

광릉 산림지의 지표 플럭스 스케일링에 관한 FIFE로부터의 교훈

홍진규 · 이동호 · 김 준

연세대학교 대기과학과, 지구환경연구소

(2005년 1월 24일 접수; 2005년 3월 29일 수락)

Lessons from FIFE on Scaling of Surface Fluxes at Gwangneung Forest Site

Jinkyu Hong, Dongho Lee and Joon Kim

Department of Atmospheric Sciences, Global Environment Laboratory, Yonsei University, Seoul, Korea

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

ABSTRACT

CarboKorea and HydroKorea are the domestic projects aiming to improve our understanding of carbon and water cycles in a typical Korean forest located in a complex terrain with a watershed connected to large rivers. The ultimate goal is to provide a nowcasting of these cycles for the whole Peninsula. The basic strategy to achieve such goal is through the inter- and multi-disciplinary studies that synthesize the in-situ field observation, modeling and remote sensing technology. The challenge is the fact that natural ecosystems are nonlinear and heterogeneous with a wide range of spatio-temporal scales causing the variations of mass and energy exchanges from a leaf to landscape scales. Our paradigm now shifts from temporal variation at a point to spatial patterns and from spatial homogeneity to complexity of water and carbon at multiple scales. Yet, a large portion of our knowledge about land-atmosphere interactions has been established based on tower observations, indicating that the development of scaling logics holds the key to the success of CarboKorea and HydroKorea. Here, we review the pioneering work of FIFE (First ISLSCP Field Experiment) on scaling issues in a temperate grassland and discuss the lessons from it for the application to Gwangneung forest site.

Key words : Scaling, Water and Carbon cycles, FIFE, Gwangneung forest

I. 서 언

물과 기후 자원에 관한 효율적인 관리와 사용을 위해서, 주어진 시간과 공간 규모에 대해서 특별히 물, 에너지, 탄소의 순환에 기여하는 각각의 물리적, 생지화학적 과정을 먼저 이해하는 것이 중요하다. 국내 주요 생태계에서는 최근 구축된 국내 고유의 지표 플럭스 감시 네트워크인 KoFlux 하부구조를 활용하여 물과 탄소 순환에 관한 연구들이 진행되고 있다(환경부, 2004; 건설교통부, 2005). 이러한 연구에서는 현장 실

측자료에 근거하여 복잡 경관에서의 물과 탄소의 순환을 이해하고, 이들의 시간·공간적 변화를 확대 분석하는 스케일링 기술의 개발을 위해 원격탐사와 GIS 기술을 모델링 기술과 연계시키고 있다. 성공적인 기술개발을 위해서는 그 동안 진행되어왔던 연구 패러다임의 전환이 필요한데, 특정한 시간과 장소에 국한된 경험적 관계식보다는 체계적인 물리 과정의 이해를 통한 가용 자원의 평가와 예측이 요구된다. 물과 탄소 수지를 구성하는 각각의 구성 성분도 독립적으로 평가되어야만 한다. 그러나 현장 관측으로 산출되는 생태

수문 요소들은 대개가 점 자료(point data)이어서, 이러한 자료들을 3차원 공간과 시간의 변화를 고려하여 해석하고 예측할 수 있도록 규모에 따른 변화를 평가할 수 있는 스케일링 논리를 개발해야 한다. 이를 통해서, 현 단계의 생태수문 순환 연구 방법이 가지고 있는 시공간적인 제약성, 정확도 및 비용 효율성을 극복할 수 있어야 한다.

이와 같은 기술의 필요성은 미국에서 70여개의 대학들이 연합하여 집중관측지역을 선정하여 장기적인 실측과 해석에 근거한 연구를 시작한 것을 보아도 알 수 있다(CUAHSI, 2004). 이러한 물과 탄소 순환의 시공간적 변화에 관심을 가지고 직접 관측, 위성 영상/GIS 및 모형 결과를 연결하는 시도는 1980년대 후반의 FIFE(First ISLSCP Field Experiment)로 거슬러 올라간다. 국제 기후 연구 프로그램의 일환인 ISLSCP(International Satellite Land Surface Climatology Project)의 첫 야외 실험으로 1987년 시작된 FIFE는 앞서 언급한 스케일링 문제와 각종 자료의 통합 기법을 통하여, 지표-대기 상호 작용에 대한 우리의 이해를 크게 증진시켰고, 후에 수행되는 많은 집중 실험의 본보기가 되어왔다. 이 논문에서는 이러한 FIFE의 준비 과정, 실험 계획, 위성 영상의 사용과 모형 개발 측면을 간단히 살펴봄으로써 국내에서 현재 진행 중인 물과 탄소 순환에 관한 연구에 기여하고자 한다.

II. CarboKorea/HydroKorea 연구의 배경

한반도 지역의 국지 규모에서 지역 규모까지의 물과 탄소의 순환 및 수지를 감시, 분석, 평가할 수 있는 첨단 기술을 개발하고 이를 활용하여 기후 변화 협약과 수자원 확보에 관한 순향(順向)의 정책결정을 지원하는 것이 CarboKorea와 HydroKorea 연구 개발 사업 목적이다(Kim, 2005). CarboKorea 연구는 KoFlux 네트워크의 탄소 플럭스 자료를 기반으로 플럭스 발자국(footprint), 고분해능 위성 영상 및 생태수문모형을 통합한 첨단 스케일링 기법을 개발하여 한반도 탄소 순환을 분석/평가할 감시 시스템을 구축하고 그 실용성을 검증한다. HydroKorea 개발 연구는 실측에 근거하여 복잡 지형인 광릉 산림의 소유역을 중심으로 물 수지의 닫힘을 확인하고, 지상관측/생태수문모형/MODIS영상 자료를 연계하는 스케일링 기술을 확립하여 MODIS 격자(7km × 7km)의 수문 순환 성분

의 실험예보(nowcasting)를 실현한다. 또한 광릉 소유역의 결과를 한강 유역에 확대 적용할 연구 방법론을 확립하여 가용 수자원 확보와 관리 효율성을 극대화할 기반기술을 제안 한다(Fig. 1).

물과 탄소 순환에 관한 대부분의 연구는 직접적으로 또는 암시적으로 수평 균질성을 가정한다. 또한 물과 탄소 순환에 관한 이해에 바탕을 두기 보다는 특정한 연구 장소에 해당되는 경험식을 바탕으로 이루어지는 경우가 많은데, 이러한 방법론의 한계로 인해 사용된 방법의 시공간적 특징만을 포착하게 되는 문제가 있다(Table 1). 이러한 방법론상의 문제를 해결하려면 각 방법과 자료가 가지는 장점들을 극대화하는 것이 중요

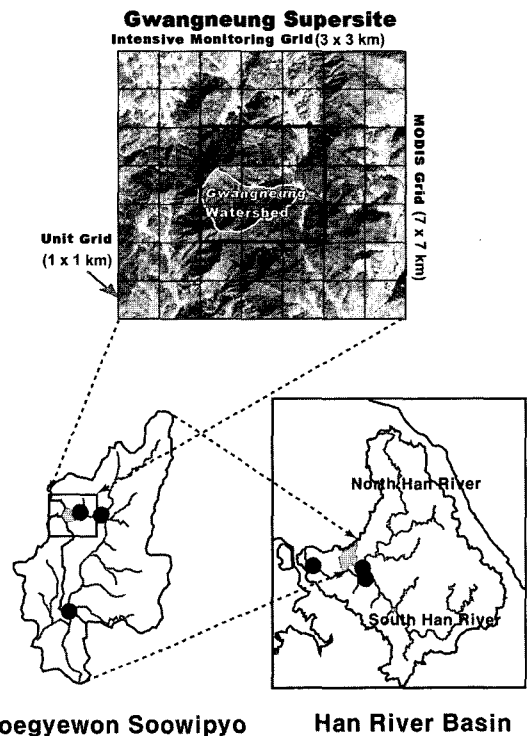


Fig. 1. Location of the unit grid, intensive observation grid and MODIS grid in Gwangneung forest supersite.

Table 1. Spatiotemporal characteristics of in-situ observation, modeling, and satellite image (G: Good, S: So-so, P: Poor).

	in-situ observation	numerical modeling	satellite image
temporal coverage	S	G	P
spatial coverage	P	S	G
accuracy	G	S	S
cost efficiency	P	S	S

하다. 예를 들면, (1) 과정 수준(process level)에서의 실측을 통해 물과 탄소 순환의 근본적 생물리 과정에 대한 이해를 높이고, (2) 이를 바탕으로 실측을 규모 확장(upscaling)하는 핵심 기술을 개발하고, (3) 각 방법론이 가지는 시공간 규모상의 약점을 상호 보완할 수 있는 자료의 통합이 필요하다. 모델링과 위성영상 분석은 야외 관측에 대한 구체적인 실험설계를 제안하게 되는 반면, 실측은 모형의 모수화(parameterization)와 위성영상 분석의 알고리즘 개선에 사용된다. 여기서 모형은 위성영상 알고리즘의 개발에 필요한 정보를 제공하고, 위성영상은 모형의 초기값과 경계 조건을 위한 자료 기반을 제공하게 된다.

서로 다른 시간과 공간으로의 규모 확장은 오랫동안 지속되어온 연구 주제이다(Jarvis, 1993). 그러나 기반 기술의 부재로 여전히 초기 상태에 머물러 있거나, 대부분 일 규모에서 군락 규모로의 확장 정도가 다루어져 왔다. 최근 들어, 규모 확장을 위한 관측 기법이 발달하고, 고분해능의 다양한 위성 영상이 제공되고, 컴퓨터 계산 능력의 향상으로 수치 모형의 고분해능 수치 모사가 가능해졌다. 국내에서는 2002년에 KoFlux가 구축되어 전지구 물·에너지·탄소 플럭스 관측망인 FLUXNET에 등재된 이래, 국내의 육상 생태계의 탄소와 물 순환에 관한 현장 관측 기반을 제공하고 있다(Kim *et al.*, 2002). 이를 활용한 다양한 예비 연구결과가 한국 농림기상학회 'KoFlux 2002 Synthesis 특별호'에 보고되었다(Kim and Rho, 2003). 최근에는 1m 고해상도의 IKONOS 영상에서 계산된 식생지수들과 플럭스 발자국(footprint)을 중첩하여 분석함으로써, 타워 플럭스의 시공간적 대표성을 정량화 하는 방법론이 제안되었고(Kim *et al.*, 2005), 이를 국내 농림생태계에 적용하려는 시도가 진행 중이다(Moon *et al.*, 2005). 또한 1km 저해상도의 MODIS 위성자료를 활용하여 총 1차 생산(gross primary production)과 증발산을 추정하는 알고리즘이 개발 중에 있다(Kang *et al.*, 2005). 다양한 시공간 규모의 탄소와 물 순환 메커니즘을 규명하기 위해 안정 동위원소를 활용한 분석이 진행 중이며(Lee, 2005), 중규모 기상모형을 활용하여 1km 격자 간격으로 지면-대기간의 수증기와 열 교환에 대한 수치 모사도 진행 중이다(Hong *et al.*, 2003; Hong, 2005).

III. FIFE의 배경

ISLSCP의 목적은 (1) 식생과 대기간의 이산화탄소, 수증기 및 에너지 교환 과정을 조절하는 물리적, 생물학적 과정에 대한 이해를 증진시키고, (2) 작은 규모에 제한되어 있는 이해력을 지역 및 지구 규모로 확장하기 위해서 위성원격탐사 기술을 연계하는 것이다(Hall and Sellers, 1995a). FIFE는 ISLSCP의 목적 달성을 위해 필요한 자료들을 수집하기 위한 첫 번째의 대규모 야외 실험이다(Sellers *et al.*, 1992a). 1986년부터 1989년까지 미국 캔자스의 15×15km 격자의 초지생태계에서 실시되었고, 네 차례의 집중 실험을 통하여 광범위한 위성, 기상, 생물리 및 수문학 자료를 획득하였다. 참여한 29개 연구팀의 150 여명의 과학자들은 대기경계층, 지표 플럭스, 지표 복사 및 생물, 수정/보정, 토양 수분, 통합 과학의 6개 분야로 나뉘었고, 미국 NASA(National Aeronautics and Space Administration)의 지원을 받았다. FIFE에서 얻어진 모든 자료는 NASA의 FIFE 정보 시스템(FIS)에 모아져 품질 검정을 거쳐 문서화되어 1994년에 CD-ROM으로 배포되었다(Strebel *et al.*, 1994). CD-ROM과 관련 문서들은 현재 미국의 Oak Ridge National Laboratories에서 받을 수 있다. FIFE에 관한 보다 상세한 정보는 Sellers and Hall(1992a)와 Hall and Sellers(1995b)에 나와 있다.

FIFE의 성과는 1992년과 1995년에 발표된 지구물리학회지 특별호에 잘 정리되어있다(Sellers and Hall, 1992a; Hall and Sellers, 1995a). 요약하면, (1) 지표 에너지 배분을 조절하는 생물리 인자들, 특히 증발산을 조절하는 기공의 역할과 지표 현열 플럭스와 대기 경계층간의 상호작용에 대한 이해가 증진되었고, (2) 모델링에 필요한 군락 전도도나 토양 수분과 같은 지표면 모수의 정량화에 위성과 항공기를 사용하는 기술이 개발되었고; (3) 국지 규모의 관측 결과를 큰 공간규모로 확장하는 스케일링 기술이 발전되었고; (4) 다양한 학제간 연구를 통해 많은 모형과 위성 영상 알고리즘의 개발과 개선이 이루어졌다(Hall and Sellers, 1995b).

이제, FIFE의 실험 준비 과정, 연구 결과 및 주요 성과를 재해석하여 복잡경관에 위치한 국내의 농업 및 산림생태계에 어떻게 적용할 수 있는지를 살펴본다.

IV. 논 의

2.1. 실험 설계

FIFE에서 사용된 15km×15km 집중 관측 격자에서 지표 관측 시스템들의 위치는 지표 피복 관리 상태와 지형 효과(고도, 경사 및 사면)를 계층화하여 얻어진 정보를 바탕으로 결정되었다. 30m 간격의 DEM(digital elevation map)과 유출량의 발원지 등을 분석하여, 관측지를 고지대, 저지대, 중간 경사지, 경사진 북/동/남/서 사면으로 구분하였다. 20m 분해능의 SPOT영상을 사용하여 산림 지역에 대한 지도를 만들었고, 항공사진에 근거하여 경작지와 목초지를 구분하고 소각된 지역이 따로 구분되는 등, 모든 정보가 중첩되어 30m 간격의 최종 분류에 사용되었다. 이렇게 세분화된 정량화를 통해 관측지의 특성을 파악하는 것은 관측된 값들이 어떤 시공간적 특징을 반영하는지에 관한 문제와 직결되기 때문에 매우 중요하다. FIFE에서는 이렇게 계층화된 자료들의 오차를 다양한 방법으로 평가하였다. 직접 조사하거나 LANDSAT TM 영상의 GVI(green vegetation index)를 활용하였고, 통계 분석기법을 사용하여 분류된 계층간의 지표 성질(토양 수분, 생물량, Bowen 비 등)의 차이의 통계적 유의성을 조사하였고, 화재로 인한 지표 성질의 공간적 변이에 주목하였다.

광릉 산림의 경우, 인공 조림에 따른 산림의 나이 분포, 침엽수와 활엽수림대의 구분, 군락내부의 2차 산림대에 관한 정보 등이 수집되어야 할 것이다. 특히 다양한 공간 분해능의 위성 영상 자료를 활용한 지표 특성 분류의 검증 작업이 규모 확장과 더불어 신중하게 이루어져야 한다. FIFE에서는 이미 수문학적 특성을 함께 고려한 실험설계의 탁월함이 돋보이는데, 유출량 발원지 분석이나 토양 수분의 공간적 분포를 알아내려는 노력은 물수지 순환 연구에 있어서 주목할 만하다. 광릉 산림 유역에서도 습성 지수(wetness index)를 활용하거나, 마이크로파를 활용한 토양 수분 탐사방안과, 지하수와 관련하여 집중관측 격자내의 호수에 대한 정보도 고려해야 한다. 수평적으로 비교적 균질한 지역임에도 불구하고 작은 공간규모의 불균질한 특성을 정량화하려는 FIFE의 노력을 생각한다면, 광릉 산림과 같은 복잡 지형의 지표 특성 분석의 중요성은 아무리 강조해도 지나치지 않다. 현재 이와 관련된 연구가 광릉 산림에서 진행 중에 있다(Moon et

al., 2005).

FIFE의 관측 기간은 토양 수분, 식생 계절학, 하향 복사 및 사용가능한 관측 자원의 한계를 고려하여 집중 관측 기간을 중심으로 제한되었는데, 이제는 경년 변화의 관찰이 보편화되고 있다. FIFE는 1986년에서 시작되어 1989년까지 진행되었고, 이 기간에 12-20일 정도의 집중 관측 기간을 1987년에 네 번, 1989년에 한 번 가졌다. 1987년의 첫 두 번의 집중 관측 기간은 식생이 푸르게 덮였었고, 풍부한 강수와 토양 수분으로 관측지가 공간적으로 비교적 균질하였고, 세 번째 집중 관측 기간에는 심한 가뭄으로 증발산이 아주 작아 지표면 특성의 공간 변화가 오히려 크지 않았다. 규모 확장을 할 때 어려운 점은, 수학적으로 Jensen의 부등식으로 표현되는 지표의 변화에 대한 지표-대기 교환의 비선형성이다(Sellers et al., 1997; Hong, 2005). 스케일링 기술 개발에 주력하는 광릉 산림 유역 연구에서는, 규모 확장시 공간 변동에 의한 오차나 수정 방안에 대한 정량화를 위해, 시간에 따른 지표 특성의 공간 변이에 대한 장기적인 감시가 필요하다. 예를 들면, 활엽수림은 계절 변동에 따라 엽면적 변화와 관련하여 지표면 불균질성의 변화를 보인다(Moon et al., 2005). 최근에 주목받는 연 변화와 경년 변화의 감시와 평가를 위해서는 10년 이상의 장기적이고 지속적인 투자가 필요하다. 특히 장마와 관련된 몬순과 엘니뇨 등의 기후변화와 맞물려 어떻게 변화하는지 관찰해야 한다. 장기 감시와 함께, 집중 관측 격자 내에서 다양한 야외 집중 실험이 이루어져야 한다. 이를 위해 정책적인 지원뿐만 아니라, 교육 프로그램을 통하여 고급 인력양성이 함께 이루어져야 한다.

FIFE의 관측 위치는 주로 실용성을 고려하여 결정되었다. 주로 초원의 경사가 완만한 곳을 선택하되 계절 변동이 크고, 연구 및 항공기 지원의 수월성을 고려하여 캔자스의 장기생태 보호지역을 선택하였다. 광릉 산림 유역은 국립 수목원과 국립 산림과학원이 관리하는 보존림 지역으로 안정성과 접근성이 탁월하다. 아울러 장기간 지속되어온 생태수문 관측은 최적의 조건을 제공한다. 그러나 복잡 지형으로 구성되어 있어서 FIFE와는 다른 연구의 어려움이 있다. 그 중 하나는 지표 플럭스 타워 관측 시스템의 수와 관측 위치를 결정하는 것이다. 전자는 각 시스템에서 산출되는 방대한 자료의 관리를 감당할 수 있는 훈련된 인력의 수를 고려해야 한다. 현재 광릉 산림의 경우, 물과 탄

소의 교환을 측정하기 위해 소유역 상부 활엽수림 지역의 40m타워와 더불어 약 1.2km 서쪽에 위치한 소유역 하부의 침엽수 지역에 40m 타워가 추가 설치되었고, 각 타워에 연직으로 여덟 높이에서 온도, 수증기 및 CO₂ 농도를 측정하는 프로파일 시스템을 설계/제작 설치 중에 있다(Fig. 2). 이러한 실험설계는 보존 방식의 저류량과 수평 및 연직 이류량을 정량화 하는데 도움이 된다(Aubinet *et al.*, 2003).

지역 규모로의 확장과 관련하여 FIFE와 같이 적절한 항공 관측이 어려운 국내의 현실을 감안할 때, 테더존데, 바람 프로파일러를 활용하는 대류 경계층 수지 방법, 지면 모형이 결합된 1차원 행성 경계층 모형의 도입, 위성영상 분석, GIS를 중첩한 플럭스 발자국 활용(예, Hall *et al.*, 1992; Cooper *et al.*, 1995; Boegh *v.*, 2002) 등을 진지하게 고려해 볼 가치가 있다.

2.2. FIFE 정보 시스템 (FIS)

FIFE의 목적은 학제간 연구를 통해서만 이루어질 수 있기 때문에, 복잡하고 방대한 양의 실측 자료와 위성 자료를 체계적으로 저장/처리하여 사용자에게 보

다 빠르고 쉽게 제공할 수 있는 시스템이 필요했다. 이러한 목적을 위해 만들어진 FIFE 정보 시스템(FIS: FIFE information system)은 (1) 자료 저장을 위한 관리 센터로서 연구자가 자료 종류, 변수, 날짜별로 자료를 조회할 수 있는 자료기반을 구축하고; (2) 특정 연구자가 특정일에 연계 되는 새로운 자료를 시스템에서 보다 쉽게 갱신할 수 있도록 하고; (3) 연구자들이 신속하게 자료를 이용할 수 있게 하고; (4) 모든 자료를 체계적으로 문서화하고; (5) 다양한 자료 처리와 품질 검사에 능한 전문 인력을 양성을 가능케 하였다.

FIS와 같은 기능은 이제 방대한 자료를 생산하는 모든 학제간 연구에 필수적인 요소이다. 학제간 연구인 CarboKorea와 HydroKorea에 참여하는 연구자들의 배경은 농학, 대기과학, 물리학, 생태학, 수문학, 임학, 지리학, 지질학, 환경공학 등으로 매우 다양하며, 각 전공 분야에서도 서로 다른 세부 전공과 다양한 연구 목적을 가지고 실측과 위성 영상/GIS, 모델링 결과를 다루는데 간단한 ASCII부터 복잡한 binary나 GRIB 자료를 사용한다. 이러한 자료를 통합/관리하기 위해 KoFlux 자료 기록/처리 프로그램을 구축하여 자

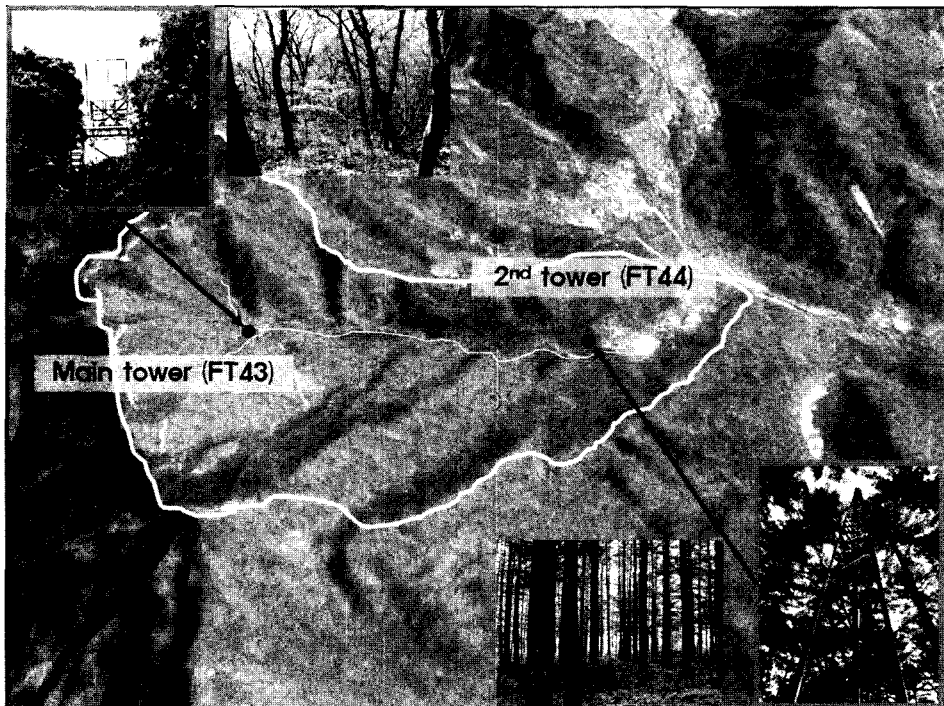


Fig. 2. Location of the main flux tower in deciduous trees and the second flux tower in coniferous trees at Gwangneung catchment area.

료의 안전한 저장관리와 효율적인 처리를 도모하고 있다. 일단 타워 관측에서 얻어진 자료는 집록기에서 실시간으로 각종 통계량을 산출/확인할 수 있으며, 무선 자료 송신 시스템과 디지털 카메라를 사용한 현장 촬영 시스템도 구축 중에 있어, 실시간으로 웹에서 자료와 현장을 확인할 수 있게 된다. KoFlux 자료 기록 시스템은 1 Terrabyte 용량의 LINUX 파일 서버와 자료 처리를 위한 300 Gigabyte UNIX workstation으로 이루어져 있다. 자료 처리 프로그램은 FORTRAN90, C shell, CPP와 Makefile 등으로 이루어져 있다. KoFlux 자료 기록/처리 시스템은 연세대학교 대기과학과에 설치되어 운영되며 플렉스 타워에서 얻어지는 미기상자료를 주로 관리하는 반면에 위성 자료의 대부분은 강원대학교 환경과학과에 설치된 LINUX 파일 서버에 저장/관리된다(Hong and Kim, 2002; Hong, 2005).

CarboKorea와 HydroKorea 개발 연구가 더 깊이 있고 폭 넓은 연구를 위한 하부 구조를 제공하려면 현재의 KoFlux 자료 기록/처리 시스템은 몇 가지 개선점을 가지고 있다. 첫째, 자료 처리 프로그램이 대부분 FORTRAN90 언어로 쓰여 있어 사용 방법이 직관적이지 못하고, FORTRAN90에 대한 기본적인 지식이 요구된다. 따라서 FORTRAN, UNIX/LINUX 운영 체계를 활용하지 않는 학문 영역의 연구자가 사용하기에는 어려움이 있다. 둘째, 관계형 자료기반이 아니기 때문에 자료를 낱자나 관측 변수별로 일목요연하게 분류하여 제공하는 것이 어렵다. 셋째, 자료 기록 센터가 공식적으로 정해지지 않아, 참여하는 각 연구자가 개별적으로 자료를 저장하는 경우가 많다. 넷째, 가장 근본적인 문제로 자료기반 관리의 경험이 풍부하고 자료 저장/처리를 전담할 수 있는 인력이 턱없이 부족한 점이다.

해결책의 하나로 빠르게 발전한 PC 기반의 관계형 자료기반을 활용하여 SQL 서버 등과 연동시키는 방법이 있는데, 많은 사람들이 보다 직관적으로 자료를 활용할 수 있다. 예를 들어, 무선으로 웹상에서 변동되는 자료와 연동하여 마이크로소프트의 ACCESS와 같은 관계형 자료기반을 구축할 경우 자료의 품질 관리와 관측지 상태 점검 등에 아주 유용할 것이다. 모든 자료는 관리 센터의 관리 하에 반드시 정해진 사용 규칙과 사사에 의한 동의가 있을 경우에만 사용할 수 있고, 안정적 보관을 위해서 미리 사이트를 활용하

고 다양한 백업 시스템이 구축되어야 한다. 난류 통계와 같이 방대한 양의 자료들은 적절히 압축하여 보관하는 것이 필요하다. 기본적으로 ASCII 형태의 자료 저장보다는 binary 파일이나 NetCDF(network common data format) 형태가 바람직하며, 특히 NetCDF는 처리기에 의존하지 않는 장점이 있다. 가장 중요한 것은 자료 처리/저장에 관한 지속적인 교육을 통해 연구자들 자신이 자료의 처리/저장/활용에 관한 전문 인력으로 양성되는 것이다.

2.3. 위성 영상의 활용

FIFE의 가장 중요한 기여는 위성 영상의 성공적인 활용이다. FIFE를 통하여 각종 위성 영상의 전처리 과정으로 수행되는 보정과 수정 과정에 대한 광범위한 성과가 있었다(Frouin and Gautier, 1990; Bruegge *et al.*, 1992). FIFE에서는 위성 영상의 전처리 과정뿐만 아니라 다양한 위성 영상 (LANDSAT, SPOT, AVHRR, GOES)을 국지 규모에 적용하여 복사 수지 성분을 추정하여 대기 복사 전달 모형을 향상 시키거나 상호비교를 통해 방법 간의 문제점과 관련 오차를 정량화하였다. 이러한 오차 분석을 통해, 위성 영상 오차에 따른 모형의 민감도 실험이 이루어졌고, 영상에서 계산된 SVI(simple vegetation index)와 FPAR(fraction of photosynthetically active radiation)의 상관관계를 도출하여, 스케일링의 이론적 근거를 제시하였다. 또한 마이크로파를 활용하여 토양 수분의 공간 특성을 도출하였고, 관련 토양 수분 자료는 관측 지형의 공간 변이성을 정량화하고, 생물리 모형의 입력 및 검증 자료로 활용되었다(Sellers and Hall, 1992b). 광릉 산림 소유역의 영상 자료 분석에 관한 내용은 Moon *et al.*(2005)에 자세히 나와 있다.

이와 관련하여 Sellers *et al.*(1995)은 위성 영상과 모델링을 적절히 조합하여, 100m에서 15km 규모의 지표-대기 교환 과정을 기술하는데 성공적으로 사용하였다. 특히 원격 탐사 자료로부터 도출된 지표 전도도와 토양 수분 자료를 활용하여 지표 에너지 수지 모형의 규모 불변성을 테스트 하였다(Sellers and Hall, 1992b; Peck and Hope, 1995). Sellers and Hall(1992b)은 위성 영상의 수정과 보수 과정, 지표 특성의 비등방성(anisotropy) 등이 향후의 중요한 연구 주제가 되어야함을 지적하였다. FIFE가 수행된 당시에는 지표의 비등방성을 정량화할 수 있는 도구가 명확

하지 않았으나, 최근에 GIS에서 사용되고 있는 semivariogram을 활용한다면 이 문제를 보다 체계적으로 정량화할 수 있다. 광릉 산림 구역의 LANDSAT TM자료와 IKONOS 영상을 활용하여 현재 semivariogram 분석이 진행되고 있다(Moon *et al.*, 2005). Cosh and Brutsaert(2003)가 공간 특성을 분석하는 다양한 방법론에 대해서 언급한대로, 최근에 보편화된 파엽(wavelet) 분석, 이차원 푸리에 분석과 프랙탈 차원 분석도 공간특성을 정량화하는데 유용하게 사용될 것이다. 광릉 산림 구역의 경우, 토양 수분의 시공간적 특성 변화를 감시하는 기술이 강화되어야 하며, FIFE의 경우처럼 다중의 위성 영상 보정 기법을 사용하는 것이 바람직하다. 다양한 영상 채널과 우수한 시공간 범위를 보유한 MODIS 영상 활용도 극대화되어야 할 것이다. 한편, 위성 영상으로부터 얻어진 플럭스 지수들과 실제 증발산 또는 이산화탄소 플럭스간의 상관관계가 낮아지는 가뭄 기간의 경우에 지표-대기 교환량의 규모 확장을 어떻게 할 것인가에 대한 구체적 대안이 마련되어야 한다.

2.4. 모델링

FIFE 자료를 활용한 모델링 연구는 1992년 특별호보다 1995년 특별호에 집중되어있는데, 이는 측정된 자료를 저장하고 취합하여 모형을 검증하는데 많은 시간이 필요했기 때문이다. 가장 주목할 만한 것은 모형과 위성 영상을 활용하여 지표의 불균질이 수치 모형 결과에 어떤 영향을 줄 것인지를 고찰한 것이다. 특히 Sellers *et al.*(1992b)은 지표 특성의 공간 변이가 비교적 적은 1987년 FIFE 자료를 활용하여 균락 전도도와 토양 수분양이 증발산과 CO₂ 플럭스에는 비선형적으로 영향을 줌에도 불구하고 플럭스 값이 모형의 수평 격자 크기에는 상관이 없음을 보였고, 지형 효과와 고분해능의 토양 수분 자료가 포함된 공간 변이가 큰 1989년 FIFE 자료를 사용하여 연구 결과를 확장하였다(Sellers *et al.*, 1995). 이론적으로 Sellers *et al.*(1995, 1997)은 지면 경사가 크지 않으면 효과가 적고, 토양 수분의 공간 변이가 토양이 건조해짐에 따라 감소하여 비선형 효과가 소멸됨을 보임으로서 낮은 해상도의 전구모형 또는 중규모 모형의 지면 과정 수치 모사가 다양한 목적에 활용될 수 있는 가능성을 제시하였다. 그러나 최근에 Hong(2005)은 이러한 비선형성의 소멸이 구름 증가로 인한 하향 복사의 불균

질성과 이로 인한 모형내의 강수 과정에 의한 토양 수분의 공간 불균질성이 증가할 경우에 일어나지 않음을 보였다. 복잡한 지형과 한쪽으로 편향된 경사도를 보이는 광릉 산림의 경우, 대기와 교환되는 물과 CO₂에 대한 규모 불변성을 확인하는 것이 매우 중요하다. 아울러 잎이 모두 떨어지는 겨울철 관측 자료의 규모 확장과 모형 성능 검증을 위한 이론적 연구에서 토양 증발과 관련된 토양 표면 저항의 효과에 대한 고찰이 필요하다.

FIFE와는 달리 복잡지형인 광릉 산림 구역의 경우, 공기 흐름을 수치 모사하는 것이 중요하다. 이는 관측 지역의 바람, 습도, 온도의 시공간 분포 특성에 관한 정보와 수치 모사를 통해 산곡풍과 배수류(drainage flow)에 관한 정보를 산출하여, 결손된 플럭스 타워 관측을 보완할 수 있기 때문이다. 이러한 수치 모사에 앞서 이상적인 상황에서의 수치 실험을 통한 모형의 조정과 점검이 필요하다. Figs. 3-5는 구름이 없는 한 낮에 광릉 산림 구역의 DEM 자료와 위성 영상으로부터 얻어진 지형 자료, 식생 및 토양 분류 자료를 초기 조건으로 중규모 기상모형 ARPS(Advanced Regional Prediction System)를 사용하여 얻은 바람장의 수치 모사 결과이다. 플럭스 타워 부근에 상승 기류가 존재하지만, 소구역 하단부의 두 번째 타워 부근에서 평균 연직 바람이 상단부의 주타워 부근과 비교했을 때 상대적으로 작을 것이 예상된다. 위성 영상과 관측지의 대기 지표층 관측을 통해 보다 현실적인 초기값과 경계 조건을 사용하면 보다 많은 정보를 이끌

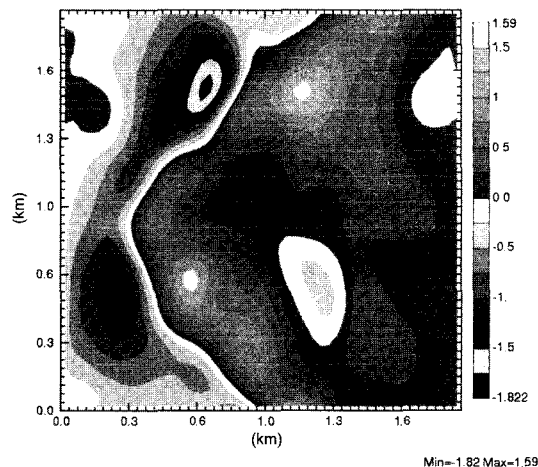


Fig. 3. Spatial distribution of vertical wind speed around Gwangneung forest sites simulated by ARPS.

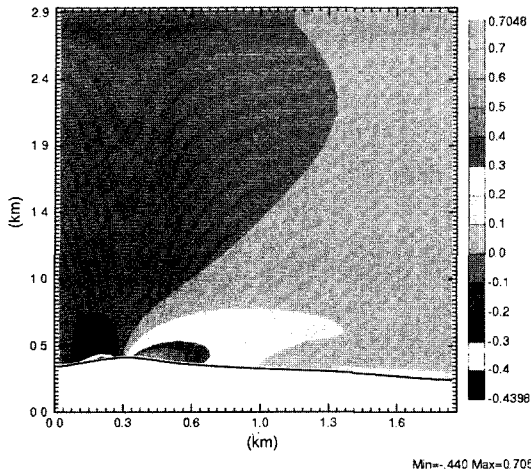


Fig. 4. longitude-vertical cross section of vertical wind speed simulated by ARPS.

어 낼 수 있다. 탄소와 물 순환의 밀접한 관계가 확인되어감에 따라, FIFE 시기에는 충분히 개발되지 못했던 생태수문모형의 역할은 MODIS 격자로 규모 확장하는데 큰 기여를 할 것으로 기대된다.

2.5. 발자국분석

최근에 지표-대기 간에 교환되는 물, CO₂ 등과 같은 물질 및 에너지를 측정하는 타워 관측과 이를 MODIS 영상 또는 RHESys와 같은 생태수문모형과 연결시키는데 있어서 타워 관측의 발자국(footprint) 분석은 필수적인 것이 되고 있다. 특히 관측지의 특성이 공간적으로 균질하지 않을 경우에 발자국 분석의 중요성은 더욱 증대된다. 여기서 발자국이란 ‘관측 기기의 시계’를 말한다. 일반적으로 관측 기기는 충분히 높은 지점에 설치함으로써, 타워에서 관측되는 발자국이 관측지의 다양한 대기조건에서 연구대상이 되는 생태계를 충분히 대표할 수 있어야 한다. 일단 관측 타워의 위치가 결정되면, ‘발자국 기후’(footprint climatology: 일정 기간의 발자국의 시간 공간적인 변화 양상의 통계)에 따라 생태수문학적 요소들의 관측 지점 선정 등을 공플릭스 관측과 조화롭게 설계할 수 있다.

발자국의 개념은 Pasquill과 Smith(1983)에 의해서 시작되었으나, 1980년대 후반인 FIFE 국제공동실험에서 야외 플럭스 관측을 마친 연구자들이 매일 저녁 모여서 지표의 타워들과 비행기에서 독립적으로 관측된 플럭스 자료를 비교 분석하는 과정에서 구체적으로

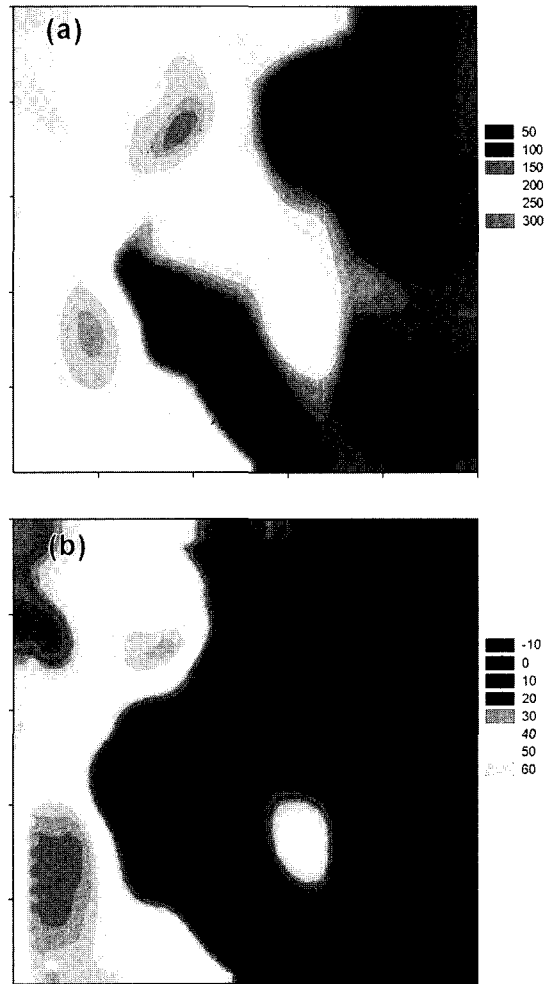


Fig. 5. Spatial distribution of (a) latent and (b) sensible heat fluxes simulated by ARPS.

고려되기 시작하였다(Sellers *et al.*, 1992). 이어서 1990년 초반에 발표된 일련의 논문들에 의해 발자국 분석의 이론적 토대가 마련되었다(Schuepp *et al.*, 1990; Schuepp *et al.*, 1990; Leclerc and Thurtell, 1990). FIFE가 진행되었던 80년대 후반에서 90년대 초반까지 지표 타워 관측 결과를 모형 결과와 비교하는데 있어서 관측 결과의 공간 대표성을 정확화해야 한다는 인식은 부족했던 것으로 보인다. 특히 FIFE가 이루어졌던 실험 장소가 비교적 균질하였고, 보다 큰 규모의 증발산과 이산화탄소 플럭스를 추정하기 위해서는 지표 특성의 계층화 작업을 통하여 공간의 특성을 대표하는 지역에 타워가 적절히 배치되어 개별 플럭스

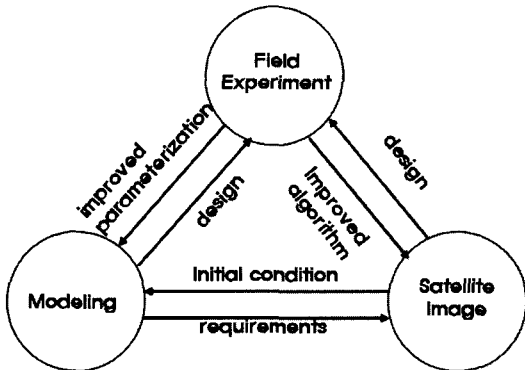


Fig. 6. Relation of field observations, satellite image processing algorithm, and modeling.

타워에서 얻어진 결과를 간단히 평균함으로써 목적이 이루어지기 때문에 플렉스 타워의 발자국 분석은 체계적으로 이루어지지 않았다. 다만 Schuepp *et al.* (1992)의 경우, 항공기를 이용한 지표-대기 교환량을 측정하면서 지면 발원의 비균질성에 의한 국지 이류(local advection)를 발자국 분석을 통하여 보정을 시도하였다. 최근 들어, 확산 방정식의 해석 해를 사용하는 오일러 접근 방법과 입자를 추적하는 라그랑지 방법이 많이 사용되고 있다. 특별히 Schmid(1994)가 발원지 개념을 도입하고, Baldocchi(1997)가 산림생태계에 발원지 분석을 적용하면서 발자국 관련 모형의 개발과 적용이 빠른 속도로 발전하게 되었다. 광릉산림과 같은 복잡 경관의 경우, 지표의 불균질성을 고려하는 모형과 군락 내부의 전달 과정을 모사할 수 있는 발자국 모형의 활용이 필요하다. 특히, 플렉스와 농도의 발자국이 다른 것을 감안하여, 저류형과 관련된 수증기/CO₂ 농도의 프로파일 관측과 관련하여 농도 발자국을 구별하여 고려해야 한다.

V. 맺음말

지금까지 살펴본 바와 같이, FIFE를 통해서 통찰력 있는 실험설계, 새로운 관측 기술, 위성 영상 및 모형 개발기술 등에 관한 많은 것을 고찰해보았다. 요약하면, 지표와 대기간에 교환되는 물과 이산화탄소에 관한 연구는 사용가능한 모든 관측과 모형 자원을 활용한 집중 실험과 학제간 지식의 과감한 공유를 통한 시너지 효과가 필수조건이다(Fig. 6). 모형 전문가들과

야외 실험자들 사이의 대화를 통하여, 실험가들은 모형의 수치 모사를 위해 필요한 자료가 무엇인지 파악하고, 모형가들은 야외 실험의 기본 골격과 자료 처리 과정에 대해서 어느 정도 이해하고 있어야 한다. 또한 FIFE이후 다양하게 개발되어온 생물리 과정에 대한 비교 평가와 함께, 생지화학적 과정에 대한 폭넓은 이해를 바탕으로 모형 결과에 접근하도록 노력해야 한다. 또한 작은 규모에서 일어나는 물과 탄소의 순환에 대한 이해과정이 더 큰 규모에도 적용될 수 있음을 감안할 때, 과정 수준의 연구가 물질순환 연구의 기본이 됨을 확인하였다. 지표 특성 중에서, 특히 토양 수분이 매우 중요한데 반해, 토양수분을 관측/분석/연구할 수 있는 국내 전문 인력이 너무 부족한 실정이다. FIFE에서는 마이크로파를 이용해 표층의 토양 수분량 추정 기술과 식생지수를 뿌리 영역의 수분량과 연결시키는 방법을 시도하였다. 광릉 산림 유역에서는 현재 집중화장치를 활용한 TDR(time domain reflectometer) 네트워크 관측과 DEM 자료로부터 산출되는 습성 지수로부터 추정되는 토양 수분량 연구가 준비 중에 있다.

지상관측, 위성 영상, 모델링을 통합하는 하이브리드 기법은 지면 특성을 올바르게 감지하고 믿을만한 모형 결과로 정책 결정에 필요한 정보를 제공하게 되는데, 이 과정에서 핵심도구가 되는 것이 자료 동화 과정이다(Hong *et al.*, 2003; Yun *et al.*, 2004; Mitchell *et al.*, 2004). 물과 탄소 순환의 실험 예보를 위해서는 다양한 종류의 모형을 활용하는 다중 접근 방식이 필요하다. 먼저, 지표-대기 사이에 교환되는 증발산, CO₂ 플렉스를 정확히 추정하려면, 타워 플렉스 자료와 유동 모형을 병용하는 방법이 마련되어야 한다. 유동 모형의 보존 방정식에 타워 플렉스에서 관측된 난류 수송항을 동화하여, 모형에서 모사된 수평/연직 이류항을 최적화하여 증발산과 CO₂ 플렉스를 추정하는 것이다. 다음은 중규모 모형에 위성 영상, AWS 자료, 각 정부 부처산하의 토양 온도/수분 자료, 타워 플렉스 산출 자료 등을 동화시키는 단계로서 물과 탄소 순환에 관한 정보뿐만 아니라 정확한 일기 예보에 기여를 할 수 있다. 마지막으로 생태수문모형인 Biome-BGC나 RHESSys에 위성 영상 자료를 동화시켜 산악 지형의 산림 지대의 물과 탄소 교환 예측을 향상시키는 것이다. 이러한 생태수문모형의 자료 동화 과정은 초보단계에 있으나, 완성될 경우 스케일링 논리의 개발과 함께 무궁무진한 자료 제공으로 정책 결정과 다양

한 연구목적에 활용될 것이다. 단, 이러한 자료 동화 과정에서 위성 자료의 결과물은 모형 결과와는 달리 질량 및 에너지 보존 방정식을 만족하지 않는다는 것에 주의할 필요가 있다(Sellers and Hall, 1992b).

토양-식생-대기간 상호작용에 관한 연구와 관련하여 새로운 연구 도구가 등장하고 있다. 대표적인 것이 다양한 시공간으로의 확장성을 가진 안정동위원소 방법이다. 예를 들어, 안정동위원소 분석에 사용되는 'Keeling plot'을 군락 내에 적용하는데 있어서의 문제를 해결할 수 있는 고속반응 레이저분광기를 안정동위원소 측정과 접목하는 첨단기술은 주목할 만하다(Lee et al., 2005). 안정동위원소 분석은 상향/하향 스케일링 과정을 통하여 개별적으로 얻어진 물과 탄소 수지에 대한 구속조건을 제시하고, 물과 탄소 수지를 각각의 개별 성분으로 분리하는데 매우 유용하다(Lee, 2005). 물과 탄소의 순환의 정량적인 규명과 현실적인 실험예보의 해석을 위해서는 생물리/생태수문 모형에 안정동위원소 과정이 포함되어야 하며, 안정동위원소 모듈이 추가된 모형은 스케일링 기술 개발에 있어서 유용한 정보를 제공하게 될 것이다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원 (과제번호: 1-8-2)과 환경부의 차세대핵심환경기술개발사업 (Eco-Technopia 21 Project)의 지원으로 수행되었다.

인용문헌

- Aubinet, M., B. Heinesch, and M. Yernaux, 2003: Horizontal and vertical CO₂ advection in a sloping forest, *Boundary-Layer Meteorology* **108**, 397-417.
- Boegh, E., H. Soegaard, and A. Thomsen, 2002: Evaluating evapotranspiration rates and surface conditions using LANDSAT TM to estimate atmospheric resistance and surface resistance, *Remote Sensing of Environment* **79**, 329-343.
- Bruegge, C. J., R. N. Halthore, B. Markham, M. Spanner, and R. Wrigley, 1992: Aerosol optical depth retrievals over the Konza Prairie, *Journal of Geophysical Research* **97**, 18743-18758.
- Cooper, H. J., E. A. Smith, and W. L. Crosson, 1995: Limitations in estimating surface sensible heat fluxes from surface and satellite radiometric skin temperature, *Journal of Geophysical Research*, **100**, 25419-25428.
- Cosh, M. H. and W. Brutsaert, 2003: Microscale structural aspects of vegetation density probability, *Journal of Hydrology* **276**, 128-136.
- Frouin, R. and C. Gautier, 1990: Variability of photosynthetically available and total solar irradiance at the surface during FIFE: A satellite description, *AMS Symposium on FIFE*, Anaheim, Calif., American Meteorological Society 98-104.
- Hall, F. G., K. F. Huemmrich, S. J. Goetz, P. J. Sellers, and J. E. Nickerson, 1992: Satellite remote sensing of surface energy balance: Success, failure, and unresolved issues in FIFE, *Journal of Geophysical Research* **97**, 19061-19090.
- Hall, F. G. and P. J. Sellers (Eds.), 1995a: *Journal of Geophysical Research* **100**, 25383-25644.
- Hall, F. G. and P. J. Sellers, 1995b: First International Satellite Land Surface Climatology Project (ISLSCP) Field Experiment (FIFE) in 1995, *Journal of Geophysical Research* **100**, 25383-25395.
- Hong, J. K., 2005: Land-Atmosphere Interactions on the Tibetan Plateau: From Turbulence to Monsoon, Ph. D. Dissertation, Yonsei University, Korea.
- Hong, J. K. and J. Kim, 2002: On processing raw data from micrometeorological field experiments, *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **4**, 119-126. (in Korean with English abstract)
- Hong, J. K., H. C. Lee, J. Kim, B. J. Kim, C. H. Cho, and S. J. Lee, 2003: Inferring regional scale surface flux around FK KoFlux site: From one point tower measurement to MM5 mesoscale model, *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **5**, 138-149.
- Jarvis, P., 1993: Prospects for bottom-up models, *Scaling Physiological Processes*, J. R. Ehleringer and C. B. Field (Eds.), Academic Press, 115-126.
- Kang, S. K., Y. I. Kim, and Y. J. Kim, 2005: Effects of uncertainties of climate data on the production of MODIS GPP and NPP, *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, this issue. (in Korean with English abstract)
- Kim, J. and C.-S. Rho, 2003: KoFlux 2002 Synthesis - Special Issue of *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **5**, 49-149.
- Kim, J., 2005: Coping with Climate Change Protocols by Understanding Water and Carbon Cycles in Korean Ecosystems: Foreword, *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, this issue. (in Korean with English abstract)
- Kim, J., W. Kim, C. Cho, B. Choi, H. Chung, B. Lee, K. Kim, K. Kim, M. Kim, B. Lee, D. Lee, G. Lee, J. Lee, J. Lim, J. Oh, E. Park, J. Shim, J. Yun, and C. Rho, 2002: KoFlux: A new tool to study the biosphere-atmosphere interactions in Asia, *Ecology of Korea*, D. Lee (Ed.), Bumwoo Publishing Company, 215-229.

- 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.
- Lee, D. H., 2005: Review of stable isotope studies for carbon and water cycles in terrestrial ecosystems, *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, this issue. (in Korean with English abstract)
- Lee, X., S. Sargent, R. Smith, and B. Tanner, 2005: In-situ measurement of water vapor ¹⁸O/¹⁶O isotope ratio for atmospheric and ecological applications, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, in press.
- Mitchell, K. E., D. Lohmann, P. R., Hauser, E. F. Wood, J. C., Schaake, A. Robock, B. A. Cosgrove, J. Sheffield, Q. Duan, L. Luo, R. W. Higgins, R. T. Pinker, J. D. Tarpley, D. P. Lettenmaier, C. H. Marshall, J. K. Entin, M. Pan, W. Shi, V. Koren, J. Meng, B. H. Ramsay, and A. A. Bailey, 2004: The multi-institution North American land data assimilation system (NLDAS): Utilizing multiple GCIP products and partners in a continental distributed hydrological modeling system, *Journal of Geophysical Research* **109**, doi:10.1029/2003JD003823.
- Moon, S.-K., S.-H. Park, J. K. Hong, and J. Kim, 2005: Spatial characteristics of Gwangneung forest site based on high resolution satellite images and DEM, *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, this issue. (in Korean with English abstract)
- Peck, E. L. and A. S. Hope, 1995: Spatial patterns of soil moisture for the FIFE study area derived from remotely sensed and ground data, *Journal of Geophysical Research* **100**, 25463-25468.
- Schuepp, P. H., J. I. MacPherson, R. L. Desjardins, 1992: Adjustment of footprint correction for airborns flux mapping over the FIFE site, *Journal of Geophysical Research* **97**, 18455-18466.
- Sellers, P. J. and F. G. Hall (Eds.), 1992a: *Journal of Geophysical Research* **97**, 18343-19109
- Sellers, P. J. and F. G. Hall (Eds.), 1992b: FIFE in 1992: Results, scientific gains, and future research directions, *Journal of Geophysical Research* **97**, 19091-19109.
- Sellers, P. J., F. G. Hall, G. Asrar, D. E. Strelbel, and R. E. Murphy, 1992a: An overview of the First ISLSCP Field Experiment, *Journal of Geophysical Research* **97**, 18345-18372.
- Sellers, P. J., M. D. Heiser, and F. G. Hall, 1992b: Relationship between surface conductance and spectral vegetation indices at intermediate (100m² - 15km²) length scales, *Journal of Geophysical Research* **97**, 19033-19060.
- Sellers, P. J., M. D. Heiser, F. G. Hall, S. J. Scott, D. E. Strelbel, S. B. Verma, R. L. Desjardins, P. M. Schuepp, and J. I. MacPherson, 1995: Effects of spatial variability in topography, vegetation cover, and soil moisture on area-averaged surface fluxes: A case study using the FIFE 1989 data, *Journal of Geophysical Research* **100**, 25607-25629.
- Sellers, P. J., M. D. Heiser, F. G. Hall, S. B. Verma, R. L. Desjardins, P. M. Schuepp, and J. I. MacPherson, 1997: The impact of using area-averaged land surface properties topography, vegetation condition, soil wetness in calculations of intermediate scale (approximately 10km²) surface-atmosphere heat and moisture fluxes, *Journal of Hydrology* **190**, 269-301.
- Strelbel, D. E., D. R. Landis, K. F. Huemmrich, and B. W. Meeson, 1994: Collected Data of the First ISLSCP Field Experiment, Vol.1-6, CD-ROM, NASA GSFC, Greenbelt, Md.
- Yun, J. I., J. C. Nam, S. Y. Hong, J. Kim, K. S. Kim, U. Chung, N. Y. Chae, and T. J. Choi, 2004: Using spatial data and land surface modeling to monitor evapotranspiration across geographical areas in south Korea, *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **6**, 149-163. (in Korean with English abstract)