

토양수분 연구와 관련한 원격탐사의 이용

(Application of Remote Sensing to soil moisture Research)

유 철 상*

토양은 대기권(atmosphere)과 지구권(geosphere)사이의 얇은 다공 물질층이다. 토양수분(soil moisture)은 토양속에 포함된 물로서 강우, 유출 등과 함께 중요한 물 순환과정의 하나이다. 토양수분은 식량 생산과 관련한 농학 분야, 강우-유출 해석에 있어서의 수자원 분야, 지면-대기 상호작용과 관련한 기상분야에서 중요한 요소(factor)로 고려된다. 또한 토양수분은 온도와 같은 물리적 환경의 변화에 대한 생태계의 반응을 구체화할 수 있는 중요한 요소이기도 하다. 지표면에서의 증발, 증산과 함께 토양수분에 대한 이해는 지표수문과정들과 기후/기상의 상호관계를 이해하고 예측하는데 꼭 필요한 요소이나, 그 중요성에 비해 지구규모의 토양수분 및 온도의 관측은 거의 없었던 것이 사실이다.

1994년 Tiburon, California에서는 NASA (Mission to Planet Earth)의 지원 아래 토양수분에 관한 워크샵이 개최되었다. 이 모임은 “토양 상층부나 표층속의 토양수분에 대한 원격탐사가 지구규모의 토양수분 관측에 필요한 개념적 구조(conceptual framework)와 과학적 전략(scientific strategy) 수립에 촉진제로서의 역할을 할 수 있는나?”에 초점이 맞추어져 있었다. 미국을 비롯한 세계각국의 토양학, 수문학, 생태학 및 기상학 분야의 30여명 이상이 토의에 참여하였으며, 여기에 그때의 토의내용중 수문분야와 원격탐사를 이용한 표층수출 관련부분을 워크샵 보고서(Ming-Ying

Wei, 1995)에 근거하여 요약, 정리하여 보았다.

1. 서 론

지구물리학적인 매개변수(parameter)들의 경우와 마찬가지로 지구규모의 토양수분 관측과 해석은 지상관측과 항공관측을 병행하여 최고로 수행될 수 있을 것이다. 원격탐사의 경우 건습토양의 유전율(dielectric constant)의 차이를 나타내 줄 수 있는 능동적/수동적 마이크로파(active and passive microwave)와 관련한 기술에 초점이 맞추어져 있다. 기술상의 많은 발전이 이루어 지긴 했으나 현재까지 원격탐사 자료와 지상관측 자료를 확실하게 묶어줄 수 있는 방법은 없는 실정이다. 과학적인 분석 및 모형화 작업도 연구되어야 할 분야로 남아 있다.

토양수분의 현장관측용인 채토건조법(gravimetric method)나 그외 유사한 방법들(Neutron Probe, Time-Domain Reflectometry 등)과 마찬가지로, 마이크로파를 이용하여 관측한 토양수분 자료는 그 자체의 독특한 특성을 갖고 있다. 예를 들면 토양수분의 관측 깊이는 전자기파장의 길이에 따라 약간 다르기는 하지만, 대략 수 cm로 제한된다. 그러나 수문학분야나 생태학분야에서의 관심은 뿌리대(root zone)에서의 토양수분 분포로서 대략 깊이가 1-2m 정도 까지인데, 과연 표층의 토양수분 상태로 부터 그 아래의 토양수분까지를 추론할 수

* 한국수자원공사 수자원연구소

있느냐가 문제로 남아있는 부분이다. 원격탐사를 이용하여 관측할 경우의 또다른 문제는 원격탐사가 면적 평균값을 제공한다는 것인데, 이 정보로부터 각기다른 지형조건, 토양의 불균질성(heterogeneity)을 고려하여 어떻게 유용한 정보를 추출해 내느냐 하는 것이 더 연구 되어야 할 부분이다.

토양-식생 시스템에서의 수분 저장능력 결정은 상당히 어려운 문제이기는 하나 이 문제 해결을 위한 원격탐사 이용의 잠재가능성은 이미 1981년의 WMO/ICSU Joint Committee에서 인정되었고, “창의적인 아이디어나 교육훈련의 부족, 결단과 자원(resolve and resources)문제 등으로 토양수분을 지구규모로 관측시 필요한 확실한 방법이 없다는 것은 매우 중대한 문제”라고 National Research Council(America)에 의해 1992년에 지적된 바 있다. 문제 해결을 위한 첫 시도로서 다음과 같이 문제점들을 정리해 볼 수 있다.

- 1) 만일 지표 또는 토양 상층부 함수량의 시간적 공간적 변동을 안다면, 토양수분과 대기와의 동역학적 관계에 있어 어떤 문제들이 정립될 수 있는가?
- 2) 관측 또는 간접적인 방법으로 추론한 토양수분 자료의 장점, 불확실성, 한계등이 주어질 경우, 어떻게 토양수분의 특성을 추출하고 해석할 것인가?
- 3) 지표면 토양수분의 시간-공간적 분산도(variability)를 어떻게 특성화할 것인가? 넓은 지역에서의 토양수분과 침투를 어떻게 표현할 것인가? 강우나 증발산과의 동역학적 결합 뿐만 아니라 토양, 식생조건, 지형특성등이 토양수분에 미치는 영향은 무엇인가?
- 4) 현장실험이 토양수분에 대한 우리의 이해를 증진 시킬 수 있는가? 시간-공간적 표본추출(sampling) 및 보완적 관측을 위해 필요한 조건은 무엇이며, 그 조건은 어떻게 알아 내는가?

이들 질문들에는 각각의 학문영역에서 토양수분에 대한 이해가 다를 수 있음을 묵시적으로 인정하고 있다. 기상학자에게 있어 토양수분은 아주 넓은 지역에 존재하며, 대기에 수분을 전달하고, 그럼으로서 강우에 영향을 주는 조건으로 보고 있으며,

수문학자에게는 유역에서의 유출 해석시 선행조건이 되고, 강우에 따른 유출의 양에 영향을 주는 요소로 이해 된다. 농학자에게 토양수분은 작물 성장에 꼭 필요한 요소로서 반드시 보전시켜야 할 요소이고, 수문지질학자에게 있어 토양수분은 지하수의 수분공급원이며, 물이 지표나 상층토양내의 오염물이나 생물상(biota) 등을 땅속 깊이 이동시킬 수 있는 잠재 오염원이기도 하다. 비록 앞에서 제기된 4가지 문제들이 연구의 목적을 총괄하기는 하나, 궁극적으로는 지면의 수문현상에 관한 일관된 지식으로 유도할 수 있는 전략의 개발이 연구의 궁극적 목표가 될 것이다.

2. 수문학 분야에서의 토양수분

간헐적으로 내리는 강우의 특성과 토양수의 흐름을 제어하는 지형요소, 토양의 불균질성, 뿌리대에서의 식생에 의한 수분상승 조절 등이 토양수분 동역학의 3차원 해석을 매우 어렵게 만드는 이유들이다. 토양표층에 있어서의 수분상태는 계절적으로 또한 강우시와 비강우시의 특성에 따라 변한다. 비포화층의 수분은 지하수와 침투 및 역침투에 의해 결합되어있고, 지역적인 배수망과도 관련되어 있다. 이 과정들은 다양한 시간축척(time scale)에서 운영되고 있다.

전통적으로 수문학자들은 토양수분의 3차원 분포와 시간적 변동성에 대한 적절한 이해없이 과업을 추진해 왔다. 토양수분의 지상관측은 일반적으로 집중적인 노동력을 필요로 한다. 따라서 몇몇 농업 관심지역이나 관심 연구유역을 빼고는 축적된 토양기상(즉, 장기간에 걸친 토양 온도 및 수분분포 관측) 구성에 필요한 자료들은 거의 전무한 실정이다. 지난 20여년간 개발 되어온 공간적인 분포와 물리적 현상에 근거한 물수지방법은 진단과 검정에 필요한 적절한 자료의 부재로 말미암아 그 적용이 방해받아 온 것이 사실이다.

마이크로파 영역에서의 지표 토양수분 원격탐사는 토양수분의 분포나 그 동역학적 특성을 조사하는데 중요한 역할을 하게 될 것에 의심의 여지가 없다. 넓은 지역에서 지표 토양수분의 분포를 관측하는 경우 원격탐사 장비의 사용은 실용적인 측면

에서 매우 편리한 것이다. 표 1은 전통적인 수문학의 적용에 필요한 토양수분의 시간 및 공간적 적정 관측간격을 나타낸 것이다. 여기서 ‘분포(profile)’는 약 1-2m 정도까지의 깊이를 나타낸다. 이 요건들은 대륙이나 유사한 큰 축적의 수문에 적용할 경우 어떠한 지상 관측계망이 필요하고, 또한 원격탐사를 이용할 경우 무엇이 가능한지를 가늠해 볼 수 있는 기준이 된다. 무엇보다도 좀더 창의적인 접근방법이 요구되는 부분인 것이다.

지표와 대기와는 에너지(복사, 현열 및 잠열 등), 물질(수분이나 화학적 물질 등), 모멘텀의 교환으로 상호 작용하고 있다. 토양상층부는 주기적으로 수분의 함몰처(sink)와 생성처(source)의 역할을 한다. 지표와 대기와의 상호작용이 대기 또는 기상조건에 의해 제어될 때, 토양은 대기가 제공(요구)하는 비율대로 흡수(방출)하게 된다. 반대로 침투 이상의 유출이 발생되거나 실제 증발량이 잠재 증발량보다 작을 경우에는, 토양 조건이 지표와 대기간의 상호작용을 제어하게 된다.

토양과 대기간의 상호작용에 있어 주요 상태변수인 지표 수분상태는 현열 및 잠열 플러스(sensible and latent heat flux)로의 지표 복사력과 강우로부터의 유출 및 침투로의 분배를 결정한다. 또한 지표면의 알베도(albedo)와 열 방출률(heat emissivity)도 지표 토양수분의 상태에 의존하게 된다. 짧은 시간축척의 경우 행성경계층(planetary boundary layer)의 발달과 구름 밀도는 지표면으로 부터의 증발, 증산에 좌우되고, 시간축척이 길어짐에 따라 지면의 수문열 관성(hydrothermal inertia)과 해양의 열관성(thermal inertia)은 지역적 또는 지구규모의 계절간, 연간 기후 변동에 영향을 주게 된다. 1988년 미국에서의 가뭄과 1993년 미시시피강 유역의 대홍수는 지구규모의 물 순환이나 지역적 기상변동에 미치는 토양수분의 역할 이해와 관련한 대표적 사례가 되고 있다.

지표면 과정들과 기후, 기상과의 상호 작용은 Opportunities in Hydrologic Sciences(National Research Council, 1991)에서 토의된 여러 연구 주제들 중의 하나이다. 토양 속성(soil property)들에 대한 시간-공간적 변동성의 특성화, 물 이송(transport)의 동역학적 현상에 대한 축척문제 또

한 중요하게 떠오르는 문제들로서, “침투나 토양수분의 지역적 관측결과를 어떻게 더 넓은 지역으로 확대하는가?”, “지표하 유체흐름을 모의할 모형구조 설정을 위한 이론적 또는 실험적 접근방법은 무엇인가?”하는 문제들이 여기에 포함된다. 불포화 토양에서의 물 흐름이나 침투의 확정론적 모형에 추계학적 개념이 도입 되듯이, 지역적 토양수 특성을 지구 규모 축척에 해당하는 기대값 및 분산으로 확장할 수 있는 개념적 구조가 절실히 요구되는 것이다. 표본추출의 문제와 관련하여 토양수분의 시간-공간적 변동성은 뒤에서 좀더 자세히 언급될 것이다. 소위 “역 모의(inverse simulation)”와 관련한 문제도 좀더 많은 연구가 필요한 부분의 하나이다.

Entekhabi 등(1993)은 다공층에서 1차원으로 연결된 열-수분 확산모형(1-dimensional coupled heat and moisture diffusion model)과 복사 전달 모형(radiative transfer model)을 결합하여 토양수분과 온도 분포를 추정할 수 있는 가능성을 보여 주었다. 이러한 접근방법이 큰 축척으로 연장될 경우, 지상관측 및 원격탐사를 위해 적절하게 쓰일 수 있을 것으로 보인다. 지상관측이 연직방향의 정보를 제공해 줄 수 있는 반면, 원격탐사를 이용한 복사정보는 주로 공간적인 정보를 제공해 준다. 이러한 복사자료의 직접동화(direct assimilation)는 지표 토양수분의 추출에 요구되는 경험적 관계 설정을 피할 수 있게 해준다. 식생, 지형, 토양의 불균질성에 대한 영향을 고려한 추가의 작업도 필요하게 된다. 만일 기상분야가 가진 4차원 자료동화의 경험을 토양기상 연구의 방향으로 본다면, 역 모의(inverse simulation)는 아마도 토양기상 분석을 위한 궁극적이고 또 가능한 방향이 될 것이다.

3. 토양수분의 시간-공간적 분산도(Variability) 및 표본추출

토양수분 관측 자료는 모형의 초기조건 설정에 가장 유용하게 쓰여질 것이다. 그러기 위해서는 관측시스템이 먼저 구상되어야 한다. 현재까지는 어떠한 방법으로도 시간-공간적으로 연속인 현장측

Table 1. Examples of sampling intervals of soil moisture

	Vertical	Horizontal	Temporal
Runoff production	surface	10-30 m	1 hour-1 day
Wind erosion	surface	100 m	.1 hour
Infiltration	surface, profile	1 m	1 hour
Evapotranspiration	surface, profile	100 m	1/2 day
Interflow	surface, profile	10 m	1 day
Stream network dynamics	surface, profile	10-30 m	1 day

정을 할 수 없으므로, 불가피하게 무작위 오차 (random error)가 들어가게 되고 때때로 관측 시스템과 관련한 편기(bias)가 존재하게 된다. 따라서 시간-공간적으로 평균된 자료영역의 오차크기는 관측설계 자체 뿐만 아니라, 관측하려는 대상 자료영역의 시간-공간적 분산도에도 영향을 받게 된다. 관측영역의 분산구조에 의거한 관측설계도 몇몇 분산도 요소의 영향 측정엔 구조적으로 실패할 수 있는데, 이는 다른 축척(scale)에서의 영향이 잘못 받아들여질 수 있기 때문이다.

특정 시간-공간적 추정값의 오차는 관측설계가 결정되고 관측 자료영역의 시간-공간적 공분산이 주어질 경우 쉽게 계산할 수 있다. 이것은 TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission)과 관련하여 North와 Nakamoto(1989)에 의해 보여진 바 있다. 이것을 토양수분 관측에 적용할 경우에 최종 관측설계에 앞서 아래와 같은 몇몇의 선행연구가 이루어져야 할 것으로 보인다.

- 1) 과학적 조건들에 상응하는 관측시스템에 필요한 시간적 공간적 축척의 결정 : 여기서의 과학적 요구조건들은 지구 규모의 기상모형, 기상 및 하천의 수치예보모형, 그리고 토양 이용 및 농업계획등 경우에 따라 달라진다. 따라서 사용자 집단사이의 폭넓은 상호 교류가 절실하며 원격탐사 시스템 자체의 제한성도 잘 주지되어야 할 사항이다.
- 2) 현장조사와 모형화 작업을 통한 토양수분의 시간-공간적 공분산의 구조 평가 : 토양수분 자료의 시간-공간적 평균화(averaging)나 누가(aggregation)는 거의 예외없이 통계학적 특성을 변화시키게 되며, 이는 중간규모의 기상모형, GCM, 지역적 물수지 모형등의 수문계수

추정에 중요한 의미를 갖는다. 모형화나 예측에 있어서의 중요성과 간편한 처리를 위한 축척 불변(scale invariance)개념 도입 등이 설명될 필요가 있다.

- 3) 표본추출 설계에 따른 오차 평가 : 이것은 관측 시스템의 수치 모의에 의해 수행될 수 있다. 또한 고려하는 축척에 따라 실제의 통계학적 특성들을 갖는 자료를 인위적으로 모의한 후 표본추출 함으로서도 수행될 수 있다.
- 4) 지표상태 또는 기상조건 등 다양한 관측 형태들 사이의 상호 교류/보완 가능성 평가.

앞에서 나열한 각 항목은 서로 연관성을 가지고 있으며 보다 광범위한 현장 프로그램을 필요로 한다. 하지만 일단 대략적인 수준에서 부터 시작하고 계속해서 보다 발전적인 보완이 이루어질 수 있을 것으로 본다.

4. 결 론

토양수분 워크샵은 토양상층 또는 지표층에 포함된 물의 양을 원격탐사하는 것이 토양수분의 지구 규모 관측을 위한 이론적 구조 개발과 과학적 전략 수립에 촉진제의 역할을 할 수 있는지를 결정하기 위함이었다. 그 대답은 매우 긍정적이나, 확립된 지식과 경험이 없는 상태에서 워크샵 자체는 문제들에 대한 폭넓은 인식과 다양한 접근방향 등으로 특징 지워질 수 있었다.

토의 시작에서 제기된 4가지 질문들 중 첫 3가지 질문은 다양한 학문적 배경과 접근방법으로 문제에 대한 여러 측면들을 부각 시켰으나, 네번째 질문에 대해서는 정도있는 해답이 제시되지 못하였

다. 토양수분 측정과 분석의 어려움은 토양의 물리적 화학적 특성의 불균질성의 탓으로 돌려져 왔다. 그러나 좀더 큰 축척에 있어서 토양수분 동역학을 복잡하게 만드는 요소는 에너지 및 물수지의 복잡한 제어에 있다고 볼 수 있을 것이다. 즉, 대기조건이 주요 제어요소로 작용할 때 지면-대기사이의 교환은 토양수분의 상태와는 무관하게 되고, 단지 대기 강제항(즉 강우시의 강우강도, 비강우시의 잠재 증발률)에 의존하게 된다. 토양한계체제(soil-limited regime)에서 지면-대기의 교환은 토양수분 상태(강우의 침투능, 비강우시 역침투 및 증산을 등)에 제어받게 된다. 이러한 체제의 변환을 관측하고 이해하는 것이 일반적인 지표과정 및 토양수분의 관측 시스템을 설계하고 보완하는데 중심이 될 것이다.

토의 내용을 간단히 요약하면,

- 1) 지면-대기 상호작용 및 수문학에 있어서 선택 변수는 뿌리대까지, 가능하다면 지하수위까지의 토양수분 및 온도분포이다. 토양 상층 수 cm의 함수량 자체는 일반적인 수문학적 또는 생태학적인 측면에서 볼 때 충분한 정도는 아니다.
- 2) 토양수분의 시간-공간적 추정자(토양수분의 추정치 뿐만 아니라 오차나 불확실성에 대한 추정치도 함께 주는)의 정의는 토양수분 및 다른 관련자료 측정값의 적절한 사용에, 또는 모형변수의 실제값과의 연결에 꼭 필요한 것이다.

그 외에 중요하다고 여겨지는 연구의 방향을 정리해 보면

- 3) 사차원 자료동화(data assimilation)와 역모의(inverse simulation)가 토양수분 동역학의 기술적인 부분에 있어 가능성과 적용성이 있어 보인다. 토양에서의 열과 물 플럭스의 지배이론

을 도입하여 설계하는 자료동화는, 원격탐사하여 얻은 토양수분의 공간분포와 현장 측정에서 얻은 연직분포 자료를 이용하여 가능할 수 있고, 필요한 오차 추정치도 함께 제공될 수 있다. 그러나 지표하 흐름의 지배 방정식들은 그 사용에 세심한 검토가 필요하고, 현장규모의 축척이상에 적용할 경우 아마도 재정의가 필요할 것으로 보인다. 지형이 고려된 식생의 수문 함수는 토양수분 동역학이 대륙규모의 물순환에 필수적 부분이 되도록 적절히 잡아 주어야 한다.

- 4) 토양변환함수(pedotransfer function)의 개념은 정적인 토양특성을, 특히 토양-대기의 상호작용에 있어, 동역학적 토양변수로 관련시켜 준다는 점에서 매력적이다. 만일 이러한 함수들이 더욱 발전되고 성공적으로 시험된다면, 토양분류학의 상당한 양의 정보가 지면의 연구에 큰 도움이 될 것이다.

마지막으로 토양기상, 즉 토양수분과 온도는 토양수분 자체로서보다 더욱 강력한 의미로 자리 매김될 것이다. 토양 기상의 관측은 대기나 해양기상의 경우 보다 더욱 어려운 것으로 밝혀졌으나, 지구 시스템의 상태변수로서 관측외에 다른 대안은 없는 것으로 보인다. 비록 Tiburon에서의 토의가 토양수분에 관한 것이었지만, 토양이 화학적으로 생물학적으로 활동적인 매질이라는 사실을 간과해서는 안된다. 화학적 생물학적 활동이 토양자체의 기상 조건에 의존되어지므로, 토양기상에 대한 이해는 당연히 선행되어야 할 일인 것이다. 항공기나 인공위성에 의한 원격탐사로 이미 가능해진 넓은 공간적 관측범위 덕분에 토양기상은 과학적 기회의 장이 될 것으로 보인다. ☘