한국지반신소재학회논문집 제20권 4호 2021년 12월 pp. 141 ~ 149
J. Korean Geosynthetics Society Vol.20 No.4 December 2021 pp. 141 ~ 149

DOI: https://doi.org/10.12814/jkgss.2021.20.4.141
ISSN: 2508-2876(Print) ISSN: 2287-9528(Online)

초분광정보를 이용한 지반의 함수비 예측 기술의 신뢰성 분석 연구

A study on Reliability Analysis for Prediction Technology of Water Content in the Ground using Hyperspectral Informations

이기철[1], 안희철[2], 박정준[3], 조진우[4], 유승경[5], 홍기권[6]*

Kicheol Lee[1], Heechul Ahn[2], Jeong-Jun Park[3], Jinwoo Cho[4], Seung-Kyong You[5], Gigwon Hong[6]*

[1]*Member, Researcher, UCI Tech Co. Ltd., 313 Inha-ro, Nam-gu, Incheon 22227, Republic of Korea*
[2]*Member, Researcher, Institute of Technology Research and Development, Korea Engineering & Construction, 3-16 Jungdae-ro 25-gil, Songpa-gu, Seoul 05661, Republic of Korea*
[3]*Member, Principal Researcher, Incheon Disaster Prevention Research Center, Incheon National University, 119 Academy-ro, Yeonsu-gu, Incheon 22012, Republic of Korea*
[4]*Member, Senior Researcher, Construction Automation Research Center, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Gyeonggi-do 10223, Republic of Korea*
[5]*Member, Professor, Dept. of Civil Engineering, Myongji College, 134 Gajwa-ro, Seodaemun-gu, Seoul 03656, Republic of Korea*
[6]*Member, Assistant Professor, Dept. of Civil and Disaster Prevention Engineering, Halla University, 28 Halladae-gil, Wonju-si, Gangwon-do 26404, Republic of Korea*

ABSTRACT

In this study, an laboratory experiment was performed for prediction technology of water content in the ground using hyperspectral information. And the spectral reflectance with a specific wavelength band was obtained according to the fine and water content. Through it, the spectral information was normalized with the spectral index of the existing literature, and the relationship with the fine and water contents and the reliability of the prediction technology were analyzed. As a result of analysis, the spectral reflectance is decreased when the water and fine contents are increased under the high water contents. In addition, the reliability of prediction technology of water content was evaluated by examining 7 different spectral index calculation methods. Among them, DVI showed relatively high prediction reliability and was superior to other calculation methods in terms of sensitivity.

요 지

본 연구에서는 초분광정보를 이용한 지반의 함수비 예측 기술을 위해 실내 분광정보 실험을 수행하여 세립분 및 함수비 조건에 따라 특정 파장대역에 따른 분광반사율을 획득하였다. 이를 토대로 기존 문헌의 스펙트럼 지수에 따라 분광정보를 정규화하고, 세립분 및 함수비 조건과의 상관관계 및 예측 기술의 신뢰성을 분석하였다. 상관관계 분석 결과 함수비가 증가할수록 분광반사율은 낮아지며 세립분 함유율이 증가할수록 높은 함수비 조건의 분광반사율은 감소율이 크게 발생하였다. 또한 7가지의 스펙트럼 지수 산정방법을 고찰하여 함수비 예측에 대한 신뢰도를 평가하였다. 이 중 DVI가 비교적 높은 예측 신뢰도를 보이며, 민감도 부분에서도 다른 산정 방법에 비해 우수하여 지반의 함수비 예측 기술 적용에 있어 적합한 스펙트럼 지수인 것으로 판단하였다.

Keywords **:** Water content, Spectral information, Spectral reflectance, Hyperspetral sensor, Spectrum index

1. 서 론

오늘날 건설 시장의 축소와 건설노동자의 고령화 문제 등으로 인하여 자동화는 미래 산업의 필수적인 요소가 되었으며, 생산성 및 안정성을 향상시키기 위한 건설 자동화

Received *30 Nov. 2021,* ***Revised*** *24 Dec. 2021,* ***Accepted*** *24 Dec. 2021*
****Corresponding author***
Tel: +82-33-760-1843; Fax: +82-33-760-1261
E-mail address: g.hong@halla.ac.kr (g. Hong)

기술 연구가 활발히 수행되고 있다(Seo et al., 2020; Sim et al., 2020). 이 중에서 도로 토공 및 포장 공사는 일반적으로 선형적이고 반복적인 특징으로 인해 자동화 적용이 비교적 양호하다고 알려져 있으나 자동화 장비를 이용한 시공자동화, 품질관리 디지털화 측면에서 실제 현장은 다양한 변수를 포함하고 있다.

도로 토공 및 포장 공사 분야에서 품질관리는 주로 현장 지반의 다짐도와 관련이 있다. 다짐도가 확보되지 않으면 자동화 시공 장비와 같은 중장비의 이동이 어려울 뿐 아니라 지지력 감소, 침하 및 균열과 같은 문제가 발생 할 수 있으며, 이는 품질 저하로 이어진다(Song et al., 2015). 따라서 품질관리를 위한 다짐도는 중요하며, 적용이 가능한 수준의 고속화, 사용성, 신뢰성을 확보할 필요가 있다.

일반적으로 표준 다짐 시험(ASTM-D698, 2017)의 결과에 따르면 동일한 다짐에너지가 가해졌을 경우 함수비에 따라 흙의 건조단위중량은 상향 포물선 형태를 가진다. 이때 포물선의 꼭지점은 최대건조단위중량 및 최적 함수비를 나타내며, 해당 상태를 다짐도 100%로 규정하고 있다. 최적 함수비 이외에 함수비에서 다짐도는 100%를 만족할 수 없으며, 이를 만족하기 위해서는 표준 다짐 에너지보다 큰 에너지가 가해져야 한다. 이와 같이 다짐도는 함수비와 밀접한 상관이 있으며, 다짐도와 함수비 변화에 따른 강도정수 변화 특성, 지반의 물리적 특성과 다짐특성의 상관성 분석 등 많은 연구가 수행 되어져 왔다(Kim et al., 2014; Park and Kim, 2017).

따라서 앞선 자동화 개발을 위해서는 다짐도의 품질관리 및 데이터화의 필수적 요소인 지반의 함수비 분석이 필수적이다. 하지만 일반적으로 시공 현장에서 지반의 함수비 평가는 재래식(현장 시료 무게와 건조 후 시료 무게 측정에 따른 함수비 측정) 방법이 적용되고 있으며, 이는 시험 시간이 길고, 숙련도에 따라 오차 범위 달라지는 신뢰성 문제가 존재한다. 또한 시간 및 인력 문제로 인해 전체 범위 측정이 아닌 일부 특정 지점의 포인트 계측이 수행되기 때문에 전반적인 시공 범위의 함수비 측정은 불가능한 실정이다. 이와 같은 재래식 함수비 평가 기법의 문제점으로 인해 많은 연구자들은 함수비 측정 방법을 정량화하고 시간을 줄일 수 있는 형태로 개발하고자 하였다. 이 중 TDR (Time Domain Reflectometry)은 전기적 신호의 전도특성으로 전기신호에 대한 반향시간을 통해 측정하는 전기적 측정 방법으로 1980년대 Topp et al.(1980)이 제시한 뒤 현대에 이르기 까지 개선된 TDR 방법이 꾸준히 제시되고 있다(Lee and Kim, 2021). 또한 지표투과레이더(GPR)를 이용한 체적함수비 및 유전상수의 일정 구간 측정이 수행되기도 하였다(Han et al., 2016)

하지만 기존 함수비 측정 및 예측 연구는 재래식 방법과 마찬가지로 포인트 계측이 주를 이루고 있으며, GPS를 이용한 방법도 한정적인 범위 내에서만 가능하다. 즉, 전체적인 시공 현장의 함수비 측정이 불가능하거나, 시간이 오래 소요 되고, 측정 과정에 있어 수동적인 형태를 취하기 때문에 자동화 측면에서 활용성이 떨어진다. 이에 따라 소요시간 단축 및 자동화를 위해서는 광범위한 지역의 함수비 데이터를 한 번에 수집하고, 이를 자동으로 처리 할 수 있는 방안이 필요한 실정이며, 초분광정보를 이용하면 이 같은 문제를 해결 할 수 있다. 해당 기술은 무인항공기(UAV, Unmanned Aerial Vehicle or Uncrewed Aerial Vehicle)인 드론과 초분광 카메라를 이용한 광범위 촬영 데이터(분광 정보)를 자동화된 전처리과정을 거쳐 함수비로 변환하는 것으로 최종적으로 특정 지역의 함수비가 CCM(Color-coded-map)으로 출력된다. 이 기술의 핵심은 전처리과정을 통한 함수비 변환이며, 변환 과정과 결과에 대한 신뢰성이 무엇보다 중요하다.

분광정보를 이용한 함수비 측정 및 예측은 Park(2003)이 분광반사특성을 활용하여 색상 도표와 함께 토양수분량을 가시적으로 구분이 가능함을 확인한 바 있으며, Lim et al.(2019)은 국내 6종류의 흙에 대해 함수비 변화에 대한 예측 가능성을 분석하였다. 하지만 위 연구들 역시 기존 재래식 방법, TDR, GPR과 마찬가지로 포인트 계측 또는 일부 면적만을 대상으로 하며, 광범위한 지역의 함수비 변환에 관한 연구는 수행되지 않았다.

따라서 본 연구에서는 지반조건에 따른 함수비를 분광기법으로 예측하고 이를 광범위한 도면에 가시적으로 나타낼 수 있는 CCM 기법 적용을 위한 기초연구를 수행하고자 한다. 이를 위해 광범위 및 자동화 함수비 측정 기술 개발을 위해 분광정보를 함수비 데이터로 전환하는 전처리과정을 수행하였으며, 분광정보는 실내실험을 통해 지반 조건 및 함수비에 따라 획득하였다. 이때 분광정보는 파장대별 반사율을 의미하며, 이를 함수비로 1대1 매칭 시키는 것은 불가능하기 때문에 분광정보를 다양한 연구자들에 의해 제시된 스펙트럼 지수(Spectrum index)로 전환하여 지수화 하였다. 최종적으로 스펙트럼 지수와 함수비와의 상관관계를 분석하였으며, 최종적으로 함수비 추출이 가능한 스펙트럼 지수를 선정하였다. 이때 실험 조건은

지반 종류와 함수비(0~12%)로 지반종류는 표준사 기준 세립분(0.075mm 이하) 함유량 0~30% 이다.

2. 분광정보의 전처리과정 원리

분광의 사전적 의미로는 빛을 분광기를 사용하여 파장에 따라 순서대로 나열하는 것으로 Fig. 1과 같다(Endice et al., 2009). 즉, 분광계(프리즘)을 통해 흡수 및 반사된 빛을 파장의 순으로 나열하여 특정 결과(에너지, 반사율, 진동수 등)로 나타내는 것을 의미하며 이 결과를 스펙트럼이라고 한다.

흙과 물 등 모든 물체는 그 종류에 따라 고유의 전자파 반사특성을 가지고 있으며, 분광반사곡선은 물체에 종류에 따라 에너지를 흡수하고 반사하는 파장대가 서로 달라 각 물체가 가지고 있는 고유정보 추출이 가능하다. 이 특성을 이용하면 각각의 물체를 분류하거나 물체의 성분을 분석할 수 있는데 이 중 초분광 센서(Hyperspectural sensor)는 입사되는 빛을 분광시켜 영상의 각 픽셀에 해당하는 지표물의 연속적이고 좁은 파장역으로 수십에서 수백 개의 분광정보를 취득한다. 이에 따라 물질마다 존재하는 고유의 광학적 성질 및 물질의 흡수와 반사 특징에 대한 분석이 가능하며, 기존 다중분광에서는 측정이 불가능하던 수분 또는 양분 부족에 의한 식물의 상태, 잎의 함수량 및 화학적 특성 등 정량적인 분석이 가능하다.

3. 분광기법을 적용한 실내 분광실험

3.1 실내 실험 과정

흙 시료의 세립분 및 함수비 조건에 따른 분광정보 평가를 위한 실내 실험을 위해 Fig. 2와 같은 초분광정보 평가 시스템을 구축하였다. 해당 시스템은 파장대역 400nm~

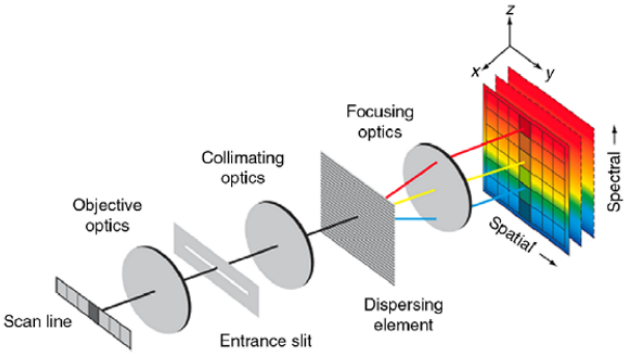


Fig. 1. Principle of Spectroscopyl (Endice et al., 2009)

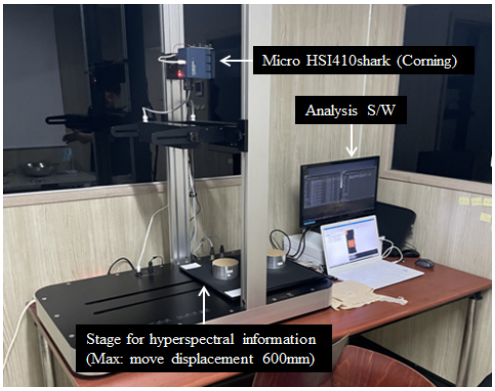
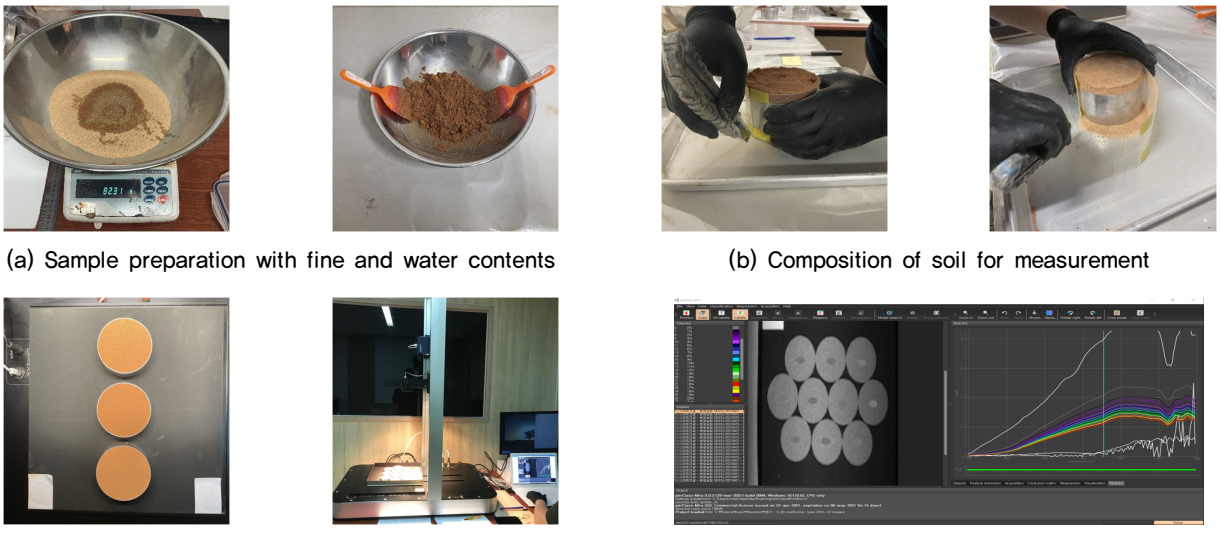


Fig. 2. Evaluation system of hyperspectral information



(a) Sample preparation with fine and water contents

(b) Composition of soil for measurement

(c) Shooting using hyperspectral camera

(d) Check for spectral information

Fig. 3. Processes of laboratory experiment for hyperspectral information

1000nm, 분광해상도 2nm, 150개 밴드수를 가지고 있는 초분광 카메라(Micro HSI410shark, Corning)와 시료 스테이지(최대 이동거리 600mm) 및 분석 S/W로 구성되어 있다.

실내 분광실험 과정은 Fig. 3과 같다. 실험 케이스는 세립분 함유량과 함수비로 세립분(0.075mm 이하 입경의 모래) 0%, 10%, 20%(3개), 함수비 0~12%(2% 증가량, 7개), 오차 검증에 따른 반복 수행 (3번)으로 총 63번 수행되었다. 실험에 사용한 흙 시료는 주문진 표준사에 세립분을 중량비에 맞게 배합하였으며, 함수비 조건을 적용하였다(Fig. 3(a) and (b)). 시료 조성은 시간에 따른 함수비의 변화를 최소화하기 위하여 분광 카메라로 스캔하기 바로 직전에 조성되며(Fig. 3(c)), 스캔 과정 이후 라벨링 작업을 통해 반사율을 획득하였다(Fig. 3(d)). 여기서, 라벨링 작업은 초분광 이미지에 일정 범위를 지정하는 과정으로 해당 범위만큼의 픽셀에 해당하는 분광정보를 평균화할 수 있다.

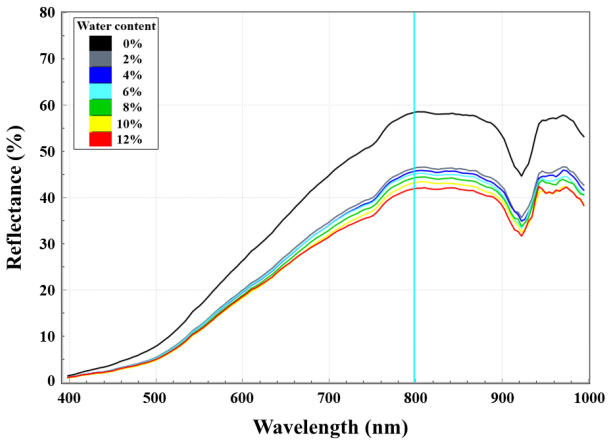
3.2 실내 분광실험 결과

각 세립분 함유율(0%, 10%, 20%)을 기준으로 함수비에 따른 분광정보(파장대역별 분광반사율)는 Fig. 4와 같다. 이때 출력 값은 반복시험에 따른 데이터의 평균값이다. 세립분 함유량과 함수비와는 관계없이 파장대역 800nm 부근에서 가장 큰 분광반사율이 측정되었으며, 이후 감소하다 920nm 부근에서는 상승하는 경향을 보였다. 이는 920nm 부근에서 공기 중 특정 성분으로 인한 분광반사율 저해 요인이 있는 것으로 추정된다.

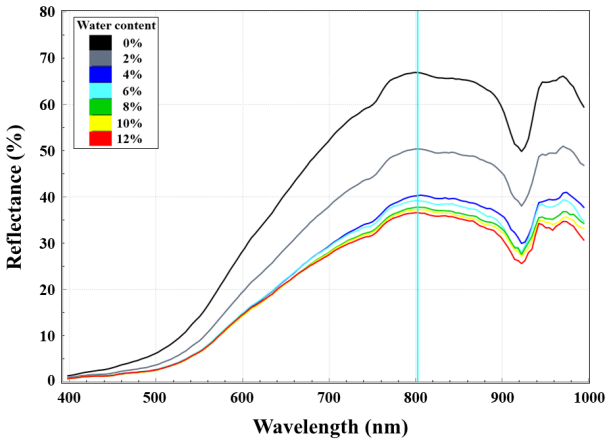
세부적으로 최대 분광반사율을 가진 파장대역 800nm에서의 분광 반사율은 세립분 0% 조건에서 함수비에 따라 43.5~58.3%, 세립분 10% 조건에서 36.9~67%, 세립분 20% 조건에서 33.5~68.5%로 측정되었다. 세립분 조건 20%에서 함수비가 12% 일 때, 분광 반사율은 33.5%로 세립분 0%, 10% 조건의 함수비 12%일 때 분광반사율보다 가장 낮게 나타났다. 즉, 세립분 함유율이 높을수록 측정이 가능한 분광반사율의 한계와 연관이 있으며, 이는 세립분 조건이 높을수록 간극비가 작아지고, 흙 시료의 상부에 표출되는 수분 결정이 증가하여 난반사가 발생하기 때문이다.

파장대역 800nm에서 최대 분광반사율을 산출하였을 때 결과는 Fig. 5와 같다. 함수비가 증가할수록 모든 세립분 조건에서 최대 분광반사율은 감소하는 경향을 확인할 수 있었다. 이는 함수비가 증가할수록 수분 결정에 의한 난반사의 영향으로 반사율이 감소된 것으로 판단된다.

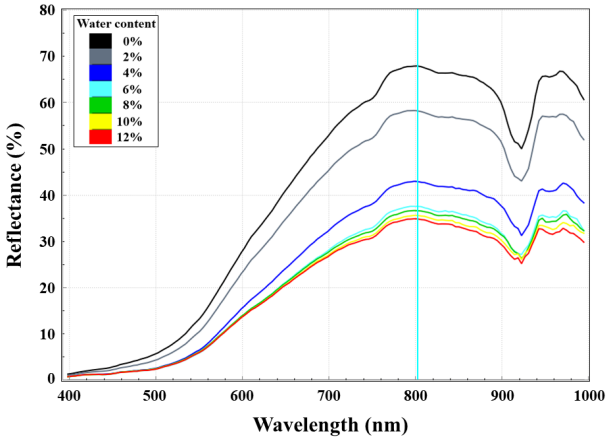
함수비가 0%일 때, 세립분 조건 20%에서 가장 큰 분광반사율을 보이다가 함수비가 증가할수록 분광반사율에 대한 감소율이 가장 크게 나타나면서 함수비 8%에서는 점차 수렴하는 것으로 확인되었다. 이는 함수비가 0%일 때는 세립분에 의한 흙 시료의 색상 차이가 영향을 크게 미



(a) Fines content 0%



(b) Fines content 10%



(c) Fines content 20%

Fig. 4. Reflectance with wavelengths

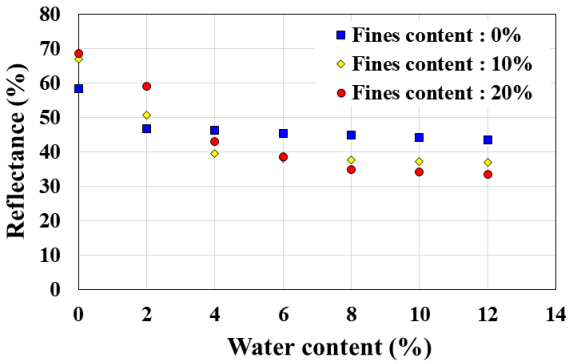


Fig. 5. Reflectance according to water content by fines content

친 것으로 판단되며, 함수비가 증가할수록 수분 결정에 대한 영향이 점차 커지면서 분광반사율이 크게 감소하기 때문이다. 이러한 경향은 세립분 10%에서도 동일하게 나타났으며, 세립분이 증가할수록 흙 시료에 대한 간극비가 작기 때문에 함수비 6% 이상부터는 흙 시료 상부 표면에 나타나는 수분 결정의 영향이 크게 미쳐 분광반사율이 점차 감소한 것으로 판단된다.

4. 함수비 예측을 위한 스펙트럼 지수 적용 결과

4.1 스펙트럼 지수 개요

스펙트럼 지수(Spectrum Index)는 분광실험으로 획득한 파장대별 분광정보(분광반사율)를 이용하여 각각의 스펙트럼 지수 산정방법(DI, RI, NDI, PI, etc.)에 따라 정규화 할 수 있는 지수를 의미한다(Ge et al., 2019). 따라서, 스펙트럼 지수는 분광실험을 통해 얻은 분광반사율을 평가할 수 있는 중요한 수단으로 각기 다른 파장대별 분광반사율의 정규화를 통한 신뢰성 분석이 가능하다.

이와 같은 스펙트럼 지수에 대해서는 국내/외 관련 연구에서 다양하게 적용되어져 왔으나, 실험조건 및 분석재료에 따라 적용되는 스펙트럼 지수가 상이하기 때문에 연구결과와 부합하는 적정 스펙트럼 지수 도출이 필요하다. 따라서, 본 연구에서는 Table 1과 같은 기존 문헌자료에서 고찰된 다양한 스펙트럼 지수 산정방법을 참고하여 적정 스펙트럼 지수의 도출을 수행하고자 하였다. Table 1의 문헌은 수분과 관련된 스펙트럼 지수 도출 방법을 조사한 것으로 식 (1)~(4)의 DI, RI, NDI, PI는 기존 토양 함수비 측정 및 예측 지수이며(Ge et al., 2019), 식 (5)~(7)의 NDVI, DVI, RVI는 식물의 성분 및 세포 구조에 대한 분석 시 사용되는 식물지수이다(Haboudane et al., 2004, Tian et al., 2011, Sims and Gamon, 2002).

4.2 스펙트럼 지수 산정 결과

실내 실험을 통해 획득한 분광정보를 7가지의 다양한 스펙트럼 지수 산정방법에 따라 지수화 하였으며, 결과는 Table 2와 Fig. 6과 같다. 선형회귀 분석 결과, 세립분 0% 조건에서는 DVI의 R^2이 0.9446으로 가장 높은 신뢰도를 나타냈고, NDVI의 R^2이 0.2333으로 가장 낮은 신뢰도를 나타낸 것으로 확인되었다. 세립분 10% 조건에서는 DVI의 R^2이 0.91로 가장 높은 신뢰도를 나타냈고, NDVI의 R2 값이 0.0541으로 가장 낮은 신뢰도를 나타낸 것으로 확인되었다. 세립분 20% 조건에서는 DI의 R^2이 0.8684로 가장 높은 신뢰도를 나타냈고, NDI의 R^2이 0.0.0245로 가장 낮은 신뢰도를 나타낸 것으로 확인되었다.

분광실험을 통해 얻은 분광반사율을 스펙트럼 지수로 산정한 결과, 스펙트럼 지수에 대한 분광실험 결과 예측 신뢰도는 각각 상이하였으며, 이 중 DVI는 3가지의 세립

Table 1. Equations of spectrum index with references

References	Equations	
DI (Ge et al., 2019)	$DI_{(R_s R_f)} = R_{866} - R_{655}$	(1)
RI (Ge et al., 2019)	$RI_{(R_s R_f)} = R_{866} / R_{655}$	(2)
NDI (Ge et al., 2019)	$NDI_{(R_s R_f)} = (R_{866} - R_{655}) / (R_{866} + R_{655})$	(3)
PI (Ge et al., 2019)	$PI_{(R_s R_f)} = (R_{866} - 0.4404 R_{655} - 0.3308) / (\sqrt{1 + 0.4401^2})$	(4)
NDVI (Haboudane et al., 2004)	$NDVI_{(R_s R_f)} = (R_{800} - R_{680}) / (R_{800} + R_{680})$	(5)
DVI (Tian et al., 2011)	$DVI_{(R_s R_f)} = R_{800} - R_{680}$	(6)
RVI (Sims and Gamon, 2002)	$RVI_{(R_s R_f)} = R_{800} / R_{680}$	(7)

* R_i = reflectance at the i-th wavelength

Table 2. Spectrum index with fine and water contents by references

References	Fine content (%)	Water content (%)							R^2
		0	2	4	6	8	10	12	
DI (Ge et al., 2019)	0	21.10	20.00	17.90	17.70	17.70	17.50	17.20	0.73
	10	24.00	18.50	14.70	13.40	13.40	13.40	13.40	0.68
	20	24.00	21.50	16.70	13.50	12.00	11.80	11.70	0.87
RI (Ge et al., 2019)	0	1.62	1.65	1.66	1.66	1.67	1.67	1.66	0.57
	10	1.59	1.63	1.65	1.60	1.60	1.62	1.63	0.05
	20	1.58	1.61	1.67	1.64	1.59	1.59	1.60	0.03
NDI (Ge et al., 2019)	0	0.24	0.24	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.57
	10	0.23	0.24	0.24	0.23	0.23	0.24	0.24	0.06
	20	0.22	0.24	0.25	0.24	0.23	0.23	0.23	0.02
PI (Ge et al., 2019)	0	38.27	33.89	29.97	29.63	29.48	29.12	28.82	0.71
	10	42.68	31.75	24.84	23.49	23.34	23.08	22.93	0.66
	20	42.93	37.31	27.69	22.82	21.19	20.75	20.40	0.83
NDVI (Haboudane et al., 2004)	0	0.17	0.19	0.19	0.18	0.17	0.17	0.16	0.23
	10	0.06	0.09	0.14	0.17	0.18	0.19	0.19	0.89
	20	0.17	0.17	0.18	0.21	0.19	0.19	0.19	0.20
DVI (Tian et al., 2011)	0	16.50	14.80	14.40	13.60	13.20	12.70	12.10	0.94
	10	8.00	8.50	9.50	11.30	11.30	11.70	12.00	0.91
	20	20.00	17.00	13.20	13.50	10.90	10.70	10.50	0.86
RVI (Sims and Gamon, 2002)	0	1.40	1.46	1.45	1.43	1.42	1.40	1.39	0.23
	10	1.14	1.20	1.32	1.42	1.43	1.46	1.48	0.90
	20	1.41	1.41	1.44	1.54	1.45	1.46	1.46	0.18

분 조건에서 모두 비교적 높은 예측 신뢰도를 나타낸 것으로 확인되었다.

4.3 스펙트럼 지수 변화량의 민감도 분석

Fig. 6의 데이터는 선형회귀분석에 따른 R^2을 분석한 것으로 데이터의 선형적인 신뢰성을 분석 할 수 있다. 하지만 y축 입력 값인 스펙트럼 지수의 범위가 다양하기 때문에 직접적인 비교는 어려운 실정이다. 이에 따라 스펙트럼 지수를 식 (8)에 따라 스펙트럼 지수 변화량(△Index)으로 변화시키고, 선형회귀식에 대한 기울기를 분석하였다. 여기서 기준은 함수비 0%, 세립분 0%를 기준으로 하였다. 해당 기울기는 함수비 증가량에 따른 스펙트럼 지수 변화량의 증감률이다.

우선적으로 해당 과정의 가정은 스펙트럼 지수에 따라 함수비가 결정되는 것으로 함수비에 따라 스펙트럼 지수가 결정되는 것은 아니다. Fig. 7과 같이 서로 다른 함수비-스펙트럼 지수의 변화량의 기울기를 가지는 두 직선이 있다고 가정하였을 때 기울기가 낮으면 스펙트럼 지수의 변화량(y축)이 작더라도 함수비(x축)가 크게 증가한다. 이를 높은 민감도를 가졌다고 본 논문에서는 지정하며, 반대로 기울기가 크면 스펙트럼 지수의 변화량(y축)이 크더라도 함수비의 변화량이 작기 때문에 보다 정밀한 함수비 측정이 가능하다.

$$\triangle index = \frac{index(WC_{i\%}, FC_{j\%})}{index(WC_{0\%}, FC_{0\%})} \tag{8}$$

여기서, $\triangle index$: 스펙트럼 지수 변화량

$index(WC_{i\%}, FC_{j\%})$: 함수비 i %, 세립분 함유량 j%일 때 스펙트럼 지수

$index(WC_{0\%}, FC_{0\%})$: 함수비 0%, 세립분 함유량 0%일 때 스펙트럼 지수

i : 함수비(%)

j : 세립분 함유량(%)

식 (8)에 따른 스펙트럼 지수 변화량의 민감도은 Table 3과 Fig. 7과 같고, 음수 값은 무시하고, 절대값만을 나타

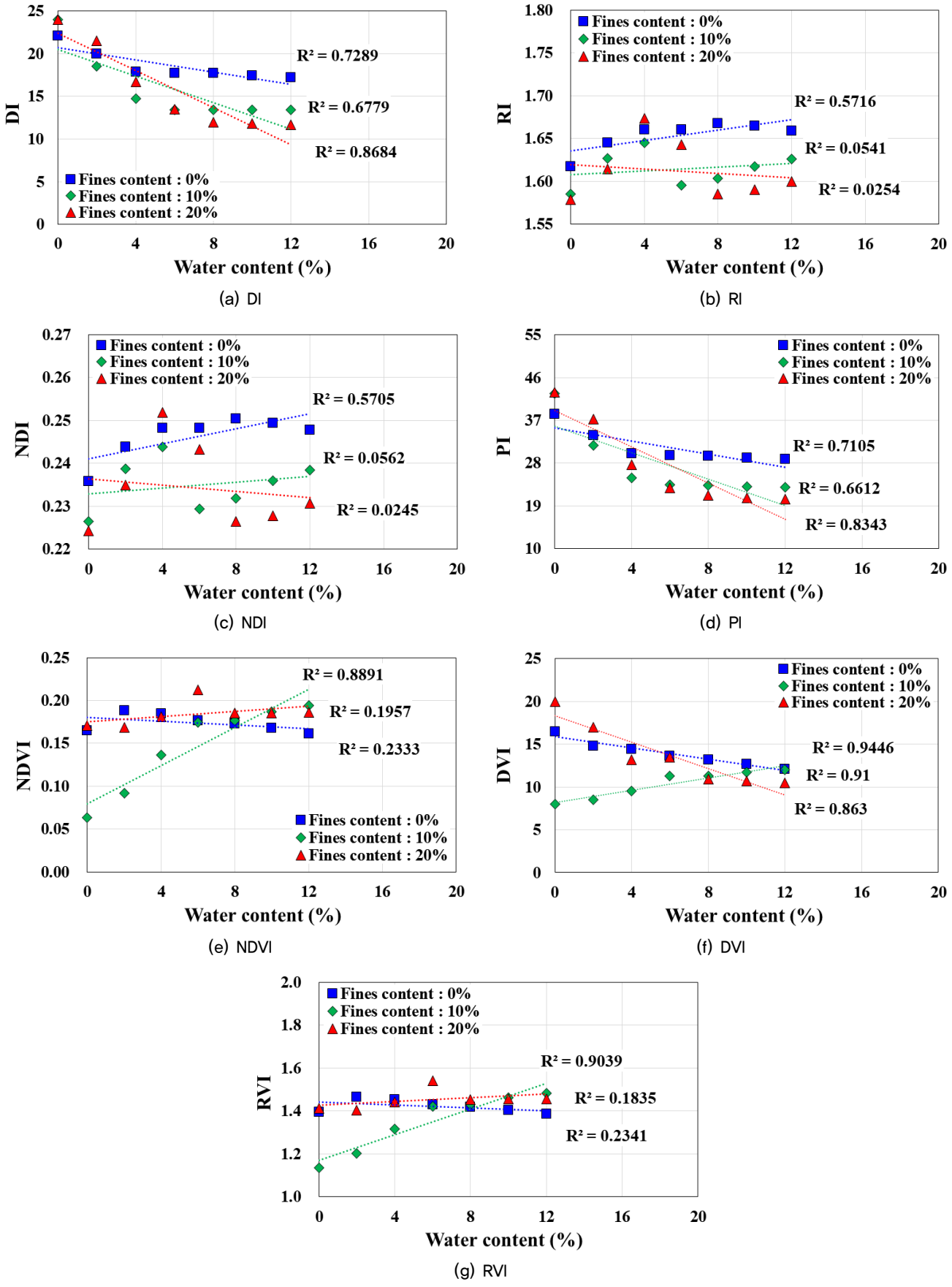


Fig. 6. Results of application for spectral index according to references

Table 3. Sensitivity of change of spectrum index with references

Fine contents	DI (Ge et al., 2019)	RI (Ge et al., 2019)	NDI (Ge et al., 2019)	PI (Ge et al., 2019)	NDVI (Haboudane et al., 2004)	DVI (Tian et al., 2011)	RVI (Sims and Gamon, 2002)
0%	0.0162	0.0019	0.0037	0.0179	0.0068	0.0201	0.0024
10%	0.0322	0.0007	0.0015	0.0327	0.1752	0.0451	0.0262
20%	0.0454	0.0008	0.0016	0.0446	0.0086	0.0388	0.0031

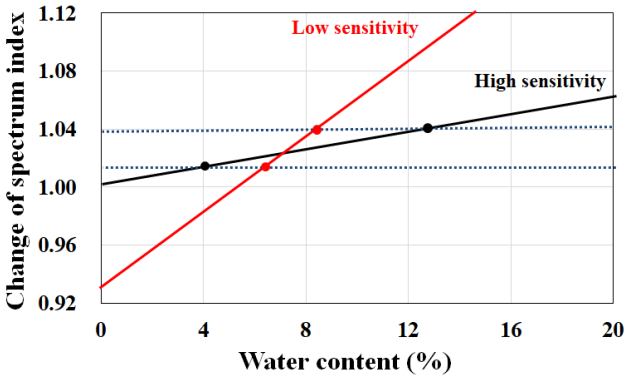


Fig. 7. Sensitivity of change of spectrum index

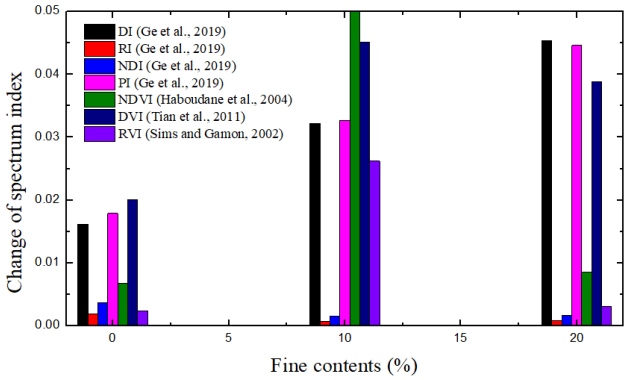


Fig. 8. Comparison of change of spectrum index with references

냈다. 분석결과 RI와 NDI는 매우 낮은 민감도를 보였으며, 반대로 나머지 스펙트럼 지수는 비교적 큰 민감도를 보였다. 따라서 RI와 NDI는 스펙트럼 지수 변화에 따라 함수비가 크게 변하기 때문에 해당 식을 이용한 함수비 도출 과정에서 세심한 주의가 필요하다. 종합적으로 판단하였을 때 세립분 함유량에 따라서도 변화가 관측되며, 비교적 모든 세립분 함유량에서 큰 값을 가지는 DVI가 함수비 예측을 위한 스펙트럼 지수로써 적합한 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 초분광 카메라를 이용하여 획득한 분광정보를 대상으로 지반의 함수비 예측 기술의 신뢰성을 분석하고자 하며, 이를 위해 실내 초분광정보 평가 시스템 구축 이후 세립분 함유량과 함수비에 따른 분광정보를 기존 스펙트럼 지수에 대입하였다. 최종적으로 함수비 예측이 가능한 스펙트럼 지수 산정 공식을 도출 하였으며, 결론은 다음과 같다.

(1) 모든 케이스에서 분광반사율은 파장대역 800nm에서 최대를 가졌으며, 이후 감소하다 920nm 부근 다시 증가하는 경향을 보였다. 함수비 측면에서 함수비 증가는 분광반사율을 감소시키며, 세립분은 각 함수비에 따른 분광반사율간의 차이를 크게 하는 역할을 하였다. 즉 다량의 함수비는 파장을 흡수함으로써 반사율을 감소시키고, 세립분은 각 함수비에 따른 파장-분광반사율 곡선간의 차이를 증가시켰다.

(2) 최대 분광반사율이 측정되는 파장대역 800nm에서의 분광반사율만을 분석한 결과 함수비가 증가함에 따라 분광반사율은 점차 감소하며, 특정 함수비에서는 수렴하는 경향을 보였다. 이는 함수비 가 증가하면서 시료 표면에 맺히는 수분 결정에 대한 영향 또는 이에 따른 난반사인 것으로 판단된다.

(3) 세립분 및 함수비 조건에 따른 실내 분광실험 결과, 모든 조건에서 함수비가 증가할수록 분광반사율은 감소하였다. 또한, 파장대역 800nm에서 가장 큰 분광반사율이 나타났으며, 세립분 함유율이 0%일 때, 저 함수비 조건에서 가장 큰 분광반사율의 감소율을 보이다가 점차 미소하게 감소하는 경향을 확인할 수 있었으며, 이러한 경향은 세립분 함유율이 10%일 때는 함수비가 6%일 때, 세립분 함유율이 20%일 EO는 함수비가 8%일 때 비슷한 경향을 확인할 수 있었다.

(4) 분광실험에 대한 결과를 스펙트럼 지수에 적용한 결과, 적용 공식에 따른 스펙트럼 지수의 함수비 예측 신뢰도는 상이하였다. 선형 회귀 분석에 따른 R-square 분석과 민감도 분석 결과 DVI가 함수비 예측을 위한 스펙트럼 지수로 가장 적합한 것으로 판단된다.

(5) 현재 적용된 스펙트럼 지수는 기존 문헌의 공식으로, 분광정보를 바탕으로 정확한 함수비를 도출하기 위해서는 적절한 파장 선택 및 조합이 수행되어야 한다. 즉, 새로운 공식을 정립하여야 함을 의미하며, 향후 연구에서는 더 많은 실험 및 케이스 설정을 통한 DB 구축을 통해 이를 수행할 예정이다.

Acknowledgement

This research was supported by the Ministry of Land, Infrastructure and Transport of the Korean government (Project Number: 21SMIP-A157182-02).

References

1. ASTM-D698 (2017), *Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12,400 ft-lbf/ft3 (600kN-m/m^3))*, ASTM International, West Conshohocken, PA.
2. Endice, D. F., Nieke, J., Koetz, B., Schaepman, M. E. and Itten, K. (2009), "Improving radiometry of imaging spectrometers by using programmable spectral regions of interest", *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol.64, No.6, pp. 632-639.
3. Ge, X., Wang, J., Ding, J., Cao, X., Zhang, Z., Liu, J. and Li, X. (2019), "Combining UAV-based hyperspectral imagery and machine learning algorithms for soil moisture content monitoring", *PeerJ*, 6926, pp.1-27.
4. Haboudane, D., Miller, J. R., Pattey, E., Zarco-Tejada, P. Z. and Strachan, I. B. (2004), "Hyperspectral vegetation indices and novel algorithms for predicting green LAI of crop canopies: Modeling and validation in the context of precision agriculture", *Remote Sensing of Environment*, Vol.90, No.3, pp.337-352.
5. Han, Y., Sohn H. J. and Ryu, K. C. (2016), "Relationship Analysis of Volumetric Water Content According to the Dielectric Constant for Stability Analysis of Ground Excavation", *Geophysics and Geophysical Exploration*, Vol.19, No.3, pp. 153-163 (in Korean).
6. Kim, Y. I., Kim, J. Y., Shim, J. R., Choi, J., Kang, K. S., Baek, W. J. and Lee, K. I. (2014), "A Mechanical Properties According to the Compaction Degree on Weathered Granite Soil Using Lightweight Dynamic Cone Penetrometer", *Journal of the Korean Geosynthetics Society*, Vol.13, No.3, pp.21-30 (in Korean).
7. Lee, J. and Kim, D. (2021), "Analysis of Sand Water Ratio and Drying Unit Weight Using Flat TDR System", *The Journal of Engineering Geology*, Vol.31, No.3, pp.333-342 (in Korean).
8. Lim, H. H., Cheon, E. N., Lee, D. H., Jeon, J. S. and Lee, S. R. (2019), "Soil Water Content Measurement Technology Using Hyperspectral Visible and Near-Infrared Imaging Technique", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.35, No.11, pp.51-62 (in Korean).
9. Park, C. and Kim, J. (2017), "Correlation Between Physical and Compaction Characteristics of Various Soils", *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, Vol.18, No.1. pp.23-29.
10. Park, J. H. (2003), "Spectral Reflectance of Soils Related to the Interaction of Soil Moisture and Soil Color Using Remote Sensing Technology", *Journal of the Korean Society Agricultural Engineers*, Vol.45, No.5, pp.77-84.
11. Seo, J. W., Gang, T. G. and Choe, C. H. (2020), "[I Priority sector] Automation Technologyand Control Technology of Construction Equipment", Construction Engineering and Management, Vol.21, No.4, pp.4-10 (in Korean).
12. Sim, C. S., Lee, S. Y. and Sim, S. H. (2020), "[II Priority sector] Smart Construction Technology of road structures", *Construction Engineering and Management*, Vol.21, No.4, pp.11-15 (in Korean).
13. Sims, D. A. and Gamon, J. A. (2002), "Relationships between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structures and developmental stages", *Remote Sensing of Environment*, Vol.81, pp.337-35.
14. Song, M., Kim, D. and Choi, C. (2015), "A New Calibration Equation for Predicting Water Contents With TDR", *Journal of the Korean Geosynthetics Society*, Vol.14, No.1, pp.59-65 (in Korean).
15. Tian, Y., Yao, X., Yang, J., Cao, W. and Zhu, Y. (2011), "Extracting red edge position parameters from ground and space-based hyperspectral data for estimation of canopy leaf nitrogen concentration in rice", *Plant Production Science*, Vol.14, pp.270-281.
16. Topp, G. C., Davis, J. L. and Annan, A. P. (1980), "Electro-magnetic determination of soil water content: meas-urements in coaxial transmission lines", *Water Resour. Res*., Vol.16, No.3, pp.574-582.