Journal of Environmental Science International
27(2); 135~141; February 2018

pISSN: 1225-4517 eISSN: 2287-3503
https://doi.org/10.5322/JESI.2018.27.2.135

TECHNICAL NOTE

드론 원격정보 격자크기가 실제증발산량 산정에 미치는 영향

이길하*
대구대학교 건설시스템공학과

Influence of Scaling in Drone-based Remotely Sensed Information on Actual Evapotranspiration Estimation

Lee, Khil-Ha*
Department of Civil Engineering, Daegu University, Gyeongsan 38453, Korea

Abstract

The specification of surface vegetation is essential for simulating actual evapotranspiration of water resources. The availability of land cover maps based on remotely collected data makes the specification of surface vegetation easier. The spatial resolution of hydrologic models rarely matches the spatial scales of the vegetation data needed, and remotely collected vegetation data often are upscaled up to conform to the hydrologic model scale. In this study, the effects of the grid scale of of surface vegetation on the results of actual evapotranspiration were examined. The results show that the coarser resolution causes larger error in relative terms and that a more realistic description of area-averaged vegetation nature and characteristics needs to be considered when calculating actual evapotranspiration.

Key words : Actual evapotranspiration, Aggregation, Scale, Vegetation index

1. 서 론

실제증발산은 물이 지표면으로부터 대기로 이동하는 중요한 수단인 증발과 증산의 합을 나타내며 지표면으로부터 물 그 자체, 흙 표면, 식생과 식생차단에 의한 물의 이동을 내포하고 있다. 실제증발산의 산정은 식생의 종류와 지표면 토지 이용실태에 따라서 그 양이 크게 좌우되므로 실제증발산량 모형에서 지표면 특성을 정확하게 반영할 필요가 있다. 그러나 실제증발산량은 수문학적 인자 가운데 가장 관측이 어려운 요소 중의 하나이며, 물리적으로 복잡하고 많은 인자가 서로 상호 작용하므로 계산하기도 어렵다.

실제증발산량의 산정에는 이론적으로 완성도가 높은 PM (Penman-Monteith, Monteith, 1965) 방법이 많이 거론되기는 하나 지역 특성을 반영하는 매개변수를 결정하기가 어려워 실무에서는 활용도가 떨어진다. 대신 풍속에 의한 영향을 계수화하여 복사에너지 항만으로 간략화하였으나 정확도에서 뒤지지 않는 PT (Priestley-Taylor, Priestley and Taylor, 1972) 방법이 흔히 사용된다. 이 연구에서는 PT 모형의 수정형인 PT-JPL 방법을 사용할 경우에 지표면 특성을 표현하기 위하여 일반적으로 원격정보를 활용하는데

Received 13 December, 2017; **Revised** 31 December, 2017; **Accepted** 8 January, 2018
***Corresponding author**: Lee, Khil-Ha, 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.

(Rouse et al., 1974; Fisher et al., 2008) 이때 원격정보의 격자크기가 실제증발산량 산정결과에 어떤 영향을 미치는가를 고려해 보았다. 수문 기상 데이터 및 지표면 데이터가 필요한 실제증발상량 산정과 같은 수치모형에서 지표면 데이터는 본질적으로 지표면 수직작용 시스템을 제어하게 된다. 격자기반의 분포형 모형에서는 실제증발산의 반응에 매우 민감한 입력변수로서 적정한 값의 선택은 수치모형의 결과의 질에 직접적인 영향을 미친다. 실제증발산모형에서 토지피복데이터를 처리하려면 모델의 요구와 선택은 종종 주관적이고 직관적으로 행해짐에 따라 토지 피복데이터를 재조정할 필요가 있다(Shuttleworth, 1998).

드론을 활용한 지표면 관측의 장점 중 하나는 고해상도이다. 드론을 활용하면 몇 센티미터 고해상도의 정밀한 자료를 얻을 수 있다(Lee et al., 2016). 증발산을 포함한 수문모형에서는 격자크기가 몇 센티미터라는 것은 현실적으로 상상하기 힘들다. 일반적으로 국지적 수문모형은 몇 십 미터, 지역 스케일 정도 되면 몇 백 미터에서 몇 킬로미터가 될 것이다. 드론을 활용하여 고해상도의 지표자료를 얻는다면 자주 업스케일링의 문제에 부딪힐 것이다.

PT-JPL에서 실제증발산량을 계산할 때에 지표면의 토양함수와 식생상황과 같은 지표면의 특성을 대푯값으로 나타내기 위하여 NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)와 SAVI (Soil-Adjusted Vegetation Index)를 사용하는데 (Rouse et al., 1974; Huete, 1988; Fisher et al., 2008), NDVI와 SAVI의 격자크기가 각각 1 m, 2 m, 5 m, 10 m, 20 m일 때 증발산량 결과값을 상대 비교해 보았다. 이 연구에서는 경계범위 안에는 유효한 식생지수를 가지며 경계 밖에서는 자료가 없는 경우에 한하여 관찰을 국한하였다. 실제증발산 모의결과에 직접적인 영향을 끼치는 지표관련 매개변수 결정과 관련하여 격자크기와 이질성이 모형의 결과에 끼치는 영향에 대하여 다루고, 이질성을 평균할 때 선택방법에 대한 유용한 지침과 기본 정보를 제공할 것으로 사료된다(McNaughton, 1994 ; Raupach, 1995 ; Shuttleworth, 1998).

2. 재료 및 방법

지표면 식생의 광학적 특성인 NDVI와 SAVI를 관측하기 위하여 전라북도 전주시 효자동 3가에 위치하고 있는 문학대공원을 연구대상지로 선정하였다 (Fig. 1). 관측에는 SenseFly사에서 제작한 eBee모델을 드론에 장착하여 원격으로 광학자료를 수집한 후 영상을 구축하였다. Canon 사의 S110 NIR카메라는 근적외선 밴드뿐 아니라 적색광과 녹색광을 포함하고 있어

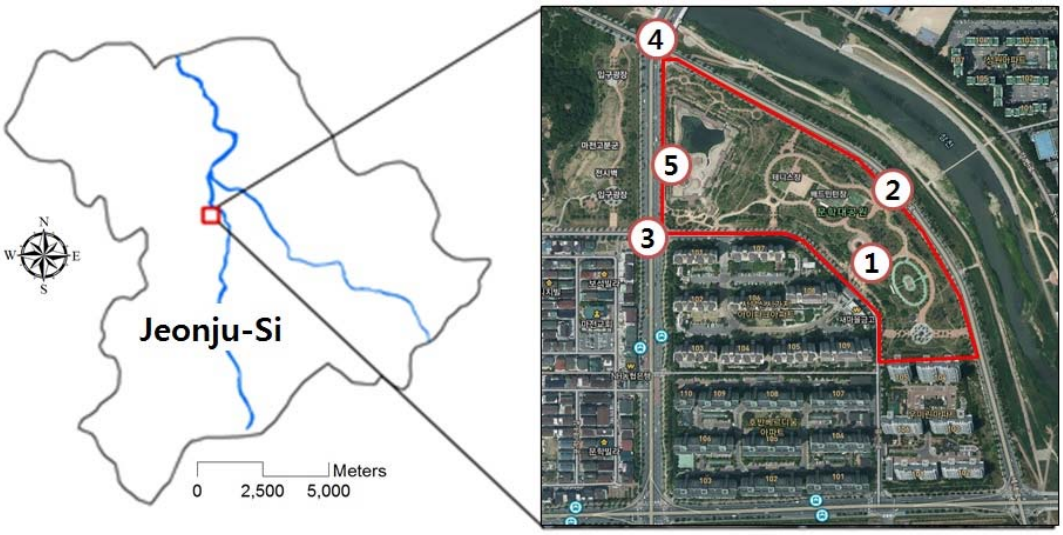

Fig. 1. Study area.

NDVI와 SAVI추출에 유용하므로 이를 이용하여 지표면 정보를 수집하였다. 드론 비행계획은 eMotion 소프트웨어를 활용하여 수립하였다. 고도 약 115 m에서 4 ㎝급으로 촬영하여 연구에 필요한 해상도를 재구성하였으며, 종중복도와 횡중복도는 각각 85%와 70 %로 설계하였다. 연구가 진행되는 현재 eBee모델은 비행 속도 40∼90 ㎞/h, 최대풍속 12 m/s 까지 운행이 가능하다. 이 연구에서는 비행시간은 최대 약 50 분으로 수행하였다. 드론으로 촬영한 사진은 패치(patch) 형태로 수집되기 때문에 일체형을 만들기 위하여 영상접합과정을 거치는데 Pix4D 소프트웨어를 이용하여 영상접합을 수행하였다. 또 접합 시 정확한 좌표매칭을 위해 지상에서 5점의 기준점(GCP; Ground Control Point)을 선정한 후 GPS (Global Positioning System) 장비를 활용하여 GCP 측량을 실시한 후 신뢰성을 높였다.

3. 이론적 배경

PT (Priestley-Taylor)모형(Priestley and Taylor, 1972)은 잠재증발산량을 산정하기 위하여 PM (Penman-Monteith)공식(Monteith, 1965)으로 파생된 하나의 수정형 모형이다. PM 증발산량 공식의 일반형은 식(1)과 같이 표현할 수 있다. 이를 재정리하면 식(2)로 표현된다.

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

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

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

여기에서 LE는 증발산량(M J/m^2 · day); $\triangle$는 포화수증기 기울기(kPa^o/C); R_n은 순복사에너지(M J/m^2 · day); G는 토양에너지(M J/m^2 · day); γ는 psychometric 상수 (kPa^o/C); ρ_a는 평균 대기밀도 (kg/m^3); C_p는 물의 비열($1/kg^o.C$); $(e_s - e_a)$는 수증기압차이(kPa); r_a과 r_c는 가각 aerodynamic 저항계수, canopy 저항계수이다. 증발산량은 기상조건에 의하여 지배되는데 복사에너지(R_n)와 풍속의 함수이다. 이 증발산과정에 미치는 주요 기상인자이다. PM 식은 많은 입력인자가 필요하고 계산도 복잡하므로 간단하게 만들기 위하여 다음과 같이 α를 두어 복사에너지항으로만 이루어진 PT공식으로 다음과 같이 치환할 수 있다(식 4)(Priestley and Taylor, 1972).

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

여기에서 LE는 증발산량(M J/m^2 · day), α는 무차원이며 식(4)와 같이 표현할 수 있다

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

일반적으로 PT모형은 한 지점의 계산에 최적화된 모형으로 면적이 넓은 지역의 증발산 계산에는 약점을 보인다. 이를 보완하기 위하여 PT (Priestley-Taylor) 모형을 바탕으로 최근 원격탐사기술을 활용하여 실제증발산량을 계산하도록 보완형 모형인 PT-JPL을 개발하였다. 실제증발산량은 식(5)에 제시된 것과 같이 식생에 의한 증발산(LE_c, M J/m^2 · day), 식생 아래의 토양에서 증발되는 양(LE_s, M J/m^2 · day), 차단된 물이 증발되는 양(LE_i, M J/m^2 · 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.

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

$$LE_s =$$

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

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

여기에서 f_{wet}는 상대적인 지표면 습윤정도를 나타내며, f_g는 싱싱한 식생이 차지하는 비율, f_T는 식생의 온도를 반영한 매개변수, f_M은 식생 함수도, f_{SM}은 토양함수도를 반영하는 무차원계수, R_{nc} 는 식생에 작용하는 복사에너지, R_{ns} 는 토양에 작용하는 복사에너지를 반영한 것이며, ρ는 밀도, λ는 단위량의 물을 증기화 시키는데 필요한 에너지를 나타내며, 앞에서 언급한 것과 같이 $\triangle$는 포화수증기 기울기(kPa^o/C), G는 토양에너지(M J/m^2 · 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, m과 b는 계수로서 여기에서는 m1=1.2*1.136, m2=1.0, b1=1.2*-0.04, b2=-0.05가 사용되었다. f_g와 f_M은 f_{APAR}와 f_{IPAR}의 함수로 이루어져 원격정보를 실제증발산량 LE_a(식5)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(*VIR*)파장을 이용하여 경험적으로 개발한 인덱스로서 식생의 양을 표현하는데 식(11)와 같이 표현된다. 또한 SAVI는 NDVI에다가 토양의 상태를 반영하여 수정보완한 형태로 식(12)과 같이 표현할 수 있다.

$$NDVI = \frac{NIR - VIS}{NIR + VIS} \quad (12)$$

$$SAVI = \frac{NIR - VIS}{NIR + VIS + 0.5}(1 + 0.5) \quad (13)$$

4. 결과 및 고찰

PT-JPL을 이용하여 실제증발산량을 계산하기 위해서는 순복사에너지, 온도, 습도 등의 기상자료가 필요하다. 대상지역은 사회시설지역으로서 수치모형에서 필요로 하는 기상자료를 수집하는 기상관측장비가 존재하지 않으므로 정확한 지점에서 기상자료를 수집하는 것은 불가능하다. 기상자료는 지리적으로 연구대상지점 인근에 위치한 전주기상대에서 관측한 기상자료를 사용하였다. 이러한 방법은 기상자료를 이용한 연구에서도 흔히 사용되는 기법이다. 연구의 목적이 모형의 이론적 개발이나 검증과는 달리 지표면 광학자료가 실제증발산 산정에 미치는 영향을 관찰하는 이 연구와 같은 수치실험에서는 비교대상에 대하여 같은 기상자료를 사용한다면 전체적인 기상추세를 해치지 않으며 허용되는 게 일반적이다.

PT-JPL모형에서는 토양의 건조한 정도를 나타내는 수문학적 매개변수, 식생의 건강한 정도와 양, 식생 온도를 나타내는 생태학적 매개변수, 식생이 흡수한 복사에너지 정도를 나타내는 광학적 매개변수가 있다. 드론을 이용하여 수집한 NDVI와 SAVI자료를 PT-JPL모형에 입력하면 PT-JPL모형은 내부에서 상호연동으로 인하여 위에서 언급한 매개변수를 2차적으로 계산한다. 원격정보를 이용할 시에는 보통 높은 해상도를 가진 격자 형태의 자료로 시작하고 공간적으로 많은 수의 격자를 계산해야 한다. NDVI와 SAVI 자료의 격자크기를 얼마로 결정하느냐에 따라서 실제증발산의 정확도에 영향을 미칠 뿐 아니라 계산 속도에도 중요하므로 격자크기에 대한 파급효과에 대하여 살펴볼 필요가 있다. 이는 원격탐사자료를 이용한 수문-수치모형연구에서 흔히 발생하는 이슈이다.

먼저 가로×세로의 격자 크기가 1 m이며 가로 400개, 세로 380 개의 격자망을 구성하고 개별격자에 대하여 실제증발산량을 계산하였다. 계산에는 앞서 구축한 포트란(Fortran) 프로그램을 이용하였다(Lee et al., 2016). 이에 대응하여 상대비교하기 위하여 가로×세로의 크기가 1 m인 격자를 바탕으로 포트란 프로그램을 이용하여 가로×세로의 격자 크기가 각각 2 m, 5 m, 10 m, 20 m 이며 격자의 개수가 각각 200×190, 80×76, 40×38, 20×19 인 격자망으로 재구성하였다.

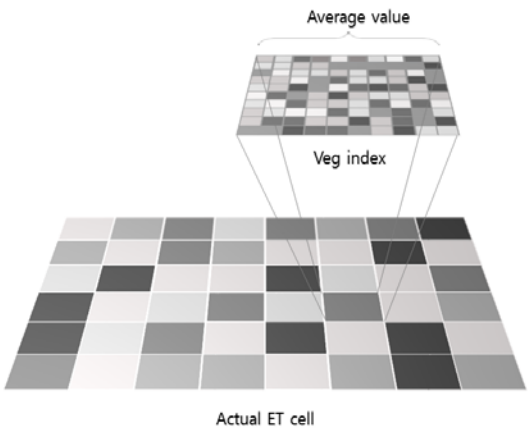

Fig. 2. A Schematic plot of upscaled grid aggregation.

1 m 격자로부터 큰 격자에 대하여 각각의 셀에서 산술평균 처리하였다. Fig. 2는 1 m 해상도의 식생자료를 활용하여 10 m 해상도의 수치모형에서 자료를 통합평균 처리하는 체계를 가시적으로 보여준다. 10 m의 수치모형의 한 개의 셀 안에는 100 개의 1 m 식생자료를 통합 처리해야한다.

실제 격자의 크기가 실제증발산모형에 미치는 2차적인 효과를 검토하는 가장 합리적인 방법은 실제 현장관측 자료와 비교해 보는 것이다. 증발산 관측 장비는 고가이고 고난이도의 관리기술이 필요하다. 일단 설치하더라도 고밀도 네트워크를 구성하기도 어렵고 기술적인 어려움으로 전문가가 부족하여 유지 관리가 힘들다. 한편 격자망의 크기가 모형에 미치는 2차적

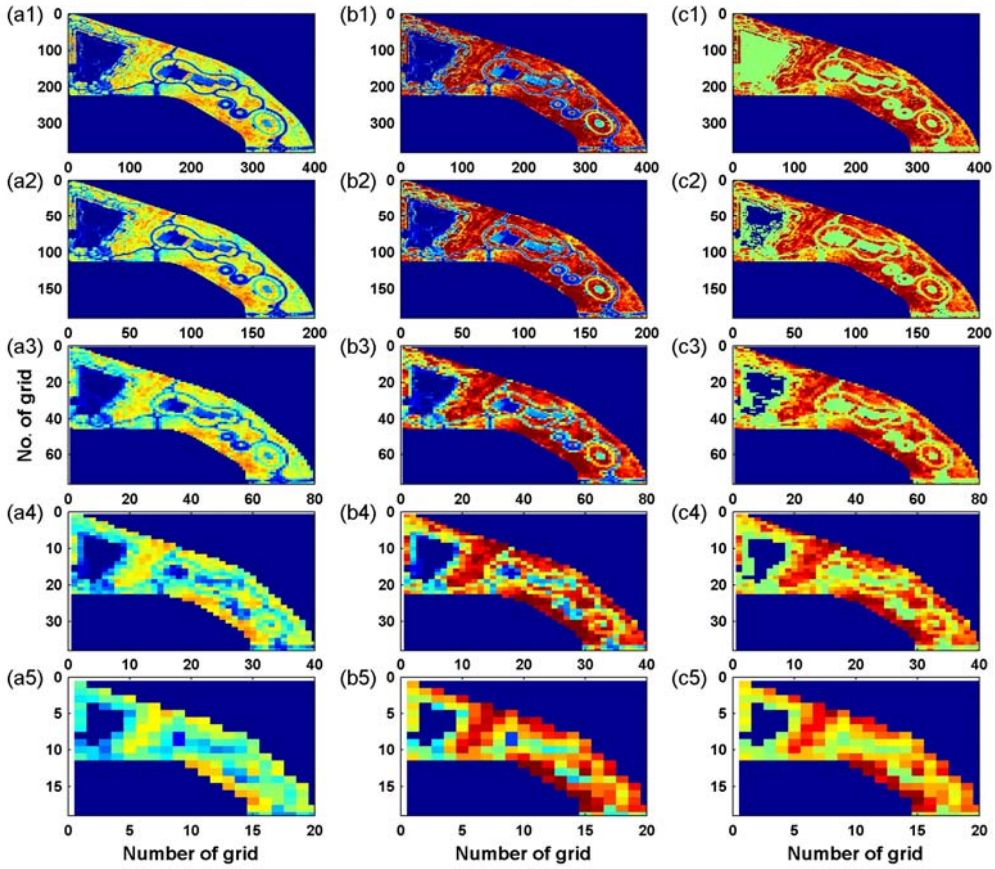

Fig. 3. NDVI (a1-a5), SAVI (b1-b5), and actual evapotranspiration (c1-c5) for each grid scale. 1 denotes 1 m resolution, 2 denotes 2 m resolution, 3 denotes 3 m resolution, 4 denotes 4 m resolution, and 5 denotes 5 m resolution. NDVI and SAVI scales from (1.0) red to blue (0.0) and ETa scales from red (20.0 MJ/m^2 day) to blue (0.0 MJ/m^2 day).

영향이라는 것은 실제 현실에서 물리적으로 나타나는 자연현상이 아니다. 단지 수치모형에서만 발생하는 인위적인 문제이며 모형의 조작을 어떻게 하나에 대한 기술적인 문제이다. 모형내부의 구조적 정확성이나 이론적 배경을 검토하는 물리적인 접근이 필요한 것이 아니라 격자 크기에 따른 상대비교를 검토하는 기능적이고 기술적인 문제이다.

대상지역은 시각적으로 식생지역과 인공구조물이 확연하게 구분이 되는 공원과 공동시설로 구성되어 있다. Fig. 3의 (a)와 (b)자료는 드론을 운용하여 수집한 NDVI와 SAVI 지표면 식생자료에 대한 각 해상도의 결과를 가시적으로 보여준다. 각 해상도의 격자형 식생자료는 식(11)과 식(12)을 통하여 생태학적 매개변수로 변환되며 다시 식(7)을 통하여 실제증발산에 직접적으로 반영된다.

사실 실제증발산량은 기상자료와 지표면 식생자료에 의하여 결과가 좌우된다. 실제증발산량이 식생의 종류, 패턴, 변화에 의하여 지배되는 것이 사실이나 그 이전에 식생의 이런 행태조차도 기상조건에 의하여 결정된다. 그래서 실제증발산을 결정하는데 있어 기상조건을 배제하고는 이야기를 할 수가 없다. 이 연구에서는 각 격자에 대한 기상조건이 같다고 가정하였다. 다섯 개의 해상도를 가진 격자망을 사용하여 앞서 제시된 식(5)를 바탕으로 실제증발산을 계산한 결과는 다음과 같다.

우선 1 m 해상도의 식생지수자료를 활용하여 계산한 평균 증발산량은 70.02 W/m^{2}로 나타났다. 2 m 해상도에 대한 증발산량은 66.09 W/m^2, 5 m 해상도에 대한 증발산량은 64.81 W/m^2, 10 m 해상도에 대한 증발산량은 62.15 W/m^2, 20 m 해상도에 대한 증발산량은 61.23 W/m^2 로 나타났다. 1 m 해상도의 값을 정해로 가정한다면 상대오차가 각각 5.62%, 7.44%, 11.24%, 12.56% 로서 격자의 해상도가 낮아질수록 오차가 커짐을 알 수 있다. 또 해상도가 낮아질수록 과소평가함을 볼 수 있다. 컴퓨터 툴을 이용하여 자료를 통합 평균 처리할 때에 식생이 격자의 반을 채우지 못하면 식생이 없는 것으로 간주하고 처리하는 게 일반적이다. 해상도가 낮아질수록 오차가 커지는 결과는 낮은 해상도 경계부분에서 통합평균 처리과정에서 식생을 인위적으로 얻거나 잃어버리는 결과를 초래하여 발생한 것으로 사료된다. 이와 같은 현상은 특히 해안가, 호수, 하천 경계지역에서 주의를 기울일 필요가 있다는 것을 의미할 것이다.

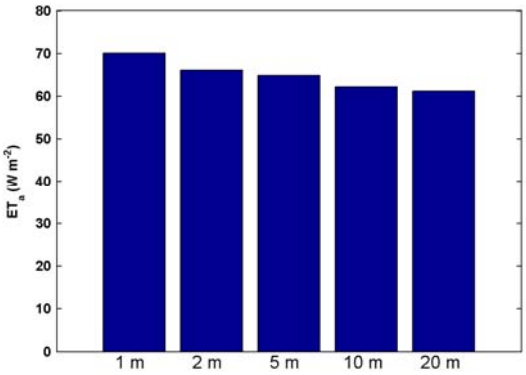

Fig. 4. Relative comparison of actual evapotranspiration for each grid scale.

5. 결 론

원격정보를 활용하여 수집한 1 m 해상도 (400×380)의 식생지수 NDVI와 SAVI자료가 격자크기에 따라 실제증발산의 정확도에 어떻게 영향을 미치는지를 살펴보기 위하여 2 m, 5 m, 10 m, 20 m 격자로 확대하여 산술평균 하였다. 그리고 이를 이용하여 실제증발산량을 각각 계산한 결과 1 m 해상도에 대하여 평균 증발산량은 70.02 W/m^{2}로 나타났다. 2 m, 5 m, 10 m, 20 m 해상도에 대하여 평균증발산량은 각각 66.09 W/m^2 (5.62%), 64.81 W/m^2 (7.44%), 62.15 W/m^2 (11.24%), 12.23 W/m^2(12.56%) 로 나타났다. 원격탐사자료와 수치해석의 스케일링 불일치는 흔히 나타나는 현상으로 식생지수를 통합 평균 처리할 시에는 주의가 필요하다.

이 연구에서 보듯이 원격자료가 수치모형과 연동하여 사용될 때에 격자크기를 결정하고 통합 평균 처리하는 방법은 결과의 정확도에 상당히 중요하다. 향후 현장 관측 자료가 존재하는 지역에서 더 섬세하고 향상된 연구 설계를 가진 2차 연구를 계획 중이다.

감사의 글

이 논문은 2017년 한국연구재단 이공분야기초연구

사업 중견연구자사업의 지원을 받아 수행된 연구임 (한국연구재단-2017년도-2017001809)

REFERENCES

Fisher, J., Tu, K., Baldocchi, D., 2008, Global estimates of the land atmosphere water flux based on monthly AVHRR and ISLSCPII 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.

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, G., Kim, S., Hamm, S., Lee, K., 2016, Computation of actual evapotranspiration using drone-based remotely sensed information: preliminary test for a drought index, Journal of Environ. Sci. Int., 25, 1653-1660.

McNaughton, K. G., 1993, Effective stomatal and boundary layer resistances of heterogeneous surfaces, Plant Cell Environ., 17, 1061-1068.

Monteith, J. L., 1965, Evaporation and environment, Symp. Soc. for Exp. Bio., 19, 205-224.

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, 81-92.

Raupach, M. R., 1995, Vegetation-atmosphere interaction and surface conductance at leaf, canopy, and regional scales, Agri. Forest Meteorol., 73, 151-179.

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.

Shuttleworth, W. J., 1998, Combining remotely sensed data using aggregation algorithms, Hydrology Earth Syst. Sci., 2, 149-158.

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.