

ORIGINAL ARTICLE

드론 원격정보를 활용한 실제증발산량의 산정: 가뭄지수를 위한 사전테스트

이근상¹⁾ · 김성욱²⁾ · 함세영³⁾ · 이길하*

대구대학교 건설시스템공학과, ¹⁾전주비전대학교 지적토목학과, ²⁾지아이 지반정보연구소, ³⁾부산대학교 지질환경과학과

Computation of Actual Evapotranspiration using Drone-based Remotely Sensed Information: Preliminary Test for a Drought Index

Geun-Sang Lee¹⁾, Sung-Wook Kim²⁾, Se-Yeong Hamm³⁾, Khil-Ha Lee*

Department of Civil Engineering, Daegu University, Gyeongsan 38453, Korea

¹⁾*Cadasree & Civil Engineering, Vision College of Jeonju, Jeonju 55069, Korea*

²⁾*Geo-information Institute, GI Co. Ltd., Busan 47598, Korea*

³⁾*Department of Geological Science, Pusan National University, Busan 46241, Korea*

Abstract

Drought is a reoccurring worldwide natural hazard that affects not only food production but also economics, health, and infrastructure. Drought monitoring is usually performed with precipitation-based indices without consideration of the actual state and amount of the land surface properties. A drought index based on the actual evapotranspiration can overcome these shortcomings. The severity of a drought can be quantified by making a spatial map. The procedure for estimating actual evapotranspiration is costly and complicated, and requires land surface information. The possibility of utilizing drone-driven remotely sensed data for actual evapotranspiration estimation was analyzed in this study. A drone collected data was used to calculate the normalized difference vegetation index (NDVI) and soil-adjusted vegetation index (SAVI). The spatial resolution was 10 m with a grid of 404 x 395. The collected data were applied and parameterized to an actual evapotranspiration estimation. The result shows that drone-based data is useful for estimating actual evapotranspiration and the corresponding drought indices.

Key words : Actual evapotranspiration, Drone, Drought index, Natural disaster, PT-JPL

1. 서론

지구 온난화로 인해 장기적인 기후변화가 일어나며 기후변화는 생태계와 해양환경 등 지구 환경에 지

대한 영향을 미칠 것이다. 이는 기상학적, 수문학적 인자의 변화로 연결되어 인간의 생활 사회, 경제, 문화, 보건 등의 기본생활에 영향을 미치고 홍수, 가뭄과 같은 극한 기후상황을 초래하므로 이에 대한 고찰을

Received 17 August, 2016; Revised 12 October, 2016;

Accepted 31 October, 2016

*Corresponding author : Khil-Ha Lee, Department of Civil Engineering,

Daegu University, Gyeongsan 38453, Korea

Phone : +82-53-850-6522

Email : khil_ha@yahoo.com

The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.
© This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

거친 후 적절한 대비가 필요하다(IPCC, 2007). 가뭄은 오랜 기간 동안 비가 오지 않거나 강수량이 비정상적으로 줄어든 기상재해를 일컫는다. 한편으로 강수량의 변화가 없이 지표면으로부터 수분의 증발산이 강우보다 많아 물 부족이 유발되는 상황도 가뭄으로 분류한다. 가뭄은 흔하게 관측되는 자연현상이나 시작 시점의 예측이 어렵고 재해로 인식되는 시점에서는 극복방안이 쉽지 않다. 가뭄은 인류 문명의 과정에서 반복적이고 지속적으로 발생하면서 일상생활에 막대한 영향을 미쳐왔다(IPCC, 2007).

가뭄의 영향은 식량생산에서 보건, 경제, 인프라, 수자원, 환경 등 사회 전반에 걸쳐 확산하나 시간상으로 천천히 나타나며 공간적으로 피해 범위가 광범위하여 다른 형태의 자연재해와 사뭇 다르다. 가뭄은 강우, 증발산, 물 수요와 같은 수자원이용 과정의 불균형으로 빚어지는 자연현상으로서의 가뭄을 분석하고 감시하여 대응책을 만들어내는 것이 중요하다(IPCC, 2007).

일반적으로 가뭄은 가뭄지수를 산정하고 이를 통해 정량화 한다. 가뭄발생은 여러 가지 가뭄지수를 활용하여 모니터링을 할 수 있는데 흔히 SPI (standardized precipitation index)와 PDSI (palmer drought severity index), SWSI (surface water supply index) 등이 이용된다. 그러나 이러한 강우를 기초한 방법들은 식생의 기반이 되는 지표면의 건조한 정도와 토양함수를 전혀 고려하지 않아 비슷한 정도의 강우가 내려도 지표면의 건조한 상태나 습한 상태에 관계 없이 동일한 가뭄지수를 나타내는 단점이 있다. 가뭄을 상대적으로 정의하자면 강수량의 변화가 없어도 지표면 증발산이 강우보다 많아 물의 공급과 수요에서 불균형이 발생하는 상황도 가뭄으로 간주하므로 강우량 기반의 가뭄지수는 동일한 강우량 조건의 경우에도 지표면의 식생에 따라 가뭄의 진행속도가 달라지는 현실을 반영하지 못하게 된다(Narasimhan and Srinivasan, 2005).

실제증발산은 물이 지표면으로부터 대기로 이동하는 중요한 수단인 증발과 증산의 합을 나타내며 지표면으로부터 물 그 자체, 흙 표면, 식생과 식생차단에 의한 물의 이동을 내포하고 있다. 실제증발산은 지구 물의 순환과정의 한 축으로서 증발산을 자원의 손실로 간주하는 수자원분석에서는 간과할 수 없는 수문

학적 요소이나 국내의 많은 선행연구에서는 주관적인 판단에 따른 분석을 하거나 생략하는 경우가 많았다. 심지어는 계산상의 오류로 인한 결과를 중요한 수자원 관리정책에 반영한 경우도 있다(Falkenmark and Rockstrom, 2006; Lee, 2016; Savenije, 2000).

실제증발산은 식생의 종류와 지표면 이용상태에 따라서 그 양이 크게 좌우되는데, 같은 조건에서 활엽수는 침엽수에 비해 실제증발산량이 많고 특히 휴면기나 이른 봄철에 증발산이 활발하다. 실제증발산은 태양에너지, 습도, 온도, 풍속 등의 기상조건과 식생의 성장 정도, 흙이 표면적을 차지한 정도 등의 지표면 특성을 아울러 반영하는데 실제로 전 지구적인 관점에서 증발량이 증발량보다 많아 지표면에서 식생의 유무, 성질, 특성은 무시할 수 없는 요소이다(Brustaert, 1991). 잠재증발산은 실제증발산에 필요한 물이 지표면에 충분히 공급된 이상적인 상황을 가정하여 계산한 것으로 실제증발산은 항상 잠재증발산보다 작아 토양함수의 반영이 필요하다(Brustaert, 1991; Maidment, 1993).

실제증발산을 바탕으로 가뭄지수를 산정한다면 앞서 언급한 토양함수와 식생현황에 대한 단점을 극복할 수 있고 또 세계적 추세도 많은 연구자들이 실제증발산을 바탕으로 한 가뭄지수개발에 집중하고 있다(Narasimhan and Srinivasan, 2005). 한편, 가뭄지수를 개발하기 위해서는 실제증발산량을 산정하는 기법이 필요하다. 우리나라의 경우 기상청과 한국수자원공사에서 제한된 지역에서 특정 조건에 대해 에디코리레이션(Eddy correlation)을 이용하여 실제증발산량을 관측한 바 있으나 실제증발산량 산정에 대한 연구가 거의 전무하여 현장에 적용할 수 있는 실용프로그램이나 검증된 이론이 없는 실정이다. 이 연구에서는 상대적으로 간단한테 반해 정확도가 높은 것으로 알려진 PT (priestly-taylor) - JPL(Fisher et al., 2008) 방법을 사용하여 실제증발산량을 계산하였다. 지표면의 토양함수와 식생상황은 원격정보가 이용하는데 드론을 활용하여 지표면과 식생의 특성을 대표하는 NDVI (normalized difference vegetation index)와 SAVI (soil-adjusted vegetation index) 원격정보를 수집하였다(Huete, 1988; Rouse et al., 1974).



Fig. 1. Study area.

2. 재료 및 방법

드론 원격정보를 활용하여 실제증발산량을 계산하기 위해, Fig. 1과 같이 전라북도 전주시 효자동 3가에 위치하고 있는 문학대공원을 연구대상지로 선정하였다. 문학대공원 주변의 영상정보를 구축하기 위해 SenseFly 사에서 제작한 eBee 모델의 고정의 드론을 활용하였다. eBee 모델은 비행 속도 40~90 km/h, 최대풍속 12 m/s까지 운행이 가능하고 비행시간은 최대 약 50분이다.

영상 촬영을 위해서는 적절한 카메라 선정이 중요하며 연구에서는 대상지 현황파악을 위한 실감정보

구축을 위해 RGB 카메라인 Sony 사의 WX RGB 카메라를 사용하였고, 실제 증발산량 산정에 이용되는 NDVI와 SAVI를 추출하기 위해서는 Canon 사의 S110 NIR 카메라를 각각 이용하였다. 특히 S110 NIR 카메라는 근적외선 밴드를 포함하여 적색광과 녹색광을 포함하고 있어 NDVI와 SAVI 추출을 위한 파장대를 가지고 있다. 또한 드론 비행계획을 수립하기 위해 Fig. 2와 같이 eMotion 소프트웨어를 활용하여 고도 약 115 m에서 4 cm급으로 촬영하였으며, 중중복도와 횡중복도는 각각 85%와 70%로 설계하였다. 그리고 드론으로 촬영한 사진에 대해 Pix4D 소프트웨어를 이용하여 영상접합을 수행하였으며, 접합 시 정확한 좌표

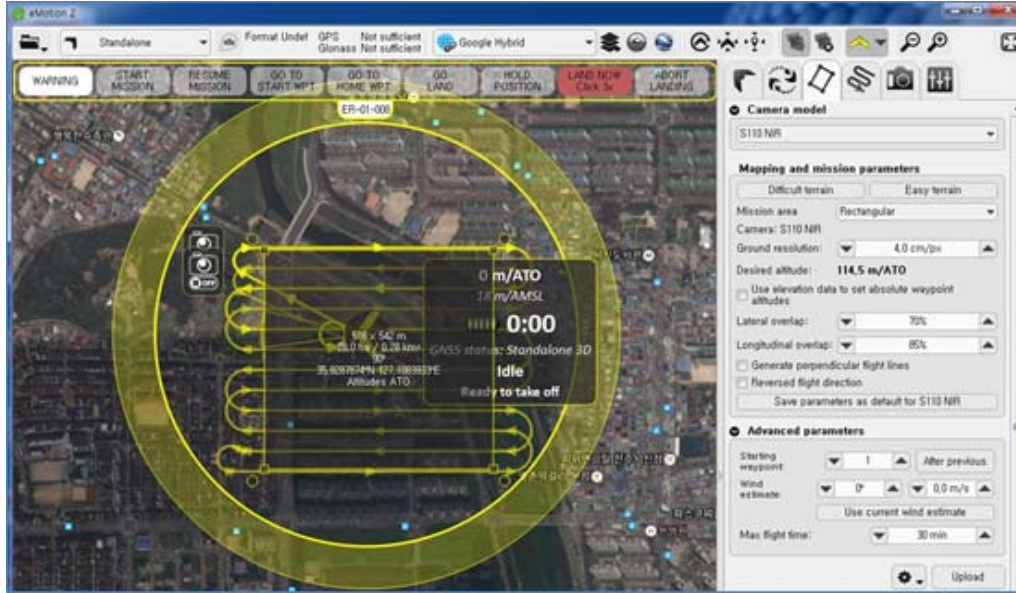


Fig. 2. Flying plan using eMotion SW.

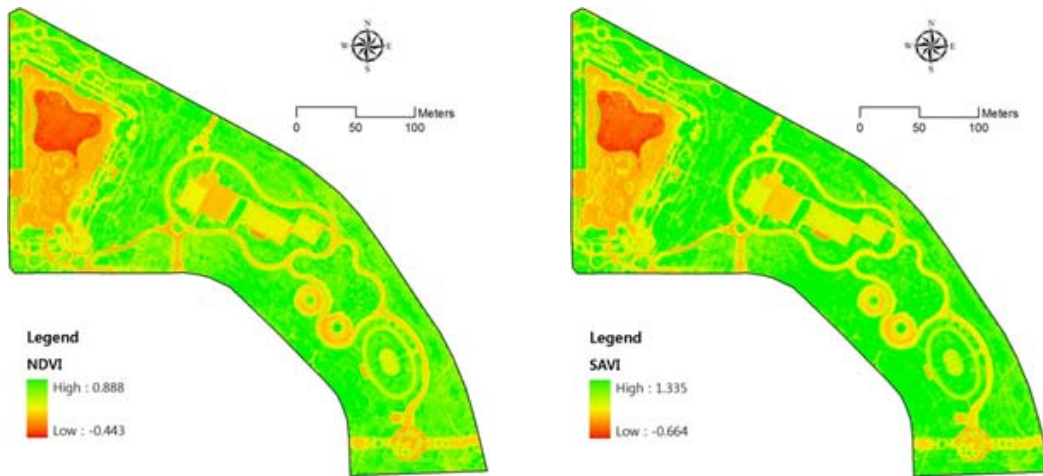


Fig. 3. Remotely sensed NDVI and SAVI data driven by drone.

매칭을 위해 Fig. 1과 같이 5점의 지상기준점(GCP; ground control point)을 선정한 후 GPS (global positioning system) 장비를 활용하여 GCP 측량을 실시하였다.

S110 NIR 카메라를 탑재하여 취득한 NIR (near

infrared), 적색, 녹색광으로부터 NDVI와 SAVI 정보를 추출하기 위해 PG-STEAMER 원격탐사 소프트웨어(픽소니어, 대한민국 대전)를 기반으로 NDVI와 SAVI를 산정하였다.

3. 이론적 배경

PT (priestley-taylor)모형(Priestley and Taylor, 1972)은 잠재증발산량을 산정하기 위하여 PM (penman-monteith)공식(Monteith, 1965)으로부터 다음과 같이 만들어졌다. PM공식에서 증발산량은 식 (1)과 같고 재정리하면 식 (2)로 표현된다.

$$LE = \frac{\Delta(R_n - G) + \rho_a C_p (e_s - e_a) / r_a}{\Delta + \gamma(1 + r_c / r_a)} \quad (1)$$

식 (1)에서 $\frac{\Delta(R_n - G)}{\Delta + \gamma}$ 에 따라 정리하면 식 (2)와 같다.

$$LE = \frac{\Delta(R_n - G)}{\Delta + \gamma} \left(\frac{1 + \rho_a C_p (e_s - e_a) / \Delta(R_n - G) r_a}{1 + \gamma r_c / (\Delta + \gamma) r_a} \right) \quad (2)$$

여기에서 LE 는 증발산량($M J/m^2 \cdot day$); Δ 는 포화수증기 기울기(kPa° / C); R_n 은 순복사에너지($M J/m^2 \cdot day$); G 는 토양에너지($M J/m^2 \cdot day$); γ 는 psychometric 상수(kPa° / C); ρ_a 는 평균 대기밀도(kg/m^3); C_p 는 물의 비열($1/kg^\circ.C$); $(e_s - e_a)$ 는 수증기압차이(kPa); r_a 과 r_c 는 각각 aerodynamic 저항계수, canopy 저항계수이다. 증발산량은 기상조건에 의하여 지배되는데 복사에너지(R_n)와 풍속(r_a)이 풍속의 함수이다.) 이 그것이다. 위의 PM식을 간단하게 만들기 위하여 다음과 같이 α 를 두어 복사에너지항으로만 이루어진 PT공식으로 치환하였다(식 (4))(Priestley and Taylor, 1972).

$$LE = \alpha \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} (R_n - G) \quad (3)$$

여기에서 LE 는 증발산량($M J/m^2 \cdot day$), α 는 무차원이며 식 (4)와 같이 표현할 수 있다

$$\alpha = \frac{1 + \rho_a C_p (e_s - e_a) / \Delta(R_n - G) r_a}{1 + \gamma r_c / (\Delta + \gamma) r_a} \quad (4)$$

PT-JPL은 PT (priestley-taylor)모형을 바탕으로 원격정보를 활용하여 실제증발산량을 계산하도록 진화된 모형이다. 실제증발산량은 식 (5)에 제시된 것과 같이 식생에 의한 증발산($LE_c, M J/m^2 \cdot day$), 식생 아래의 토양에서 증발되는 양($LE_s, M J/m^2 \cdot day$), 차단된 물이 증발되는 양($LE_i, M J/m^2 \cdot day$)과 같이 세 개의 구성요소로 이루어진다.

$$LE_a = LE_c + LE_s + LE_i \quad (5)$$

식 (5)의 각 구성 요소는 다음의 식 (6) ~ 식 (8)로 계산한다.

$$LE_c = (1 - f_{wet}) f_g f_T f_M \frac{\rho \Delta}{\Delta + \lambda} R_{nc} \quad (6)$$

$$LE_s =$$

$$(f_{wet} + f_{SM}(1 - f_{wet})) \alpha \frac{\rho \Delta}{\Delta + \lambda} (R_{ns} - G) \quad (7)$$

$$LE_i = f_{wet} \frac{\rho \Delta}{\Delta + \lambda} R_{nc} \quad (8)$$

여기에서 f_{wet} 는 상대적인 지표면 습윤정도를 나타내며, f_g 는 싱싱한 식생이 차지하는 비율, f_T 는 식생의 온도를 반영한 매개변수, f_M 은 식생 함수도, f_{SM} 은 토양함수도를 반영하는 무차원계수, R_{nc} 는 식생에 작용하는 복사에너지, R_{ns} 는 토양에 작용하는 복사에너지를 반영한 것이며, ρ 는 밀도, λ 는 단위량의 물을 증기화 시키는데 필요한 에너지를 나타내며, 앞에서 언급한 것과 같이 Δ 는 포화수증기 기울기(kPa° / C), G 는 토양에너지($M J/m^2 \cdot day$)이다.

식 (10)과 식 (11)에서 f_{APAR} 은 싱싱한 식생이 광합성을 위하여 흡수하는 에너지이며 f_{IPAR} 는 전체 식생이 광합성을 위하여 흡수하는 에너지를 나타내는 무차원 계수이다. 여기에서 드론으로 수집한 원격정보 SAVI와 NDVI가 활용되는데, m 과 b 는 계수로서 여기에서는 $m_1=1.2*1.136$, $m_2=1.0$, $b_1=1.2*-0.04$,

$b_2 = -0.05$ 가 사용되었다. f_g 와 f_M 은 f_{APAR} 와 f_{IPAR} 의 함수로 이루어져 원격정보를 실제증발산량 LE_a (식 (5))의 계산으로 연결된다(June et al., 2004; Xiao et al., 2003).

$$f_{APAR} = m_1 SAVI + b_1 \quad (9)$$

$$f_{IPAR} = m_2 NDVI + b_2 \quad (10)$$

NDVI는 적외선(NIR)과 가시광선(VIS)과장을 이용하여 경험적으로 개발한 인덱스로서 식생의 양을 표현하는데 식 (11)과 같이 표현된다. 또한 SAVI는 NDVI에다가 토양의 상태를 반영하여 수정보완한 형태로 식 (12)와 같이 표현할 수 있다.

$$NDVI = \frac{NIR - VIS}{NIR + VIS} \quad (11)$$

$$SAVI = \frac{NIR - VIS}{NIR + VIS + 0.5} (1 + 0.5) \quad (12)$$

4. 결과 및 고찰

PT-JPL을 이용하여 실제증발산량을 계산하기 위해서는 순복사에너지, 온도, 습도 등의 기상자료를 필요로 하나 대상지역은 사회시설지역에 해당하여 요구되는 기상자료의 획득은 불가능하다. 연구의 목적이 모형의 이론적 개발이나 검증과는 달리 기술적으로나 현장 활용 측면을 점검하는 것이므로 관측지점 인근에 위치한 전주기상대에서 관측한 기상자료를 사용하였다. 대상지역이 전주시에 속하고 전체적인 기상추세를 해치지 않아 이러한 방법은 기상자료를 이용한 연구에서도 흔히 사용된다.

실제증발산량을 계산하기 위해서는 토양함수나 건조한 정도를 나타내는 수문학적 매개변수, 식생의 건강 정도나 식생온도를 나타내는 생태학적 매개변수, 식생이 흡수한 복사에너지 정도를 나타내는 광학적 매개변수를 필요로 한다. 일단 기상자료와 드론을 이용하여 수집한 NDVI와 SAVI자료를 입력하면 PT-JPL은 구조적인 상호연동으로 인하여 위에서 언급한 매개변수를 계산한다. Fig. 3은 드론 원격탐사를 통해 추출한 NDVI와 SAVI를 나타내고 있다. 매개변

수가 결정되면 식 (6)에서 제시한 바와 같이 실제증발산량을 계산하게 된다.

원격정보를 이용할 시에는 보통 해상도 높은 격자 형태의 자료가 주어지므로 공간적으로 많은 수의 격자를 계산해야 한다. 연구에 사용한 원격정보는 가로×세로의 격자 크기가 10 m이며 가로 404개, 세로 395개의 격자망을 구성하고 개별격자의 실제증발산량을 계산하였다. 식 (6)을 이용한 실제증발산량 계산을 위해 포트란(Fortran) 프로그램을 이용하여 실제증발산량을 계산하는 소프트웨어를 구축하였다. 이는 계산의 효율성과 연구의 최종 목적이 실제증발산량 그 자체이기도 하지만 이를 이용하여 2차적인 가뭄분포를 파악하는데도 효과적이다.

일반적으로 분석 결과를 검증하는 가장 합리적인 방법은 실제 현장관측 자료와 분석치를 대비하는 것이다. 그러나 지진, 화산 등에 의해 발생하는 재해와 같이 붕괴 순간의 관측자료가 존재하지 않거나 수집이 어려울 때에는 연구 결과를 검증하기가 까다롭다. 수문학 분야의 현장관측에서 유량은 가장 관측이 쉬운 인자이며 증발산량은 관측이 가장 어려운 수문인자이다. 또 증발산량을 관측하는 장비가 고가이므로 고밀도 네트워크를 구성하기도 어렵고 일단 설치하더라도 기술적인 어려움으로 전문가가 부족하여 유지관리가 힘들다. 대상지역이 속한 전주기상대의 경우도 증발산량 관측이 이루어지고 있지 않으나 이러한 약점이 연구의 장애요소가 될 수 없고 이 연구의 목적이 물리적인 정확성이나 이론적 검증이 아니라 드론이 수집한 원격정보가 실제증발산 산정에 활용될 수 있는 기능적 확인에 있으므로 정량적인 검증보다는 대안인 정성적 분석을 선택하였다.

Fig. 1의 위성영상과 같이 대상지역은 공원과 공동시설로 구성되어 있고 시각적으로 식생지역과 인공구조물을 확연하게 구분할 수 있다. Fig. 3은 드론을 이용하여 수집한 NDVI와 SAVI의 결과를 보여준다.

Fig. 3에서 NDVI와 SAVI는 식생지역을 잘 재생해내고 있으며 SAVI는 음영에 따라 건강한 식생이 발달한 지역을 선별적으로 구분할 수 있다. 드론으로 수집한 원격정보는 식 (10)과 식 (11)을 통하여 생태학적 매개변수로 변환되며 다시 식 (7)을 통하여 실제증발산으로 반영된다. Fig. 4는 실제증발산의 계산결과를

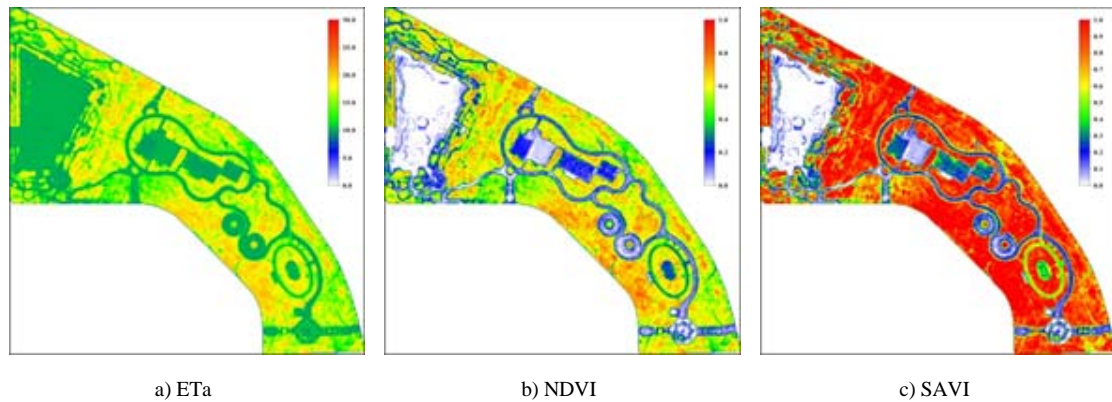


Fig. 4. NDVI and SAVI in comparison with the output of actual evapotranspiration (ETA): a) Actual evapotranspiration (ETA), b) NDVI, c) SAVI.

나타낸 것으로 기상자료가 균일하다는 가정 하에 전 주기상대 자료를 이용하였으므로 실제증발산량의 결과는 NDVI와 SAVI의 변화량에 따라 달라진다. 이론적 배경의 절차에 따라 산정된 실제증발산량의 결과는 NDVI와 SAVI의 패턴과 잘 부합한다. 사실 실제증발산량은 식생의 종류, 패턴, 변화가 지배하므로 합리적인 결과를 보여준다고 할 수 있다. 이는 드론을 활용하여 수집한 원격정보가 실제증발산량의 계산에 적절하게 사용할 수 있다는 것을 보여준다. 각 격자마다 차별화된 기상자료를 부여하면 실제증발산량은 격자의 식생과 기상 특성을 반영하여 보다 현실적으로 구현될 것이다.

NDVI와 SAVI 자료를 위한 자료로서 기상청이나 공공기관에서 제공하는 자료를 활용하는 것이 가능할 수 있다. 공공기관에서는 인공위성으로 수집한 자료를 제공하므로 시간적 공간적 해상도가 떨어지는 것이 대부분이나 넓은 면적의 국가규모나 대규모 유역의 계산에서는 유용하게 활용할 수 있다. 인공위성의 경우 공간해상도의 경우 수 십 m에서 수 km에 이르나 시간해상도에서는 2~3일에 한 번, 심지어 일주일에 한 번의 관측값을 가지게 된다. 반면에 이번 대상지역과 같이 범위가 좁은 지역의 실제증발산량 산정의 경우 고해상 위성 관측 자료가 요구되며 자연재해와 같이 분석 자료가 즉시 필요한 경우에는 인공위성은 앞서 설명한 바와 같이 주기에 따른 한계를 가지고 있다. 이에 반해 드론을 활용할 경우 공간적 시간적 제약

받지 않고 사용자가 원하는 시점의 자료를 즉시 획득할 수 있는 장점이 있다. Fig. 4에 제시된 것과 같이 드론을 활용한 식생원격정보는 실제증발산량을 계산하는데 있어 합리적인 결과를 보여준다.

5. 결론

가뭄은 기후변화에 수반되는 대표적 자연재해에 해당하며 식량생산 뿐만 아니라 사회, 경제, 보건 등에 직접적인 영향을 미치므로 이에 대비한 방재대책이 필요하다. 원격탐사기술의 발전으로 기존의 온도와 강우 위주의 가뭄분석에서 실제증발산량 위주의 가뭄 분석으로 연구방향이 이동 중이다. 선행 강우량 기반의 가뭄지수 기법은 같은 강우가 내려도 지표면의 식생상황과 지표면의 토양함수 정도를 반영하지 못하는 단점이 있는 반면에 실제증발산을 바탕으로 한 가뭄지수는 이러한 약점을 보완하고 지표면의 특성과 식생의 존재와 양을 함축적으로 내포할 수 있는 장점이 있다. 그러나 실제증발산량을 계산하는 이론과 과정은 계측장비의 운용에 많은 비용과 전문 인력이 요구되며 실제증발산량을 계산하는 방법이 복잡하여 접근하기가 쉽지 않다.

이 연구에서 PT-JPL을 바탕으로 한 실제증발산량 계산에 필요한 지상의 식생 정보를 수집하기 위한 방법으로 드론을 이용하고 가능성을 확인하였다. 드론을 이용해서 수집한 NDVI와 SAVI를 실제증발산

매개변수와 연동한 결과 수집된 원격정보는 실제증발산량 산정에 매우 효과적인 결과를 보여주었다. 기존의 원격정보 이용 방법은 높은 공간해상도의 위성관측자료가 필요하며 같은 지역을 반복해서 측정할 경우 주기해상도가 떨어지는 단점이 있다. 드론은 이러한 단점을 극복할 수 있는 자료구축 방안이 될 수 있다.

지진이나 화산 분화처럼 순간적으로 발생하는 자연재해는 전조현상을 관측하기 어려운 반면, 가뭄은 서서히 발생하므로 전조현상이 있고 분석에 필요한 시간적 여유가 있는 재해이다. 그러나 전조현상을 파악하기 위해서 상시 관측이 필요하다. 최근 인공위성 관측자료의 활용빈도는 증가 추세에 있으나 실제증발산량 산정에는 공간적, 시간적 해상도의 제약이 있어 소규모 유역의 증발산량산정을 위해서는 드론의 활용이 매우 유용할 것으로 판단되며, 분석 결과의 신뢰성과 기능성을 높이기 위해 더 많은 노력과 검증이 지속적으로 이루어져야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 건설기술연구사업(16SCIP-B065985-04)에 의해 수행되었습니다.

REFERENCES

- Brustaert, W., 1991, Evaporation into the atmosphere, theory, history and application, Kluwer, Dordrecht, The Netherlands.
- Falkenmark, M., Rockstrom, J., 2006, The new blue and green water paradigm: Breaking new ground for water resources planning and management, *J. Wat. Res. Planning Manag.* - ASCE, 132(3), 129-132.
- Fisher, J., Tu, K., Baldocchi, D., 2008, Global estimates of the land atmosphere water flux based on monthly AVHRR and ISLSCP-II data, validated at 16 FLUXNET sites, *Remote Sens. Environ.*, 112, 901-919.
- Huete, A. R., 1988, A Soil-adjusted vegetation index (SAVI), *Remote Sens. Environ.*, 25, 295-309.
- IPCC (interpanel of climate change), 2007, *Climate change 2007: The physical science basis*, Cambridge University Press, Cambridge, UK and NY, USA.
- June, T., Evans, J. R., Farquhar, G. D., 2004, A Simple new equation for the reversible temperature dependence of photosynthetic electron transport: A Study on soybean leaf, *Func. Plan. Biol.*, 31, 275-283.
- Lee, K., 2016, Korea has no water scarcity!, *Water Res.*, 43(3), 579-582.
- Maidment, D. R., 1993, *Handbook of hydrology*, McGraw-Hill, New York.
- Monteith, J. L., 1965, Evaporation and environment, *Symp. Soc. for Exp. Bio.*, 19, 205-224.
- Narasimhan, B., Srinivasan, R., 2005, Development and evaluation of soil moisture deficit index (SMDI) and evapotranspiration deficit index (ETDI) for agricultural drought monitoring, *Agri. and For. Met.*, 133(1-4), 69-88.
- Priestley, C. H. B., Taylor, R. J., 1972, On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters, *Mon. Weather Rev.*, 100(2), 81-92.
- Rouse, J. W., Haas, R. H., Scheel, J. A., Deering, D. W., 1974, Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS, *Proceedings, 3rd Earth Resource Technology Satellite (ERTS) Symposium*, 1, 48-62.
- Savenije, H. H. G., 2000, Water scarcity indicators; The deception of the numbers, *Phys. Chem. Earth, Ser. B*, 25(3), 199-204.
- Xiao, X., Hollinger, D., Aber, J. D., Goltz, M., Davidson, E., Zhang, Q., 2003, Satellite-based modeling of gross primary production in an evergreen needle leaf forest, *Remote Sens. of Environ.*, 89, 519-534.