

The Study of Applicability to Fixed-field Sensor for Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) Monitoring in Cultivation Area

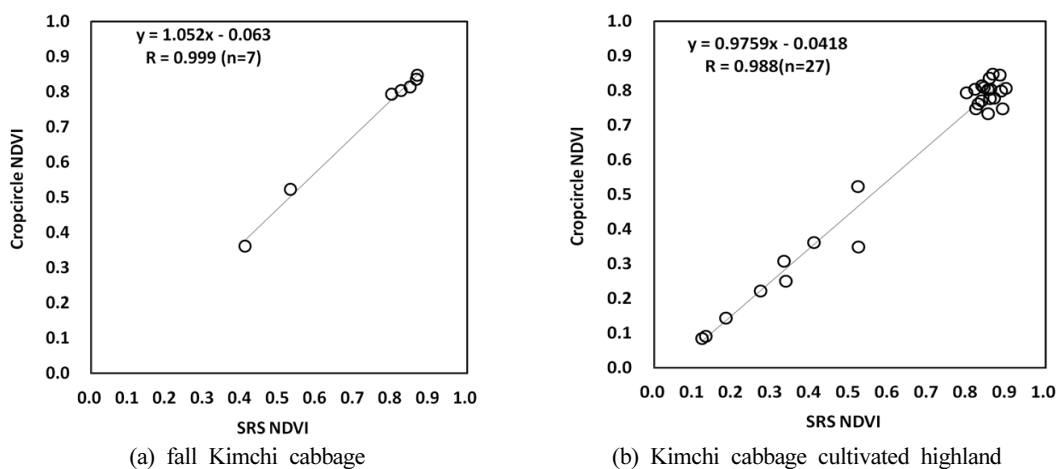
Kyung-Do Lee, Sang-Il Na, Shin-Chul Baek, Byung-Joon Jung, and Suk-Young Hong*

Climate Change and Agroecology Division, National Institute of Agricultural Science, RDA, Wanju 55365, Korea

(Received: October 8 2015, Revised: November 2 2015, Accepted: November 3 2015)

The NDVI (Normalized difference vegetation index) is used as indicators of crop growth situation in remote sensing. To measure or validate the NDVI, reliable NDVI sensors have been needed. We tested new fixed-field NDVI sensor, “SRS (Spectral Reflectance Sensor)” developed by Decagon Devices, during Kimchi cabbage growing season at the cultivation area located in Gochang, Gangneung and Taebaek in Korea from 2014 to 2015. The diurnal variation of NDVI measured by SRS (SRS NDVI) showed a slight \cap -profile shape and was affected by water on the sensor surface. This means that SRS NDVI around noontime is reasonable, except rainy day. Comparisons were made between the SRS NDVI and NDVI of used widely mobile sensor (Cropcircle NDVI). The comparisons indicate that SRS NDVI are close to Cropcircle NDVI ($R=0.99$). SRS NDVI time series displayed change of the plant height and leaf width of Kimchi cabbage. An obvious exponential relationship is found between SRS NDVI and the plant height ($R^2 \geq 0.92$) and leaf width ($R^2 \geq 0.92$) of Kimchi cabbage. Thus, SRS NDVI will be used as indicator of crop growth situation and a very powerful tool for evaluation of remote sensing NDVI estimates and associated corrections.

Key words: NDVI, SRS sensor



Relationship between NDVI measured by SRS and NDVI measured by Cropcircle.

*Corresponding author: Phone: +82632382510, Fax: +82632383823, E-mail: syhong67@korea.kr

§Acknowledgement: This study was conducted by support of RDA NAS research and development project (project number: PJ010897).

Introduction

최근 ICT (Information and Communications Technologies) 기술의 발전으로 농장, 온실, 농경지 등 농축산물 생산현장 정보의 수집, 처리, 전달 과정을 자동화하여 생산성과 농작업의 효율성을 높일 수 있는 스마트농업에 대한 관심이 증가하고 있다 (Jeong et al., 2011; Lee et al., 2014; Yeom et al., 2013). ICT 기술의 실효성 있는 농업분야 적용을 위해서는 작물, 가축 등의 생육, 성장 상황 및 이를 둘러싸고 있는 농장, 온실, 농경지의 환경 변화를 모니터링 할 수 있는 센싱 기술의 활용이 필요하다 (Hur et al., 2011; Jeong et al., 2011). 원격탐사는 전자기파를 감지하는 각종 기기 및 센서를 이용하여 지표면, 물, 대기 현상에 대해 비접촉·비파괴적인 방법으로 필요한 정보를 얻어내는 과학 기술로서 작황 추정에 널리 활용되고 있는 센싱 기술의 하나이다 (Hong et al., 2010). 원격탐사를 활용한 작황 추정은 주로 식생의 활력도와 생육 정도를 나타내는 분광지수인 식생지수 (Vegetation Index)를 이용하는데, 식생지수 수치와 변화 경향은 초고, Biomass, LAI 등 생육인자의 변화 특성을 잘 반영하는 것으로 알려져 있다 (Cohen, 1991; Lyon et al., 1998; Na et al., 2014).

원격탐사에 이용되는 대표적인 자료의 하나인 위성 영상의 경우 넓은 지역의 작물 생육상황을 동시에 관찰할 수 있는 장점이 있으나 필지 단위의 작황해석을 위해 고해상도 위성영상을 활용할 경우, 같은 지역에 대해 연속적인 촬영을 위해 소요되는 시간이 최소 일주에서 한 달 이상으로 길고 구름 등 기상적인 영향으로 안정적인 시계열 자료를 확보하는 것이 쉽지 않은 단점이 있다. 지상광학 센서의 경우 동시에 측정할 수 있는 대상면적이 좁은 단점이 있으나 식생 군락이 비교적 균일한 경우 주요 생육시기에 급격한 생육 변화를 보이는 작물의 특성을 세밀하게 반영할 수 있으며, 위성항공영상 측정값의 검·보정을 위해서 활용될 수 있어 위성·항공 영상분석 자료와 상호보완적으로 활용될 수 있다는 장점을 가지고 있다 (Kim and Hong, 2008).

지상광학 센서의 경우 휴대성 유무에 따라 이동식과 고정식으로, 광원의 종류에 따라 입사되는 태양광의 지표면 반사량을 측정하는 수동형과 LED와 같은 인공광원을 방사하여 반사량을 측정하는 능동형으로 분류할 수 있다. 국내에서는 Kang et al. (2009, 2010), Kim et al. (2005, 2006), Kim and Hong (2008)의 연구자들에 의해 이동식 능동형 지상광학 센서를 활용하여 LAI, Biomass 등 작물 생육인자 및 질소량 추정에 대한 연구 결과가 보고된 바 있다. 그러나 이들 센서는 주요한 생육시기의 급격한 생육변화를 모니터링하기 위해 측정자가 직접 농경지에 방문하여 측정해야 함으로 시간과 노력이 많이 소요되며 동일 필지에서 연속적인 측정값을 얻을 때 고정식에 비해 동일한 측정 조건을 유지

하기 어려워 오차를 내포할 수 있다는 단점이 있다. 고정식 수동형 지상광학 센서의 경우 관측하는 대상면적이 고정되어 있고 기존 개발 센서의 경우 광량 및 기상 변화에 따라 안정적 데이터 획득이 쉽지 않았다는 단점이 있었으나, 최근에는 센싱 기술의 발달에 따라 저렴한 비용으로 설치가능하고 일별로 연속적인 자료를 획득할 수 있어 작물의 생육 변동을 보다 세밀하고 안정적으로 관측할 수 있게 되어 식생지수 관측에 점차 활용성이 증대되고 있다 (Gamon et al., 2015).

Huemmerich et al. (1999)은 아한대 숲에 고정형 지상광학 센서를 설치하여 식생지수를 모니터링하고 위성 및 항공영상에서 산정한 식생지수와 비교하였으며, Jenkins et al. (2007)도 지상광학 센서를 활용하여 수목의 식생지수를 모니터링하고 광합성유효광 (PAR: Photosynthetically Available Radiation) 변화와 비교한 바 있다. Gamon et al. (2015)은 최신의 고정형 지상광학 센서 (Spectral Reflectance Sensor, Decagon Devices Inc., USA 이하 SRS센서)를 활용하여 수목의 식생지수를 모니터링하고 성능을 평가하여 보고한 바 있다.

그러나 국내에서는 농작물의 생육상황을 모니터링하기 위한 고정식 수동형 지상광학 센서의 활용성 평가 연구는 부족한 실정이다. 따라서, 본 연구는 이동식 지상광학 센서에 비해 저렴하면서도 연속, 자동 측정이 가능한 최신의 고정식 수동형 지상광학센서인 SRS센서를 활용하여 농작물 식생지수 모니터링 및 생육상황 추정의 활용 가능성을 평가하기 위해 수행하였다.

Materials and Methods

센서 원리 및 구성 본 연구에 활용된 SRS센서는 측정 대상의 정규화식생지수 (이하 NDVI : Normal Distribution Vegetation Index)를 계산한다. NDVI는 식생의 활성도를 평가하는 지표로 많이 사용되고 있으며, 식생에서 반사되는 적색영역 파장과 근적외선영역 파장을 이용하여 (Eq. 1)과 같이 계산한다.

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red} \quad (Eq. 1)$$

여기서, NIR은 근적외선 밴드의 스펙트럼 반사율이며, Red는 적색 밴드의 스펙트럼 반사율이다. SRS센서는 근적외선 밴드와 적색 밴드의 스펙트럼 반사율을 산정하기 위해 대기를 통해 입사되는 복사량과 지표면에서 반사되는 복사량을 각각 측정하여 그 비율을 (Eq. 2)와 같이 계산한다.

$$NDVI = \frac{Rn/In - Rr/Ir}{Rn/In + Rr/Ir} = \frac{(Ir/In)Rn - Rr}{(Ir/In)Rn + Rr}$$

$$= \frac{\alpha Rn - Rr}{\alpha Rn + Rr}$$

(Eq. 2)

여기서, Rn, Rr은 각각 반사되는 근적외선과 적색 밴드의 복사량, In, Ir은 각각 입사되는 근적외선과 적색 밴드의 복사량, α는 입사 근적외선 밴드 복사량에 대한 입사 적색 밴드 복사량의 비율이다. 근적외선과 적색 밴드의 입사 및

반사 복사량을 측정하기 위해 SRS 센서는 지표면과 수직 방향으로 상부를 향해 설치하는 센서 (Hemispherical sensor) 와 측정하고자 하는 대상을 향해 설치하는 센서 (Field stops sensor) 및 이들 센서로부터 측정값을 입력받아 저장하는 로거 (Logger)로 구성되어 있다 (Fig. 1, Table 1).

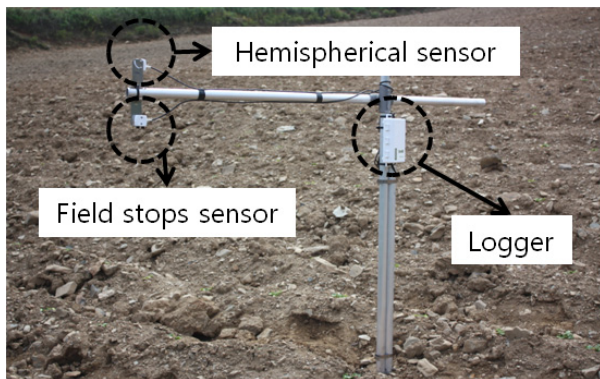


Fig. 1. Photo of SRS sensor installation and compositions.

센서 설치 및 측정값 특성 평가 SRS센서를 이용한 농작물 NDVI 관측을 위해 2014년 가을배추 주산지인 전북 고창군 대산면 1필지, 2015년 고랭지배추 주산지인 강원도 강릉 및 태백의 3개 주산지에 각각 2필지씩 총 7필지에 SRS 센서를 설치하였다 (Table 2). 센서 설치높이는 지표면을 통해 반사되는 복사량을 감지하는 Field stops sensor가 이랑에서 1 m에 위치할 수 있도록 하였으며 측정 간격은 10분으로 하였다.

기상조건 변화가 SRS센서 측정값에 미치는 영향을 분석하기 위해 2014년 고창 가을배추 주산지에 설치한 SRS 센서 측정값을 대상으로 직선거리로 3.6 km 떨어진 고창기상대의 운량 및 강우 자료를 수집하였다. 운량은 하늘을 덮고 있는 구름의 양을 0에서 10까지의 계급으로 나누어 표시한 것인데 본 연구에서는 운량이 0이었던 맑은 날 (‘14/10/7, ‘14/10/15, ‘14/10/27, ‘14/11/4)과 운량이 6 이상으로 흐리거

Table 1. Spectral reflectance sensor specifications.

Index	Hemispherical Sensor		Field Stops Sensor	
	Spectrum	630 ± 50 nm	800 ± 40 nm	630 ± 50 nm
Accuracy	10%	10%	10%	10%
Resolution	0.0001 W · m ⁻² · nm ⁻¹	0.0001 W · m ⁻² · nm ⁻¹	0.0001 W · m ⁻² · nm ⁻¹	0.0001 W · m ⁻² · nm ⁻¹
Range	0 to 2 W · m ⁻² · nm ⁻¹	0 to 2 W · m ⁻² · nm ⁻¹	0 to 2 W · m ⁻² · nm ⁻¹	0 to 2 W · m ⁻² · nm ⁻¹
Field of view	180°		20°	
Dimensions	4.3cm × 4.2cm × 2.7cm			

Table 2. Location of SRS installation and operation periods.

No.	Administrative distric	Name of chief producing area	Locations (Lat, Long)	Cultivation periods of Kimchi cabbage	Sensor operation periods
1	Gochang-gun	Daesan	35°19'12.14"N 126°34'41.65"E	‘14.9.2~‘14.11.20	‘14.9.18~‘14.11.19
2	Gangneung-si	Anbandegi	37°38'13.85"N 128°43'50.04"E	‘15.06.11~‘15.08.23	‘15.07.14~‘15.09.09
3	Gangneung-si		37°36'52.69"N 128°44'24.80"E	‘15.07.02~‘15.09.10	‘15.07.14~‘15.09.09
4	Taebaek-si	Gwinemi	37°20'14.37"N 129°00'43.67"E	‘15.06.29~‘15.09.06	‘15.07.02~‘15.09.08
5	Taebaek-si		37°20'13.30"N 129°00'17.80"E	‘15.06.28~‘15.08.30	‘15.07.01~‘15.09.08
6	Taebaek-si	Maebongsan	37°13'23.16"N 128°57'54.33"E	‘15.06.13~‘15.08.31	‘15.07.01~‘15.09.08
7	Taebaek-si		37°13'03.19"N 128°57'57.00"E	‘15.06.15~‘15.08.19	‘15.07.02~‘15.09.08

나 비가 온 날 ('14/10/3, '14/10/12, '14/10/21, '14/11/2)의 일 측정값 변화를 분석하였다.

센서 측정값 비교 및 작물 생육인자 상관관계 분석

SRS센서의 NDVI 수치 검정을 위해 이동식 능동형 지상광학센서인 CropCircle (ACS210, Holland Scientific, USA)을 2주 단위로 SRS센서 측정지점의 배추 식생으로부터 50 cm 위에서 측정하였다. CropCircle은 광원을 태양이 아닌 LED로 직접 측정하기 때문에 구름 및 에어로졸과 같이 주변 환경에 영향을 받지 않고 NDVI의 측정이 가능하며 기존 연구들을 통해 식생지수 산정 및 농작물 생육추정에 많이 활용되고 있다 (Kang et al., 2009, 2010; Kim and Hong, 2008; Kim et al., 2005, 2006). 또한 SRS센서로 측정된 NDVI와 배추의 생육변화 비교를 위해 2주 간격으로 배추의 초고 및 엽폭을 조사하고 NDVI와 상관관계를 분석하였다.

Results and Discussion

기상에 따른 SRS센서 일주기 측정값 특성 분석

맑은 날 배추 밭에서 SRS센서의 NDVI 측정값 일변화는 Fig. 2와 같았다. '14년 10월 7일부터 '14년 11월 4일까지 약 한 달간 8~12일 간격으로 4회 측정된 NDVI 일주기 측정값은 모두 유사한 경향을 보였다. 일출 무렵 매우 큰 변동을 보이다 이후 정오까지 점차 증가하였으며, 정오부터 오후 4시까지

일정한 값을 보이다 이후 점차 감소하였으며 일몰 무렵 다시 큰 변동을 보였다. 이는 일출과 일몰시 지면에서 수직방향과 태양이 이루는 각도인 천정각이 커지면서 대기 산란 등의 영향 (Huemmrich et al., 1999; Sagan, 1994)과 일출시 이슬 등에 의한 영향 (Wittich and Kraft, 2008)으로 판단된다. 일출 및 일몰시를 제외하고는 NDVI가 전체적으로 “∩”형의 변화 경향을 보였는데 이는 Wittich and Kraft (2008)가 떡갈나무에 대하여 고정식 수동형 지상광학센서로 측정된 NDVI 변화 패턴과 유사한 결과이다. Huemmrich et al. (1994)는 천정각이 70도 이하 일 경우, Wittich and Kraft (2008)은 일사량이 300 Wm⁻¹ 보다 높을 경우 고정식 수동형 지상광학센서의 NDVI 값을 활용할 것을 제안하였으나, 이는 센서별 특성에 따라 달라질 수 있으므로 SRS센서를 이용한 NDVI 측정 시에는 하루 중 태양광이 충분히 입사되는 정오를 중심으로 일정한 NDVI 값을 보이는 시간대의 자료를 활용해야 할 것으로 판단된다. 본 연구에서는 14:00시를 기준으로 전후 약 2시간 동안의 측정값이 10분 간격의 측정값과 1시간 동안의 평균 값, 최댓값과 큰 차이가 없이 일정한 값을 보이고 있어 일 대푯값 선정을 위해서 이 시간대의 값을 평균하여 활용하였다.

흐린 날 배추 재배지에서 SRS센서의 NDVI 측정값 일변화는 Fig. 3와 같았다. '14년 10월 3일부터 '14년 11월 2일까지 약 한 달간 9~13일 간격으로 4회 측정된 NDVI 일주기 측정값은 운량 및 강우에 의해 영향을 받아 일정한 경향을

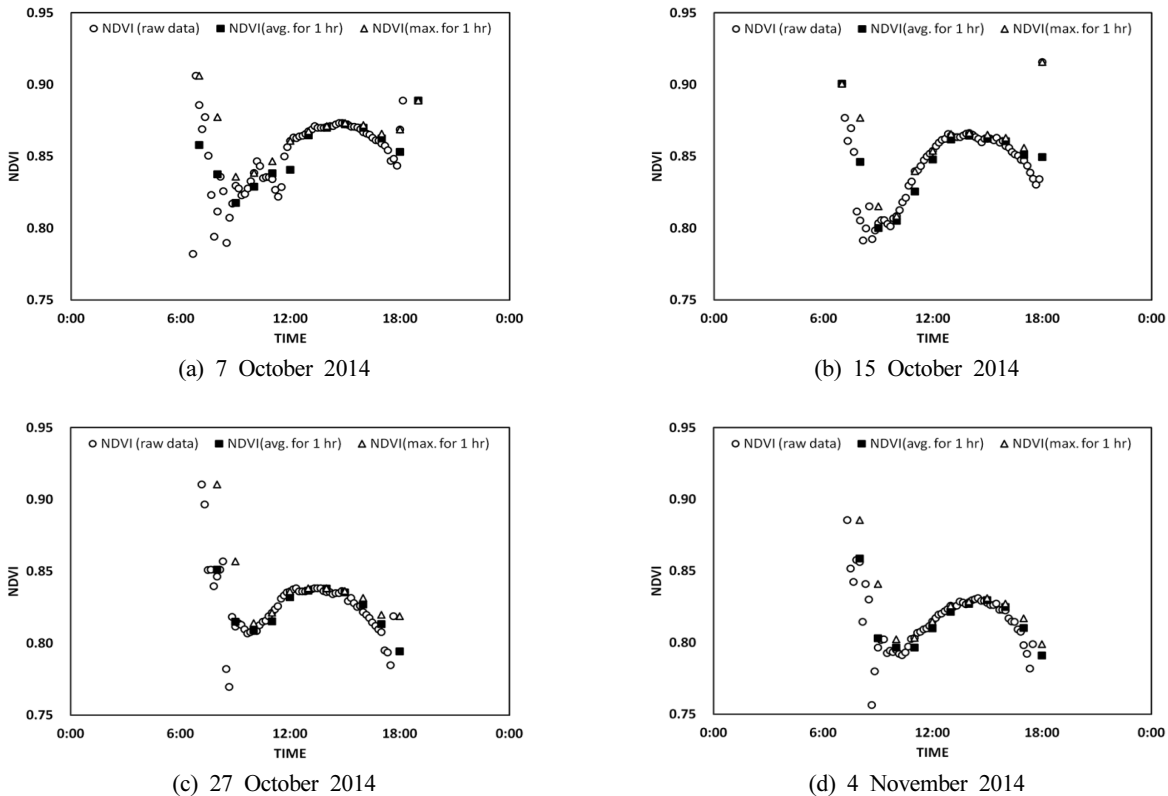


Fig. 2. Diurnal course of NDVI using SRS on clearly days.

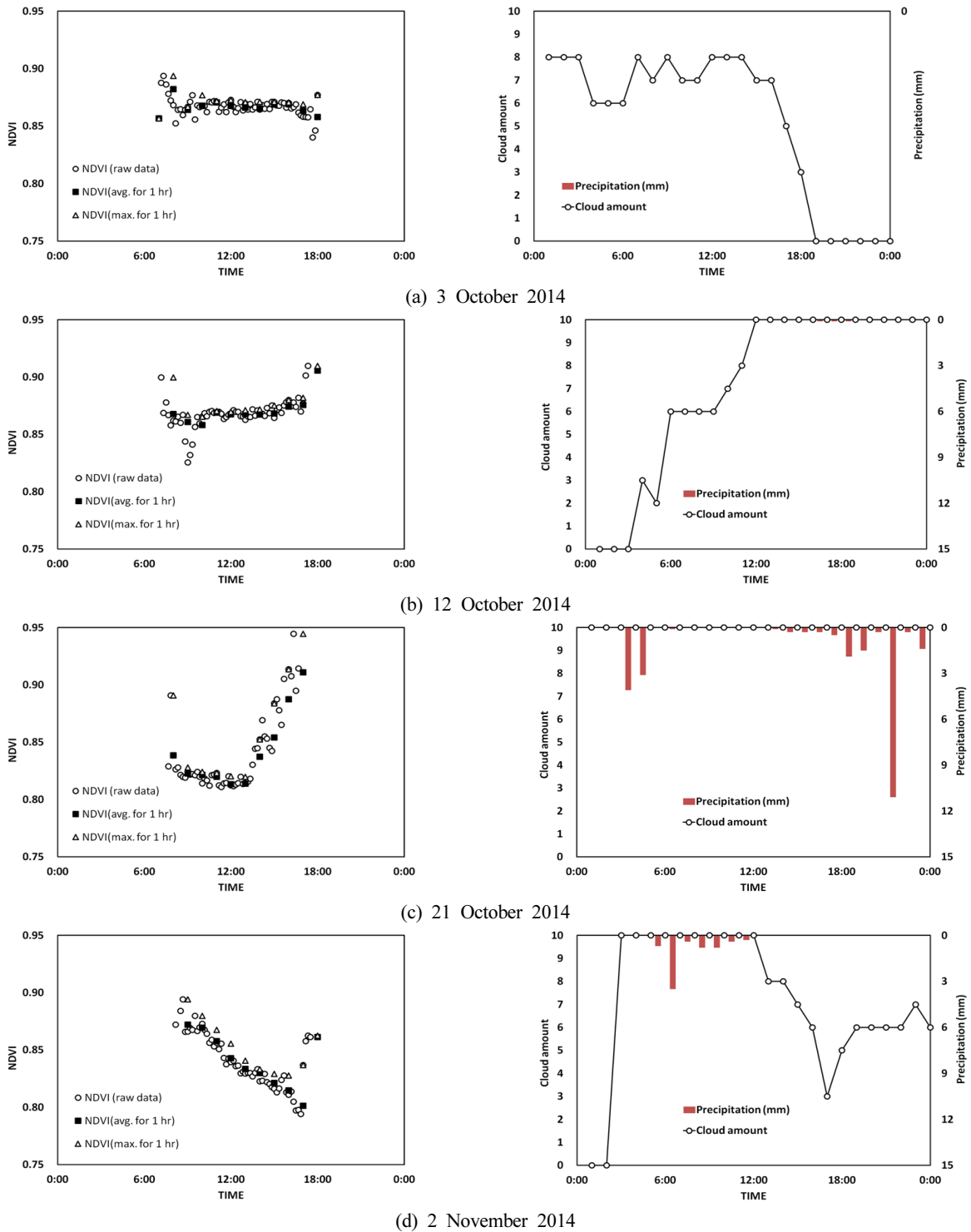


Fig. 3. Diurnal course of NDVI using SRS and weather condition on cloudy days.

찾을 수 없었다. 운량이 6이상으로 흐렸지만 강우는 없었던 '14년 10월 3일과 12일의 NDVI 측정값은 일출과 일몰시 다시 큰 폭의 변동성을 보였으나 대체로 일정한 경향을 보였으며, 14:00시를 기준으로 전후 약 2시간 동안의 NDVI 평균값도 각각 0.87과 0.86으로 10월 7일 및 10월 15일의 평균값 0.86, 0.85와 비교해도 큰 차이가 없었다. 그러나 강우가 있었던 '14년 10월 21일과 '14년 11월 2일의 경우 강우에 의해

크게 영향을 받았다. '14년 10월 21일의 경우 일출시 강우가 없다가 오후 들어 강우가 내리기 시작하면서 점차 측정값이 증가하는 경향을 보였으며, '14년 11월 2일의 경우 새벽부터 내린 비로 값이 증가했다가 강우가 그치면서 점차 감소하는 경향을 보이다 일몰시 다시 크게 증가하는 경향을 보였다. 따라서 맑은 날과 흐린 날의 SRS센서 NDVI 값을 비교해보면 일출과 일몰시 값의 변동이 큰 것은 서로 유사하였으나

운량이 많은 날의 경우 NDVI 값의 변동이 적었으며, 강우 발생 시에는 값이 급격히 증가하는 경향을 보였다. 이는 운량이 많을 경우 광량 차이가 맑은 날에 비해 상대적으로 적어 일정한 값을 보일 뿐 아니라 NDVI 계산 시 입사량과 반사량을 함께 고려한 반사율을 활용해 지수를 산정함으로써 맑은 날과 비교 시 NDVI에 큰 차이가 없는 값을 얻을 수 있었으나 강우 시에는 센서 및 지표면이 물에 의해 입사 및 반사되는 광량의 흡수, 산란 등 간섭이 발생하기 때문으로 추정된다 (Wittich and Kraft, 2008).

‘14년 고창 가을배추 재배지에 설치한 SRS센서의 오후 12시부터 오후 16시의 평균 NDVI와 강우량 변동은 Fig. 4와 같다. 가을배추의 경우 9월 2일 정식하였는데, 정식 후 15일경에는 NDVI가 약 0.35의 값을 보였으나 이후 정식 후 30일경까지 0.8이상으로 급격한 증가를 보였다. 10월 이후에는 큰 변동 없이 완만하게 감소하는 경향을 보였는데, 이는 NDVI가 식물 잎의 엽록체 활력도에 따라 값의 변화를 보이기 때문에 생육 후기 잎의 엽록체 함량이 차츰 감소하는 특성을 반영하기 때문으로 판단된다 (Huemmrich et al.,

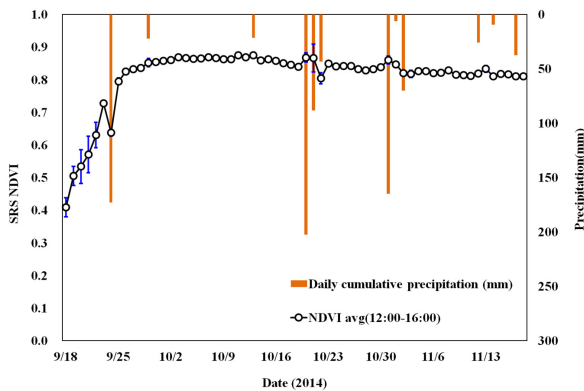


Fig. 4. Daily NDVI using SRS and precipitation on cultivation area of Kimchi cabbage in Gochang for 2014.

1999). 이처럼 SRS센서는 측정 간격이 짧아 NDVI의 연속적인 동적 변화를 잘 나타내고 있어 작물생육 변동과정 모니터링에 적합할 것으로 생각된다. SRS센서로 측정한 NDVI 일주기 변화가 강우 시 큰 변동성을 보였는데, Fig. 4에서도 강우가 발생한 날 NDVI의 변화가 다른 날에 비해 변동이 컸던 것을 확인할 수 있었다. 9월 18일부터 9월 24일까지 생육 초기에 NDVI의 변동이 컸었는데 이는 관개를 위한 스프링클러 작동에 따라 비산하는 관개수에 영향을 받았기 때문으로 판단된다.

센서 측정값 비교 및 작물 생육인자와의 상관관계 분석

‘14년 고창 가을배추 주산지 및 ‘15년 강릉·태백 고랭지 배추 주산지에서 측정한 SRS센서 NDVI와 Cropcircle NDVI를 비교한 결과는 Fig. 5와 같다. 측정 시기와 장소가 달랐으나 배추에 대한 SRS센서의 NDVI와 Cropcircle NDVI의 상관계수는 0.98 이상으로 매우 높았으며 기울기도 5% 이내의 차이를 보여 SRS센서도 작물 NDVI 관측에 효과적으로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

‘14년 가을배추 및 ‘15년 고랭지배추의 초고 및 엽폭 변화는 Fig. 6과 같다. ‘14년 가을배추와 ‘15년 고랭지배추의 경우 품종, 지형 및 기상 환경이 달랐으나 초고와 엽폭 모두 생육 초기에 급격히 증가하다 중, 후반기에는 일정하게 유지되는 경향을 보여 생육후 성장일수와 2차 곡선으로 추세선을 작성할 수 있었다 (Kang et al., 2010). SRS NDVI와 배추 초고 및 엽폭의 상관관계는 Fig. 7과 같았다. 가을배추의 경우 SRS NDVI와 초고, 엽폭은 지수함수의 관계를 보였으며 (Hong et al., 1998; Wang et al., 2004) 결정계수가 0.91 이상으로 매우 높게 나타났다. 고랭지배추의 경우에도 SRS NDVI와 초고, 엽폭은 0.92 이상의 결정계수를 보였다. SRS센서 NDVI와 배추 초고 및 엽폭의 높은 상관관계는 SRS센서 NDVI로 초고, 엽폭 등 생육인자를 추정할 수 있는

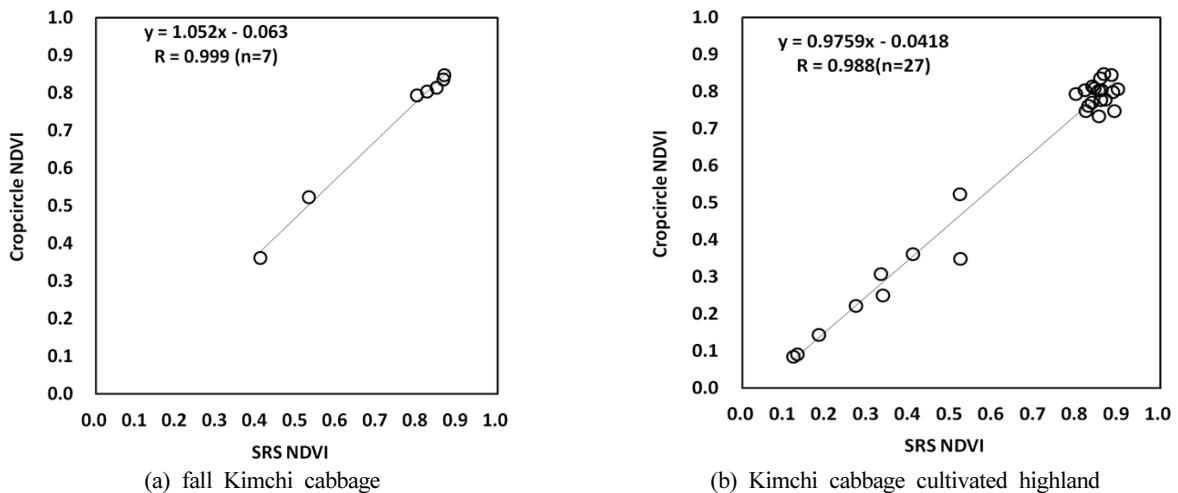
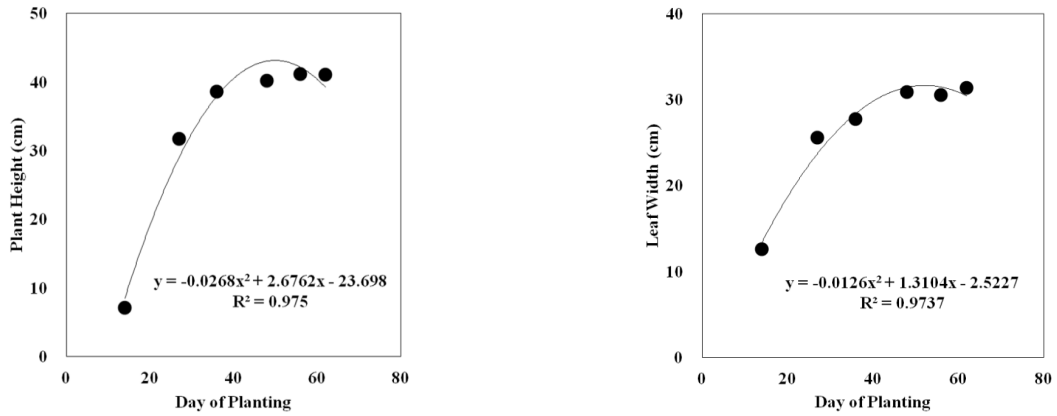
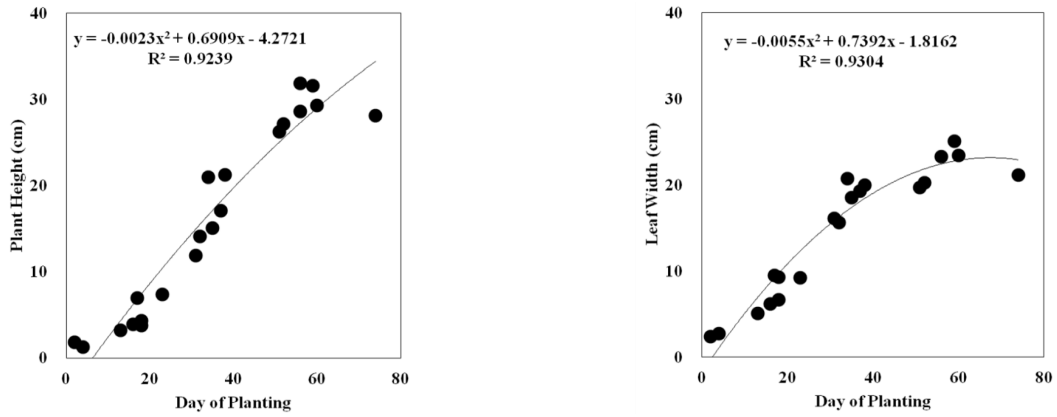


Fig. 5. Relationship between NDVI measured by SRS and NDVI measured by Cropcircle.

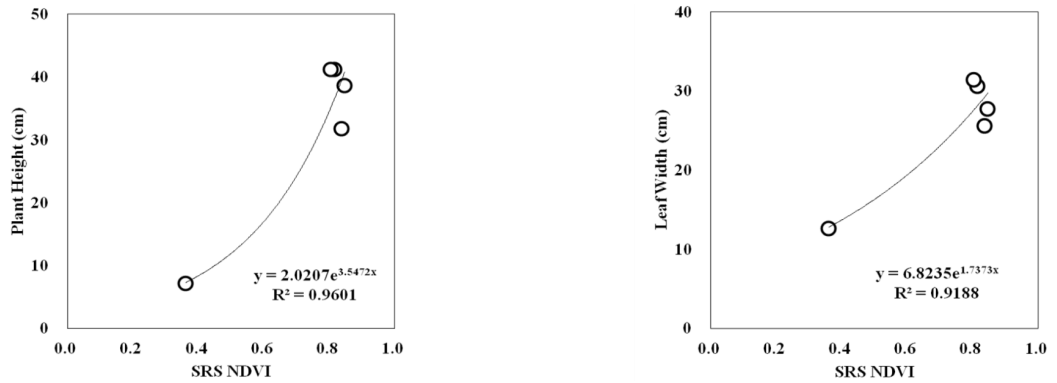


(a) fall Kimchi cabbage

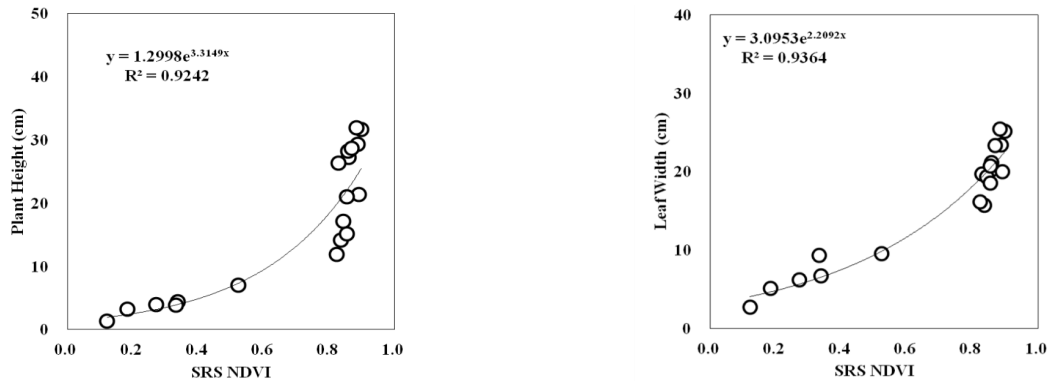


(b) Kimchi cabbage cultivated highland

Fig. 6. Change of plant height and leaf width of Kimchi cabbage.



(a) fall Kimchi cabbage



(b) Kimchi cabbage cultivated highland

Fig. 7. Scatter diagrams of NDVI measured SRS and plant height, leaf width for Kimchi cabbage.

근거를 제시해주며 추후 위성, 항공 영상을 활용한 NDVI 산정 및 작황 추정 시에도 현장 검정 자료로 함께 활용될 수 있을 것으로 판단된다 (Huemmrich et al., 1999; Wang et al., 2004).

Conclusion

식생지수를 연속, 자동으로 관측하여 생육상황을 추정할 수 있는 최신의 고정식 수동형 지상 광학센서의 농작물 모니터링 적용성 평가를 위해 최근에 개발된 SRS센서를 활용하여 '14년 가을 배추 및 '15년 고랭지 배추 재배지 7필지에 대하여 NDVI를 측정하였다. SRS센서로 측정한 NDVI는 하루 중 14:00시를 기준으로 2시간 전후 안정적인 값을 보였으며, 운량에 따른 영향은 크지 않았으나 광량의 흡수, 산란에 영향을 주는 경우에는 큰 영향을 받는 것으로 나타났다. SRS 센서로 측정한 NDVI와 기존에 널리 활용되고 있는 이동식 능동형 지상광학센서인 Cropcircle로 측정한 NDVI를 비교한 결과, 둘 사이의 상관관계수는 0.98 이상으로 매우 높았으며 기온기도 5% 이내의 차이를 보여 SRS센서도 작물 NDVI 관측에 효과적으로 활용될 수 있을 것으로 판단된다. SRS NDVI와 배추 초고 및 엽폭의 상관관계를 분석한 결과 가을배추 및 고랭지 배추 모두 결정계수 0.92 이상의 높은 값을 보여 SRS NDVI로 초고, 엽폭 등 작물 생육인자의 추정도 가능할 것으로 판단된다. 이러한 결과는 센서를 이용한 작물 생육상황 평가에 활용될 수 있는 것은 물론, 위성, 항공영상을 활용한 들녘 단위 식생지수 산정에도 현장 검정 값으로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

References

- Cohen, W.B. 1991. Response of vegetation indices to change in three measures of leaf water stress. *Photogramm. Eng. Remote Sens.* 57(2):195-202.
- Gamon, J.A., O. Kovalchuk, C.Y.S. Wong, A. Harris, and S.R. Garrity. 2015. Monitoring seasonal and diurnal changes in photosynthetic pigments with automated PRI and NDVI sensors. *Biogeosci. Discuss.* 12:2947-2978.
- Hong, S.Y., J.T. Lee, S.K. Rim, W.K. Jung, and I.S. Jo. 1998. Estimation of paddy rice growth increment by using spectral reflectance signature. *J. Korean Soc. Remote Sens.* 14(1):83-94.
- Hong, S.Y., Y.H. Kim, E.Y. Choe, Y.S. Zhang, Y.K. Sonn, and C.W. Park, K.H. Jung, B.K. Hyun, S.K. Ha and K.C. Song. 2010. Geographic information system and remote sensing in soil science. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 43(5):684-695.
- Huemmrich K.F., T.A. Black, P.G. Jarvis, J.H. McCaughey, and F.G. Hall. 1999. High temporal resolution NDVI phenology from micrometeorological radiation sensors. *J. Geophys. Res.* 104(22):27, 935-27, 944.
- Hur, S.O., K.H. Han, S.H. Jeon, Y.S. Jang, S.W. Kang, S.O. Chung, H.J. Kim, and K.H. Lee. 2011. Application of smartphone and wi-fi communication for remote monitoring and control of protected crop production environment. *CNU J. Agric. Sci.* 38(4):753-759.
- Jenkins, J.P. A.D. Richardson, B.H. Braswell, S.V. Ollinger, D.Y. Hollinger, and M.L. Smith. 2007. Refining light-use efficiency calculations for a deciduous forest canopy using simultaneous tower-based carbon flux and radiometric measurements. *Agric. For. Meteorol.* 143:64-79.
- Jeong, K.J. and W.J. Kim. 2011. The implementation of smart raising environment management system based on sensor network and 3G telecommunication. *J. Korea Inst. Electron. Commun. Sci.* 6(4):595-601.
- Kang, S.S., H.C. Jung, S.H. Jeon, and S.D. Hong. 2009. Evaluation of biomass and nitrogen nutrition of tobacco under sand culture by reflectance indices of ground-based remote sensors. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 42(2):70-78.
- Kang, S.S., H.Y. Gong, H.C. Jung, Y.H. Kim, S.Y. Hong, and S.D. Hong. 2010. Evaluation of biomass and nitrogen status in paddy rice using ground-based remote sensors. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 43(6):954-961.
- Kim, M.H., J.C. Shin, and B.W. Lee. 2005. Applicability of vegetation index and SPAD reading to nondestructive diagnosis of rice growth and nitrogen nutrition status. *Korean J. Crop Sci.* 50(6):369-377.
- Kim, M.H., J.D. Fu, and B.W. Lee. 2006. Determining nitrogen topdressing rate at panicle initiation stage of rice based on vegetation index and SPAD reading. *Korean J. Crop Sci.* 51(5):386-395.
- Kim, Y.H. and S.Y. Hong. 2008. Estimation of rice grain protein contents using ground optical remote sensors. *Korea. J. Remote Sensing.* 24(6):551-558.
- Lee, J.Y., S.H. Kim, S.B. Lee, H.J. Choi, and J.J. Jung. 2014. A study on the necessity and construction plan of the internet of things platform for smart agriculture. *J. Korea Multimedia Soc.* 17(11):1313-1324.
- Lyon, J.G., D. Yuan, R.S. Lunetta, and C.D. Elvidge. 1998. A change detection experiment using vegetation indices. *Photogramm. Eng. Remote Sens.* 64(2):143-150.
- Na, S.I., S.Y. Hong, Y.H. Kim, and K.D. Lee. 2014. Evaluation of the applicability of rice growth monitoring on Seosan and Pyongyang region using RADARSAT-2 SAR -by comparing RapidEye-. *J. Korean Soc. Agric. Eng.* 56(5):55-65.
- Sagan, C., 1994. *Pale Blue Dot*, New York : Random House, p.429.
- Wang, Q., J. Tenhunen, N.Q. Dinh, M. Reichstein, T. Vesala, and P. Keronen. 2004. Similarities in ground- and satellite-based NDVI time series and their relationship

- to physiological activity of a Scots pine forest in Finland. *Remote Sens. Environ.* 93: 225-237.
- Wittich, K.P. and M. Kraft. 2008. The normalised difference vegetation index obtained from agrometeorological standard radiation sensors: a comparison with ground-based multiband spectroradiometer measurements during the phenological development of an oat canopy. *Int J Biometeorol.* 52:167-177.
- Yeom, T.H., S.M. Park, H.I. Kwon, D.K. Hwang, J.C. Kim. 2013. A smart farming system based on visible light communications. *J. Korean Inst. Commun. Inf. Sci.* 38(5):479-485.