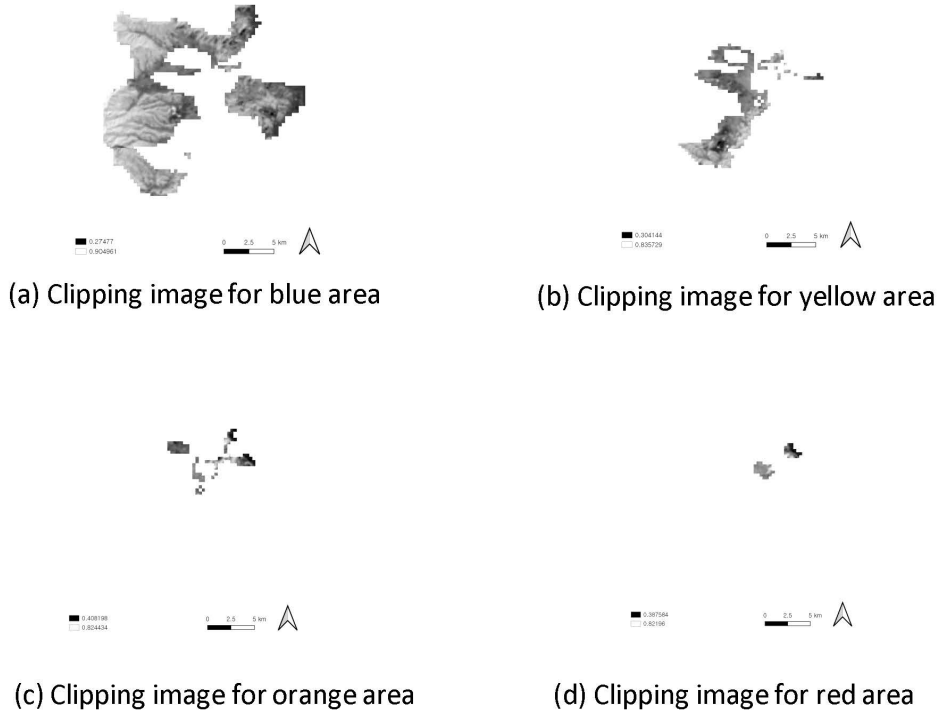


FIGURE 6. Clipping soil moisture index(SMI) map images using Liquefaction Potential Index(LPI) map for the earthquake frequency of 2400 years on November 16, 2017.

### 결과 및 분석

본 연구에서는 경상북도 포항시 흥해읍 일대의 지진 전후 토양수분지수 변화를 탐지하기 위해 다중시기 Landsat-8 위성영상을 활용하여

정규식생지수(NDVI)를 통해서 지표면온도(LST)의 최댓값과 최솟값을 산출하고 토양 액상화 자료를 이용해 지진 재현주기에 따른 해당지역의 토양수분지수(SMI)의 평균과 그 증감을 확인하였다(표 2).

2017년 포항지진이 발생한 직후인 Dataset I

TABLE 2. Statistics of soil moisture index for research area

Dataset	Date	Soil Moisture Index											
		500Y				1000Y				2400Y			
		Blue	Yellow	Orange	Red	Blue	Yellow	Orange	Red	Blue	Yellow	Orange	Red
I	2017-10-31	0.58	0.51	0.53	0.73	0.58	0.52	0.52	0.55	0.58	0.52	0.52	0.52
	2017-11-16	0.65	0.58	0.61	0.78	0.65	0.58	0.59	0.64	0.65	0.59	0.58	0.6
	2017-12-02	0.61	0.58	0.61	0.8	0.61	0.57	0.59	0.65	0.61	0.58	0.58	0.6
II	2013-10-04	0.58	0.55	0.58	0.7	0.58	0.55	0.57	0.57	0.58	0.54	0.57	0.57
	2013-11-05	0.59	0.52	0.55	0.8	0.6	0.52	0.54	0.59	0.61	0.52	0.54	0.55
	2013-12-23	0.64	0.61	0.6	0.78	0.64	0.63	0.59	0.64	0.64	0.64	0.58	0.59



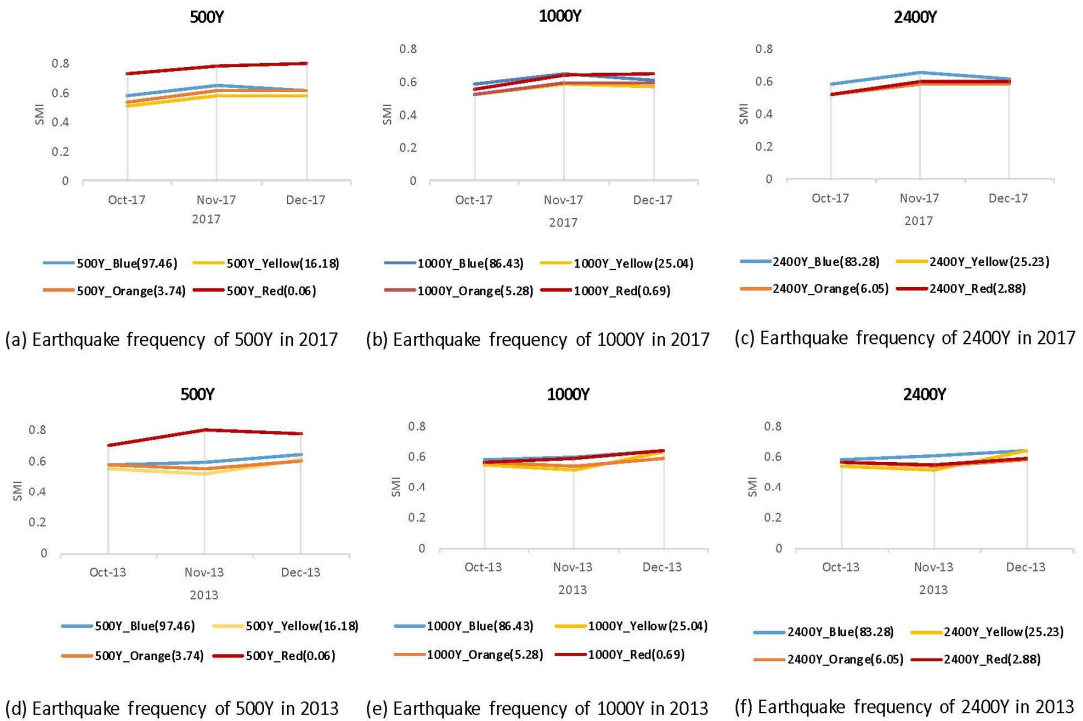


FIGURE 7. Relationship between soil liquefaction and soil moisture index(SMI) for the earthquake frequency of (a) 500 years, (b) 1000 years, and (c) 2400 years in 2017 and (d) 500 years, (e) 1000 years, and (f) 2400 years in 2013.

의 2017년 11월 16일자 영상에서는 10월에 비해 500년(500Y), 1000년(1000Y), 2400년(2400Y)의 모든 지진 재현주기에서 토양수분지수가 증가하는 경향을 확인할 수 있었다. 반면에 비교 대상이 되는 Dataset II의 2013년 영상에서는 10월과 11월 사이에 토양수분지수가 약간 감소하거나 거의 비슷하게 유지되는 경향을 보이는 것을 확인하였다(그림 7).

두 시기의 토양수분지수 평균을 고려했을 때도 그림 7의 Dataset I에서는 10월과 11월 사이에 지진재현주기 (a) 500년(500Y)은 11.48%, (b) 1000년(1000Y)은 13.36%, (c) 2400년(2400Y)은 13.08% 만큼 증가하였고, 같은 시기 Dataset I에서는 (d) 500년(500Y)은 2.07%만큼 증가하였지만 (e) 1000년(1000Y)에서 0.88%, (f) 2400년(2400Y)에서 1.76% 만큼 감소하였다.

그림 7의 (a)와 (d)에 해당하는 지진 재현주기 500년(500Y\_Red)에 해당하는 결과는 액상화 위험도가 매우 높은 심각 단계의 범위가 0.06 km<sup>2</sup>로 다른 단계에 비해 작기 때문에 상대적으로 결괏값이 과도하게 표출되었을 가능성이 있다고 판단된다.

본 연구에서 활용된 토양수분지수(SMI)의 최댓값(1)과 최솟값(0)을 생각해볼 때, Dataset I의 결과는 지진에 의한 토양 액상화 현상을 토양수분지수로 설명하기에 의미 있는 수치라고 여겨진다. 따라서 포항지진 발생 후 나타난 토양 액상화 현상으로 인해 평년과 다르게 토양 수분지수가 상승했을 가능성이 크다고 할 수 있다.

본 연구에서는 포항지진으로 인한 토양액상화 현상을 분석하고자 지진 전후에 해당하는 Landsat-8 위성자료를 취득하였으나 이는 지

진 발생 전후인 2017년과 2013년에 한정되어 있으므로 향후 대상지역의 평년 토양수분지수를 함께 비교할 수 있도록 추가 위성영상을 확보하고 변화를 분석할 필요가 있다. 또한 대상지역 기후 특성 및 다른 수분 지수 등을 활용하여 후속 연구를 계속해 나간다면 연구의 신뢰성을 높일 수 있을 것으로 기대한다.

## 결 론

본 연구는 지진으로 인한 토양 액상화 현상과 이로 인한 토양수분의 변화를 탐지하기 위해 다중시기 Landsat-8 위성영상을 활용하여 포항시 북구 흥해읍 일대의 정규식생지수(NDVI)와 지표면온도(LST)를 분석하고 원격탐사지수 영상을 제작하였다. 대상 지역을 지진 재현주기별 액상화 평가 결과에 해당하는 범위로 잘라 토지 피복별 영상을 제작하고 토양수분지수(SMI)를 산출하여 평균값을 비교한 결과 포항지진 직후에 해당하는 2017년 11월 16일 영상에서 모든 지진재현주기에 대하여 토양수분지수가 약 11% 이상 상승한 것을 탐지할 수 있었다. 비교 대상이었던 2013년 11월 5일 영상에서는 토양수분지수가 감소 또는 유지되는 결과를 보이면서 포항지진 발생 후 토양액상화 현상으로 인해 토양수분지수가 증가했다는 것을 간접적으로 파악할 수 있었다.

이번 연구는 위성영상을 활용하여 지진과 함께 나타날 수 있는 토양 액상화 현상을 토양수분지수를 통해서 모니터링 함으로써 액상화로 인해 야기될 수 있는 지반 침하, 건물 손상 및 구조물의 붕괴등과 같은 추가 피해를 예방하고 새로운 지진 발생을 예측 및 대비하는 데 기여할 수 있을 것이다. 다만 본 연구의 사례는 포항지진이 발생한 2017년과 그 비교 대상인 2013년으로 국한되어 있기 때문에 대상지역의 평년 토양 수분을 함께 비교해본다면 더 정밀한 분석이 가능할 것으로 생각된다. 또한, 추후에는 본 연구에서 사용한 Landsat-8 영상 이외에도 SAR (Synthetic Aperture Radar), GLDAS (Global Land Data Assimilation System),

ASCAT (Advanced Scatterometer), SMAP (Soil Moisture Active & Passive) 등 다양한 위성영상 및 토양수분 산출물 자료를 활용하고 사면재해 위험도 평가를 추가하여 지진과 관련된 자연재해에 대한 종합적인 견해를 제시할 수 있도록 연구를 확장해 나갈 계획이다. **KAGIS**

## REFERENCES

- Bannari, A., H. Rhinane and H. Bahi. 2018. Synergy between SMOS-MIRAS and Landsat-OLI/TIRS Data for Soil Moisture Mapping before, during, and after Flash-Flood Storm in Southwestern Morocco, Chapter 2:5-28.
- Choung, Y.J., K.K. Yu and Y.I. Lee. 2020. A Study on Monitoring the Land Surface Temperature Changes Caused by Constructions of Rainwater Villages Using the Multi-temporal Landsat-8 Satellite Images. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies* 23(1): 30-40 (정윤재, 유기광, 이용익. 2010. 다중시기 Landsat-8 위성영상을 활용한 빗물마을 조성 사업에 의한 지표면 온도 변화 모니터링에 관한 연구. *한국지리정보학회지* 23(1):30-40).
- Choung, Y.J., Y.I. Choung and S.Y. Choi. 2018. Assessment of the Relationship between Air Temperature and TOA Brightness Temperature in Different Seasons Using Landsat-8 TIRS. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies* 21(2):68-79. (정윤재, 정연인, 최수영. 2018. Landsat-8 위성의 열적외 센서를 활용한 대기온도와 밝기온도의 계절별 상관관계 분석. *한국지리정보학회지* 21(2):68-79).
- Giglio, L., J. Desclotres, C.O. Justice and

- Y.J. Kaufman. 2013. An enhanced contextual fire detection algorithm for MODIS, *Rem. Sens, Environm.* 87(2-3): 273-282.
- Gillespie, T.W., J. Chu, E. Frankenberg and D. Thomas. 2007. Assesment and Prediction of Natural Hazards from Satellite Imagery. *Prog Phys Geogr. Oc.t;* 31(5):459-470.
- Guha. S., H. Govi, A. Dey and N. Gill. 2018. Analytical study of land surface temperature with NDVI and NDBI using Landsat 8 OLI and TIRS data in Florence and Naples city, Italy, *EUROPEAN JOURNAL OF REMOTE SENSING.* 51(1):667-678.
- Ha, I.S. and M.S. Jung. 2018. A Case Study on Liquefaction occurred during the Pohang Earthquak. *Earthquake Engineering Society of Korea* 15:2 (하익수, 정만수. 2018. 포항지진 액상화 사례 분석 연구. 한국지진공학회 춘계학술발표회 논문집 15:2).
- Hazen, A. 1920. Hydraulic Fill Dams. *Transactions of the American Society of Civil Engineers.* 83:1717-1745.
- Hunt, E.D., K.G. Hubbard, D.A. Wilhite, T.J. Arkebauer and A.L. Dutcher. 2009. The development and evaluation of a soil moisture index, *Int. J. Climatol.* 29:747-759.
- Iwasaki, T., F. Tatsuoka, K. Tokida and S. Yasuda. 1978. A Practical Method for Assessing Soil Liquefaction Potential Based on Case Studies at Various site in Japan. *5th Japan Earthquake Engineering Symposium.* Vol(2):641-648.
- Iwasaki, T., K. Tokida, F. Tatsuoka, S. Watanabe, S. Yasuda and H. Sato. 1982. Microzonation for soil liquefaction potential using simplified methods. *Proceedings 3rd International Conference on Microzonation, Seattle, USA.* 1319-1330.
- Jung, M.S., H.S. Kang, S.Y. Park and G.H. Na. 2018. Pohang liquefaction risk assessment, *Disaster & Safety.* 20(1):14-19 (정만수, 강효섭, 박성용, 나건하. 2018. 포항 액상 위험도 평가, 재난 안전. 20(1): 14-19.
- Kaufman, Y., C.O. Justice, L.P. Flynn, J.D Kendall, E.M. Prins, L. Giglio, D.E. Ward, W.P. Menzel and A.W. Setzer. 1998. Potential grobal fire monitoring from EOS-MODIS, *J. Geophys. Res.* 103(D24): 32,215-32, 238.
- Kim, J.K., T.Y. Kwak, J.T. Han, B.Y. Hwang and K.S. Kim. 2020. Evaluation of Dynamic Ground Properties of Pohang Area Based on In-situ and Laboratory Test. *JOURNAL OF THE KOREAN GEOTECHNICAL SOCIETY.* 36(9):5-20 (김종관, 광태영, 한진태, 황병윤, 김기석. 2020. 현장실험 및 동적실내실험을 이용한 포항지역 동적 지반특성 평가. 한국지반공학 회논문집 36(9):5-20).
- Kim, K.S., G.S. MOON and Y.J. CHOUNG. 2020. Analysis on the Changes of Remote Sensing Indices on Each Land Cover Before and After Heavy Rainfall Using Multi-temporal Sentinel-2 Satellite Imagery and Daily Precipitation Data. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies* 23(2): 70-82 (김경섭, 문갑수, 정윤재. 2020. 다중 시기 Sentinel-2 위성영상과 일강수량 자료를 활용한 집중호우 전후의 토지피복별 원격 탐사지수 변화 분석. 한국지리정보학회지

- 23(2):70-82).
- Korea Meteorological Administration(KMA). 2017 Earthquake Annual Report. p.214 (대한민국 기상청, 간행물, 2017 지진연보. 214쪽).
- Korea Meteorological Administration(KMA), Open MET Data Portal, Weather Data Service (대한민국 기상청, 기상자료개방포털, 종관기상관측데이터). <https://data.kma.go.kr/data/grnd/selectAsosRltmList.do?pgmNo=36>. (Accessed January 20, 2021).
- Lee, H., J.K. Kim, K. Ko, Y.S. Ghim, J. Kim and S.R. Lee. 2018. Characteristics of sand volcanoes caused by 2017 Pohang Earthquake-induced liquefaction and their paleoseismological approach. *Journal of the Geological Society of Korea* 54(3):221-235 (이호일, 김진철, 고경태, 김용식, 김지성, 이승렬. 2018. 2017 포항지진 액상화에 의한 모래화산의 발달 특성 및 고지진학적 접근. *지질학회지* 54(3):221-235).
- National Institute of Meteorological Sciences (NIMS). 2016. Generation of Land Surface Temperature and Analysis of the Effects in Urban Green Areas Using Landsat-8 Satellite Data. Technical Notes, NIMS, Seogui-po, Korea. p.53 (국립기상과학원. 2016. Landsat 8 위성자료를 이용한 지표면온도 산출 및 도심녹지효과 분석. 국립기상과학원 응용기상연구과 연구노트. 53쪽).
- Saha. A., M. Patil, V.C. Goyal and D.S. Rathore. 2019. Assessment and Impact of Soil Moisture Index in Agricultural Drought Estimation Using Remote Sensing and GIS Techniques, *MDPI*. 7(1):2.
- Salvia, S., S. Stramondoa, G.J. Funningb, A. Ferrettic, F. Sartid and A. Mouratidis., 2012. The Sentinel-1 mission for the improvement of the scientific understanding and the operational monitoring of the seismic cycle, *Remote Sensing of Environment*. 120(15):164-174.
- SEO M.W., C.G. SUN and M.H. OH. 2009. LPI-based Assessment of Liquefaction Potential on the West Coastal Region of Korea, *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea*. 13(4):1-13.
- Seed, H.B. and L.M. Idriss. 1971. Simplified Procedure for Evaluating Soil Liquefaction Potential. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*. 97(SM9):1249-1273.
- United States Geological Survey(USGS). 2015. Landsat 8(L8) Data Users Handbook. <https://www.usgs.gov/land-resources/nli/landsat/landsat-8-data-users-handbook>. (Accessed January 15, 2021).
- Zeri, Mi., R.C.S. Alvalá, R. Carneiro, G. Cunha-Zeri, J.M. Costa, L.R. Spatafora, D. Urbano, M. Vall-Llossera and J. Marengo. 2018. Tools for Communicating Agricultural Drought over the Brazilian Semiarid Using the Soil Moisture Index, *Water*. 10(10):1421. **KAGIS**