

고해상도 위성영상과 수치고도모형에 근거한 광릉 산림 관측지의 공간적 특성

문상기 · 박승환 · 홍진규 · 김준

연세대학교 지구환경연구소/대기과학과

(2005년 1월 24일 접수; 2005년 3월 29일 수락)

Spatial Characteristics of Gwangneung Forest Site Based on High Resolution Satellite Images and DEM

Sang-Ki Moon, Seung-Hwan Park, Jinkyu Hong and Joon Kim

Global Environmental Institute/ Department of Atmospheric Science, Yonsei University, Seoul, Korea

(Received January 24, 2005; Accepted March 29, 2005)

ABSTRACT

Quantitative understanding of spatial characteristics of the study site is a prerequisite to investigate water and carbon cycles in agricultural and forest ecosystems, particularly with complex, heterogeneous landscapes. The spatial characteristics of variables related with topography, vegetation and soil in Gwangneung forest watershed are quantified in this study. To characterize topography, information on elevation, slope and aspect extracted from DEM is analyzed. For vegetation and soil, a land-cover map classified from LANDSAT TM images is used. Four satellite images are selected to represent different seasons (30 June 1999, 4 September 2000, 23 September 2001 and 14 February 2002). As a flux index for CO₂ and water vapor, normalized difference vegetation index (NDVI) is calculated from satellite images for three different grid sizes: MODIS grid (7km × 7km), intensive observation grid (3km × 3km), and unit grid (1km × 1km). Then, these data are analyzed to quantify the spatial scale of heterogeneity based on semivariogram analysis. As expected, the scale of heterogeneity decreases as the grid size decreases and are sensitive to seasonal changes in vegetation. For the two unit grids where the two 40 m flux towers are located, the spatial scale of heterogeneity ranges from 200 to 1,000m, which correspond well to the climatology of the computed tower flux footprint.

Key words : Site characteristics, NDVI, LANDSAT, MODIS, Flux footprint, Scaling, Heterogeneity

I. 서 언

지하수위에 의한 지하수 함양량 평가, 에디 공분산 법에 의한 증발산 및 각 지점별 토양수분 함량 등과 같이 현장 관측으로 산출되는 생태수문 요소들은 대개 점(point)에서 plot 규모(1m²~1km²)의 자료로서 그 공간적인 제약을 벗어나기 힘들다. 지면 상태가 불균질한 경우, 기상학적/지질학적 비균질성과 이방성에 의

해 현장 관측값의 시공간 대표성이 더욱 떨어진다. 현장 관측만으로 다양한 생태수문 요소들의 시공간 대표성을 확보하기 위하여 수많은 관측 지점을 선정하고 측정하는 것은 비용과 효율성에서 비현실적이다. 따라서 대부분의 연구는 특정한 장소와 환경에 해당하는 경험식을 사용하는 방법론의 한계로 정책 차원에서 요구하는 시공간 분포에 관한 정보 도출이 제한될 수밖에 없다. 그러나 최근 다양한 분야의 과학기술의 발달

로 이러한 시공간적인 제약을 벗어날 수 있는 가능성이 제시되고 있다.

1999년 12월에 Terra 위성이 발사된 이후 2000년 2월말부터 Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer(MODIS) 지구 관측 영상이 제공되고 있다. 공간 해상도가 250m - 1km인 MODIS는 지구환경변화를 감시하고 탄소와 물의 순환 연구를 위해 다양한 지구규모의 생태수문학적 자료들을 구축해나가고 있다. 이러한 영상 정보와 더불어, 다양한 육상 생태계에서의 물과 탄소 순환에 관한 지속적인 플럭스 감시가 FLUXNET과 같은 전구 감시망을 통해 주요 대륙에서 수행되고 있다(Baldocchi *et al.*, 2001). 국내에서도 2001년부터 다양한 농림생태계에서 CO₂, 증발산, 토양수분 등의 생태수문 자료가 실시간으로 관측되고 있으며, 현재 품질 관리를 거쳐 KoFlux Data Information System(DIS)에 저장되고 있다(www.koflux.org).

Hong *et al.*(2005)에서 논의된 바와 같이, plot 규모의 관측 자료와 위성영상 또는 모형의 격자규모와 연계시키는 스케일링(scaling) 문제가 초미의 관심사이다. 그러나 현재까지 표준화된 방법에 의하여 스케일링 연구가 진행되지 못하고 있다. 최근 연구에서는 플럭스 타워가 위치한 곳의 다양한 해상도의 위성 영상으로부터 식생 지수, 습성(wetness) 지수, 활력(greenness), 엽면적 지수, 흡수된 광합성 유효 복사 등과 관련된 플럭스 지수를 스케일링 기술개발에 활용하고 있다(e.g., Kimura *et al.*, 2004; Kim *et al.*, 2005; Nagler *et al.*, 2005). 국내에서도 육상생태계의 물질 순환과 관련하여 스케일링 문제에 초점을 둔 연구들이 KoFlux 관측지의 하나인 광릉 수퍼사이트를 중심으로 이루어지고 있다. 본 연구에서는 광릉 산림 소유역의 증발산과 CO₂ 플럭스의 타워 관측값과 위성 영상을 연계하는 첫 단계로서 위성 영상과 GIS를 이용하여 광릉 관측지(7km×7km)의 지형, 토양 및 식생의 공간 정보를 정량화하고, 물질 순환과 연관된 플럭스 지수들을 선별하여 그 공간적인 특성을 조사하였다.

II. 재료 및 방법

2.1. LANDSAT images and software

본 연구에 사용된 자료는 국립지리원 발행 1:25,000 수치지형도에서 추출한 수치 고도 모형

(Digital Elevation Model; DEM)과 공간해상도 30m인 LANDSAT ETM+ 영상이다. LANDSAT 영상은 여름(1999년 6월 30일)과 겨울(2002년 2월 14일), 가을(2000년 9월 4일, 2001년 9월 23일)에 우리나라 서해로부터 경기도와 강원도를 지나 동해 일부까지를 포함한 영상들로서 기하보정(부록 참조)을 거친 후 광릉 소유역을 포함하는 7km×7km 영역을 추출하였다. 대기 중 수증기와 미량 기체 효과를 제거하는 대기 보정은 본 연구에서 적용하지 않았으며 대기 보정 효과에 대한 연구가 현재 진행 중이다. 위성 영상의 분석은 49개의 단위 격자(1km×1km)로 이루어진 MODIS 격자(7km×7km) 내에서 소유역과 두 플럭스 타워를 포함하는 집중관측 격자(3km×3km)를 중심으로 수행하였다(Fig. 1).

위성영상의 처리를 위해 ERDAS 사의 IMAGINE 8.5와 ESRI 사의 ArcView GIS(version 3.3a)와 ArcMap(version 9.0)에 탑재된 Geostatistical Analyst를 함께 이용하였다. ArcView GIS는 주로 Grid로 변환된 영상을 표시하거나 산술적인 통계처리에 이용되었으며 ArcMap GIS는 지구통계분석을 실시하는데 이용되었다. 플럭스 발자국 분석에는 FSAM(Schmid, 1997) 모형을 사용하였다.

2.2. 이론적 배경

2.2.1. 식생지수

본 연구에서는 플럭스 지수로서 식생지수인 Normalized Difference Vegetation Index(NDVI)를 사용하였다. NDVI는 가시광선(붉은색) 파장대와 근적

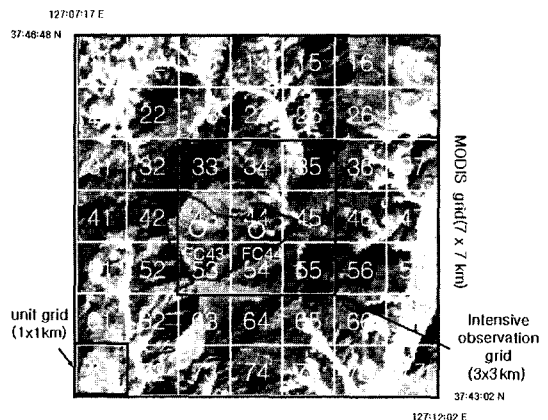


Fig. 1. Gwangneung forest watershed in three different grid sizes: MODIS grid (7km×7km), intensive observation grid (3km×3km) and unit grid (1km×1km).

외선 파장대에서 지표 피복체의 반사도의 조합으로 산출되는데, -1에서 1까지의 범위를 가지며 다음과 같이 정의된다(e.g., Schowengerdt, 1997).

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{VIS}}{\rho_{NIR} + \rho_{VIS}} \quad (1)$$

여기서 ρ_{NIR} 는 근적외선 영역(0.7~1.1 μ m)에서의 반사도, ρ_{VIS} 는 가시광선 영역(0.4~0.7 μ m)에서의 반사도이다.

2.2.2. 반분산(semivariance)

대표적인 공간 분석 기법 중 하나로 일정한 거리에 있는 자료들의 유사성을 나타내는 척도로 아래와 같이 정의된다.

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} E[(z(x) - z(x+h))^2] \quad (2)$$

여기서 h 는 지연 거리(lag distance) 또는 분리 거리(separation distance)로서 두 자료 간에 떨어져 있는 거리를 말한다(Choi, 2004). 반분산은 일정거리 h 만큼 떨어진 두 자료들 간의 차이를 제곱한 것의 기대값(E)을 반으로 나눈 것이다. 따라서 거리가 가까우면 그 값들이 비슷하므로 반분산은 일반적으로 작게 나타나고 거리가 멀어질수록 그 값이 크게 나타나는 것이 일반적 경향이다.

식 (2)로부터 계산된 반분산의 h 에 대한 변화에 잘 맞는 구형(spherical) 모형을 적용하여 범위(range), 실(sill), 너겟(nugget)과 같은 의미 있는 모수들을 추정하였다(Fig. 2). 여기서 range는 h 의 증가에 따라 반분산이 빠르게 증가하다가 더 이상 증가하지 않고 평평해지는 지점까지의 거리로서, 이러한 h 를 직경으로 하는 원 안의 값들은 공간적으로 상관성을 가짐을 의미한다. sill은 전체 자료의 분산을 나타내며, nugget은 관측오차와 미세규모의 변동을 함께 나타낸다(Kanevski and Maignan, 2004).

III. 결과 및 토의

3.1. 지형, 식생, 토양의 공간 특성

3.1.1. MODIS 격자 (7km × 7km)

고도: Fig. 3은 MODIS 격자에 대한 1m해상도의 IKONOS 영상으로서, 북서쪽과 동쪽에 고도가 낮은 평지가 분포하고, 대부분 산악지대로 구성되어 있음을 보

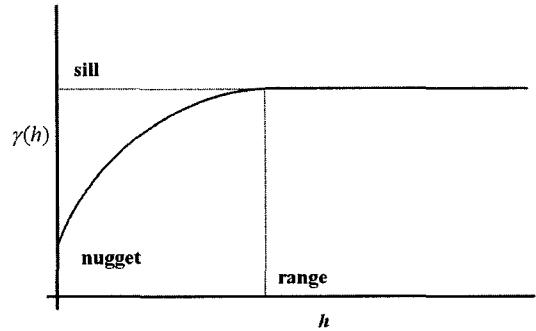


Fig. 2. Parameters of semivariogram analysis: range, sill, and nugget.

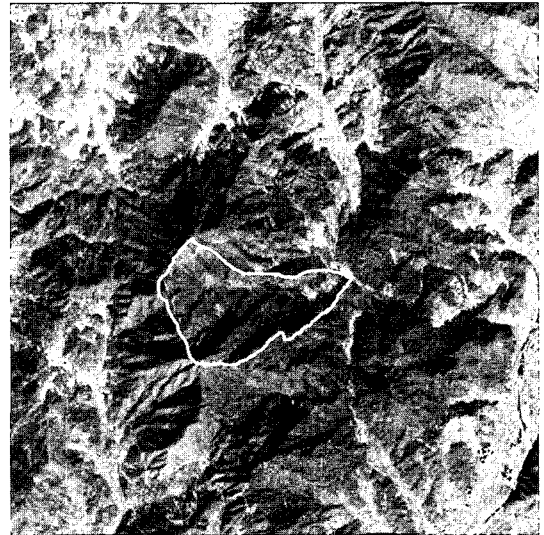


Fig. 3. 7km × 7km multispectral IKONOS image (with 1m resolution) centered on Gwangneung forest watershed on 15 January 2004.

여준다. 특히, 북동쪽과 남서쪽 부근에서 최대 고도값을 갖는 산봉우리들이 존재한다. 높은 고도의 능선은 DEM의 중앙 부근에서 남북으로 단위 격자 33, 43, 53, 63, 74로 연장되어 있고, 불연속적으로 단위 격자 16에서 최고의 고도(해발 580m)를 보인다(Fig. 4). 최저 고도는 단위 격자 1의 해발 20m이며, MODIS 격자의 평균 고도는 182m이다.

사면경사: DEM에서 산출한 MODIS 격자의 사면경사도의 범위는 0°(평지)-52°이다. 평균은 16.9°이고 표준편차는 8.4°이다. 사면경사를 10° 간격으로 구분할 때 평균이 포함된 10-20° 사이의 사면 면적이 19.4km²로 가장 넓게 분포하며, 10° 이하의 사면 면적이 16.0km²로서 0-20° 사이에 속하는 사면들이 전

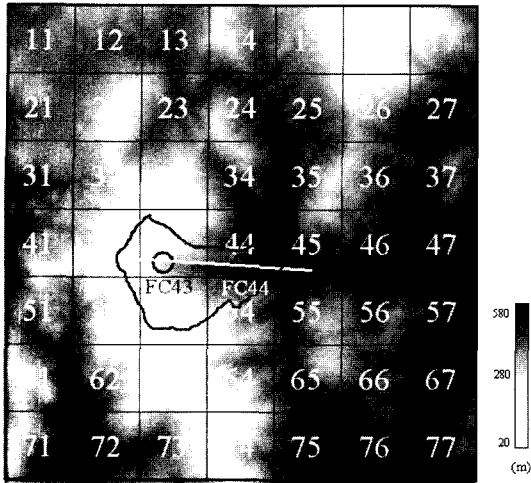


Fig. 4. Digital elevation map (with resolution: 30m) of MODIS grid centered on Gwangneung forest watershed.

체면적의 70%를 차지한다. 고도가 최대가 되는 북동쪽과 남서쪽에서 사면경사도도 비교적 크게 나타난다 (Fig. 5).

사면 방향: 방위를 8등분하였을 때, 90-135° 방향이 최대면적(7.0km²)을 차지하고, 45-90° (6.3km²), 135-180° (6.1km²)의 순으로, 평지를 제외한 전체 면적 (42.6km²)에 대해서 북동에서 남쪽을 향한 사면들이 약 46%를 차지한다. 또한 고도가 높은 곳들은 주로 동서 방향의 사면으로 이루어져 있다(Fig. 6).

식생과 토양: 환경부에서 제공하는 토지피복지도에 의하면 본 연구지역의 MODIS 격자에서 산림은 전체

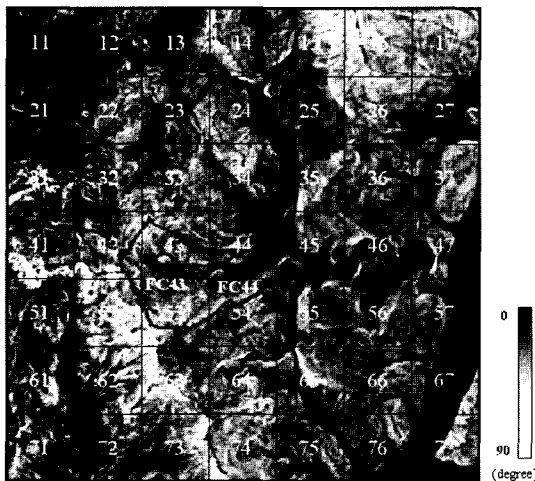


Fig. 5. Slope map of MODIS grid centered on Gwangneung forest watershed.

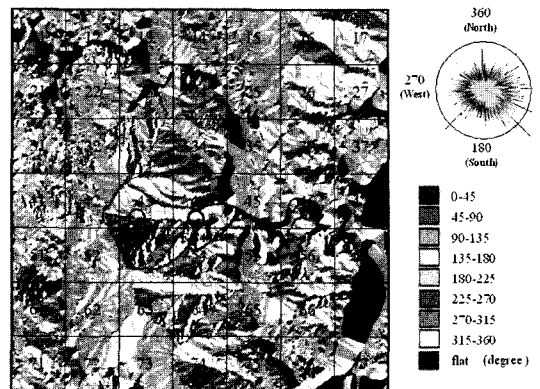


Fig. 6. Aspect map of MODIS grid centered on Gwangneung forest watershed.

면적의 77%인 37.5km²를 차지한다. 이 중 활엽수림은 11.7km²(31%), 침엽수림은 19.6km²(53%), 혼효림은 6.1km²(16%)를 차지한다(Fig. 7). 농업과학기술원에서 제작한 수치토양도에 의한 토양 분석 결과에 의하면, MODIS 격자에서 사양질(sandy loam) 토양이 36.9km²(75%), clay loam이 6.3km²(13%), sand가 6.1km²(12%)를 차지한다(Fig. 8).

3.1.2 집중 관측 격자 (3km × 3km)

고도: 산봉우리들과 능선이 존재하는 43, 53, 54번 단위 격자에서 높은 고도를 보이며, 계곡부에 해당하는 44번 격자에서 비교적 낮은 고도를 보인다(Fig. 4). DEM에 의하면 최저 고도는 해발 90m, 최고 고도는 530m로 각각 45번과 53번 격자에 속해 있다. 집중 관측 격자의 평균 고도는 211m로, MODIS 격자의

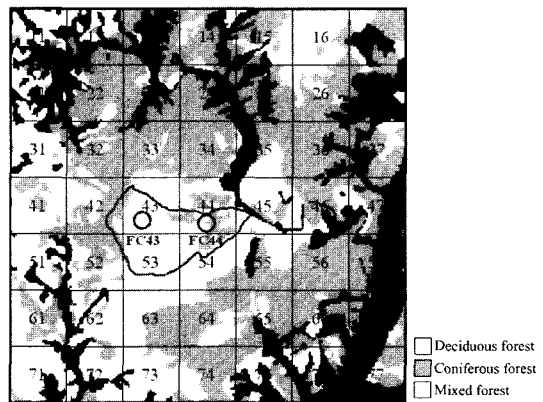


Fig. 7. Vegetation map of MODIS grid centered on Gwangneung forest watershed.

평균 고도보다 다소 높다.

사면경사: 광릉 소유역의 대부분을 포함하는 집중 관측 격자의 사면경사의 범위는 0-51°이며 평균은 15.6°, 표준편차는 8.6°로서 MODIS 격자의 값들과 매우 비슷하다. 10-20° 사이의 사면들이 전체 9km²의 약 80%를 차지한다. 소유역 상부에 위치한 플렉스 타워(FC43)와 하부에 위치한 타워(FC44)를 연결하는 계곡부의 경사도는 약 6.2°로서 소유역 내의 남북방향 사면들은 급경사인 반면 동서방향은 완만함을 보여준다(Fig. 9).

사면방향: 45-90° 방향이 1.7km², 90-135° 사면이 1.5km², 135-180° 사면이 1.3km²를 차지하여 MODIS 격자와 마찬가지로 북동쪽에서 남쪽을 향한 사면의 면적이 전체면적의 50% 이상을 차지한다.

식생과 토양: 소유역 내의 43, 53번 단위 격자는 활엽수림이 넓게 분포하고, 44번 격자는 침엽수림과 활엽수림, 54번 격자는 혼효림과 활엽수림이 분포하고 있다(Fig. 7). 토양의 종류는 네 단위 격자 모두가 MODIS 격자에서 가장 넓은 분포 면적을 갖는 sandy loam으로 되어 있다(Fig. 8).

3.1.3. 플렉스 타워가 위치한 두 단위 격자(1km×1km)

고도: FC43타워는 소유역의 원두부(headwater)에 위치하고 있다(Fig. 4). 원두부는 강수가 지표면에 내렸을 때 처음으로 유출이 시작되는 유역으로 보통 산정상 부근에 해당한다. FC43은 43번 격자에 속해 있으며 이 격자의 평균 고도는 해발 291m이다. 한편, FC44 타워는 동쪽으로 기울어진 계곡을 따라 약 1.2km 떨어져 있는 유역 하단부에 위치하고 있고 평균 고도는 144m이다(Fig. 4). 광릉 소유역의 말단부는 봉선사천과

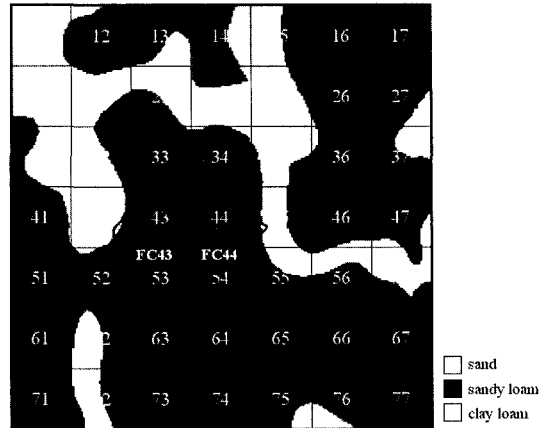


Fig. 8. Soil texture map of MODIS grid centered on Gwangneung forest watershed.

만나는 곳으로 고도가 낮은 영역에 속한다.

사면경사: 43번 단위 격자 내에는 평지가 없고 10-20°(0.55km²)와 20-30°(0.28km²) 사이의 경사를 가진 사면들이 면적의 80% 이상을 차지한다. 반면에 44번 단위 격자에는 평지가 존재하고, 역시 10-20° 사이의 경사지가 가장 큰 면적(43%)을 차지하나, 0-10°의 낮은 사면경사도 약 40%를 차지한다. 적은 면적(<10%)이지만, 두 단위 격자에 모두 절벽에 가까운 사면들(> 61°)이 존재한다.

경사방향: 43번 단위 격자에서는 동 사면과 남 사면이 비슷한 비율로 존재한다. 43번 단위 격자에서 북쪽에 위치한 사면들은 135-225°를 향하는 남 사면인 반면, 동서로 가로지르는 계곡의 남쪽에 위치하고 있는 사면들은 북 사면보다는 동 사면들이 더 지배적이다(Fig. 6). 동 사면의 분포 면적이 가장 넓고(0.47km²), 북 사면

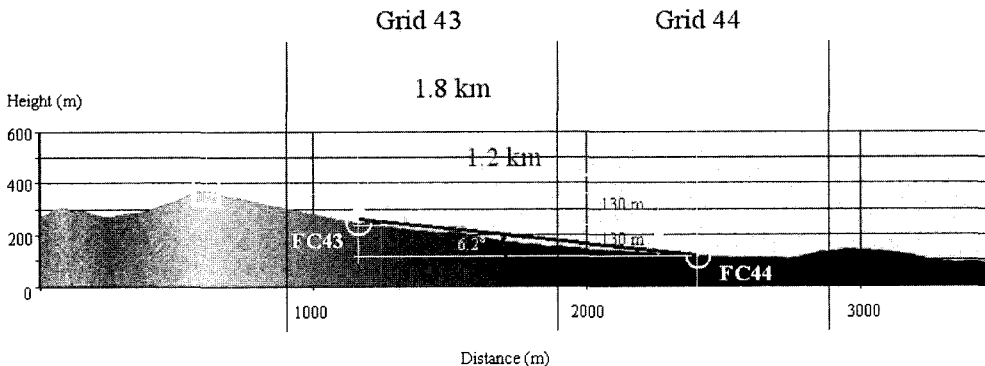


Fig. 9. Cross section of the Gwangneung forest watershed between the two 40m flux towers.

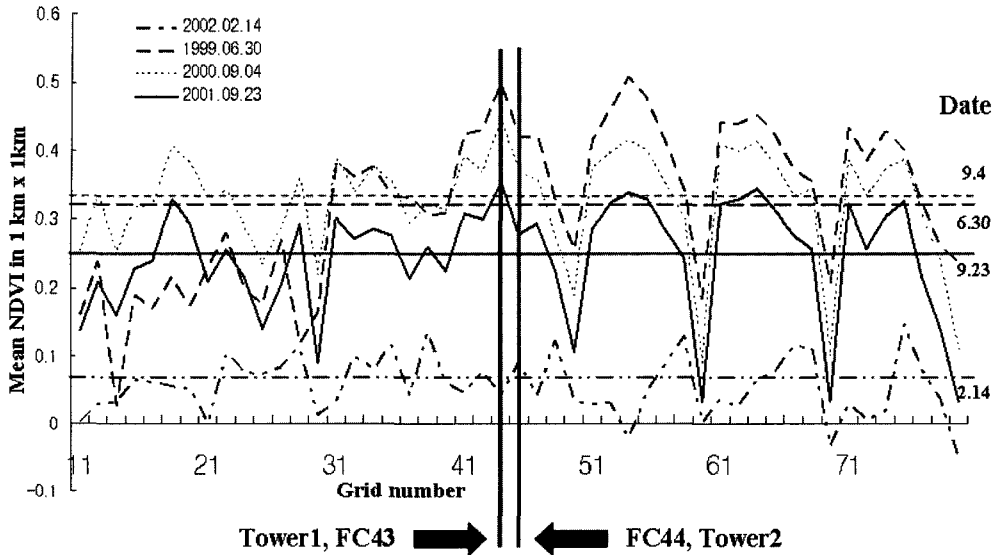


Fig. 10. Seasonal variations of mean NDVI in each unit grid for four selected images. The four horizontal lines are the NDVIs of individual image averaged for all 49 unit grids in the MODIS grid.

과 남 사면이 거의 같은 면적을 보이고 있다. 44번 격자의 소유역 내에서는 남 사면이 가장 많고, 북 사면과 동 사면을 합한 면적이 남 사면의 면적에 가깝다(Fig. 6).

식생과 토양: FC43 타워가 위치한 43번 격자는 대부분 활엽수림으로 구성되어 있으나, 44번 단위 격자는 활엽수림이 49%, 침엽수림이 41%를 차지한다. 그러나 44번 격자내의 FC44 타워가 위치한 지역은 대부분 침엽수림으로 구성되어 있다(Fig. 7). 집중관측 격자에서 알 수 있듯이 43, 44 두 단위 격자 역시 그 대부분이 우리나라의 대표적인 토양인 sandy loam 으로 구성되어 있다(Fig. 8).

3.2. 플렉스 지수 NDVI의 공간 특성

3.2.1. MODIS 격자(7km x 7km)

매해 같은 달의 NDVI 분포가 크게 다르지 않다는 가정 하에 위성 영상에서 계산된 NDVI의 계절 변화를 살펴보았다. 1999년 6월 30일 영상에서 계산된 여름철 NDVI는 0.32이고, 2000년 9월 4일 영상에 의한 가을철 NDVI의 평균은 0.33으로 여름철과 크게 다르지 않았다(Table 1, Fig. 10). 2001년 9월 23일 영상의 NDVI 평균은 0.25로서 평균이 2000년 9월 4일 영상보다 0.07이 낮았다. 2002년 2월 14일 겨울 영상의 NDVI 는 평균 0.06으로, 가을부터 겨울까지

활엽수의 기여도가 감소하기 때문이다. 각 영상에서 음수의 NDVI값이 도로나 하천과 같은 비식생 지역에서 주로 나타나고 일부는 겨울철 활엽수 지대에서도 나타난다. 또한 1999년 6월 30일 영상의 상단 일부를 덮고 있는 구름이 NDVI의 값을 감소시킨다. 몬순 기후로 인하여 여름철에 구름이 없는 영상을 구하기는 현실적으로 어렵기 때문에 이와 관련된 대기 보정 효과를 정량화할 수 있어야 한다. 단위 격자의 NDVI 값이 음수인 경우는 겨울 영상에서만 나타나며 21, 53, 67, 77번 단위 격자들이 이에 해당된다. 21, 67,

Table 1. Mean, maximum (Max), and standard deviation (SD) of NDVI for MODIS, Intensive Observation (I.O.) and Unit grids computed from four seasonal satellite images

Statistics	Grid	14 Feb.	30 Jun.	4 Sep.	23 Sep	
Mean	MODIS	0.06	0.32	0.33	0.25	
	I.O.	0.06	0.42	0.36	0.28	
	Unit	43	0.04	0.50	0.45	0.35
		44	0.09	0.42	0.37	0.28
Max	MODIS	0.42	0.59	0.56	0.56	
	I.O.	0.40	0.57	0.53	0.47	
	Unit	43	0.36	0.56	0.53	0.45
		44	0.40	0.55	0.52	0.46
SD	MODIS	0.10	0.15	0.14	0.15	
	I.O.	0.09	0.11	0.09	0.09	
	Unit	43	0.06	0.03	0.05	0.04
		44	0.10	0.07	0.10	0.11

77번 단위 격자는 개채수가 적은 활엽수 지대이고, 53번 격자는 소유역에 포함되는 곳으로서 개채수가 많은 활엽수지대이므로 겨울철에는 음수로 나타나지만, 여름 영상인 경우 NDVI 평균이 0.51로서 화소(pixel) 단위의 최대값인 0.59에 가깝다.

3.2.2. 집중관측 격자(3km × 3km)

1999년 6월 30일 영상에 의한 여름철 NDVI 평균은 0.42, 2000년 9월 4일 영상에 의한 가을철 NDVI 평균은 0.36으로서 여름철과 0.06의 차이를 보인다(Table 1). 2001년 9월 23일 영상의 NDVI 평균은 0.28로 더 낮았지만 여름과 가을 영상이 모두 MODIS 격자의 NDVI값보다 10-20% 더 크게 나타났다. 2002년 2월 14일 겨울영상의 NDVI는 평균 0.06으로써 MODIS 격자의 NDVI와 동일하다(Table 1).

3.2.3. 플릭스 타워가 위치한 두 단위 격자(1km × 1 km)

43번 격자는 낙엽 활엽수 지대로서 겨울철 NDVI가 0.04인 반면 가을에는 >0.35, 여름에는 0.50으로 매우 높다. 44번 격자는 혼효림 지대로서 겨울철 NDVI가 0.09인 반면, 다른 계절에는 0.28 이상이다(Table 1). 침엽수가 상대적으로 많은 44번 격자의 겨울철 NDVI가 활엽수가 대부분인 43번보다 다소 높다. 두 단위 격자 내의 계절별 NDVI의 최소값과 최대값의 차이는 각각 0.46과 0.33으로, MODIS 격자의 경우(0.27)보다 큰 계절변동을 보인다. 따라서 두 플릭스 타워에서 관측되는 CO₂ 플릭스나 증발산 자료들을 보다 넓은 범위와 다양한 조건의 식생 지수와 연계할 수 있을 것이다.

Table 2. Range, sill, and nugget of NDVI for unit grids 43 and 44 computed from four seasonal satellite images

Statistics	Grid	14 Feb.	30 Jun.	4 Sep.	23 Sep
Range(m)	43	1,008	1,008	907	1,008
	44	241	1,008	1,008	1,008
Sill	43	0.004	0.001	0.002	0.002
	44	0.010	0.006	0.011	0.014
Nugget	43	0.002	0.0006	0.0009	0.001
	44	0.001	0.003	0.005	0.007

3.3. 공간 규모의 지구통계 분석

3.3.1. MODIS 격자

계절별로 LANDSAT 영상으로부터 계산된 NDVI자료에 대해 반분산 분석을 수행하였다. 겨울 영상의 경우 range는 1.2km이고, 다른 계절의 영상들은 range가 모두 7km내외였다. 반분산 분석에서 range는 비균질성(heterogeneity)의 공간 규모를 나타내므로, MODIS 격자 내에서 겨울철에 비균질성의 공간 규모가 다른 계절에 비해서 매우 작음을 알 수 있다.

3.3.2. 집중 관측 격자

MODIS 격자의 결과와 비교해 보면, 집중관측 격자는 겨울을 제외한 나머지 계절 영상의 range 값이 MODIS격자에서의 값보다 훨씬 작다. 여름에는 3km, 가을에는 0.9 또는 2.1km인 반면, 겨울에는 MODIS 격자의 range와 비슷한 1.3km이다. 비균질성의 공간 규모가 격자의 크기가 작아지면서 작아지고, 특히 여름에 가장 크게 나타나고 있다.

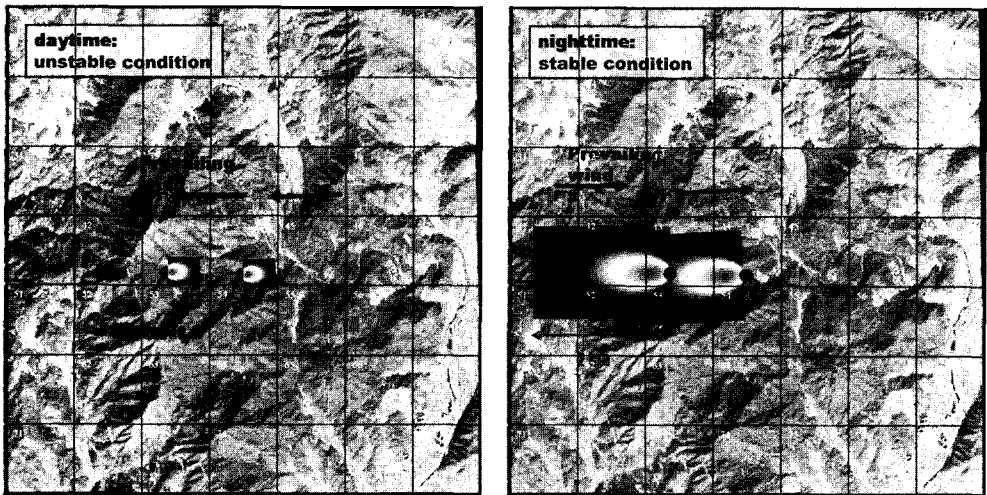


Fig. 11. Flux footprints computed from the FSAM model at the two 40m towers in Gwangneung forest watershed under stable and unstable atmospheric conditions.

3.3.3. 플렉스 타워가 위치한 두 단위 격자

단위 격자 44번의 겨울 영상을 제외하고는 43, 44번 두 격자의 모든 계절 영상들이 1km 이내의 range를 보인다(Table 2). 44번 격자의 겨울 영상은 241m로 훨씬 더 작다. sill은 전체 분산을 나타내는 값으로, Table 2의 값들에 제곱근을 취하면, Table 1의 두 단위 격자의 계절별 NDVI의 표준 편차(SD)의 값들과 일치한다. nugget은 관측오차와 미세규모의 변동을 나타내는 값으로 sill 보다 작는데, 44번 단위 격자에서 다소 크게 나타난다. nugget의 값들을 계절별로 살펴보면, 겨울 영상으로부터 계산된 NDVI값이 상대적으로 작지만 nugget 값이 50%이상을 차지하므로 불확실성이 큰 반면에, 여름 영상의 NDVI는 오차가 10% 이하임을 알 수 있다. 가을 영상으로부터 계산된 NDVI의 오차는 약 15-25% 정도이고, 겨울영상을 제외한 나머지 계절들의 영상에서 단위 격자 43번이 44번보다 불확실성이 작음을 알 수 있다.

range 값으로부터 두 단위 격자내의 비균질성의 공간 규모가 모두 1km이내임을 고려할 때, 단위 격자내의 모든 실측이 적어도 1km 정도의 공간 규모를 대표할 수 있도록 실험과 샘플링 설계가 이루어져야 한다. 타워에서 공기역학적 방법에 의해 관측되는 CO₂ 플렉스와 증발산의 경우에도, 그 발자국 기후(footprint climatology)가 1km 정도의 공간규모를 포함할 수 있어야 한다(Hong *et al.*, 2005). Fig. 11은 광릉 소유역의 40m타워에서 계산된 플렉스 발자국이 대기가 안정한 때에는 약 2km 정도, 불안정한 한낮의 경우 약 500m 정도의 규모를 가지고 있음을 보여준다. 따라서 소유역 상부와 하부에 위치한 두 타워로부터 관측되는 플렉스 자료는 단위 격자를 대표할 수 있을 것이다. 차후 위성 영상으로부터 계산된 다양한 플렉스 지수(e.g. NDVI) 자료들을 플렉스 발자국 모형으로 계산된 발자국 전이함수(transfer function)를 사용하여 기중 평균하면 타워 플렉스 자료와 위성 자료를 직접 비교할 수 있게 된다(Kim *et al.*, 2005).

IV. 적 요

농림생태계에서의 물과 탄소의 순환을 연구하려면, 먼저 관측지의 공간적 특성을 정량적으로 이해해야 한다. 특히, 우리나라와 같은 복잡한 경관에 관측지가 위치한 경우에는 공간 특성의 이해가 더욱 더 중요하

다. 본 연구에서는 광릉 산림 소유역의 지형, 식생 및 토양과 관련된 변수들의 공간적 특성을 정량화하였다. 지형의 공간 특성을 산출하기 위해 수치고도 모형(DEM)에서 계산된 고도, 경사 및 사면 정보를 분석하였다. 식생과 토양 정보는 LANDSAT TM 영상으로부터 제작된 지표 피복 지도를 사용하였다. 계절 특성을 살펴보기 위해 1999년 6월 30일, 2000년 9월 4일, 2001년 9월 23일, 2002년 2월 14일의 네 위성 영상을 사용하였다. CO₂와 수증기의 플렉스 지수로서, 위성 영상으로부터 식생지수 NDVI를 세 격자 크기(7km×7km MODIS 격자, 3km×3km 집중관측 격자, 1km×1km 단위 격자)에 대해 각각 도출하였다. 반분산 분석에 근거해서 이 자료들을 사용하여 관측지의 비균질성의 공간 규모를 계산하였다. 예상한대로, 격자의 크기가 작아질수록 비균질성의 규모가 작아졌고, 식생의 계절 변화에 민감하였다. 40m 플렉스 타워가 위치한 두 단위 격자의 경우, 비균질성의 공간 규모는 200~1000m 이었고, 이러한 공간 규모는 모형에서 계산된 타워 플렉스 발자국의 기후도와 잘 일치하였다.

감사의 글

지표 피복도와 수치 토양도를 제공해주신 환경부와 농업과학기술원 관계자에게 감사를 드린다. 본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업(과제번호: 1-8-2)과 환경부의 차세대핵심환경기술개발사업(Eco-Technopia 21 Project)의 지원을 받아 수행되었다.

인용문헌

- Baldocchi, D., E. Falge, and K. Wilson, 2001: A Spectral Analysis of Biosphere-Atmosphere Trace Gas Flux Densities and Meteorological Variables Across Hour to Multi-Year Time Scales, *Agricultural and Forest Meteorology* **107**, 1-27.
- Choi, J. 2004: *Modeling of Spatial Data-Kriging and Optimization*-Goomibook, 289p.
- Hong, J., D. Lee, and J. Kim, 2005: Lessons from FIFE on Scaling of Surface Fluxes at Gwangneung Forest Site, *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, this issue. (in Korean with English abstract)
- Kanevski, M. and M. Maignan, 2004: *Analysis and*

Modeling of Spatial Environmental Data. EPFL Press, 288p.

- Kim, J., Q. Guo, D. Baldocchi, L. Xu, M. Leclerc, and H. P. Schmid, 2005: Upscaling CO₂ fluxes from tower to landscape: Overlaying tower flux footprint calculations on high resolution (IKONOS) vegetation density images, *Agricultural and Forest Meteorology*, in press.
- Kimura, R., S. Okada, H. Miura, and M. Kamichika, 2004: Relationships among the leaf area index, moisture availability, and spectral reflectance in an upland rice field. *Agricultural Water Management* 69(2), 83-100.
- Nagler, P.L., J. Cleverly, E. Glenn, D. Lampkin, A. Huete, and Z. Wan, 2005: Predicting riparian evapotranspiration from MODIS vegetation indices and meteorological data. *Remote Sensing of Environment* 94(1), 17-30.
- Schmid, H.P., 1997: Experimental design for flux measurements: Matching scales of observations and fluxes. *Agricultural and Forest Meteorology* 87, 179-200.
- Schowengerdt, R. 1997: *Remote Sensing: Models and Methods for Image Processing*, Academic Press, San Diego, C.A.

부 록

위성 영상의 기하 보정

영상 분석시 공간 오차를 보정하고 공간 좌표를 설정하기 위해 지상 기준점(Ground Control Point; GCP)을 선정하고, 이를 통해 Bessel 타원체의 TM(Transverse Mercator) 좌표계로 변환하는 과정을 기하보정이라 한다. 이때 사용되는 모형은 영상의 종류와 특성에 따라 다양하며, 일반적으로 다항식에 의한 모형이 자주 이용된다. 다항식은 보정 영상의 면적 및 지상 기준점의 개수에 따라 차수를 지정해 줄 수 있으며, 본 연구에서는 1차 다항식을 적용하여 기하 보정을 실시하였다. 지상 기준점을 설정하기 위해 보정된 영상, 수치 지형도 등을 참조 자료로서 이용하거

나, keyboard 및 digitizer를 통해 직접 입력할 수도 있다. 여기서는 수치 지도를 이용하여 지상 기준점을 선정하였다. 이때 콘크리트 도로나 교차점과 같이 시간에 따른 위치의 변화가 적고 육안으로 확인이 용이한 지점들을 대상으로 다항식 변수의 개수만큼 선정해야 한다. 기하 보정 모형은 1차 다항식으로서 총 6개의 공간 오차(a0, a1, a2, b0, b1, b2)에 대해 6개의 변수를 산출해야 하므로 최소 6개 이상의 지상 기준점이 선정되어야 한다:

$$x'=a_0+a_1x+a_2y, y'=b_0+b_1x+b_2y \quad A(1)$$

(x, y : 오차를 포함하는 원 영상의 공간 좌표,

x', y' : 오차를 제거한 보정 영상의 공간 좌표)

사용자에 의해 선정되는 지상 기준점을 통해 1차 다항식이 계산되고, 이 식에 의해 새로운 공간 좌표가 생성되는데, 이 과정에서 포함되는 상대적인 오차는 참조 좌표계를 기준으로 x, y 평면에서의 RMSE(Root Mean Square Error)를 통해 나타낸다.

$$RMSE = \sqrt{(x'-x)^2 + (y'-y)^2} \quad A(2)$$

1차 다항식을 산출하기 위해 선정되는 각 지상 기준점은 x, y에 대해 각각의 RMSE를 확인할 수 있기 때문에 RMSE가 최대인 것에 대해서는 위치를 조정하거나 삭제하여 총 RMSE가 1미만(1 pixel 거리 미만)이 되도록 한다. 선정된 RMSE가 허용 오차 범위를 만족하면 공간 정보의 보존성이 가장 좋은 강도 내삽법인 최근린 내삽법(nearest neighborhood)을 설정하고, 원 영상의 해상도를 고려하여 출력 영상의 해상도를 30m로 설정한 후 처리하므로 기하 보정이 완료된다.