

원격탐사 자료를 이용한 수문학 분야의 시·공간 스케일 확대

채 효 석 (한국수자원공사 수자원연구소 연구원)

송 영 수 (전북대학교 자원공학과 교수)

이 환 기 (한국수자원공사 정보관리실 실장)

1. 서론 : 스케일 확대의 필요성

최근 지구상의 인구가 약 60억명을 돌파하였으며, 향후 30년 동안 지구상의 인구는 약 2배 정도 증가할 것으로 추정되고 있다. 이러한 인구 증가에 따라 물 부족과 수질 오염 등은 우리 인류가 해결해야 할 가장 심각한 당면과제로 인식되고 있다. 공기와 마찬가지로 물은 인간이 살아가기 위해서 가장 필수적인 자원이며, 이미 여러나라에서 심각한 물 부족이 발생하고 있거나 기상이변, 산림피해 및 사막화 등으로 인하여 수자원에 많은 영향을 받고 있는 실정이다. 이러한 상황에서 지역간 혹은 변화하는 시간 스케일에 따라 가용한 수자원의 양을 정확하게 분석하는 것은 매우 중요하다. 지구의 온난화와 인간의 활동으로 야기되는 산림 파괴와 사막화 같은 토지이용의 변화에 따라 발생하는 기후 변화의 효과에 의해서 가용한 수자원의 양은 인류에게 많은 미래에 대한 불확실성을 초래할 수 있다.

수자원과 기후와 토지 이용 변화의 효과를 평가하기 위해서 가장 실질적인 방법은 기후 모델과 연계된 분포형 수문모형(distributed model)을 이용하는 것이다. 전통적으로 수문 모형들은 10^3km^2 정도의 소유역(catchment)에 있어서 국부적인 수자원 문제를 다루기 위해서 개발되었다. 그러나, 기후 모델과 연계된 분포형 수문모형을 이용하기 위해서는 10^5 내지는 10^8km^2 정도의 지역적(local) 혹은 대륙적(global)

규모의 문제로 접근해야 한다. 수문 모델은 소유역내의 몇 개 지점에서 얻어진 자료를 이용하며, 이러한 자료들이 그 지역은 대표하는 것으로 가정한다. 또한, 개발된 모델은 하나 혹은 몇몇 지점에서 측정된 유출이나 증발 혹은 토양수분 변화 등과 같은 관측 자료를 가지고 검증된다. 토양이나 식생 종류 등에 있어 크게 변화하는 대유역으로 이러한 모델을 확장하는 것은 모델을 수행하기 위해 필요한 자료를 획득하는 데 있어 많은 문제점을 가지고 있으며, 대유역에 대해서 모델 적용 결과가 일치하는 지에 대한 검증도 필수적으로 요구된다. 모델을 수행하기 위해서 필요한 자료는 단지 몇 개의 연구대상 지역에 대해서만 획득이 가능하다. 반면, 수자원에 대한 정보를 획득하기 위해서 필요한 자료 획득 네트워크가 우리나라에서는 아직 충분하게 설치되어 있지 않은 실정이다.

원격탐사(remote sensing) 기법은 넓은 지역에 대한 자료를 획득할 수 있으므로 대륙적 규모의 수자원을 평가하기 위한 모델에 필요한 정보를 제공할 수 있는 잠재력을 가지고 있다. 그러나, 전자파의 종류와 지표면에서 센서로 입사하는 반사(reflect) 혹은 방사(emitted) 성분은 일반적으로 필요한 모델의 입력자료나 출력자료와 직접인 관계가 없다. 따라서, 원격탐사 자료를 해석하기 위한 적절한 모델이나 알고리즘이 필요하다. 예를 들어, 현열은 원격탐사 센서에서 획득되는 열적외선(infrared) 정보와 관련이 깊은 반면에 현열을 추출하기 위해서는 지상에서 관측한 기

상자료와 원격탐사 자료가 결합하는 모델 혹은 알고리즘이 필요하다. 이러한 알고리즘들은 부가적인 오차의 원인을 분석하는 데 이용될 수 있으며, 오차를 줄이기 위해서 더욱 더 많은 알고리즘 개발이 필요한 실정이다.

지표면에서 관측한 자료를 이용하는 알고리즘의 개발과 시험은 1km² 보다 작은 지역에 대해서는 현재 거의 완료된 상태이며, 이러한 소유역은 물리적인 과정을 비교적 잘 분석하고 이해할 수 있는 특성을 가지고 있다. 작은 소유역에 대해서 획득된 원격탐사 자료는 실제 지상에서 관측한 자료와 비교될 수는 없다. 더욱이 많은 자료들이 원격탐사 자료를 이용하여 추출한 변수와 비선형적인 관계를 가지고 있으며, 추출된 변수들의 선형 평균은 많은 오차를 포함하게 된다. 예를들어 증발은 지표 저항뿐만 아니라 대기조건에 따라 다르게 된다. 두 가지의 식물이 동일하게 구성되어 있는 불균질(heterogenous)의 지표면을 생각해 보자. 하나는 증발량이 511Wm⁻²을 가지는 50sm⁻¹의 지표 저항을 가지고 있으며, 다른 하나는 207Wm⁻²의 증발량을 가지는 200sm⁻¹의 지표 저항을 가지고 있다. 따라서, 전체 지역에서 발생하는 평균 증발량은 359Wm⁻²가 된다. 그러나, 만약 지표 저항에 대한 평균값이 125sm⁻¹로 계산한다면, 증발량은 295Wm⁻²로 원래 값보다 약 18% 적게 계산된다.

원격탐사 자료를 수문학 분야에서 성공적으로 적용하기 위해서는 수문 인자를 정확히 추출할 수 있는 센서의 개발과 공간적으로 국부적인 스케일에서 부터 대륙적 규모의 스케일까지 확장하거나 시간적으로 순간적인 자료에서 일별 혹은 월별 자료로 변환하는 경우에 발생하는 여러 가지 문제를 해결하기 위한 연구가 필요한 실정이다.

2. 수문학에서의 스케일 문제

워크숍 논문집에 게재된 많은 논문들은 시·공간적인 변화성과 수자원과 에너지 수지 변수들의 자연적인 불균질성을 정량화하는 데 연구의 초점이 맞추어져 있다. 넓은 지역에 대한 변수나 인자들을 추출하기

위해서 간단한 선형 평균이 수행된다면, 불균질성으로 인하여 오차를 생성하게 된다. 수문학적인 변수나 열수지 요소의 지상관측에 대한 정확도 부분에 관한 많은 관심이 나타났으며, 이러한 지식없이 수문학적 적용성을 위한 원격탐사 자료의 유용성을 평가하는 것은 무의미하다. 놀랍게도 GCM(Global Circulation Model) 참석자들을 제외하고 몇몇 과학자들은 모델이나 관측된 자료의 스케일 확장을 실제 시도하고 있었으며, 시도결과 뜻밖의 좋은 결과를 보이고 있다. 여러 가지 스케일에서 모델 결과의 정확도에 관한 자료의 영향을 평가하는 분야에 대한 더 많은 연구가 필요한 것으로 인식되었다. 이러한 분야에서 향후 많은 연구가 원격탐사 자료의 사용 측면에서 매우 빠르고 흥미있는 성과와 관심이 만들어질 것으로 기대된다.

3. 수문학적 변수 - 원격탐사 자료를 이용하여

다음은 주요한 수문학적 변수나 과정을 결정하기 위한 원격탐사 자료의 이용에 관한 기술 수준과 향후 연구 방향에 대한 내용을 살펴보기로 하자.

3.1 소유역 수문학

소유역 수문학(catchment hydrology)은 완벽한 물수지를 다루기 때문에 최종 산출물(end product)로써 고려될 수 있으며, 알고리즘을 검증하고 모델 결과의 일치성(consistency)를 확인하는 데 있어서 매우 유용하다. 대유역의 출구점(outlet)에서 물의 흐름은 그 유역으로부터 발생하는 전체 유출량을 나타내는 좋은 지표이며, 유출량은 모델 결과를 검증하기 위해서 이용될 수 있는 유용한 정보를 제공하게 된다.

광역적인 지역에 대해서 물수지와 열수지 모델이 결합된 수문학적 모델에 대한 검증이 어느 정도 이루어졌으며, 검증 결과 매우 흥미있는 내용들이 밝혀졌다. 그러나, 대기온도 등과 같은 변수들을 넓은 지역에 대해서 정기적으로 획득하기 위해서 간접적인 방법을 이용하고 있으며, 이러한 간접적인 방법은 필수적으로 몇 가지 의문사항을 포함하고 있다. 현재 간접

적인 방법들에 대한 가능성을 검증하고 있지만, 다른 변수들에 대해서 사용되고 있는 집단안(aggregation scheme)은 다소 불완전하고 모델에 따라 매우 변화한다. 또한, 결국에는 다른 지역에 대해서 검증 범위와 일반화의 가능성에 관한 추가적인 문제를 야기하게 된다.

지역적 규모와 지구적 규모까지 공간 해상도가 확대되는 경우에 수문학적 변수들의 평가와 예측 혹은 평가나 예측에 대한 필요성이 증가하고 있다. 이러한 필요성은 기상학적 모델과 수문학적 모델을 결합하거나 혹은 독자적인 기상학적 모델이나 수문학적 모델에 이용함으로써 제기될 수 있다. 지금까지 대유역에 대한 대기 모델에 있어서 수문학적인 부분은 매우 단순한 형태나 경계 모델에 의해서 표현되었다. 이렇게 단순한 모델을 이용하는 것은 제한된 계산 능력 때문에 필요했지만, 현재는 계산 능력이 빠르게 증가하고 있어 다소 복잡한 수문모형도 대기모델과 통합되는 실정이다. 하지만, 좀더 복잡한 모델에서 필요로 하는 경계조건이나 변수에 관한 정보는 아직까지 널리 이용되고 있지 못하다.

인공위성으로부터 획득된 원격탐사 자료는 좁은 지역에서부터 넓은 지역까지 자료를 획득할 수 있는 장점을 가지고 있다. 따라서 넓은 지역에 대해서 수문학적인 모델을 수행하기 위해 필요한 자료들을 제공할 수 있으며, 모델 수행 결과를 검증할 수 있는 잠재력을 가지고 있다.

수문학적인 모델에서 원격탐사 자료의 이용 가능성에 대한 인식이 다소 미흡하며, 원격탐사에서 제공되는 여러 가지 형태의 공간자료를 모델에서 반영하지 못하고 있는 실정이다. 예를 들어 분포형 수문모형의 입력자료로 필요한 강우자료는 유역내의 몇 개 지점에서 측정된 점자료(point data)를 이용하여 평균적으로 계산된 값이다. 현재 모델 개발자들은 원격탐사 자료로부터 계산되는 변수나 인자들의 정확도가 대부분의 경우 새로운 모델을 개발하기에 충분하지 못하다고 생각하고 있다.

원격탐사 자료의 정확도가 대유역 모델에서 사용하기에 충분한 정확도를 제공한다고 할지라도, 자료의

시간적인 가용성에 다소 문제가 있다. 정지궤도 위성에서 획득된 자료는 시간해상도는 뛰어난 반면 공간해상도가 부족하고, 태양 동주기궤도 위성에서 획득된 자료의 경우에는 공간해상도는 뛰어난 반면 시간해상도는 만족스럽지 못하다. 모델에서 필요한 자료가 단지 구름이 없는 조건에서 획득되어야 하기 때문에 많은 원격탐사 자료의 시간적인 가용성이 다소 감소하게 된다.

3.2 강우

강우는 중요한 수문 인자이며 정확한 시·공간적인 평가는 현재까지 어렵다. 지표에서 획득된 레이더 자료는 강우에 대한 충분한 정보를 제공하지만, 강우 관측망을 이용하여 관측된 자료를 이용하여 대상유역에 대한 강우분포를 파악하기 위해서 공간적으로 내삽하여 사용하기 때문에 정확도는 다소 부정확한 실정이다. 인공위성에 탑재된 센서를 이용하여 획득된 원격탐사 자료로부터 분석되는 강우량은 대부분 월 평균량이고 제한적인 정확도를 가지고 있다. 이러한 제약 조건에도 불구하고 현재 설치된 강우 관측망 자료를 이용하는 것보다는 다소 정확한 자료를 제공할 수 있는 것이 사실이다. 특히, 개발도상국의 경우에는 강우 관측망의 밀도가 대단히 낮기 때문에 원격탐사 자료를 이용하는 것이 현실적으로 타당한 방법이며, 강우는 시·공간적으로 변화하는 특성을 가지고 있다. 따라서, 정확한 강우를 분석하기 위해서 원격탐사 자료를 이용하는 방법에 대한 지속적인 연구가 필요하다.

3.3 토양수문학과 토양수분

물수지와 에너지수지의 제어와 조절 측면에서 토양수분의 중요성은 매우 크다고 할 수 있다. 지금까지의 연구결과 국지적 기상 예보와 GCM(General Circulation Models)의 수행에 있어서 토양수분의 중요성이 매우 크다는 것이 증명되었다. 예를 들어, GCM에서 토양수분의 초기화는 강우와 증발에 큰 영향을 받는다. 최근 연구에서 원격탐사 자료를 이용하여 지표면 부근의 토양수분 관측분야와 시·공간적인 토양수분의 정량화에 많은 발전이 이루어지고 있다.

더욱이, 1차원 물수지 모델에서 토양수분을 원격탐사 자료를 이용하여 분석하기 위한 시도가 이루어지고 있다. 따라서, 향후 연구의 초점은 원격탐사 관측 기술을 향상시키고 토양수분의 공간적인 변화를 이해하는 데 있다. 또한, 지표면 부근의 정보를 획득하는 원격탐사 자료를 이용하여 지표면 하부에 대한 토양수분 정보를 추출하기 위한 원격탐사 자료의 활용 방안을 모색하기 위한 연구가 시도되고 있다.

3.4 방사량

이미 지구적 규모의 기후 모델에서 필요한 스케일에 알맞은 자료는 정지궤도 위성으로부터 획득된 원격탐사 자료로부터 입사하는 태양 복사 에너지를 계산하기 위하여 이용될 수 있다. 그러나, 지금까지 이러한 대규모 모델에서 원격탐사 자료가 성공적으로 이용되지 못하고 있는 실정이며, 그 이유는 다음과 같은 두 가지에 기인한다. 첫째는 기후 모델이 원격탐사 자료를 이용할 수 없게 개발되었기 때문이며, 다른 하나는 자료 처리 시스템이 원격탐사 자료를 자동적으로 처리할 수 없게 설계되어 있기 때문이다.

원격탐사 자료로부터 분석되는 현열, 잠열 및 지중열 성분들은 태양 복사에너지보다는 다소 부정확하게 추출되며, 구름의 영향으로 매 시간에 대한 자료를 이용하지 못한다. 따라서, 대규모 모델에서는 원격탐사 자료의 효용성이 떨어지지만, 모델 결과를 검증하기 위해서 원격탐사 자료는 매우 유용하게 이용될 수 있다. 입사하는 태양 복사에너지를 GOES 자료로부터 계산한 결과를 살펴보면 매우 고무적이다. 예를 들어 Frouin과 Gautier(1990)의 연구결과 계산 오차가 약 9% 즉, 22Wm^{-2} 가 되는 것으로 나타났다. 이것은 실제로 NCAR Community Climate Model과 아마존에서 1개월간 지상 관측을 실시한 측정값 사이에서 Shuttleworth와 Dickinson(1989)에 의해서 밝혀진 28Wm^{-2} 내지 134Wm^{-2} 보다 훨씬 향상된 결과이다. 또한, Garratt(1994)의 연구결과에 의하면 4개의 GCM을 이용하여 계산한 태양복사 에너지의 연중 오차가 5Wm^{-2} 내지 27Wm^{-2} 로 나타났으며, 이는 지상 관측 자료와 3% 즉, 5Wm^{-2} 정도 차이가 발생한 것

이다.

3.5 현열

현열은 전달계수(transfer coefficient)를 통해서 지표면과 대기 온도사이의 차이와 밀접한 관련이 있으며, 전달계수는 지표면과 대기온도가 관측되는 높이 사이에서 발생하는 대기의 난류에 크게 의존한다. 난류의 세기는 지표면의 공기역학적 조도계수(aerodynamic roughness)를 포함하는 몇 가지 인자와 관련이 있다.

원격탐사 자료를 이용하여 획득된 지표면의 방사온도로부터 계산되는 현열의 정확도는 대기보정, 대기온도, 방사율 및 전달계수의 정확도에 따라 달라진다. 지표면 온도와 대기온도 사이의 차이는 산림지역의 경우 일반적으로 1 내지 2K 정도이며, 이러한 오차는 대기보정에 있어서도 비슷한 결과를 가지게 된다. 따라서, 산림으로부터 현열은 임의의 불확실성을 가지고 결정할 수 없다. 반 건조의 열대지방에서 산재하는 산림의 경우 온도 차이는 10K를 초과할 수 있다. 따라서, 현열을 평가하는 데 있어 주요 오차 원인이 전달계수의 불확실성에 기인하게 된다. 그러나, 스케일이 1km로부터 100km보다 크게 증가할 경우에 전달계수는 그 지역의 평균값에 근접하게 되며, 현열의 정확도가 향상될 수 있다.

현열을 추정하기 위해서 원격탐사 자료로부터 지표면 방사 온도를 추출하기 위한 연구가 있었다. 공간해상도가 120m와 1000m를 가지는 경우에 대해서 계산된 지표면 열수지 요소가 $5\text{km} \times 15\text{km}$ 지역에 대해 평균한 모델 결과와 매우 유사한 영역의 평균값이 계산되었다. 이것은 아마 다른 식생 종류에 대해서 일반화시킨 결과는 아니며, 다른 연구결과에 의하면 아한대 식물(boreal forest)로부터 수집된 자료를 이용할 경우 이 방법은 실패하였다.

3.6 증발량과 잠열

원격탐사 자료를 이용하여 잠열을 추정하는 방법은 여러 가지가 있으며, 잠재 증발량은 원격탐사 자료를 이용하여 입사하는 태양 복사에너지 혹은 순방사량을

계산함으로써 얻어질 수 있다. 증발율이 잠재열보다 적은 경우 잠열은 다른 에너지 수치 성분을 계산함으로써 얻을 수 있으며, 순방사량과 잠열이 원격탐사 자료로부터 얻어질 수 있으며, 순방사량과 식생의 피복 상태에 따라 경험식으로 부터 지중열 성분을 계산할 수 있다. 이러한 조건에서는 누적된 오차와 상대적으로 작은 잠열 때문에 계산된 잠열이 작게 분석되는 경향이 있다. 식생이 적거나 혹은 산재하고 있다고 가정할 경우 다른 제약 조건을 통해서 지표면 방사온도로부터 적당한 정확도를 가지고 현열을 결정할 수 있다는 것이다.

잠재 증발량보다 적은 증발량의 감소는 다음과 같은 두가지 원인에 의해서 나타나게 된다. Rooting zone에서 토양수분이 충분하지 않고 식생이 노쇠된 경우 혹은 두 가지 조건 중에 하나의 조건을 만족할 경우에 발생하게 된다. 현열이 증가하는 경우 증발을 위해서 사용되는 에너지의 비율이 감소하게 되며, 입사와 복사 에너지 사이의 균형을 맞추기 위해서 지표면 온도가 상승하게 된다. 따라서, 장마철 이후 식생이 작고 산재된 혹은 작거나 산재된 식생지역에 대한 지표면 방사 온도와 대기온도의 차이를 시계열 원격탐사 자료를 반복적으로 관측함으로써 잠재 증발조건 의 지속성을 분석할 수 있다.

원격탐사 자료를 이용하여 현열과 잠열을 추정하는데 있어 많은 불확실성이 존재한다는 것은 명백한 사실이다. 상관관계에 의해서 만들어지는 지표면 열수지 요소의 지상관측에 있어 불확실성이 시간별 요소에 대해 약 15내지 25%가 일반적으로 포함되어 있는 것으로 알려져 있다. 일별 요소의 경우에는 약 $40Wm^{-2}$ 의 오차나 불확실성을 가지고 있다. 이러한 지표면 관측 형태를 이용하여 원격탐사 자료를 이용할 수 있는 알고리즘이 개발되었기 때문에 원격탐사 자료를 이용하여 열수지 요소를 추정할 경우 이러한 값보다 작은 불확실성을 가질 수 없다. 그러나, 알고리즘상에서 왜곡이 없다면, 공간적인 평균값은 다소 불확실성을 감소시킬 수 있다. 지상관측의 범위가 시간적으로 20 분 내지 100 분으로 변화하고 낮 시간 동안의 빠른 변화 때문에 알고리즘의 보정은 매우 어

렵다. 자료 획득 순간에 대한 평균값을 획득하는 원격탐사 자료와 시간적으로 평균된 지상관측 자료와는 매우 다르게 나타난다.

4. 스케일링(Scaling)

많은 과정들이 비선형이기 때문에 이론적으로 선형적인 평균을 취하는 것은 바람직하지 않다. 과정이 선형적이라는 가정하에서 추론되는 오차가 무시하기에 충분하고, 그러한 경우라면 선형 근사의 유용 범위를 평가하기 위하여 충분한 지가 의문점으로 남게 되며, 스케일링 문제를 제기하기 위해서는 다른 절차가 필요하다.

1. 스케일링 문제를 제기하는 방법 중 하나는 동일한 인자를 만들거나 혹은 기본적인 변수에 대한 면적 평균을 간단히 수행하기 위한 방법을 개발하는 데 있다. 동일한 변수를 개발하는 것이 이론적인 관점에서 가장 좋지만, 10 내지 100km의 국부적인 스케일과 격자 스케일에서 변수들 사이의 관계를 설정할 때 필연적으로 많은 가정을 포함한다. 현재까지의 연구결과에 의하면, 평균 접근에 대한 효용성이 증명되었지만, 일부 특이한 지역에 대해서는 실패하였다.
2. 야외 실험은 다른 모델 접근 방법의 적용성이나 유용성을 평가할 수 있기 때문에, 야외 실험 결과에 대한 분석은 중요하다. 선형 접근 방법이 유효하다는 조건 범위를 평가하기 위한 다양한 생태 시스템에 관해서 모델이 검증되어야 한다.
3. 다른 길이 스케일에서 지표면의 특성 변화를 평가하기 위한 방법이 강구되어야 한다. 이러한 것은 선형적인 접근 방법이 성공적으로 적용될 수 있는 곳에서 스케일의 범위를 평가할 수 있게 한다. 그러한, 길이 스케일을 정량화하기 위한 기술은 다소 변화되어지며, 모순이 없는 결과를 만들지는 못하는 것으로 보인다. 다른 접근 방법은 보다 큰 스케일에서 변수들을 평가하기 위한 방법을 개발하는 데 있다. 문제는 평야지대와 산악

지대 사이나 습지나 건조지 사이의 경계와 같은 지표면에 있어 급격한 불연속에 기인하는 지역에서 발생하게 된다.

4. 중간 규모 모델이나 중간 정도의 인공위성 해상도 즉, 1 내지 10km 정도의 공간 해상도를 가지는 자료와 비교할 수 있는 지상관측 장비의 개발이다. 스케일링 자신에 따라 검증이 부분적으로 달라지기 때문에 아직까지 문제가 남아 있다. 따라서, 새로운 지상관측 장비나 혹은 증발지역 혹은 소유역 출구에서 오랜 시간 동안 분석이 필요하다. 원격탐사 분야의 과학자와 기상학자 사이에 보다 밀접한 공동연구가 또한 유용성을 입증하는 데 많은 역할을 담당할 수 있다. 원격탐사 자료에 의해서 직접 분석이 가능한 지표면 토양 수분은 온도, 대기 습도 및 강우 등에 대한 단기간 예보에 중요한 정보를 제공할 수 있다. 적절한 지표면 토양수분의 초기값을 가지고 있을 경우에 월별 강우예측 모델을 개발하는 데 있어 많은 장점을 제공할 수 있다.

모델과 비교될 때 자료의 공간해상도는 지표면 열수지 요소의 관측 범위나 양에 중요한 영향을 가지게 된다. 더욱이 길이 스케일은 지역이나 시간에 무관하며, 단지 식생, 지표면 상태 및 기후 등과 밀접한 관계가 있다. 또한, 식생의 높이나 분포 특성을 나타내는 단파장 시스템을 사용하여 길이 스케일은 평가된다. 적외선 영역 센서 중에서 가장 높은 공간해상도를 가지는 시스템은 Landsat TM으로 약 120m의 공간해상도를 가지고 있기 때문에 적외선 영역에서 유사한 연구를 수행한 시스템은 아직까지 없으며, Landsat TM의 경우에도 16일의 매우 낮은 시간해상도를 가지고 있다. 따라서, 고해상도의 열적외선 시스템이 요구되며, 40m의 공간해상도와 1일의 시간 해상도를 가지는 IRSUTE 시스템이 제안되었다.

또한, 공간 해상도와 밀접한 관련이 있는 것은 시간 해상도이며, 시간 해상도에서 발생하는 문제점은 순간적인 관측값을 시간에 대해 적분한 값으로 나타내는 데 있다. 또한 인공위성 궤도의 특성으로부터 또

다른 문제가 제기된다. 대부분 인공위성은 태양 동주기궤도를 가지고 있지만, 넓은 주사폭을 가지고 있는 센서는 변화하는 지방태양시(NOAA/AVHRR의 경우 약 2시간)에서 관측이 이루어지게 된다. 두 번째는 구름에 의해서 영향을 받아 가시광 혹은 근적외선 영역의 자료가 왜곡되는 것이다. 예를 들어 지표면으로부터 열적외선 자료는 단지 구름이 없는 청명한 날씨에 대해서 얻어질 수 있으며, 정오 때에 획득된 원격탐사 자료를 이용하여 추출된 열수지 요소의 평가는 평균 조건보다도 다소 높은 값을 보이게 된다. 비록 좋은 시간 해상도(예를 들면 일별)를 가지고 있다고 할지라도, 몇몇 수문학적인 변수들은 낮 시간 동안 큰 변화를 보이게 된다. 예를 들어 열대지방에서 강우는 다른 시간대에 비하여 낮과 밤에 많은 강우가 발생하게 된다. 그래서, 인공위성이 지나가는 시간에 따라 일별 강우가 과대평가 혹은 과소 평가된다. 이러한 문제를 완화하기 위해서 낮은 공간해상도를 가지는 반면 약 30분 정도의 시간 해상도를 가지고 있는 정지궤도 위성 자료를 이용하거나 열적외선 영역 자료와 결합하여 사용하기 위해서 훨씬 낮은 공간해상도를 가지는 반면 모든 기상조건에서 획득 가능한 수동적 혹은 능동적 마이크로파 자료를 이용하는 것이 바람직하다.

식생과 같이 변화 속도가 느린 현상에 대해서 현재의 시간 해상도는 충분하지만, 대기온도나 토양수분과 같이 변화 속도가 빠른 현상에 대해서는 시간 해상도를 높이든지 혹은 내삽기법이 필요하다. 원격탐사 자료는 상태변수를 검증하거나 모델의 시간적인 변화 과정을 조정하거나 갱신하기 위한 자료로 이용될 수 있다. 낮 시간 동안의 변화 문제는 낮은 경사와 TRMM(Tropical Rainfall Monitoring Mission)과 같이 몇 일에 대한 모든 낮 시간 동안의 자료 획득이 가능한 비 태양동주기 궤도 위성 자료를 이용함으로써 해결할 수 있다.

5. 제안사항

수문학적인 변수들을 원격탐사 자료를 이용하여 추

출하고자 하는 경우에 원격탐사 자료의 이용을 제한하는 주요 요소는 원격탐사 자료를 통한 평가의 정확도를 판단할 수 있는 자료의 부족이다. 따라서 다음과 같은 사항들에 대한 내용이 추진되어야 한다.

- (a) 원격탐사 알고리즘의 정확도를 평가하기 위한 자료의 분석 기법 개발
- (b) 모델을 통한 오차의 전달 과정 평가
- (c) 좀더 쉽게 사용할 수 있고 사용자에게 친숙한 자료의 생성
- (d) 알고리즘을 비교하기 위한 기법 개발
- (e) 연구 활동을 지원하기 위한 기금 조성

기존 자료 분석과 기기를 새로이 설치하기 위한 비용을 비교할 때, 기존 자료를 분석하는 데 더 많은 연구비가 투자되어야 한다고 참석자의 75% 이상이 제안하였다. 또한, 이러한 제안이 좀더 실효성을 가지기 위해서는 대규모 스케일에서 알고리즘의 정확도를 결정하는 분야에 많은 기금이 투자되어야 한다.

원격탐사 자료로부터 추출되는 정보의 다양한 이용에 관해서 논의하였으며, 모델로부터 결과를 검증하기 위해서 원격탐사 자료의 가용성은 문제가 되지 않는다. 유사하게 식생지역과 같이 초기조건이 느리게 변화하는 지역에 대한 정보를 제공하기 위해서 구름이 없을 때 획득된 자료도 만족스러운 결과를 제공할 수 있다. 반면, 모델에 대한 입력자료를 제공하기 위해서는 원격탐사 자료의 시간해상도가 향상되어야 하며, 또한 신뢰성 있는 자료 획득이 필요하다. 입사하는 태양 복사에너지를 분석하기 위해서는 가시광내지는 근적외선 영역 자료가 필요하며, 다른 변수들을 추출하기 위해서는 마이크로파를 탑재한 센서를 이용하여 획득된 자료를 이용하는 것이 타당하다.

5.1 방사량

이번 워크숍에서 지적한 바와같이 원격탐사 자료를 이용하여 대규모 스케일 모델에 대한 방사성분을 분석한 예는 아직 없었다. 따라서, 원격탐사 자료를 이용하여 방사량을 정확히 추출하기 위해서 다음과 같

은 사항을 제안하고자 한다.

- (a) 정지궤도 위성에서 획득된 자료로부터 계산된 값과 지표에서 입사하는 태양복사에너지의 모델 결과를 비교
- (b) 지표면으로 입사하는 태양 복사에너지의 실시간 관측을 위한 정지궤도 위성 개발
- (c) 사용자에게 친숙한 자료를 제공할 수 있는 정지궤도 위성 개발 및 발사

5.2 토지피복모델

원격탐사 자료를 완벽하게 이용할 수 있는 토지피복 모델들이 아직 개발되지 못했으며, 토지피복 모델을 개발하기 위해서는 다음과 같은 사항을 제안하고자 한다.

- (a) 원격탐사 자료를 동시에 이용할 수 있는 기존 모델의 수정
- (b) 원격탐사 자료를 이용하여 만들어진 생성물을 시험할 수 있는 결과를 만들기 위한 새로운 모델 개발
- (c) 지표에 대해 획득된 자료와 원격탐사 자료를 이용하거나 혹은 이용하지 않은 모델로부터 계산된 결과의 비교
- (d) 하나 혹은 두 개 지점에서 획득된 자료를 가지고 원격탐사 자료를 입력 자료로 이용하여 많은 모델 비교

5.3 강우량 및 토양수분

국부적 스케일과 광역적인 스케일 모두 수문학적 순환과정에 있어서 다른 성분들을 조정할 경우 강우량과 토양수분은 매우 중요한 인자이며, 원격탐사 자료를 이용하여 이러한 성분을 성공적으로 추출하기 위해서는 다음과 같은 사항을 제안하고자 한다.

- (a) 정확도를 향상시키고 좀더 뛰어난 시간해상도를 제공할 수 있는 원격탐사 자료로부터 강우량을 평가하기 위한 방법을 지속적으로 개발
- (b) 원격탐사 자료로부터 토양수분을 평가하기 위한 알고리즘의 지속적인 개발

- (c) 좀더 작은 공간 스케일에서 토양수분을 추적하기 위한 인공위성 센서의 개발과 발사
- (d) 지표면 토양수분과 rooting zone 이하의 토양수분 사이의 관계를 규명하기 위한 연구 수행

- (b) 10km 스케일에 적절한 기술 개발을 위한 많은 기금 확보
- (c) 불균질 지표면의 길이 스케일을 통계학적으로 결정하는 것과 선형 평균이 정확도를 제공할 수 있는 스케일 사이의 관계 연구

5.4 스케일(Scale)

원격탐사 자료를 이용하는 주요한 연구가 작은 혹은 국부적 스케일에 집중되었다고 지적했으며, 다음과 같은 사항이 제안되었다.

- (a) 경계층(boundary layer)이 반응하는 최소 격자 크기가 10km이기 때문에, 이러한 격자 크기에서 원격탐사 자료를 이용하고자 하는 지속적인 연구 필요

면적 평균(areal average)의 개념을 가지고 있는 원격탐사 자료를 이용하여 지표면 열수지 요소의 관측 정확도와 지표 관측 영향을 조정하기 위한 어려움 때문에 알고리즘을 검증하고 10 내지 100km의 대규모 스케일에서 정확도를 결정하기 위한 노력이 현재까지 거의 없었다. 따라서, 10km 이상의 스케일에서 알고리즘의 정확도를 검증하기 위한 많은 노력이 있어야 하며, 이러한 노력은 새로운 실험을 시작하는 것

Table 1. Availability of databases for some major hydrological field experiments using remotely-sensed data.

Experiment	Public database	Archive	Access	Public domain	Year	Address
HAPEX-MOBILHY	No	Yes	by request	Yes	1986	CNRM, 31057 Toulouse, France
FIFE	FIS	CD-ROM	stopped	Yes	1987, 1989	http://www.versar.com/file/filehom.htm
EFEDA	No	-	-	-	1991	
HAPEX SAHEL	HSIS	CD-ROM	WWW	Semi(full in 1997)	1992	http://www.orstom.fr/hapex
BOREAS	BORIS	Yes	WWW	Yes	1994-96	http://boreas.gsfc.nasa.gov/
NOPEX	SINOP	CD-ROM	WWW	Yes	1996-	http://www.hyd.uu.se/nopex/

Table 2. Main satellite instruments available of use in hydrology.

Satellite	Sensor	Wavelength	Revisit	Resoution	Orbit/time
Landsat	TM	VIS/NIR/SWIR TIR	1 in 16 days	30m	Polar at 9:30 120m
SPOT	HRV	VIS/NIR	1 in 5 to 25 days	10-20m	Polar at 10:30
NOAA	AVHRR	VIS/NIR/MIR/TIR	2/day	1km	2polar at 0200, 0700, 1400, 1900
Meteosat		VIS MIR/TIR	24/day	2 · 5km 5km	Geostationary at 0°
GOES		VIS TIR	48/day	1km 4km	Geostationary 75° W and 135° W
ERS-1/2	SAR ATSR/IR ATSR/M	5GHz SWIR/TIR 23,37GHz	1 in 35 days 1 in 5 day	25km 1km	Polor at 10:30
	WSC	5GHz	1 in 3 to 4 days	Profilier 50km	
DMSP	SSM/I	19-90GHz	1 in 2 to 3 days	20-50km	Polar at 6:00

Sensors
 TM = Thermal Mapper
 HRV = High Resolution Visible
 AVHRR = Advance Very High Resolution Radiometer
 SAR = Synthetic Aperture Radar
 ATSR/IR = Along Track Scanning Radiometer-Infra-Red
 WSC = Wind Scatterometer
 SSM/I = Special Sensor Microwave Imager

Wavelength
 VIS = Visible
 NIR = Near Infra-Red
 TIR = Thermal infra-Red
 MIR = Middle Infra-Red
 SWIR = Short Wave Infra-Red

Table 3. Brief details of some major hydrological field experiments using remotely-sensed data.

Experiment	Dates	Location	Brief description	Remote sensing instruments(see tabel 2)	Hydrologic and ground data collected(see tabel 3)	reference
HAPEX/MOBILHY	1986	100km × 100km area in Southwestern France	Measurements of surface fluxes at the GCM grid scale a/c	PBMR, TMS, SPOT, NS001, AVHRR, TM, Flux, L/C	EB(15), SM, P(60), O(33), Sonde, Lysimeter, SP, ST,	Andre et al. (1988)
FIFE	1987-1989	15km × 15km area on Konza Prairie, Kansas	Simultaneous measurement of in situ and remote sensing data parameterisations	BPMR, TMS, SPOT, TM NS001, AVHRR, AIRSAR, Flux a/c	EB(23:17-B, 6-Ec), SM, P, Q, Sonde, Veg/Bio, SP, ST, LC	sellers et al. (1992)
HAPEX-Sahel	1991-1993	Niger, West Africa	Characterisation of water and energy balance in the Sahel	PBMP, POLDER, PORTOS, NS001, TMS	P(110), Q(12), SM, EB(12), Sonde, Veg/Bio, ST, Reflectance	Prince et al. (1995) Goutorbe et al. (1994, 1997)
BOREAS	1993-1996	Saskatchewan and Manitoba, Canada	Energy, Water, Carbon cycle studn in the boreal forest	SIR-C-X, AIRSAR, SAR-X, TMS, N001, AVIRIS, MAS, ASA, CASI, MIMR, LIDAR	EB(12-EC), SM, P, Q, Sonde, Veg/Bio, Met(10), SP, ST, LC	Sellers et al. (1995)
EFEDA	1991	Castilla-La Mancha, Spain	Energy & Water exchange between soil, vegetation and atmosphere in semi-arid region	TM, AVHRR, Flux a/c, airborne SAR	EB(30:20-B, 10-EC), SM, ST, Sonde, Veg/Bio, Reflectance	Bolle et al. (1993)
NOPEX	1994-2001	Uppsala, Sweden & Sodankylä, Finland	Energy, water carbon cycle study in the boreal forest	EMIRAD, EMISASR, MARSS, TM, SPOT, AVHRR, ATSR	Veg/Bio, Met(≈5), SM, S Phys, dielectrics, Sonde	Haldin et al. (1997) qVan den Griend et al. (1997)

- ATSR = Along Track Scanning Radiometer
 MIMR = Multiband Microwave Radiometer
 LIDAR = Laser Radar
 PBMR = Push Broom Microwave Radiometer
 TMS = thermal Infrared Multispectral Scanner
 NS001 = Airborne TM
 a/c = aircraft
 AIRSAR = JPL Airborne SAR
 POLDER = JOlarisation and Directional Reflectivity Profiling Radiometer
 PORTOS = Shuttle Imaging Radar (C and X band)
 SIR-C-X = Synthetic Aperture Radar (X band)
 SAR-X = Airborne Vis/R imaging Spectrometer
 AVIRIS = Northern hemisphere climate processes land-surface Experiment
 NOPEX = Electro-Magnetic institute microwave Radiometer
 EMIRAD = Electro-Magnetic institute (fully polarimetric) Synthetic Aperture Radar
 EMISAR =
- MARSS = Microwave Airborne Radiometer Scanning System
 MAS = Moderate resolution imaging spectrometer Airbourne Simulator
 ASAS = Advanced Solid-state Array Spectroradiometer
 CASI = Compact Airborne Spectral Imager
 BB = Energy Budget
 SM = Soil Moisture
 P = Precipitation
 Q = Run off
 SP = Soil profile
 ST = Soil Temperature
 LC = Land classification
 B = Bowen Ratio
 EC = Eddy Correlation
 Veg/Bio = Vegetation Biomass characteristics
 Met = Meteorological Stations
 S Phys = Soil Physical characteristics

보다는 FIFE나 HAPEX-Sahel과 같은 기존 자료의 분석을 통하여 실시하는 것이 타당하다. 표 1., 2.와 3.은 원격탐사 자료를 이용하여 수행되고 있는 주요 수문학 분야의 현장실험 연구를 요약한 것이다.

5.5 시간해상도 확장

순간적으로 획득된 원격탐사 자료를 이용하여 일별

현열과 잠열을 추정하기 위한 증발율과 Bowen 비의 보존성에 대한 가정은 중요한 오차를 필연적으로 생성하게 된다. 그러나, 이러한 것은 원격탐사 자료를 이용하고자 할 경우 가장 좋은 방법일 것이다. 일별 총 열수지 요소를 추정하기 위해서 일정한 한 시간대에서 증발율과 Bowen 비의 사용에 대한 제약 조건을 평가하는 것이 필요하다. ●

〈참고문헌〉

- Andr, J-C., and 30 others(1988), Evaporation over land surfaces, first results from HAPEX-MOBILHY special observing period, *Ann Geophysicae*, 6, 477-492.
- Bolle, H-J., 30 others(1993), EFEDA, European field experiment in a desertification threatened area, *Ann Geophysicae*, 11, 173-189.
- Frouin, R., and Gautier, C.(1990), Variability of photosynthetically available and total solar irradiance at the surface during FIFE: a satellite description, In *Proceedings of the Symposium on FIFE(Anaheim, CA, Feb. 7-9)*, (Boston MA: American Meteorological Society), pp. 98-104.
- Garratt, J.R., Raupach, M. R., and McNaughton, K., G(1994), Climate and the terrestrial Biosphere, Paper prepared for Greenhouse '94, an Australian-New Zealand Conferencd on Climate Change, 9-14 October, 1994, Wellington, NZ.
- Garratt, J.R.(1994), Incoming shortwave fluxes at the surface-a comparison of GCM results with observations, *J. Climatology*, 7, 72-80.
- Goutorbe, J. P., Lebel, T., Dolman, A.J., Gash, J. H. C., Kabat, P., Kerr, Y. H., Monteny, B., Prince, S. D., Stricker, J. N. M., Tinga, A., and Wallace, J. S.(1997), An Overview If HAPEX-Sahel : a study in climate and desertification, *J. Hydrology*, 188/189, 4-17.
- Goutorbe, J. P., and 15 others(1994), HAPEX-Sahel, A large scale study of land atmosphere interactions in the semi-arid tropics, *Ann Geophysicae*, 12, 53-64.
- Halldin, S., Gottschalk, L., Van de Griend, A A., Gryning, S-E., Heikinheimo, M., Hogstrom, U., Jochum, A., and Lundin, L-C.(1997), NOPEX-a Northern hemisphere climate Processes land-surface Experiment, Accepted for publication in *Journal of Hydrology(BAHC Special Issue)*, in Press
- Prince, S. D., and 15 others(1995), Geographical, biological and remote sensing aspects of the Hydrological Atmospheric Pilot Experiment in the Sahel(HAPEX-Sahel), *Remote Sensing Environ.*, 51, 215-234.
- Sellers, P., Hall, F. G., Asrar, G., Strelbel, D. E., and Murphy, R. E.(1992), An overview and of the First International Satellite Land Surface Climatology Project(ISLSCP) Field Experiment(FIFE), *Journal of Geophysical Research*, 97, 18345-18371.
- Sellers, P., and 12 others(1995), The boreal ecosystem-atmosphere study, an overview and early results from the 1994 field year, *Bulletin of American Meteorological Society*, 76, 1549-1577.
- Shuttleworth, W. J., and Dickinson, R. E.(1989), Comments on 'Modelling tropical deforestation: A study on GCM land-surface parameterisations' by R. E. Dickinson and A. Henderson-Sellers, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 115, 1177- 1179.
- Stewart, J. B., Engman, E. T., Feddes, R. A., and Kerr, Y.,(editors)(1996), *Scaling up in hydrology*

using remote sensing(Chichester:John Wiley & Sons)
Van de Griend, A. A., Woodhouse, I., Van oevelen, P., Hoekman, D., Paloscia, S., Pampaloni, P., Sgaard, H., and Kerr, Y.(1977),

FOREST-DYNAMO, Forest Environmental Dynamics Monitoring by Microwave Remote Sensing, EC Environment Research Programme, Contract EV5V-CT94-0502. Vrije Universiteit Amsterdam, Faculty of Earth Sciences.

※ 본 논문은 1996년 영국 Willingford의 "Institute of Hydrology"에서 개최된 "Scaling up in hydrology using remote sensing"의 Workshop 내용을 요약한 것으로, J. B. Stewart, E. T. Engman, R. A. Feddes 및 Y. H. Kerr의 "Scaling up in hydrology using remote sensing : summary of a Workshop", 1998, Int. J. of Remote Sensing, Vol. 19, No. 1, pp.1881-194.를 발췌한 것임