

## 위성 자료를 이용한 대구광역시의 상대적 증발산 효율 분포

김해동<sup>1</sup> · 임진욱<sup>1</sup> · 이순환<sup>2,\*</sup>

<sup>1</sup>계명대학교 환경대학 지구환경보전학과, 704-702 대구광역시 달서구 신당동 1000번지

<sup>2</sup>부산대학교 기초과학연구원, 609-735 부산광역시 금정구 장전동 산 30번지

### Distribution of Relative Evapotranspiration Availability using Satellite Data in Daegu Metropolitan

Kim Hae-Dong<sup>1</sup>, Im Jin-Wook<sup>1</sup> and Lee Soon-Hwan<sup>2,\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Environmental Conservation, Keimyung University, Daegu 704-701, Korea

<sup>2</sup>Research institute for Basic Sciences, Pusan National University, Pusan 609-735, Korea

**Abstract:** Surface evapotranspiration is one of the most important factors to determine the surface energy budget, and its estimation is strongly related with the accuracy of weather forecasting. Surface evapotranspiration over Daegu Metropolitan was estimated using high resolution LANDSAT TM data. The estimation of surface evapotranspiration is based on the relationship between surface radiative temperature and vegetation index provided by a TM sensor. The distribution of NDVI (Normalized Difference of Vegetation Index) corresponds well with that of land-used in Deagu Metropolitan. The temperature of several part of downtown in Deagu metropolitan is lower in comparison with the averaged radiative temperature. This is caused by the high evapotranspiration from dense vegetation like DooRyu Park in Deagu Metropolitan. But, weak evapotranspiration availability is distinguished over the central part of downtown and the difference of evapotranspiration availability on industrial complexes and residential area is also clear.

**Keywords:** evapotranspiration availability, LANDSAT TM, radiative temperature, Vegetation Index

**요약:** 잠열과 관련된 지표면 증발산량은 지표 온도를 결정하는 중요한 요인이며, 이를 정확히 산정하는 것은 중규모 순환장 예보의 정확도와 밀접하게 관련된다. 본 연구에서는 고해상도인 LANDSAT 5 TM 자료를 이용하여 대구광역시의 상대 증발산 효율을 추정하였다. 증발산 효율 추정은 복사 온도/식생 지수의 관계식을 이용하였다. 식생 지수는 대구광역시의 실제 토지 이용도와 일치하였다. 도시 지역내의 공원 지역의 경우 낮은 복사 온도를 나타내었다. 이것은 두류공원과 같은 도심내 공원 지역의 고증발산에 기인한 것이다. 그러나 전체적인 도심지는 저증발산이 두드러졌다. 그리고 지표면 구성특성에 의하여 도심지 내 공단 지역과 주거 지역은 상대적인 증발산 분포에서 차이가 나타났다.

**주요어:** 증발산 효율, LANDSAT TM, 복사온도, 식생지수

## 서론

증발은 강수와 더불어 대기-지표의 에너지 교환에 있어 매우 중요한 요소이다. 특히 최근 도시기후학적 인 측면에서 도심지와 주변 지역 간의 수분 이동과 이에 의한 강수량 변화가 주요한 연구대상으로 떠오르고 있다. 현재 기상청에서는 세계기상기구의 관측

기준에 따라 증발량을 측정하고 있으나, 한 지점에서 관측한 증발량을 광역지역에 적용하기에는 어려운 것이 사실이다. 이것은 단순한 증발량 측정의 어려움뿐만 아니라 식생에 의한 증산량을 정확히 추정하기 어렵기 때문이다(한진수와 이부용, 2005).

실제 식물의 증산량을 정확히 추정하기 위해서는 식물의 밀도와 잎 면적 지수(Leaf Area Index; LAI)를 정확히 산출하여야한다(Lee, 1998). 그러나 이러한 요소들도 증발량과 선형적인 관계를 가지고 있지 않기 때문에 정확한 증발산량을 산출할 수 없다. Taconet et al.(1986)은 여러 종류의 LAI에서 증발산

\*Corresponding author: withshlee@pusan.ac.kr

Tel: 82-51-583-1917

Fax: 82-51-583-1917

량을 측정하였으며, 이들은 LAI가 식물의 증발산량을 추정하는데 중요한 요소이기는 하지만 이 한 요소만으로 증발산량을 추정하기는 매우 어렵다고 보고하였다. 그러므로 종합적이고 광역적인 측면에서 증발산량을 추정할 필요가 있다. 일반적인 증발산량의 추정에는 지표면 열수지식을 이용한다. 지표면 열수지식에서 측정이 용이한 현열플럭스와 순복사량을 계산하고, 이를 바탕으로 지표면과 공기 중의 수분량을 추정하여 잠열플럭스를 계산한다(한국 기상학회, 2001).

직접적인 증발산량 추정은 공간적 시간적으로 많은 한계를 가지고 있다. 이를 극복하기 위한 하나의 방안으로 지구관측 위성에 의한 증발산량 추정이 제안되고 있다. 위성을 이용하여 넓은 지역 내에서 공간적으로 불균일한 수분 분포를 추정하기 위하여 많은 추출 알고리즘이 제안되었다. 대기 및 지표면의 수분 상태를 추정하는데 주로 이용되는 위성으로 NOAA-AVHRR(National Oceanic and Atmospheric Administration-Advanced Very High Resolution Radiometer), GOES(Geostationary Operational Environmental Satellites), METEOSAT(METEORology SATellite), SSM/I(Special Sensor Microwave Imager), MODIS(MODerate resolution Imaging Spectroradiometer) 등이 있다.

대부분의 위성은 기상학적인 구름과 강수 등 대기 중의 수분분포를 추정하고 이를 기상예보의 자료로 이용하고 있으며, 해상도가 상대적으로 높은 NOAA-AVHRR은 지표면 상태를 추정하는 위성자료로 많이 이용된다(이미션 등, 1996). 그리고 NOAA-AVHRR을 이용한 지표면 수분 상태 추출 알고리즘에 관하여 많은 연구가 이루어졌다(Gillies et al., 1997; Goetz, 1997; Lee, 1998; Sandholt et al., 2002; Wan et al., 2004). AVHRR 자료는 5개의 밴드를 가지고 있으며, 2개의 NOAA위성에서 매일 자료가 생산되며 최대 1.1 km의 해상도를 가지고 지표면의 다양한 정보를 제공한다. 이들은 매일의 자료를 통하여 시간적인 연속성을 최대한 보장할 수 있는 위성자료이다. 그러나 상대적으로 좁은 구역의 도시지역 수분 상태를 파악하기 위해서는 AVHRR과 같은 중, 저해상도 센서들은 적합하지 못하다.

최근 위성기술의 발달과 더불어 더욱 해상도가 높은 SPOT(Satellite Pour l'Observation de la Terre)와 LANDSAT(LANd SATellite) 등의 위성 등이 운용됨에 따라 고도의 해상도를 가진 지표면 정보를

획득할 수 있게 되었다. 이러한 위성자료는 일반적으로 지리정보시스템(Geographical Information System)의 정보 획득을 위하여 고도, 토지이용도, 지표면의 토지이용도 변화 등의 관측을 주요한 목적으로 하고 있다(Kim and Yeo, 2005). 도시기후학적인 측면에서 이들 위성자료의 자료 생성빈도가 NOAA위성보다는 적음에도 불구하고, 고해상도의 도시지역 증발산량을 추정할 수 있는 가능성을 제시한다.

본 연구의 목적은 중규모 수치 예보모형의 기초자료로 사용되는 지표면의 수분 상태에 관한 간접적인 정보를 추정 분석하는 것이다. 기압과 온도와 달리 수분상태를 표현하는 지표면 습윤 정도는 관측이 매우 어렵기 때문에 현재 단순 추정이나 일정하다는 가정 하에서 수치계산을 실시하고 있다. 그러므로 비록 간접적인 방법이지만 위성자료를 통한 지표면 수분상태에 관한 정보는 수치예보의 정확도를 높이는 데 매우 중요하다.

일반적으로 위성자료를 이용한 지표면 수분상태 추정 알고리즘은 AVHRR, MODIS 등 중, 저해상도 센서만을 기반으로 하고 있다. 그러므로 본 연구에서는 이들 위성 자료보다 해상도가 높은 LANDSAT TM(Thematic Mapper)자료를 지표면 수분상태 추정 알고리즘에 적용하여 도시지역의 상대적인 증발산 비율을 산정하였다. 그리고 대구광역시의 증발산 비율의 2차원 분포치를 토지이용자료와 비교하여 위성자료의 이용가능성을 살펴보았다.

## 이론적 배경

본 연구는 위성자료를 이용하여 광역 지표면 수분 상태의 상대적인 크기 즉, 상대 증발산 효율을 추정하기 위한 것이다. 위성을 통한 증발산효율의 추정은 열수지방정식내의 잠열플럭스를 산출하는 것으로 이것은 식물의 밀집도와 지표면 온도와 직접적으로 연관된다. 식물의 밀집정도를 나타내는 위성자료로는 식생지수가 있다. 이것은 식물내 클로로필이 태양복사에너지를 강하게 흡수하기 때문에 0.4-0.7 μm 파장대의 반사도가 매우 낮게 나타난다. 한편 근적외선에 해당하는 파장대의 경우 식물의 중간층구조와 세포벽의 근적외 다중반사에 기인해서 높은 반사도를 가진다.

클로로필에 의해 흡수되는 파장대인 가시광선과 근적외 파장대의 특징을 이용하여 식생의 밀도를 무차

원 함수로 나타낸 것이 식생지수이다. 식생지수 중 태양각 및 위성시야각과 같은 대기의 영향을 제거할 수 있어서 가장 널리 이용되는 것이 무차원 식생지수(Normalized Difference Vegetation Index; NDVI)이다. NDVI는 지리정보시스템의 식생 분포를 조사하는데 널리 이용되고 있다.

NDVI를 산출하는데 가장 중요한 것은 구름과 해양에 의한 잡음을 제거하는 것이다. 일반적으로 맑은 날의 값을 기준으로 15일 또는 30일의 MVC (Maximum Value Composite) 보정을 이용하는 것이 일반적이다. 본 연구 대상일이 북태평양 고기압에 의하여 맑은 날을 나타내고, TM 위성 해상도가 높기 때문에 가시영역에서 구름의 존재를 파악할 수 있다.

NDVI와 더불어 지표면의 복사온도 역시 지표면의 수분상태를 파악하는 하나의 지표가 된다. 식생의 밀도가 높으면 증산량이 증가하여 잠열플럭스가 높게 나타난다. 이에 따라 지표면의 온도 상승이 억제된다. 그리고 식생밀도가 동일한 경우에도 지표면의 수분상태에 따라 증산량이 달라져서 지표온도가 달라진다. 그러므로 위성에서 관측된 지표면 온도는 토양 및 지표의 수분정도를 파악하는 하나의 지표로 사용될 수 있다(Goetz, 1997).

그러므로 이 두 지표의 관계를 이용하여 지표면의 수분상태 즉 지표의 상대적인 증발산비율을 추정할 수 있다. 이전의 연구들은 NDVI와 지표면복사온도(Ts)의 관계식의 기울기를 주로 이용하여 지표면의 수분상태를 간접적으로 추정하였다(Friedl and Davis, 1994; Nemani and Running, 1997; Prihodko and Goward, 1997; Boegh et al. 1998). 이런 NDVI/Ts 관계식은 식생이 균일하게 존재하는 지역에서 타당성을 가지는 것으로 알려져 있다. 균일한 식생밀도를 가진 경우, NDVI/Ts 관계식의 기울기가 직선에 가깝다. 지표면이 균질하지 못하고 위성의 관측자료 픽셀의 개수가 많으면, NDVI/Ts의 분포도는 일차원적으로 표현되지 않고, 삼각형 또는 사다리꼴의 형태가 된다.

Fig. 1은 Nemani and Running(1989, 1997)이 제안한 NDVI/Ts의 관계식인 TVDI(Temperature and Vegetation Dryness Index)를 나타낸 것이다(Sandholt et al. 2002). 그림은 NDVI에 따른 삼각형의 온도분포를 나타낸 것이다. 이때 NDVI가 작은 경우 즉, 나지가 많은 경우 수분정도에 따른 지표온도변화가 크며, 반대로 NDVI가 큰 경우 식생의 밀도가 높기 때문에 수분량에 따른 지표온도 차이가 크지 않다. 그

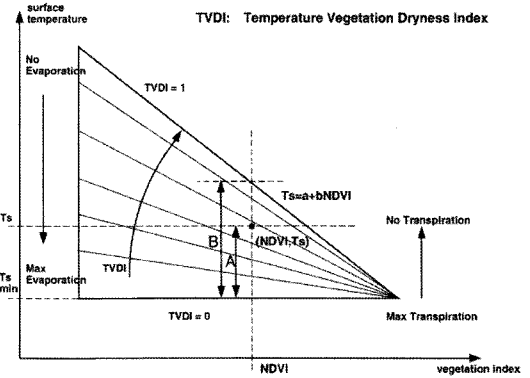


Fig. 1. Definition of the Temperature and Vegetation Dryness Index (TVDI). (after Sandholt et al., 2002)

러므로 이 분포에서는 두개의 경계를 가진다. 하나는 위쪽의 직선이며 이때 TVDI 값은 1로 최대이다. 이것은 최소 증발산을 의미한다. 다른 하나는 아래쪽의 수평의 직선이며 TVDI 값은 0으로 최소가 된다. 이것은 최대 가능 증발산을 의미한다. 위성에서 측정된 자료는 두 직선 사이에 위치하며 TVDI 값은 0과 1 사이의 값을 가진다. TVDI의 구체적인 값은 아래와 같이 결정된다.

$$TVDI = \frac{T_s - T_{s_{min}}}{a + bNDVI - T_{s_{min}}} \quad (1)$$

여기서  $T_{s_{min}}$ 은 지표면 복사온도의 최소치를 나타내고, a와 b는 위의 삼각형 내에서 동일한 TVDI 값을 가지는 직선의 등치선을 그렸을 때 직선의 기울기와 절편을 나타낸 것이다. 그러므로 TVDI 값을 추정하면, 각 NDVI에서의 증발산효율을 상대적으로 추정할 수 있다.

그러나 토지이용도가 다양한 지역에서는 곡선분포를 나타낸다. 이것은 식생에 의한 증산 뿐 아니라 나지 및 기타 지표이용도에 의한 증발이 동시에 작용하기 때문이다. 이러한 지표 증발산의 복합성이 기울기의 비선형성을 일으킨다. 그러므로 본 연구에서는 도시지역내의 복잡한 토지이용자료를 대상으로 하기 때문에 NDVI/Ts의 분포내의 TVDI의 추정식을 선형의 1차원 방정식이 아닌 비선형의 2차원을 적용하였다. 본 연구에서 사용한 이론적 개념도를 나타낸 것이 Fig. 2이다. Fig. 1에서 제시한 NDVI/Ts의 분포도와 비교할 때, 기본적인 개념은 유사하다. 그러나 복잡한 토지이용을 가진 지역을 대상으로 하기 때문에

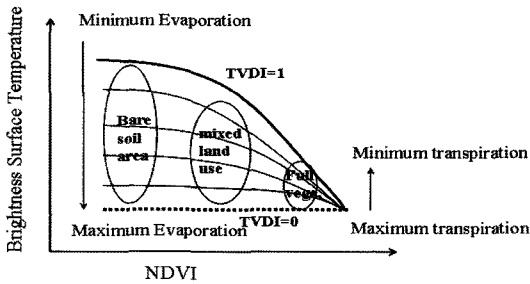


Fig. 2. Schematic diagram of TVDI calculation with non-linear equation. Dotted and thick solid lines indicate lowest and highest evapotranspiration, respectively.

비선형 곡선의 추출식을 사용하였다. 분포도내의 구분을 보면, NDVI가 0에 가까울수록 나지의 영역을 나타내며, 반대로 1에 가까울수록 식생밀도가 높다는 것을 의미한다.

### 대상 영역

본 연구에서는 한반도의 6대 광역시중 하나인 대구광역시를 대상으로 하고 있다. Fig. 3은 대구광역시의 지형도와 토지이용도를 나타낸 그림이다. 대구는 영남내륙 중심에 입지하여 북쪽으로는 팔공산, 남쪽에는 대덕산과 비슬산, 동서로는 완만한 구릉지대 시가지가 형성된 분지형 도시이다. 그리고 동서로 동해안에서 유입되는 해륙풍의 영향을 받고 있다. 도심을 가로지르는 신천과 금호강이 합류하여 낙동강으로 유입되고 있으며, 이를 통하여 도심의 바람장이 형성된다. 대구광역시는 250만의 인구 885.6 km<sup>2</sup>의 면적에 살고 있는 인구 밀집지역이며, 중심분지 내에 인구가 집중되어 있다. 그리고 토지이용도를 보면, 대구의 서쪽부분에 신천과 금호강이 흐르는 수변지역을 이루고 있으며, 기타 주변 산지에 나무 등 식생밀도가 높은 지역이 위치한다. 논과 같은 관개지역은 대구광역시의 동쪽에 위치하며, 대구광역시의 지리적 중심에 해당하는 서구, 중구, 남구, 달서구를 중심으로 도심지가 형성되어 있다.

### 위성 영상 분석

본 연구에 사용한 위성자료는 LANDSAT 5 TM으로 기본 해상도는 30 m이다. LANDSAT은 약 705 km의 고도에서 26,000 km/h의 속도로 지구 궤도를

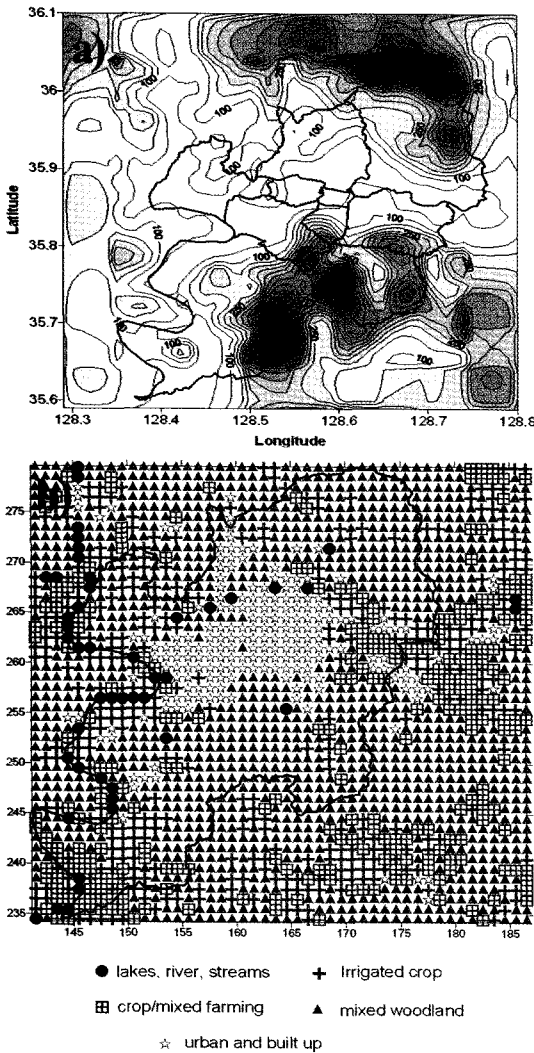
Table 1. LANDSAT 5 TM radiometric characteristics

Satellite LANDSAT 5 TM			
Spectral sensitivity (μm)	Band	Ground resolution (meter)	
TM Band	10.45-0.52	Blue	30
TM Band2	0.52-0.60	Green	30
TM Band3	0.63-0.69	Red	30
TM Band4	0.76-0.90	Near IR	30
TM Band5	1.55-1.75	Mid IR	30
TM Band6	10.4-12.5	Thermal	120
TM Band7	2.08-2.35	Mid IR	30

돌고 있다. LANDSAT은 99분마다 지구를 일주하며, 고해상도의 자료를 기록하여 전송한다. LANDSAT은 총 7개의 밴드를 가지고 있는데, 3개의 가시광선 채널과 4개의 적외선 채널을 가지고 있다. 자세한 밴드 특성은 Table 1에 나타내었다. 이 위성이 촬영한 사진은 각각 가로 185 km 세로 170 km의 지역을 나타낸다. 일반적으로 현재 위성기상학적인 적용은 주로 지상자료 및 장기적인 기상요소의 추이를 분석하는데 사용되고 있다. 이는 현재 산출되는 주요 위성자료의 해상도가 중, 저해상도센서에 의한 많은 촬영빈도 때문이기도 하다. 그러나 실제 중규모 수치기상예보에 사용되는 초기 및 경계자료는 특정일의 자료만 사용된다. 이에 따라 자료산출은 오로지 한 장면에서만 이루어진다. 비록 간접적인 방법이라도 수치예보의 기초자료로써 초기 및 경계의 생산은 매우 중요한 문제이다. 그러므로 본 연구에서는 특정일의 수분분포를 추정하는 것이 목적이기 때문에 대상일 하나의 고해상도 영상을 분석하여 위성자료를 추출하였다. 비록 위성센서를 통한 하나의 영상으로 시간 변동물이 큰 상대 증발산분포를 산출하는 것은 약간의 오차를 포함하고 있지만, 실제관측자료 획득이 불가능하다는 관점에서 보면 상대증발산에 관련된 위성자료는 도시기상연구에 중요한 정보를 제공한다고 볼 수 있다.

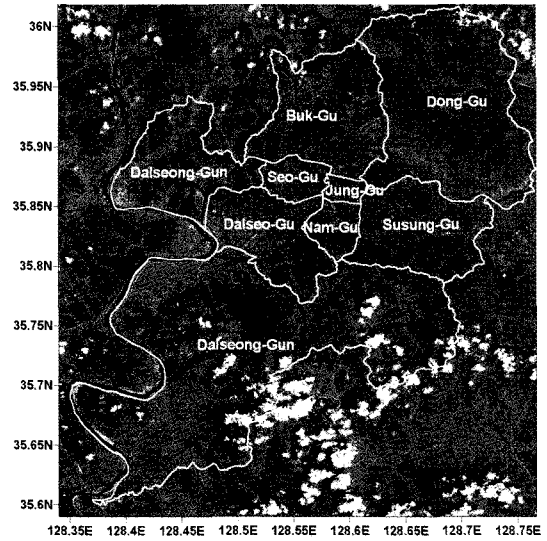
본 연구에 사용된 분석 대상일은 2004년 8월 8일이다. 이날은 강한 고기압이 한반도 중심에 위치하며, 대구광역시를 포함한 영남지방이 매우 맑은 날씨를 나타냈다. 위성의 통과시간은 1041 LST이며, 연구에 사용되어진 위성 영상은 레벨 1 자료로써 8비트의 수치로 저장되어 있다(Chander and Markham, 2003).

Fig. 4는 대상일의 가시영상(band 2)과 적외영상



**Fig. 3.** Topography and land-use of Deagu Metropolitan. Topography contours interval is 100m and solid lines in a) indicate administrative districts in Deagu Metropolitan.

(band 4, 5)을 조합한 것이다. 가시영상을 통한 구름 분석을 보면, 대구의 북서쪽에 해당하는 지역에 상층운이 나타나고, 대구남쪽의 비슬산 정상 부근에 하층운이 보인다. 이러한 하층운은 그림자분석을 통하여 고도를 산출할 수 있다. 본 연구의 산악지역의 구름은 최대고도가 1 km 이하의 낮은 구름이며, 이러한 구름은 산악지형에 의한 중규모 순환의 결과로 형성되었다고 볼 수 있다. 따라서 이러한 구름의 분포는 현재 대기의 안정도를 알려주는 중요한 지표라고 할 수 있다. 그리고 적외영상에서 나타난 붉은 지역은 지표면 온도가 높은 지역을 의미하며, 대구 중심부가



**Fig. 4.** Composite image of visible and infrared bands. White solid lines indicates administrative districts in Deagu Metropolitan.

이에 해당한다. 가시영상에서 보듯이 대구중심부에서는 구름이 발견되지 않고 맑은 날씨를 유지하고 있다. 그러므로 본 연구에서는 구름에 의한 대기보정을 실시하지 않았다.

### 기초 자료 분석

본 연구에서는 위성영상 수치로부터 직접적으로 산출 가능한 기초자료로 NDVI와 반사도 자료를 분석하였다. Fig. 5는 TM에서 추출한 NDVI의 값을 나타낸 것이다. NDVI는 앞 절에서 설명한 바와 같이 식생밀도를 나타내는 지표이다. LANDSAT TM의 경우, 밴드 3과 4번의 조합에 의해서 아래와 같이 생성된다.

$$NDVI = (BAND 4 - BAND 3) / (BAND 4 + BAND 3) \quad (2)$$

대구광역시를 둘러싼 산악지역을 중심으로 0.5 이상의 높은 NDVI 값이 나타난다. 특히 대구광역시의 남쪽에 위치한 비슬산의 경우 0.7 이상의 높은 값을 나타내고 있다. 그러나 대구광역시 중심부에 해당하는 도심지역의 경우 0.2 이하의 값을 나타낸다. 이것은 대구광역시의 실제 토지이용도 분포와 잘 일치하고 있다. 그러므로 NDVI는 대구광역시 주변의 토지이용도를 정확히 추정할 수 있는 하나의 지표가 된다. 그리고 대구광역시의 서쪽에서 남북으로 흐르는 낙동강은 매우 낮은 NDVI 값(0.1 이하)을 나타내는데, 이것은 수면의 높은 반사도에 기인한 것이다. 비

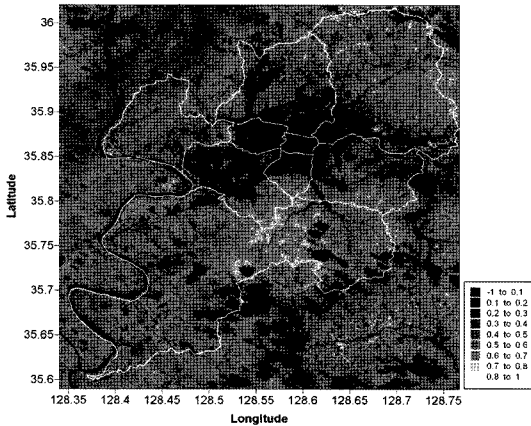


Fig. 5. Distribution of NDVI estimated by LANDSAT TM red and infrared bands (band 3 and 4).

슬산 정상지역과 남쪽부근의 낮은 NDVI값도 구름에 의한 높은 반사도 때문에 발생한 것으로 연구 분석 자료로 사용하지 않았다.

Fig. 6은 TM에서 추출한 가시영역 반사도를 나타낸 것이다. 반사도는 계절, 기후, 지역, 시간, 토지피복 등에 따라 차이가 난다. 또한 정확히 수치화 되어 있지는 않으며, 위성에 따라 조금씩 차이가 나타난다. 이러한 반사도는 지표면 열수지 계산에서 중요한 요소이며, 또한 증발산량에도 밀접하게 관계한다. 이번 연구에서는 고해상도 밴드를 이용하지 않고 광역밴드 반사도를 이용하였다. 고해상도 밴드를 이용한 광역 밴드의 반사도는 이미 연구가 되어 있다(Liang, 2000). 가시영역 총 반사도는 아래와 같이 계산되어진다.

$$\alpha_{VIS} = 0.443\rho_1 + 0.317\rho_2 + 0.240\rho_3 \quad (3)$$

여기서  $\rho_n$ 는 각 가시밴드별 반사도를 나타낸 것이다. 구름의 경우 주로 0.2이상이며 구름의 중심부는 0.4 이상의 반사도를 나타내고 있다. 대구광역시의 산림은 0.04~0.08을 나타내고 있으며, 대부분의 도심 지역은 0.08 에서 0.12 사이의 높은 반사도를 나타낸다. 또한 공단지역의 경우는 0.12 이상으로 도심에 비해 높게 나타나고 있다. 특히 현재 공단 지역들의 경우 공장 건물들의 다수가 슬레이트 지붕으로 콘크리트가 아닌 금속으로 이루어져 있어 이와 같이 높게 나타난 것으로 본다. 또한 대구 월드컵 경기장, 구 삼성상용차 부지는 단일 건물로 면적이 넓고 반사도가 0.2 이상으로 구름의 반사도 영역에 포함되고 있다.

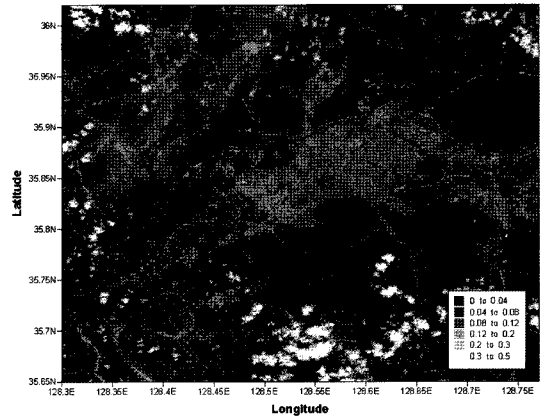


Fig. 6. Total visible albedo estimated by LANDSAT TM visible bands (band 1, 2, and 3). White indicates cloud induced by regional circulation.

달성군의 화원과 달성공단 그리고 현풍 이외의 지역은 대구 도심에 비하여 낮은 반사도를 나타내고 있다.

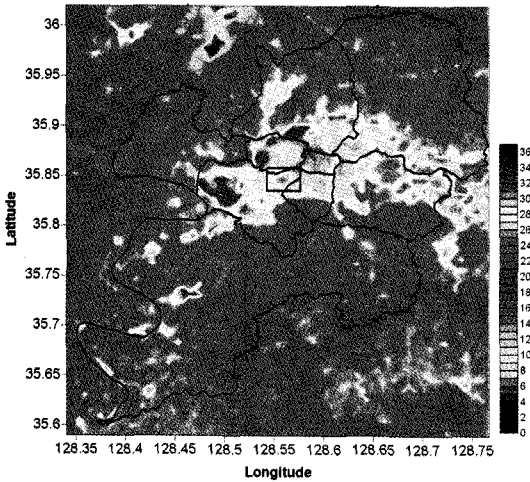
### 복사온도 및 증발산량 추정

위성에서의 지표온도는 엄밀히 말하자면 복사온도이다. 또한 같은 지역이라도 토지피복에 따라서 그 차이가 크고, 해양과는 다르게 도심 토지피복에 따라 극단적으로 바뀌는 경우도 있다. 해양 위성사진들의 특징은 대체적으로 연속성 및 일관성을 띄고 있는데, 육상의 경우는 그러하지 못하다. 이는 인간 활동 및 인공구조물 등 인위적인 요인과 지형 및 토지피복 등 자연적인 요인 등에 의하여 복사특성의 연속성이 없어졌기 때문이다. 또한 물질의 열교환이 대기나 해양처럼 활발하지 못하기 때문이다. 그렇기 때문에 기온이 지표의 영향을 받는 것이 사실이지만, 기온 분포와 지표온도의 분포는 다소 상이하게 나타날 수가 있다.

적외 밴드의 하나인 6번 밴드의 영상을 분석하여 지표면 온도를 산출하였다. 지표 온도를 구하는 식은 아래와 같다. 여기에 사용된 산출식은 NASA(National Aeronautics and Space Administration)에서 LANDSAT TM 발사전의 자료를 바탕으로 제공된 것이다.

$$T_s = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_\lambda} + 1\right)} \quad (4)$$

여기서  $T_s$ 는 절대온도로 표시되는 지표온도이며,



**Fig. 7.** Estimated surface temperature in Daegu Metropolitan. Solid lines mean administrative districts in Daegu Metropolitan. And rectangular box in central part of downtown indicates Dooryu Park.

$L_n$ 는 복사휘도  $K_1$ 과  $K_2$ 는 각각 Watt와 절대온도로 표시되는 보정 상수이며, 값은 각각 607.76 W, 1260.56 K이다.

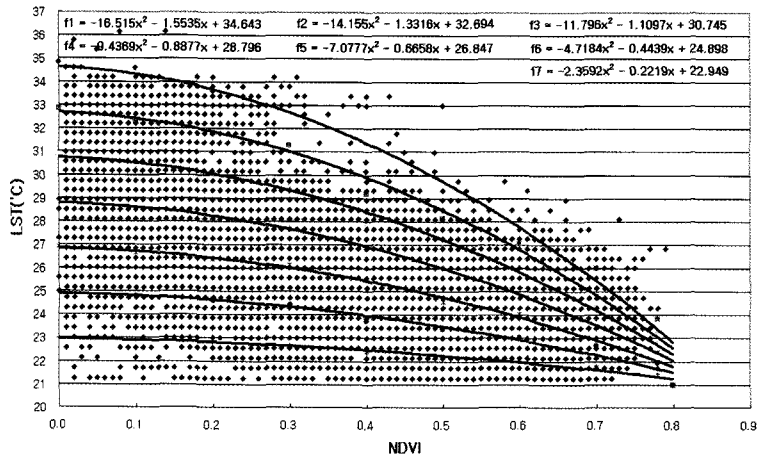
Fig. 7은 위성영상에서 계산된 지표면온도를 나타낸 것이다. 대구광역시 중심부의 경우, 인공구조물이 들어선 곳의 온도는 대부분 30°C 이상을 나타낸다. 그러나 이와 대조적으로 도심에 위치하더라도 녹지가 있는 공원지역은 상대적으로 낮은 온도를 나타낸다. 그리고 대상지역의 북쪽에 낮은 온도를 나타내는 곳은 고층구름이 있는 지역으로 본 연구에서는 제외하

였다. Fig. 6의 네모 부분은 대구광역시의 대표적인 공원지역인 두류공원을 나타낸다. 두류공원지역의 경우 23°C 전후의 지표면온도를 나타낸다. 이보다 작은 규모의 공원 역시 도심지의 기온과 비교하여 상대적으로 낮은 값을 보여준다.

달서구와 서구, 북구에서 특히 고온이 두드러져 있다. 이는 공단의 영향이 반영되었으며 지표 온도가 높게 나타난 이유는 첫째로, 공장의 건물의 재질로 추측할 수 있다. 대부분의 공단들이 열전도율이 높고 비열이 낮은 슬레이트를 이용하기 때문이라고 생각된다. 둘째로는 공장자체에서 발생하는 열들이 건물을 통해 발산되어 진다고 추측할 수 있다.

적외 6번 밴드의 해상도가 다른 밴드에 비해 낮은 관계로 하천이 잘 표현되지 않았다. 특히 신천과 낙동강의 경우 오히려 주변의 지표면온도보다 높게 나타났다. 낙동강의 경우 사구가 많은 지역이 많고, 신천의 경우 상류는 자연 제방으로 주로 바위로, 하류의 경우엔 콘크리트로 제방이 되어 있으며 유량이 적은 것도 하나의 이유라고 생각된다.

NDVI와 지표면온도 자료를 바탕으로 앞 절에서 이론적으로 설명한 NDVI/T, 분포를 이용하여 상대적인 지표면 증발산효율을 산정하였다. Fig. 8은 위성 영상자료를 이용한 NDVI/T, 분포도를 나타낸 것이다. 전체적인 분포는 사다리꼴 형태이며, 앞 절에서 언급한 바와 같이 상부의 극치 즉 최소 증발산에 의한 온도선이 선형적으로 나타나는 것이 아니고 비선형적으로 나타난다. 본 연구에서는 분포도를 8개의 비선형 관계구간으로 나누었다. 이들은 동일한 간격을 가



**Fig. 8.** Scatter plots surface temperature/NDVI. Lines calculated by upper equations indicate the relative evapotranspiration rate.

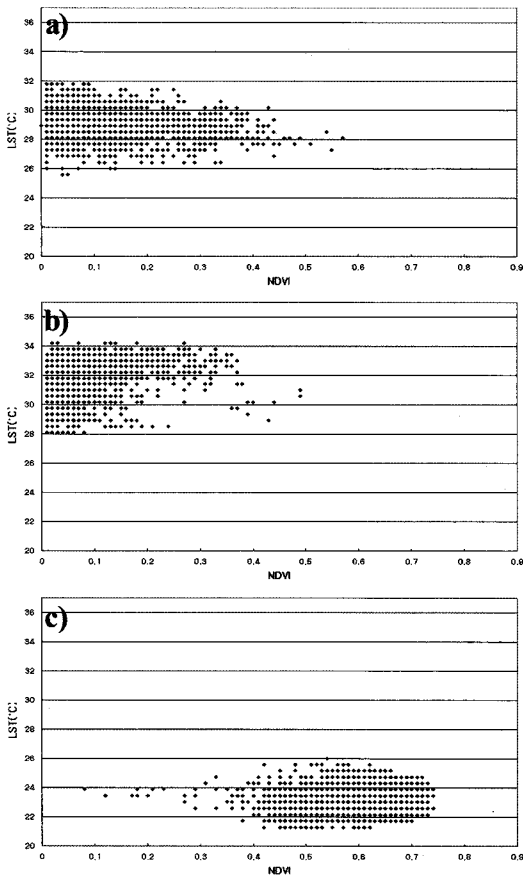


Fig. 9. Scatter plots surface temperature/NDVI at a) residential area, b) industrial complexes, and c) wood lands.

지고 있고, 각 구간은 다른 증발산강도를 가지고 있기 때문에 이에 따라 지표면의 복사온도가 달라진다고 본다. 각각의 관계식은 그림상부에 나타내었다. 각 영역의 상대적인 증발산강도는 지표면 열수지방정식에서 증발효율로 사용할 수 있다. 즉 지표면에서의 최대 가능 증발산효율을 1로 두고, 각각의 지표 상태에 따라 건조한 경우 증발효율을 낮게 반대로 수분을 많이 포함한 경우 높게 산정한다. 같은 방식으로 본 연구에서 산정된 8개의 영역을 0부터 0.8까지로 산정하여 상대적인 증발산효율을 추정하였다.

Fig. 9는 대구광역시의 도심지, 공업지역 산립지역의 NDVI/Ts 분포도를 나타낸 것이다. 공단지역인 성서공단, 3공단, 비산 염색공단의 경우 지표온도는 28~34°C이며 식생지수는 0~0.4 정도였다. 공단 내 일부 식생지수가 0.4~0.6 값을 나타내는 것은 공단 내 존재하는 녹지들에 의한 것이다. 그러나 그들의 비율

Table 2. Statistics of Relative Evapotranspiration (RE) distribution estimated by LANDSAT TM data

RE	Percent (%)	Numbers
~0.15	3.7	100637
0.15~0.3	37.7	1027947
0.3~0.45	29.0	788906
0.45~0.6	9.0	246157
0.6~0.75	2.5	67563
0.75~0.9	18.1	492154

은 매우 낮다. 온도의 경우, 도심지와 비교하여 매우 높게 나타나는데 이는 앞에서 설명한 바와 같이 열을 방출하는 공단지역이 집중되어 있으며, 건물들의 재질에 기인한다. 도심지의 경우 공단지대보다 온도는 약 2°C 가량 낮았으며, 식생지수는 0~0.5로 분포해 있다. 도시내의 높은 식생지수 분포는 대구 도심에서 가로수와 공원이 차지하는 면적이 넓은 것을 의미한다. 또한 다른 가설에 따르면 도심의 고층건물로 인하여 그림자가 생겨서 위성에서는 그림자의 저온이 반영되기 때문이라고도 하며, 충분히 개연성이 있다고 사료되어 진다. 반면 산지의 경우는 앞산과 팔공산 지역이다. 지표 온도는 21~25°C 정도이며, 식생지수는 0.4~0.7 이상의 양호한 식생을 나타내고 있다. 그리고 매우 낮은 지표온도를 나타낸다.

Table 2는 Fig. 8에서 보여준 NDVI/T, 분포도의 각 구간별 비율을 나타낸 것이다. 비율 0.3이하 구간이 전체 40%를 점하고 있으며 중간 구간에 해당하는 0.3에서 0.6 사이가 38% 정도를 점하고 있다. 그러므로 전체적인 도심에 가까운 저증발산이 높은 비율로 나타나고 있다. 산지 및 관개지역에 해당하는 0.4 이상도 전체지역의 절반정도 나타난다. 이 비율도 대구광역시의 전체적인 토지이용도의 비율과 유사하게 나타남을 알 수 있다. 이것은 대구광역시의 지표면 증발산 강제력은 이차적으로 토지이용도가 중요한 요인이 된다는 것을 의미한다.

Fig. 10은 Fig. 8에서 보여준 NDVI/T, 분포도에서 산출된 상대적인 증발산효율 분포를 나타낸 것이다. Table 2에서 보는 바와 같이 대구광역시의 40%는 0.3 미만의 증발산효율을 나타내고 있으며, 특히 공단지역의 경우 0.2 이하로 낮게 나타나고 있다. 그와는 대조적으로 산지의 경우는 0.4 이상의 경우로 높게 나타나고 있다. 0.6 이상의 경우는 구름의 영향을 받는 지역이다. 식생지수와 지표온도를 이용하여 나온 결과이지만, 지표온도를 이용하였기 때문에 Fig.



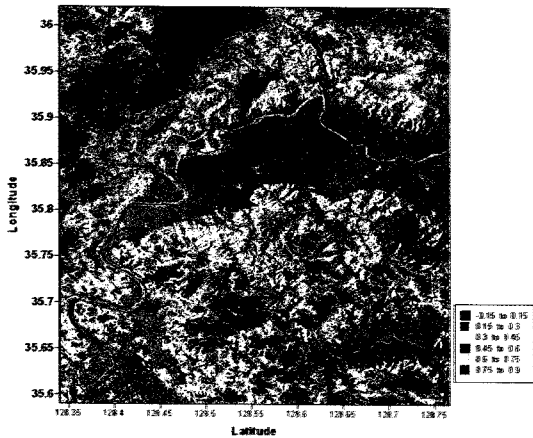


Fig. 10. Relative evapotranspiration rate calculated by the relation between surface temperature/NDVI. Black lines are administration boundaries in Deagu Metropolitan.

6과 같이 30 m의 해상도가 아닌 120 m의 해상도를 갖게 되었다.

대구광역시의 대부분의 농업지역은 달성군에 위치한다. 이러한 농업지역의 경우는 도심과는 조금 다르게 0.2~0.5 사이의 값이 혼재되어 나타나고 있다. 이 영역의 경우 2002년 토지사용도(Fig. 2)를 기준해 보면 논지역이다.

대구광역시 도심부의 경우, 일부 녹지와 가로수가 있다고 하지만 그것만으로 수분이 충분히 공급이 되지 않으며, 인공구조물의 특성상 자연 상태보다 높은 온도를 나타내기 때문에 도심지역은 건조 지역이라 볼 수 있다. 그러나 본 연구에서 산정된 대구광역시 도심지의 증발산효율은 과대평가되는 경향이 있다. 그 이유로는 첫째, 증발산효율은 토지이용도와 중요한 관계를 가지고 있지만 이것만으로 완전히 산정하기 어렵다는 것이다. 즉 지표면의 온도는 토지이용도 뿐 아니라 지표면 수분 상태를 종합적으로 고려되어 나타나는 하나의 값이다. 두번째는 두류공원 등 도심지내의 대규모 공원에서 방출된 잠열에너지가 중규모 기상학적인 이류 등 효과에 의하여 도심지내의 증발 효율 산출에 영향을 미칠 수 있다.

그리고 세 번째는 산악지역의 경우 태양의 입사각도 중요한 요인으로 작용한다. 남구의 남쪽지역인 앞산과 달성군의 산지에서는 태양 입사각이 높은 비탈면에서 지표온도도 함께 상승하는데 비하여 입사각이 작은 반대편 비탈면에서는 상대적으로 지표온도상승의 한계를 가진다. 이러한 차이는 결국 NDVI/T, 분

포도를 이용한 상대 증발산효율의 차이로 나타난다. 이러한 영향은 NDVI에서도 확인되는 부분으로 비탈면에 대한 태양 고도각이 중요한 요소로 작용함을 알 수 있다. 그리고 자유수면(free water)에 대한 증발산량은 오히려 산지보다 낮은 값을 보이고 있다. 이 부분에 대한 증발산량은 좀 더 깊은 연구가 필요할 것이다.

## 결론

지표면의 증발산량의 추정은 잠열속의 산출 뿐 아니라 지표면 열수지 계산에 매우 중요하다. 그러나 증발산량을 직접적으로 관측하기가 매우 어렵다. 그러므로 본 연구에서는 도시 수치지상 예보의 기초 자료로 중요하지만, 관측이 매우 어려운 지표면 상대 증발산 효율을 위성 자료를 통하여 추정하였다. 상대 증발산 효율 추정은 지상의 식생 밀도를 나타내는 NDVI와 위성에서 관측한 복사 지표면 온도의 관계식을 이용하였다. 특히 상대 증발산 효율 추정을 위하여 기존 연구에서 중, 저해상도 센서 자료에 적용한 NDVI/Ts 알고리즘을 도시 기상학적 공간 규모에 적용하여 그 타당성을 평가하였다. 본 연구에 사용된 분석 대상일은 2004년 8월 8일이다. 이날은 강한 고기압이 한반도 중심에 위치하여, 대구광역시를 포함한 영남 지방이 매우 맑은 날씨를 나타냈다.

NDVI 분석 결과 대구광역시를 둘러싼 산악 지역을 중심으로 0.5 이상의 높은 NDVI 값이 나타난다. 특히 대구광역시의 남쪽에 위치한 비슬산의 경우 0.7 이상의 높은 NDVI 값을 나타내고 있다. 그러나 대구광역시 중심부에 해당하는 도심 지역의 경우 0.2 이하의 값을 나타낸다. 이것은 대구광역시의 실제 토지이용도 분포와 잘 일치하고 있다. 3개의 가시 광선 영역의 밴드를 총합하여 반사도 분석을 하였다. 반사도의 경우 대구광역시 대부분의 도심 지역은 0.625에서 0.75 사이의 값으로 높은 반사도가 나타난다. 또한 일부 공단 지역의 경우는 0.75 이상으로 아주 높게 나타나고 있다. 산림 지역의 경우 도심에 비하여 상대적으로 낮은 값을 보였다.

적외선 밴드를 이용한 지표 온도의 경우 토지 이용도와 매우 일치하게 나타났다. 인공 구조물이 들어선 곳의 온도는 대부분 30°C 이상을 나타낸다. 그러나 이와 대조적으로 도심에 위치하더라도 녹지가 있는 공원 지역은 상대적으로 낮은 온도를 나타낸다. 그리고

NDVI/Ts 분포를 이용하여 상대적인 지표면 증발산 효율을 산정하였다. 본 연구에서는 8개 구간의 상대 증발산도를 구하였다. 특히 상대 증발 효율이 0.3 이하인 구간이 전체 50%를 점하고 있으며 중간 구간에 해당하는 0.4에서 0.6 사이가 38% 정도를 점하고 있다. 그러므로 전체적으로 도심에 가까운 저증발산이 높은 비율로 나타나고 있다. 토지 이용도와 비교할 때 약간 도심의 효과를 과대 평가하는 경향이 있다. 그리고 도심지, 공업 지역, 산림 지역의 NDVI/Ts 분포도를 비교한 결과 각 지역의 특징이 잘 나타난다.

본 연구는 대도시 지역의 증발산 효율의 상대적인 크기를 비교하고, 특정 시점의 증발산량의 2차원 분포를 산정하였다. 이러한 수분 분포의 불균일성이 중규모 기상장에 어떠한 영향을 미치는가에 대하여는 좀 더 심도 깊은 연구가 필요하리라 본다. 이를 위하여 많은 관측 자료를 확보하여 직접적이고 정량적인 증발량 분포와 비교하는 연구도 필요하며, 도심지 내의 지표 수분 분포의 변화 경향성을 분석하는 연구도 병행되어야 한다고 사료된다.

## 감사의 글

본 연구는 한국학술진흥재단 기초과학연구(과제번호: C00521)의 지원금으로 수행되었습니다. 재정지원을 해 주신 한국학술진흥재단 및 기타 관계자 여러분에게 감사드립니다.

## 참고문헌

- 이미선, 서애숙, 이충기, 1996, NOAA/AVHRR 자료 응용 기법 연구. 대한원격탐사학회지, 12, 60-80.
- 한국기상학회, 2001, 대기과학개론, 시그마프레스, 서울, 406 p.
- 한진수, 이부용, 2005, 해남 농경지에서의 자유 수면 증발 관측과 해석. 한국농림기상학회지, 7, 91-97.
- Boegh, E., Soegaard, H., Hanan, N., Kabat, P., and Lesch, L., 1998, A remote sensing study of the NDVI-Ts relationship and the transpiration from sparse vegetation in the Satellite based on high resolution satellite data. *Remote Sensing of Environment*, 69, 224-240.
- Chander, G. and Markham, B., 2003, Revised LANDSAT 5 TM Radiometric Calibration Procedures and Post-Calibration Dynamic Ranges. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41, 2674-2677.
- Friedl, M.A. and Davis, F.W., 1994, Sources of variation in radiometric surface temperature over a tallgrass prairie. *Remote Sensing Environment*, 48, 1-17.
- Gillies, R.R., Carlson, T.N., Gui, J., Kustas, W.P., and Humes, K.S., 1997, A verification of the triangle method for obtaining surface soil water content and energy fluxes from remote measurements of the normalized difference vegetation index and surface radiant temperature. *International Journal of Remote Sensing*, 18, 3145-3166.
- Goetz, S.J., 1997, Multisensor analysis of NDVI, surface temperature and biophysical variables at a mixed grassland site. *International Journal of Remote Sensing*, 18, 71-94.
- Kim, J. and Yeo, C., 2005, The relationship among land use, vegetation and surface temperature in urban area. *Journal of Korean Association of Geographic Information Studies*, 8, 21-30.
- Lee, S.-H., 1998, Numerical studies on impacts of topography and heterogeneous surface moisture estimated by satellite data on the local circulations. Ph.D. Thesis, University of Tsukuba. 121 p.
- Liang, S., 2000, Narrowband to broadband conversions of land surface albedo I algorithms. *Remote Sensing of Environment*, 76, 213-238.
- Nemani, R.R. and Running, S.W., 1989, Estimation of regional surface resistance to evapotranspiration from NDVI and thermal IR AVHRR data. *Journal of Applied Meteorology*, 28, 276-284.
- Nemani, R.R. and Running, S.W., 1997, Land cover characterization using multi-temporal red, near-IR, and thermal-IR data from NOAA/AVHRR. *Ecological Applications*, 7, 79-90.
- Prihodko, K. and Goward, S.N., 1997, Estimation of air temperature from remotely sensed surface observations. *Remote Sensing of Environment*, 60, 335-346.
- Sandholt, I., Rasmussen, K., and Andersen, J., 2002, A simple interpretation of the surface temperature/vegetation index space for assessment of surface moisture status. *Remote Sensing of Environment*, 79, 213-224.
- Taconet, O., Bernard, R., and Vidal-Madjar, D., 1986, Evapotranspiration over an agricultural region using a surface flux/temperature model based on NOAA-AVHRR data. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 25, 284-307.
- Wan, Z., Wang, P., and LI, X., 2004, Using MODIS LAND Surface temperature and normalized difference vegetation index predicts for monitoring drought in the southern Great Plains, USA. *International Journal of Remote Sensing*, 10, 61-72.

2006년 9월 7일 접수

2006년 12월 5일 수정원고 접수

2006년 12월 8일 채택