

# 인공위성 데이터 기반의 두 공간 증발산 산정 모형 비교 분석

서 찬 양\* / 최 민 하\*\*†

## An intercomparison of two satellite data-based evapotranspiration approaches

Sur, Chanyang\* / Choi, Minha\*\*†

**요약** : 증발산은 토양 표면에서 일어나는 증발 과정과 식물의 광합성으로 인해 발생하는 증산 작용을 포함한 수문 기상인자로 수문 순환과정에서 중요한 역할을 차지한다. 현재 국내외에서는 증발산을 산정하고 공간적인 거동을 파악하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있지만 특정 지역에서의 토지 피복의 차이나 식생으로 인해 거동을 이해하는데 많은 제약이 따른다. 본 연구에서는 고해상도의 영상을 제공하는 Landsat 위성이 기반이 되는 원격탐사 기반 에너지 수지 모형인 Mapping EvapoTRanspiration with Internalized Calibration (METRIC) 모형과 MODerate resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) 위성 기반의 Penman-Monteith 알고리즘으로 산정된 증발산의 공간 분포를 비교하였다. 토지 피복별로 분류한 후 두 공간 분포를 비교하여 침엽수림과 활엽수림에서 가장 높은 상관관계를 갖는 것을 확인하였고 두 모형에 대한 적용성이 높음을 알 수 있다. 본 연구를 바탕으로 원격탐사 기반 고해상도 증발산 지도를 제작하여 시공간적 변동성과 계절 변화에 따른 거동을 파악할 수 있을 것이다.

**핵심용어** : 증발산, METRIC, MODIS, 원격탐사, 식생

**Abstract** : Evapotranspiration (ET) including evaporation from a land surface and transpiration from photosynthesis of vegetation is a hydrological factor that has an important role in water cycle. However, there is a limitation to understand it due to heterogeneity of land cover and vegetation. In this study, Mapping EvapoTRanspiration with Internalized Calibration (METRIC) model, one of the energy balance models, and MODerate resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) satellite based well-known Penman-Monteith algorithm were compared. Two ET maps were categorized and compared by land cover classification. The results represented overall applicability of the two models with the highest correlation coefficients in needleleaf and broadleaf forests. This study will be useful to estimate remote sensing based ET maps with high resolution and to figure out spatio-temporal variability and seasonal changes.

**Keyword** : *Evapotranspiration, METRIC, MODIS, Remote sensing, Vegetation*

### 1. 서 론

증발산은 토양과 대기 사이의 상호작용의 매개체가 되는 주요 수문기상 인자로 (McCabe and Wood, 2006; Mu *et al.*, 2007), 수문학, 기상학, 농림학, 생태학 등 다양한 학문 연구에 큰 영향을 미친다 (최민하 등, 2011). 정량화된 증발산은 수

문학적 물수지 해석, 수자원 관리 등의 사업 수행에 있어 효율적인 정보를 제공할 수 있다 (Allen *et al.*, 2007a). 정확한 증발산의 관측을 위해 증발접시와 같은 측정 장비로 실측하거나 에디 공분산 기법을 이용하여 경험적으로 산정한다. 지상 지점 관측 자료는 주변의 환경적인 요인들에 의한 변동성이 민감하게 작용하므로 공간적인 분포

† Corresponding author : mchoi@hanyang.ac.kr

\* 정희원 · 한양대학교 건설환경공학과 석사과정 · E-mail : cysur@hanyang.ac.kr

\*\* 정희원 · 한양대학교 건설환경공학과 조교수 · 공학박사 · E-mail : mchoi@hanyang.ac.kr - 교신저자

에 대한 경향을 파악하기 어려운 반면 인공위성에 탑재된 다중분광 센서를 이용한 원격탐사는 지점 관측의 단점을 보완할 수 있다 (Jiang and Islam, 2001; Kustas *et al.*, 2007; Choi *et al.*, 2009).

원격탐사를 기반으로 한 증발산 산정 모형은 일반적으로 동역학적 저항을 이용한 에너지 수지 방법과 Penman-Monteith 방법을 이용한 기준 증발산 산정 방법의 두 가지 방법으로 나뉜다. 에너지 수지 방법은 가시광선과 근적외선 영역에서의 지표면 반사율과 열 대역에서의 지표면 온도를 이용하여 공기동역학적 저항과 에너지 수지 방법을 통해 증발산을 산정하는 방법이다 (Kalma *et al.*, 2008; Choi *et al.*, 2009). Penman-Monteith 모형으로 대표되는 기준 증발산 산정 모형은 원격탐사를 이용하여 얻어진 식생 정보를 이용하여 캐노피 컨덕턴스를 산정, 이를 이용하여 기준 증발산을 산정한다 (Mu *et al.*, 2007; Cleugh *et al.*, 2007; Kim *et al.*, 2011).

Mapping EvapoTRanspiration with Internalized Calibration (METRIC) 모형은 고해상도의 영상을 제공하는 Landsat 위성이 기반이 되는 원격탐사 기반 에너지 수지 모형으로서 외부 입력 자료, 주요 매개변수와 같은 알고리즘의 구조에 의해 결과들이 다르게 산정된다. Allen *et al.* (2007b)은 미국 서부 지역에 대해 Landsat 5 Thematic Mapper (TM)와 Landsat 7 Enhanced Thematic Mapper (ETM+) 위성 이미지를 이용한 METRIC 모형을 적용하여 높은 적용성을 보이는 것을 확인하였으며, 최민하 등 (2011)은 Landsat 5 TM과 Landsat 7 ETM+ 을 이용하여 경안천 유역에 대한 METRIC 모형의 적용성을 연구하였다. METRIC 모형으로 산정된 증발산과 증발접시를 이용한 관측값을 비교 검증한 결과 11%의 오차를 보였고, METRIC 모형의 높은 적용성을 확인하였다.

Penman-Monteith 모형은 이론적인 물리식을 기반으로 한 방법으로, 특정한 입력변수에 대한 의존성이 낮고 외부 환경 요인에 의한 오차 발생이 적어 널리 사용된다. Cleugh *et al.* (2007)은

MODIS 원격탐사를 기반으로 호주의 상록수림 (evergreen forest)과 열대우림 (tropical savanna) 지역에 대한 Penman-Monteith 기준 증발산 산정 방법을 적용하였다. Mu *et al.* (2007)은 Cleugh *et al.* (2007)의 MODerate resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) 위성 이미지 기반 증발산 산정 방법을 개선하여 시간 해상도 8일, 공간 해상도 1km의 전 지구 규모 공간 증발산을 산정하여 높은 적용성을 보였다. Mu *et al.* (2007)에 의해 산정된 MODIS 16 Global ET Product는 일정 수준 이상의 신뢰도를 유지하는 증발산 지도를 전 지구 규모로 제공한다.

Landsat 위성 이미지는 고해상도의 이미지로 수백 km에 이르는 지역을 높은 품질로 스캔하기 때문에 유역 규모의 연구에 적합하지만, 시간 해상도가 16일이므로 시간적 변동성을 파악하기엔 무리가 따른다. MODIS 위성 이미지는 Landsat 이미지에 비해 상대적으로 낮은 공간 해상도를 갖지만 시간 해상도가 1일로 자료 획득에 많은 이점이 있다. 이렇듯 각기 다른 특징을 갖는 두 위성의 단점을 보완하여 각각의 이미지를 분류, 비교해보면 시공간적인 증발산의 거동을 파악할 수 있다. 그 예로 McCabe and Wood (2006)는 미국 Iowa 주 Walnut creek 유역을 대상으로 1km의 공간해상도를 갖는 MODIS와 30m의 Landsat, 15m의 Advance Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) 센서에서 산정된 증발산을 식생별로 분류한 후 비교하여 증발산이 옥수수 재배지역에서 가장 높게 나타나고, 콩 재배지에서 가장 낮게 나타나는 것을 확인하였다. Timmermans *et al.* (2007)은 Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL) 모형 및 Two-Source Energy Balance (TSEB)을 플럭스타워 데이터와 비교하여 적용성이 높음을 확인하였으며, Choi *et al.* (2009)은 미국 Iowa 주 Walnut creek 유역에서 METRIC과 TSEB, Trapezoid Interpolation Model (TIM) 모형을 비교하였다. 한편, 최민하 등 (2011)과 Kim *et al.* (2011)은 METRIC 모형

## 2. 연구 지역

과 MODIS 16 Product의 지점 검증은 실시하였지만 각각 다른 특성을 갖는 모형에서 산정된 증발산 공간 분포에 대한 비교 연구는 이루어지지 않았다.

본 연구에서는 Landsat 위성 기반 METRIC 모형과 MODIS 위성 기반의 Penman-Monteith 알고리즘을 적용한 증발산의 공간적인 분포를 비교 분석하였다. 2003년 2월 1일과 2006년 9월 13일에 각기 획득한 Landsat 위성 이미지를 경안천 유역에 적용하여 Penman-Monteith 알고리즘을 적용한 MODIS 위성 이미지와 동일 시간대에서 비교하였다. 해상도가 각기 다른 두 위성센서를 이용하여 증발산의 공간 분포를 파악함으로써, 유역 내의 공간적인 변동성을 확인하고자 하였다. 또한, 유역의 증발산분포를 각 토지 피복별로 분류함으로써 토지 피복에 따른 증발산의 거동을 분석하고자 하였다.

본 연구에서는 경기도 광주시와 용인시에 위치한 경안천 유역을 대상 유역으로 선정하였다. 경안천은 북위 37°09'40"~37°29'27", 동경 127°08'06"~127°26'50"에 위치하고 있으며 (그림 1), 유역면적이 약 561.1km<sup>2</sup>의 중규모 하천이다. 경안천은 연 평균 강우량 1200.5mm, 연 평균 기온 10℃의 우리나라 평균 기후 특성에 적합한 대표적인 유역이다 (박종윤 등, 2008). 경안천 유역의 평균 고도는 154m, 유로 연장은 47.38km이며, 유역 평균경사는 28.8%로 그림 1과 같다. 이 유역의 토성은 사양토와 양토가 대표적이다. 또한, 그림 2와 같이 유역의 약 60% 정도가 산림으로 이루어져 있고 20%는 논과 밭이 포함된 경작지로 이루어져 있으며 그 외에는 시가지, 초지 등 여러 토지 피복 항목이 고루 산재되어 있다 (최민하 등, 2011; Choi *et al.*, 2011).

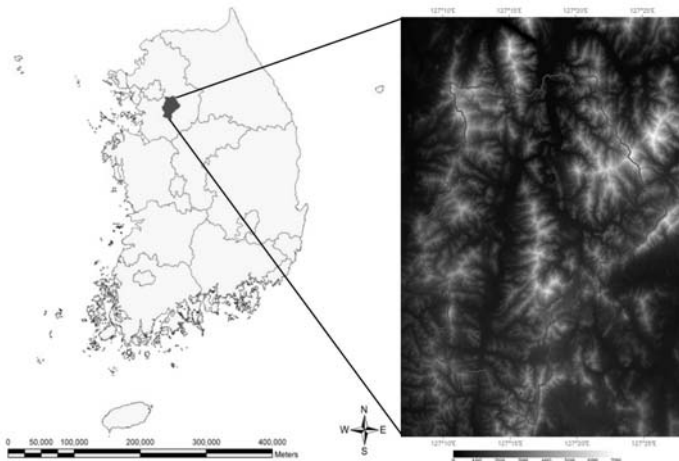


그림 1. 경안천 유역의 위치 및 Digital Elevation Model (DEM)

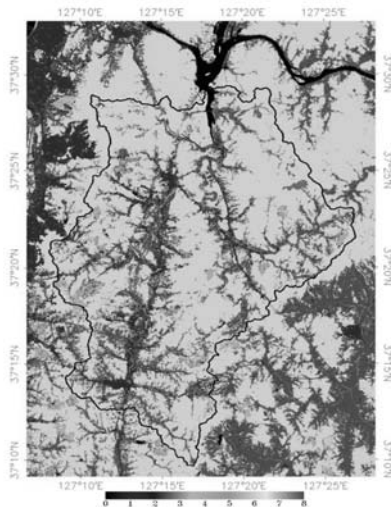


그림 2. 경안천 유역의 토지 피복도

## 3. 연구 방법

### 3.1 Landsat 위성 자료

본 연구에 적용한 인공위성 이미지는 United

States Geological Survey (USGS)에서 제공하는 Landsat 5 위성의 TM 센서와 Landsat 7 위성의 ETM+ 센서로부터 획득하였다. TM 센서는 가시광선, 근적외선, 중적외선 및 열적외선 영역에서 반사되거나 복사되는 에너지를 기록하는 광학센서

시스템으로 높은 공간해상도, 분광해상도, 시간해상도 및 방사해상도를 가지고 있는 다중분광 영상을 수집한다 (Kramer, 1994). ETM+ 센서는 TM 센서에 비해 향상된 방사보정 기능을 가지고 있으며, 이미지가 뒤틀리고 왜곡되는 것을 보정해주는 센서 보정장치 (Scan Line Corrector, SLC)가 장착되어 있다 (NASA, 1999). 하지만, 2003

년 5월 SLC가 손상이 되어 (Markham et al., 2004) 이미지가 보정이 되지 않아 본 연구에서는 Landsat 7 ETM+로 2003년 2월 1일을, Landsat 5 TM으로 2006년 9월 13일에 해당되는 이미지를 획득하여 적용하였다. TM 센서와 ETM+ 센서의 특성은 표 1과 같다.

표 1. TM / ETM+ 센서 특성

밴드	Landsat 5 TM			Landsat 7 ETM+		
	분광해상도 (μm)	공간해상도 (m)	시간해상도	분광해상도 (μm)	공간해상도 (m)	시간해상도
1	0.45-0.52	30×30	16일	0.45-0.52	30×30	16일
2	0.52-0.60	30×30		0.53-0.61	30×30	
3	0.63-0.69	30×30		0.63-0.69	30×30	
4	0.76-0.90	30×30		0.75-0.90	30×30	
5	1.55-1.75	30×30		1.55-1.75	30×30	
6	10.40-12.50	120×120		10.40-12.50	60×60	
7	2.08-2.35	30×30		2.08-2.35	30×30	
8 (pan)	-			0.52-0.90	15×15	

### 3.2 METRIC 모형

본 연구에서 적용한 증발산량 추정 모형인 METRIC 모형은 Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL) 모형의 알고리즘을 개선하였고 (Allen et al., 2007a; Bastiaanssen et al., 1998; 최민하 등, 2011), 식 (1)과 같은 에너지 수지 방법을 적용하여 실제증발산을 산정한다.

$$LE = R_N - G - H \quad (1)$$

이는 대기와 지표 사이의 관계를 물리적인 방법으로 접근하여 높은 정확도가 보장이 되고, 여러 상수들을 경험적으로 유도된 인자들을 이용하여 자체 보정이 되기 때문에 신뢰도도 높게 가질 수 있으며, 식생 분포에 대한 정보 없이도 에너지 수

지 방법을 적용할 수 있기 때문에 모형 적용이 간편하다(Allen et al., 2007a).

SEBAL 모형과 비교해서 METRIC이 갖는 가장 큰 특징은 대류현상으로 인해 공기에 전달되는 현열 에너지 플럭스인  $H$ 값의 산정 방법이다. 이러한 공기동역학적 방법에 의해 산정되는  $H$ 의 식은 다음과 같다.

$$H = \rho C_p \frac{dT}{r_{ah}} \quad (2)$$

여기서,  $\rho$ 는 공기의 밀도,  $C_p$ 는 정압 조건의 공기비열,  $dT$ 는 지표면 근처높이에서의 온도 차이,  $r_{ah}$ 는 지표면 근처에서의 공기 동역학적 저항이다. SEBAL과 METRIC의 차이는  $r_{ah}$ 를 산정하는 방법에 있다. METRIC 모형에서는 지표면으로

부터 100~200 m 높이에서 측정된 풍속을 사용하여, Monin-Obukhov stability function을 기반으로 한 stability correction 반복 과정을 통해서  $r_{ah}$ 를 구한다 (Allen et al., 1996).  $dT$ 는 센서의 복사 보정과 대기 감쇠와 오염에 의한 불확실성 때문에 식 (3)과 같이 선형 함수로 단순화 하여 계산한다 (Bastiaanssen, 1995; Bastiaanssen et al., 2004). 여기서, 매개변수 a, b를 구하는 방법은  $H$ 가 0 값을 가지는 점에 대해  $dT$ 나  $LE$ 값을 0으로 설정하여 구할 수 있다.

$$dT = a + bT_s \tag{3}$$

METRIC 모형을 구동하기 위해 Landsat 이미지와 Digital Elevation Model (DEM) 지형 자료를 이용하여 30 m 격자로 자료를 생성하였다. 또한 모형 구동에 있어 필요한 인자 중 하나인 기준 증발산 값은 경안천에서 근접한 수원 기상청의 지상관측 자료를 이용하여 산정하였다 (표 2).

표 2. 수원 기상청 제공 기상 입력 자료

	2003년 2월 1일	2006년 9월 13일
일 평균 기온 (°C)	-3.5	22.0
상대 습도 (%)	60.6	49.0
태양 복사에너지 (MJ m <sup>-2</sup> )	13.10	22.01
일 평균 풍속 (m s <sup>-1</sup> )	0.5	1.9
대형 증발접시 증발량 (mm)	-	5.4
소형 증발접시 증발량 (mm)	1.8	4.4

### 3.3 MODIS 16 Product

MODIS 16 Global ET Product는 주관 연구기관인 University of Montana의 Numerical Terradynamic Simulation Group (NTSG)로부터 제공받아 지상 관측 자료를 통해 검증해봄으로써 그 적용성을 검토하고자 하였다 (Mu et al., 2007). MODIS 16 Global ET Product는 MODIS 토지 피복, 광합성 유효 복사량 (Fraction of

Photosynthetically Active Radiation, FPAR) 데이터, 엽면적지수 (Leaf Area Index, LAI) 데이터, Global Modeling and Assimilation Office (GMAO)에서 제공하는 전 지구 규모의 기후 데이터를 이용하여 1 km의 공간 해상도와 8일의 시간 해상도로 제작된다. MODIS 16 알고리즘은 잘 알려진 증발산 산정 방법인 Penman-Monteith 방법에 기초하여 Cleugh et al. (2007)에서 제안된 알고리즘을 개선한 것이다. 지상 관측된 기상 관측 자료와 MODIS 위성 이미지를 주된 입력 자료로 이용하여 증발산을 산정하는 본 모형의 알고리즘은 다음 순서도를 따른다 (그림 3).

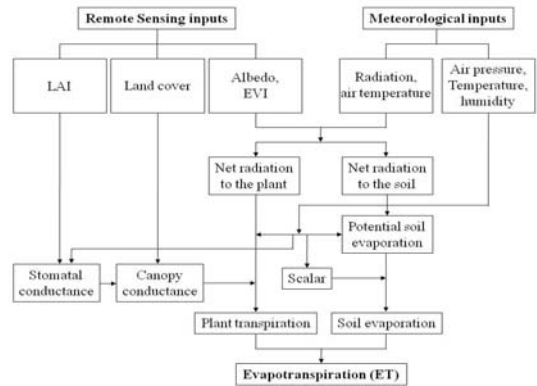


그림 3. MODIS 16 Global ET 모형의 순서도 (Mu et al., 2007)

### 3.4 위성 영상 비교

인공위성 영상의 지역적 적용성을 검토하기 위하여 두 위성의 영상을 비교 분석하였다. METRIC 영상은 공간 해상도가 30m이고, MODIS 16 영상은 1km로 서로 다르기 때문에 공간분포의 비교를 위해 METRIC 영상의 해상도를 1km로 upscaling한다. 같은 해상도를 갖는 두 영상의 공간 분포를 통해 경안천 유역의 증발산의 공간적 변동성을 확인할 수 있다. MODIS 16 product는 8일의 시간 해상도를 가지고, METRIC 영상은 하루에 한번씩 획득할 수 있다. METRIC 영상과 MODIS product는 시간 해상도

가 달라 두 영상을 단순 비교할 수 없기에 MODIS 16 product를 8일로 나눈 평균값을 일 데이터로 사용하였다.

### 3.5 토지 피복 분류

National Aeronautics and Space Administration (NASA)에서 제공하는 MODIS 12 Land cover Product에서 경안천 지역의 토지 피복 현황을 추출한 후 각 피복별로 두 위성영상의 비교를 통해 적용성을 검토해 볼 수 있다. 2003년 2월 1일과 2006년 9월 13일 모두 International Global Biosphere Programme (IGBP)로 분류한 17가지의 토지 피복 중 Evergreen needleleaf forest, Deciduous broadleaf forest, Mixed forest, Woody savannas, Croplands, Urban and built up의 6개의 토지 피복으로 세분화 할 수 있다.

## 4. 결과 및 토의

그림 4와 5는 2003년 2월 1일과 2006년 9월

13일에 해당하는 METRIC 영상과 MODIS 16 증발산의 공간분포이다. METRIC 모형으로 산정된 증발산은 물수지 기반의 일증발산이고 MODIS 16 증발산은 8일 동안의 누적된 증발산의 평균값을 사용하므로 METRIC과 MODIS 16 사이에 차이가 발생 할 수 있다. METRIC 모형에서는 콘크리트 바닥이나 시가지와 같은 토양에 수분이 없는 건조한 지역에서의 hot pixel에서는 현열 값이 발산되고, 하천에서는 잠열이 최대치를 나타내어 수분이 무한정으로 공급될 때 나타나는 증발산인 잠재증발산과 같은 값을 갖는다. 위성으로 획득될 당시 이 지역에 구름이 끼어있는 부분에서도 마찬가지로 발산이 되어 METRIC 결과 값이 과다산정 되는 경향을 확인할 수 있었다. 하지만 MODIS 16에서는 hot pixel, cold pixel이나 구름이 끼어있는 부분들에서는 결측된 값이 발생하기 때문에, 상관관계 분석에서는 다소 차이가 발생할 수 있다. 이러한 오차 발생 원인과 관련이 없는 다른 픽셀에서는 METRIC과 MODIS 16 결과 값이 비슷한 경향을 띄는 것을 확인할 수 있었다.

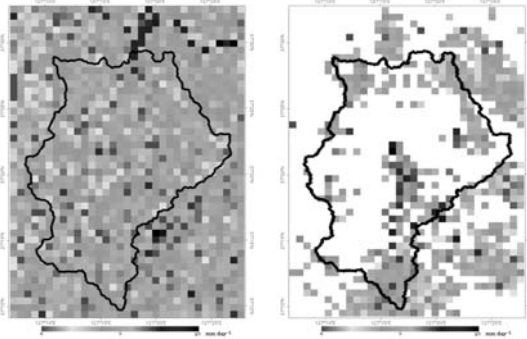


그림 4. 2003년 2월 1일 METRIC (좌)과 MODIS 16 (우) 증발산 공간 분포

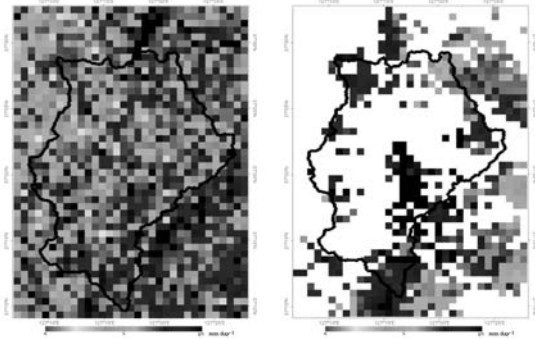


그림 5. 2006년 9월 13일 METRIC (좌)과 MODIS 16 (우) 증발산 공간 분포

표 3은 METRIC으로 산정한 증발산과 MODIS 16 증발산 수치 값으로 계산한 기본적인 통계분석이다. 표준편차를 평균으로 나뉜 값인 변동계수 (Coefficient of Variance, CV)값은 각 격자에 대해 평균값으로부터의 변동성을 알아보는 지수이다. MODIS 16 증발산 값이 변동계수가 크게 나

왔다는 것은 구름이나 대기의 상태 또는 식생, 토지 피복 등 외부 환경적 요인에 민감하게 반응을 했다는 것으로 볼 수 있다. McCabe and Wood (2006)에서는 대상유역을 식생별로 나누어 증발산의 분포양상을 비교하였고, 옥수수가 많은 곳에서 증발산이 높게 산정되고, 콩밭에서 증발산이

낮게 산정되는 결과를 확인할 수 있었다. 본 연구에서는 표 4와 같이 경안천 유역을 침엽수림, 활엽수림, 혼합림, 밭, 시가지 등의 토지 피복별로 나누어 두 위성 영상 (MODIS, METRIC)을 비교하여 적용성이 높은 토지 피복이 무엇인지를 확인

하였다. 2003년 2월 1일과 2006년 9월 13일 모두 침엽수림에서 상관계수가 가장 높게 나와 적용성이 제일 높다는 것을 알 수 있으며, 활엽수림이 그 다음임을 확인할 수 있으며, 혼합림에서는 가장 낮은 상관계수를 보였다.

표 3. METRIC 증발산과 MODIS 16 증발산 기본 통계분석

		최소값 (mm d <sup>-1</sup> )	최대값 (mm d <sup>-1</sup> )	평균값 (mm d <sup>-1</sup> )	표준편차	변동계수	Bias	RMSE
2003. 02.01	METRIC	0.05	2.93	1.61	0.72	0.44	3.10	11.99
	MODIS 16	1.25	7.88	4.29	1.95	0.45		
2006. 09.13	METRIC	0.81	6.95	3.80	0.84	0.22	0.26	0.24
	MODIS 16	1.10	7.47	3.98	1.19	0.30		

표 4. 토지 피복별 상관 계수

	토지 피복 현황	관계식	상관계수 (R)
2003.02.01	Evergreen needleleaf forest	$y=0.22x+3.23$	0.56
	Deciduous broadleaf forest	$y=0.18x+4.54$	0.34
	Mixed forest	$y=0.01x+4.86$	0.05
	Woody savannas	$y=0.57x+4.97$	0.10
	Croplands	$y=0.08x+4.22$	0.05
	Urban and built-up	$y=0.19x+4.55$	0.32
2006.09.13	Evergreen needleleaf forest	$y=0.43x+0.35$	0.59
	Deciduous broadleaf forest	$y=0.40x+3.02$	0.35
	Mixed forest	$y=0.05x+4.46$	0.04
	Woody savannas	$y=0.31x+2.88$	0.21
	Croplands	$y=0.19x+2.80$	0.10
	Urban and built-up	$y=0.27x+1.59$	0.24

### 5. 정리 및 결론

본 연구에서는 2003년 2월 1일의 Landsat 7 ETM+ 위성 이미지와 2006년 9월 13일에 관측된 Landsat 5 TM 위성 이미지를 이용하여 METRIC 모형에 적용한 후 MODIS 인공위성 영상과 비교 분석하여 지역적 적용성을 검토하였다. 30 m의 공간 해상도를 갖는 METRIC 모형과 1km의 MODIS 16 위성 이미지의 해상도를 맞추고, 각각의 픽셀

에서 나타나는 값들을 비교해 보며, 모형의 적용성을 확인해 볼 수 있었다. 앞서 발표되었던 것처럼 경안천 유역에서의 METRIC 모형의 적용성은 매우 높았던 것으로 파악되었기에 MODIS 16에서 산정된 결과와 METRIC 모형의 결과값이 비슷한 경향을 보인 이번 연구에서도 대기 중의 구름 오차와 같은 외부적 환경요인으로 인한 MODIS 16 위성 이미지의 결측치가 생기는 부분을 제외하고서는 METRIC 모형으로 산정된 값과 비슷한 경향

을 보이기에 MODIS 16의 결과값도 이 지역에서 적용성을 보인다고 판단할 수 있었다. 특히, 침엽 수림과 활엽수림에서 두 증발산 모형이 높은 상관 관계를 보이므로 식생에 대한 정확도 높은 모의가 이루어짐을 확인할 수 있었다. 향후 연구에서 결측치가 많이 발생하는 MODIS 16 위성이미지에 고해상도의 Landsat 위성이미지를 이용한 METRIC 모형 결과물을 결합시킨 결과물을 만들어낸다면, 특정한 지역에서의 고해상도 증발산 지도를 제작할 수 있으므로 시공간적 변동성과 계절 변화에 따라 변하는 거동을 파악할 수 있을 것이다.

### 감사의 글

이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(2011-0005005)

### 참고 문헌

1. 기상청 홈페이지 (<http://www.kma.go.kr/>)
2. 박종윤, 이미선, 이용준, 김성준. (2008) SWAT 모형을 이용한 미래 토지이용변화가 수문 - 수질에 미치는 영향 분석, 대한토목학회 논문집. 대한토목학회. 28(2B): 187-197.
3. 최민하, 황교택, 김태웅. (2011) Landsat 인공 위성 이미지를 이용한 경안천 유역 증발산의 생장기와 휴면기 분포 특성 분석, 대한토목학회 논문집. 대한토목학회. 31(1B): 29-36.
4. Allen, R.G., Pruitt, W.O., Businger, J.A., Fritschen, L.J., Jensen, M.E., and Quinn, F.H. (1996) Evaporation and transpiration. Hydrology Handbook, Edited by wootton et al., *American Society of Civil Engineers*, New York, NY, pp. 125-252.
5. Allen, R.G., Tasumi, M., and Trezza, R. (2007a) Satellite-Based Energy Balance for Mapping Evapotranspiration with Internalized Calibration (METRIC)-Model. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering, American Society of Civil Engineers*, Vol. 133, No. 4, pp. 380-394.
6. Allen, R.G., Tasumi, M., Morse, A., Trezza, R., Wright, J.I., Bastiaanssen, W., Kramber, W., Lorite, I., and Robison, C.W. (2007b) Satellite-Based Energy Balance for Mapping Evapotranspiration with Internalized Calibration (METRIC)- Applications. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering, American Society of Civil Engineers*, Vol. 133, No. 4, pp. 395-406.
7. Bastiaanssen, W.G.M. (1995) *Regionalization of surface flux densities and moisture indicators in composite terrain: A remote sensing approach under clear skies in Mediterranean climates*. Ph.D. dissertation, CIP Data Koninklijke Bibliotheek, Den Haag, the Netherlands.
8. Bastiaanssen, W.G.M., Menenti, M., Feddes, R.A., and Holtslag, A.A.M. (1998) A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL) : 1. Formulation. *Journal of Hydrology*, Vol. 212-213, pp. 198-212.
9. Bastiaanssen, W.G.M., Noordman, E.J.M., Pelgrum, H., Davids, G., and Allen, R.G. (2005) SEBAL for spatially distributed ET under actual management and growing conditions, *ASCE Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, Vol. 131, No. 1, pp. 85-93.
10. Choi, M., Kim, T., Park, M., Kim, S. (2009) Evapotranspiration estimates using the Landsat-5 Thematic Mapper image over Gyungan watershed in Korea, *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 32, No. 15, pp.4327-4341.
11. Choi, M., Kustas, W.P., Anderson, M.C., Allen, R.G., Li, F., and Kjaersgaard, J.H.



- (2009) An intercomparison of three remote sensing-based surface energy balance algorithms over a corn and soybean production region (Iowa, U.S.) during SMACEX. *Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 149, pp. 2082-2097.
12. Cleugh, H.A., Leuning, R., Mu, Q., and Running, S.W. (2007) Regional evaporation estimates from flux tower and MODIS satellite data. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 106, pp. 285-304.
  13. Jiang, L., and Islam, S. (2001) Estimation of surface evaporation map over Southern Great Plains using remote sensing data. *Water Resources Research*, Vol. 37, No. 2, pp. 329-340.
  14. Karma, J.D., McVicar, T.R., and McCabe, M.F. (2008) Estimating land surface evaporation : A review of methods using remotely sensed surface temperature data. *Surveys in Geophysics*, Vol. 29, pp. 421-469.
  15. Kim, H., Hwang, K., Mu, Q., Lee, S., and Choi, M. (2011) Validation of MODIS 16 global terrestrial ET product in various climate and land cover types in Asia. *KSCE Journal of Civil Engineering*, (Accepted).
  16. Kramer, H.J. (1994) *Observation of the Earth and Its Environment: Survey of Missions and Sensors*. Springer, 4th edition, pp. 33.
  17. Kustas, W.P., Anderson, M.C., Norman, J.M., and Li, F. (2007) Utility of radiometric-aerodynamic temperature relations for heat flux estimation. *Boundary- Layer Meteorology*, Vol. 122, pp. 167-187.
  18. Markham, B.L., Storey, J.C., Williams, D.L., and Irons, J.R. (2004) Landsat Sensor Performance: history and Current Status. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 42, No. 12, pp. 2691-2694.
  19. McCabe, M.F., and Wood, E.F. (2006) Scale influences on the remote estimation of evapotranspiration using multiple satellite sensors. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 105, No. 4, pp. 271-285.
  20. Mu, Q., Heinsch, F.A., Zhao, M., and Running, S.W. (2007) Development of a global evapotranspiration algorithm based on MODIS and global meteorology data. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 111, pp. 519-536.
  21. NASA, 1999, The Earth Science Enterprise website (<http://www.earth.nasa.gov/>)
  22. Timmermans, W., Kustas, W.P., Anderson, M.C., and French, A.N. (2007) An intercomparison of the surface energy balance algorithm for land (SEBAL) and the two-source energy balance (TSEB) modeling schemes. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 108, pp. 369-384.
  23. United States Geological Survey (USGS) website (<http://www.usgs.gov/>)
- 논문접수일 : 2011년 08월 05일
  - 심사의뢰일 : 2011년 08월 08일
  - 심사완료일 : 2011년 10월 14일