

유역관리를 위한 토양수분 분석(I) - 토양수분 관측 연구동향



김 광 섭 |
경북대학교 토목공학과 교수
kings@knu.ac.kr

1. 서론

국내에서 예상되는 물 부족 현상에 대한 사회적 관심과 문제해결을 위한 각 기관 및 학계에서의 연구 노력이 어느 때 보다도 활발히 진행되고 있다. 이러한 문제를 극복하기 위해서는 수문 현상의 이해를 통한 수자원의 안정된 확보, 관리, 개발 등 수자원 관련 기술력의 발전이 필수적이라 하겠다. 물 순환계통의

올바른 이해와 적합한 모형의 개발 및 검증을 위해서는 강우, 증발산 및 토양수분 등 수문 변수들의 대규모 원격측정이 필수적일 뿐 아니라 관측 격자 내에서 일어나는 시공간 변화도에 대한 해석 또한 병행되어야 할 것이다. 토양수분은 토양입자나 공극에 포함되어 있는 물을 의미하는 것으로서 지구상에서 담수의 약 0.15% 정도를 차지하는 작은 구성비를 가지고 있음에도 불구하고 여러 수문현상을 연계하는 중요한 변수이다. 침투나 침류를 통하여 강우와 지하수를 연결하는 기능과 동시에 강우사상에 따른 유출특성에 직접적인 영향을 미치며 증발산을 통하여 에너지 순환을 연결하는 중요한 기능을 한다. 그림 1에서 제시한 것처럼 토양수분이 땅과 대기의 접합부분에 위치한 주요 변수로 지표복사를 현열과 잠열로 구분하는 역할을 하며, 강수가 유출로 진행될 것인지 침투로

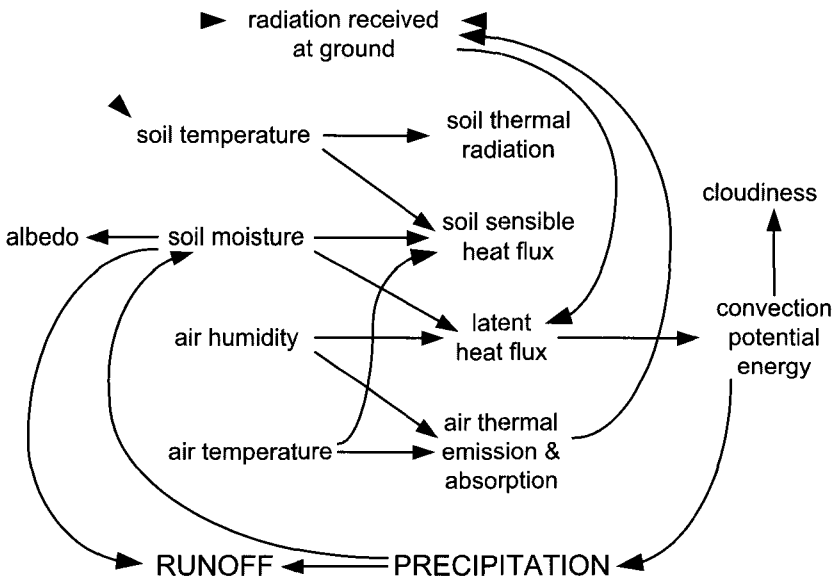


그림 1. 토양수분의 영향 경로에 대한 개념도(Brubaker and Entekhabi, 1994)

진행될 것인지를 결정하고, 지표면에서의 알베도와 열방출 현상도 토양수분의 상태에 의존한다. 그러므로 올바른 유역에서의 물순환 체계의 이해를 위해서는 강우나 증발산뿐만 아니라 토양수분에 대한 활발한 관측과 연구가 수반되어야 하겠다. 현재 우리나라에는 총 120여개의 지점에서 토양수분을 관측하고 있으며 농업기상정보시스템(<http://weather.rda.go.kr>)으로부터 자료를 제공받을 수 있다. 하지만 우리나라의 토양수분 자료는 그 관측기간이 짧고 결측이 많은 한계를 가지고 있으며 우리나라에 대한 체계적인 2차원 토양수분 관측은 전무한 실정이다. 지속적인 관측과 다양한 관측체계 구축은 유역관리와 우리나라 전체의 물 순환 이해와 수자원 관리를 위하여 필수적인바 토양수분과 관련한 관측, 시공간변화 분석, 모형확립, 물 순환 체계 해석 적용 등에 대한 연구동향에 대해서 몇 회의 기사를 통해서 알아보고자 한다. 본회에서는 토양수분 관측을 중심으로 연구동향에 대해서 파악하고자 한다.

토양수분은 지구과학의 여러 분야에서 기초적인 요소이므로 토양수분의 측정을 위한 많은 전략이 수립되어져 왔다. 그러나 다중 적용에 타당한 토양수분의 관측을 위한 통일된 접근법은 아직도 완벽하게 규정되지는 않고 계속적으로 개선되고 있다. 1992년 미국 National Research Council의 보고서에서 "The lack of a convincing approach to global measurement of soil moisture is serious problem"라고 규정한 것과 같이 1990년대는 토양수분의 전구관측에 대한 필요성을 인식하고 전구관측을 위한 노력이 진행되어 왔으며 토양수분관측을 위하여 설계되지는 않은 센서이나 현재 C-band 센서를 이용한 전구관측이 수행되고 있다.

토양수분 관련된 여러 분야에서 다양한 이해와 질문들이 제기되었고 대표적 질문은 다음과 같다.

1. 만약 토양 여러 층의 수분의 양과 시공간 변화도가 알려져 있다면 토양수분역학관계와 지면-대기의 상관에서 어떠한 문제들이 유용하게 제기될 것인가?

2. 주어진 토양수분 관측의 한계들과 다양한 샘플링 불확실성하에서 이러한 자료들이 해석되고 활용될 수 있을 것인가?
3. 어떻게 지표 토양수분의 시공간 변화 특성을 모델링할 것인가? 어떻게 광역에서의 토양수분, 증발산 및 침투량이 제시될 것인가? 강우와 증발상량의 상관관계와 토양, 식생 및 지형특성이 토양수분분포에 미치는 영향은 무엇인가?
4. 어떠한 현장실험이 토양수분의 이해에 도움을 줄 것인가? 토양수분 시공간 샘플링 전략에 필요한 것은 무엇인가? 이러한 필요를 어떻게 증명할 것인가?

여러 분야의 연구자들에 의하여 토양수분과 관련된 다양한 질문이 제기되고 이러한 질문에 답하고자 하는 연구가 계속 수행되고 있다. 이전의 연구결과에 의하면 계절적 기후변화의 예측가능성은 해수면 온도나 토양수분에 의존하므로 초여름 토양수분의 정보는 여름의 기온예측개선에 영향을 미친다(Rind, 1982). 즉, 육지에서 토양수분의 기능은 대양에서 해수면 온도기능에 상응하는 중요한 역할을 한다. 다양한 수문 모델 및 기상모델이 개발되어 적용되고 있음에도 불구하고 전구 모형은 관측된 토양수분자료가 없으므로 모형 결과들이 실측치를 이용하여 검증되지 않은 상태라고 하겠다. 그럼에도 불구하고 토양수분자료의 시공간적인 변화특성에 대한 많은 연구가 이루어져 왔으며 (Kim and Barros, 2002; Western and Blöschl, 1999; Bardossy and Lehmann, 1998; Dubayah et al., 1997) 강우, 지형, 식생피복상태 등이 토양수분의 시공간적 변화에 어떠한 영향을 미치는지에 대한 연구 또한 수행되어져 왔다 (Kim, 1999). 또한 땅과 대기를 상관관계를 이해하기 위한 연구도 활발히 수행되어 왔다 (Gupta and Waymire, 1990). 그림 2는 토양수분연구의 현황과 발전방향에 대한 개요를 나타내는 것으로 관측의 발달과 함께 수문 및 기상 현상 및 모형의 관측 자료를 사용한 검증 가능성이 높아짐을 보여준다.

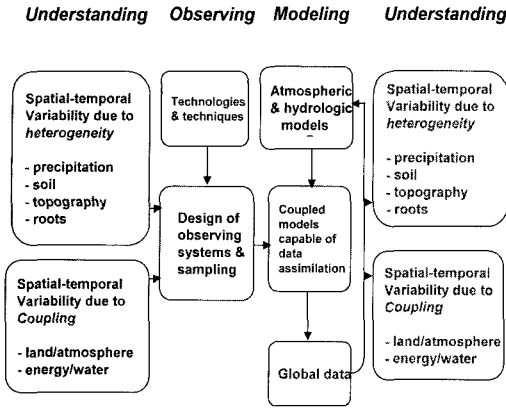


그림 2. 토양수분연구 개요 (source: NASA)

2. 토양수분 관측 연구 동향

일반적으로 우리나라는 토양수분 관측치가 부족하여 수자원 전문가들이 토양수분의 공간분포와 시간변화에 대한 정보가 없거나 제한된 정보를 가지고 업무를 수행해야한다. 중량측정법, 원자력방법, Time Domain Reflectometry (TDR)방법 및 토양수분장력측정법과 같은 지상관측법들은 엄청난 양의 노동력을 필요로 한다. 그리하여 마이크로웨이브를 이용한 지표 토양수분의 원격관측은 토양수분의 분포와 시간변화를 관측에 적합한 방법임에 의심의 여지가 없다. 원격측정 기술의 발달은 여러 시공간 스케일에 걸쳐 토양수분의 변화도를 관측하고 정량화할 수 있도록 하였다. 전반적으로 토양 수분 자료를 위한 원격 측정 기술의 발전과정은 그림3에서 보는 바와 같이 1960년도부터 1970년도에 이르기까지 타워에 설치된 라디오미터를 사용하여 매우 작은 면적에 대하여 원격관측을 시작하였다. 70년대 후반부터 80년대에 이르기 까지는 트럭이나 항공기에 장착된 라디오미터를 사용한 관측이 수행되어 왔으며, L-band Push-Broom Microwave Radiometer (PBMR)가 개발된 80년도 중반 이후 90년대 초까지는 비행기에 장착하여 토양 수분을 측정하였다. 최근 저주파 마이크로웨

이브 원격측정기술의 발달은 여러 조건의 지형 및 식생피복상태 하에서의 지표면 토양수분자료 획득을 용이하게 하였고(Jackson and Le Vine, 1996) 따라서 원격 측정된 2차원 토양수분자료의 시공간적 변화 특성에 대한 연구가 수행되었다(Kim, 1999). Electronically Scanned Thinned Array Radiometer (ESTAR)의 개발 후 Little Washita 실험(1992)과 Southern Great Plain 1997 Hydrology Experiment (SGP97)에 적용되어 광범위한 지역의 토양수분관측을 위한 가능성을 제시하였다. 관측 결과들은 L-band 마이크로웨이브 관측이 토양수분자료 관측에 가장 적합함을 보여주었다. 위성관측 기기들 즉, Special Sensor Microwave/Imager (SSM/I), Tropical Rainfall Monitoring Mission (TRMM) Microwaver Imager (TMI), Advanced Microwave Scanning Radiometer (AMSR)는 토양 수분측정을 목적으로 설계되어지지 않았다. 그럼에도 불구하고 연구자들에 의하여 SSMI 자료 등을 사용한 토양수분을 산정하고자 하는 시도가 수행되었다 (Jackson, 1997). 그러나 이러한 기기들은 지형 및 식생피복의 영향에 민감하여 토양수분 측정에 이상적이지 않은 실정이다. 위성관측 기기를 사용한 L-band 토양수분측정 시 원하는 격자 크기의 자료를 얻기 위한 안테나 크기를 획득하기 위해서는 현재기술로 해결하기 힘든 기술적인 문제가 따른다. 안테나 기술의 발달 등 관련기술의 발달과 함께 위성관측에 의한 L-band 마이크로웨이브 원격관측 시에 예측되는 지구 토양수분 관측의 격자크기는 약 50km이다. 현재 AQUA위성에 탑재된 AMSR 장비는 인공위성에서 약한 식생피복 조건하에서의 토양 수분측정을 하기 위한 현존하는 가장 유용한 기기이다. AMSR 기기를 사용하여 지구에 대하여 측정된 C-band 토양수분자료는 50km 분해능을 가지며 지구전체를 대상으로 하는 순환모델 및 기후모델의 적용에는 문제가 없으나 지역의 기상모델 특히 수문모델의 적용에 있어 한계를 가진다. 위성관측은 이후로는 10km자료 획득을 목표로 하고 있으며 더 나아가

VHF 관측계기를 사용한 관측 깊이가 1m의 수평분해능 1km 토양 수분 자료 생산을 목표로 하고 있다. 그러므로 이러한 자료가 현실화 되는 시점에는 땅-대기와 상관한 물-에너지 밸런스 및 수문 전 과정의 상호작용에 대한 규명이 보다 현실화 될 것이다.

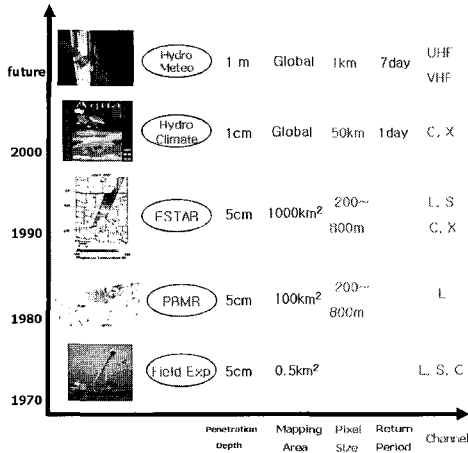


그림 3. 토양수분자료 원격측정기술 발전 과정

2.1 토양수분의 지상관측

(1) 중량측정법

중량측정법은 여전히 토양수분을 측정하는 표준방법이며 다른 모든 방법은 중량측정법을 이용하여 보정한다. 이 방법은 현장에서 토양샘플을 채취하여 무게를 측정한 후 건조기에서 건조시킨 후 다시 무게를 측정한다. 전형적으로 토양수분은 건조토의 무게에 대한 수분비로 나타낸다. 그러나 이러한 방법의 단점으로는 a) 균질한 토양에서 대표성을 가지는 샘플을 획득하기 힘들다. b) 돌이 많이 포함된 토양에 대한 샘플링이 어렵다. c) 관련 자료의 시계열을 얻기 위하여 엄청난 작업량이 필요하다. d) 보다 건조한 토양에 대해 매우 높은 관측 오차를 가진다. e) 샘플지점을 훼손시킨다.

(2) 원자력방법

원자력방법 중 대표적인 중성자분산과 감마선감쇄

를 이용하여 토양수분을 측정하는 두 가지 방법 중 중성자분산법을 소개하고자 한다. 중성자분산법은 간접 측정법으로 높은 에너지를 가진 빠른중성자를 방사하여 토양층이 내포한 수소원자와의 탄성 충돌로 인한 지체된 중성자들을 관측하여 토양수분을 산정한다. 이러한 중성자탐사기는 토양층의 토양수분 종단관측에 활용된다. 그러나 이러한 방법의 단점으로는 a) 원격관측에 대해서 분해능이 높지 않으면 침투 과정 등의 관측에 한계가 있다. b) 토양의 물리 화학적 특성에 따라 샘플지점마다 보정이 필요하다. c) 건강상의 위험을 최소화하기 위하여 사용상 주의를 요한다.

(3) 전자기적 방법

전자기적 방법은 습윤 토양의 유전체적인 특성을 이용한다. 저항력이나 성극작용에 대응하는 다양한 센서들이 개발되었다. 이러한 계측기들 중 어떤 것들은 현장에 직접 설치하도록 설계되기도 하고 다른 것들은 항공기나 위성에 탑재하여 원격관측 되도록 설계되기도 한다. 항공기나 인공위성에 탑재된 관측 기기에 대해서는 다음 절에 설명하도록 하고 여기서는 TDR 계측기에 대해서 설명하고자 한다. TDR 계측기는 주로 금속으로 만들어진 탐침으로부터 설치된 토양층에 대해서 전자기파를 발산하면 대응하는 탐침이 전자기파를 탐지하게 된다. 전자기파의 진행시간은 탐침이 설치된 토양층의 유전율에 비례하게 된다. 물(80)과 건조 흙(2-5)의 유전율의 차이가 크므로 전자기파 진행시간은 토양수분을 관측하기 위한 좋은 방법이 된다. 이 방법은 광범위한 토양온도, 염도, 흙 밀도와 구조에 적용 가능한 보정곡선이 수립될 수 있는 장점을 가지고 있다. 이 방법은 지상관측시 광범위하게 사용되고 있으며 다음과 같은 장점을 가지고 있다. a) 샘플링 체적은 탐침형태만의 함수이다. b) 설치가 용이하고 표준 중성자계측기로 계측하는 것을 신뢰할 수 없는 범위의 지표면에 대한 관측에 적합하다. c) 얼음과 액체상태의 물을 구분할 수 있을 뿐만 아니라 수분함량과 염도도 동시에 관측할 수 있다. 유일한 단점은 비교적 고가의 장비이며 각각의 지점

에 대해서 보정해야한다는 것이다.

(4) 토양수분장력측정법

수분장력계는 다공성컵과 진공게이지 및 압력변환기와 같은 압력관측기로 구성되어있다. 이 계측기는 흙이 수분을 함유하고자하는 에너지나 모관장력을 측정한다. 계측기는 습윤한 토양의 장력이 0-80kPa 범위일 때 사용가능하다. 보다 건조한 토양에 대해서는 토양건습계나 석고블록이 필요하다. 이 계측기는 비교적 저렴한 가격과 관측방법이 쉬우며 관측 시 토양의 교란을 최소화한다는 장점이 있다. 그러나 관측치를 토양수분량으로 환산하기 위하여 토양수분 보유곡선을 사용해야하며 토양수분의 정량적 관측을 위해서 주로 다른 방법과 병행해서 사용되어야한다.

2.2 토양수분의 원격관측

(1) passive 기법

단 채널 라디오미터 토양수분 관측에서 가장 실질적인 주파수는 1-3GHz이다. 더 긴 파장은 더 깊은 관측심과 식생 등에 대한 영향도 작게 받음에도 불구하고 보다 긴 안테나 길이를 요구하므로 기술적인 한계가 있다. 대부분의 연구는 라디오주파의 간섭이 적은 1.4GHz에 집중되었다. 단 채널 관측은 보조 자료들을 이용하여 식생, 표면 거칠기, 온도 및 토양조직 등에 대한 보정이 필요하다. 토양수분이 깊이에 따라 일정하다는 가정 하에서 그림 4에서 보는바와 같이 토양수분변화에 따른 마이크로웨이브 파장대(L-, C- 및 X-band)의 관입깊이는 달라진다. L-band 토양수분측정치는 약 7cm에서의 평균토양수분을 나타낼 수 있고 C-band 토양수분측정치는 약 2cm깊이의 토양수분을 나타낸다. 특히 C-band 토양수분 측정치가 식생피복의 영향에 얼마나 민감할지를 보여준다. 이러한 관측 마이크로웨이브의 파장대에 따른 측정 깊이의 차이는 토지피복의 분류에 따른 적용에 있어 신중을 기해야 함을 보여준다. 비행기에 탑재한 L-band 라디오미터의 종류로는 전절에서 언급한

PBMR 기기와 ESTAR 기기들이 있으며 2차원 토양수분관측에 성공적으로 사용되고 있다.

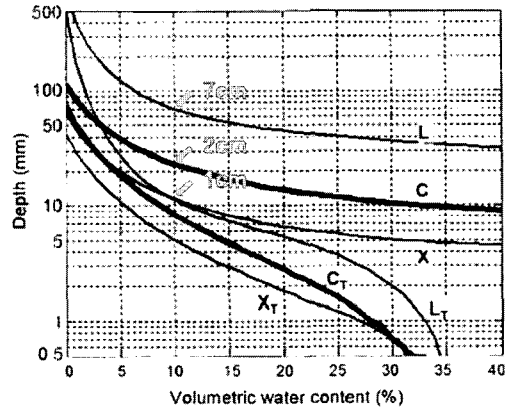


그림 4. 토양수분 함유량에 따른 마이크로웨이브 파장대(L-, C- 및 X-band)에 대한 관입깊이 (Nolan and Fatland, 2003)

(2) active 기법

최근 사용되는 active 관측기기로는 synthetic aperture radar(SAR) 장비가 있으며 큰 안테나 장비 없이도 관측 목적에 따른 분해능 조절이 용이하다는 장점이 있다. 일반적으로 자연적인 표면에서의 마이크로웨이브 후방산란은 다음과 같은 세 가지 요소에 영향을 받는다. 1) 토양표면의 거칠기, 2) 토양수분, 3) 지표면의 식생상태. 아래 식은 active 관측에서의 산란구성을 나타낸다.

$$\sigma^0 = T^2 \sigma_s^0 + \sigma_{dv}^0 + \sigma_{mv}^0 \quad (1)$$

여기서 σ^0 는 식생이 없는 평평한 땅에서의 후방산란, T^2 는 식생층의 이 방향 감쇄, σ_s^0 는 식생층의 직접 후방산란, 및 σ_{mv}^0 는 지면과 식생 요소를 포함한 다중산란을 나타낸다. active 기법에 의해서 관측된 산란값을 이용한 토양수분 산정 방법은 회귀식, 인공신경망기법 등 다양한 기법을 이용하고 있으며 식생이 덮인 지표면에서의 토양수분 역전 알고리즘은 개발단계에 있으며, 그림 5는 Oh 등(1992)에 의해서 제시

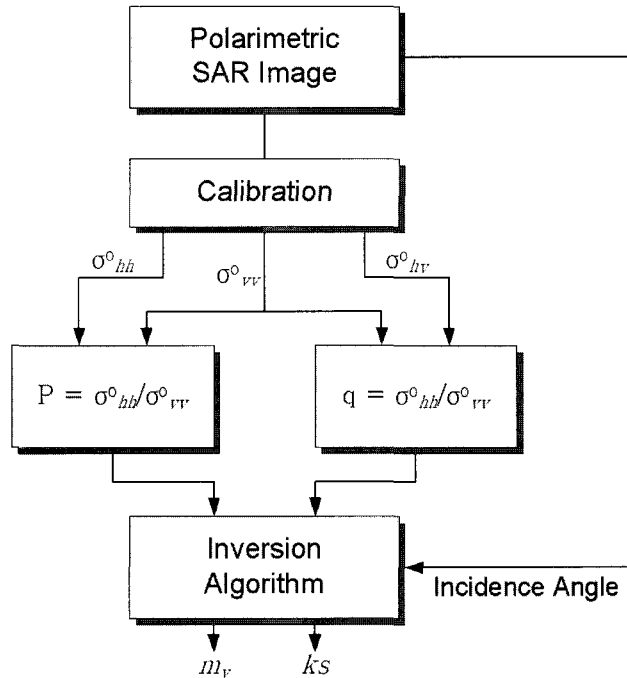


그림 5. Radar cross section비를 사용한 토양수분 산정 개념도 (Oh et al., 1992)

된 식생이 없는 평평한 땅에서의 토양수분 역전 알고리즘의 개요를 나타낸다.

3. 토양수분 관측 현장 실험

전장에서 설명한 각종 토양수분 관측 기법을 이용한 토양수분 관측 현장 실험이 이루어져 왔다. 본 장에서는 2차원 토양수분 원격관측과 관련한 대표적 현장실험에 대해서 선별적으로 언급하고자 한다. 이러한 2차원 토양수분 관측기법의 현장실험에 대한 변천 과정을 통해서 우리나라도 유역관리에 있어 토양수분의 시공간 변화특성 파악을 위해서 어떠한 실험과 관측체계를 구축해야 할 것인가 알아 볼 수 있겠다.

3.1 Washita 92 Experiment

미국 Oklahoma주 Chickasha의 남서쪽에 위치한 Washita 유역에서 1992년 7월 10일에서 7월 18

일 사이에 NASA, USDA 및 여러 정부기관과 hydrologic 모델링에서 원격 탐사 데이터의 유용성을 테스트하는 대학 사이의 공조 하에 수행된 Washita'92 Experiment를 통하여 토양수분을 관측하였다. Washita 유역은 현재 Oklahoma El Reno에 위치한 USDA ARS Grazinglands Research Lab에 의해 관리되고 있었고, 실험 유역은 약 848km² (45.6×18.6km²) 크기이며, 원격탐측은 NASA에서 제공하는 항공기에 격자변의 크기가 200m인 토양수분을 관측하는 L-band 관측기기 ESTAR로 실시되었으며, 그 외에 극초단파 방사계, 37 GHz의 극초단파 방사계, 레이저 프로파일러, NS001 다중 분광 주사기, 열적외선 다중 분광 주사기와 사진기 및 삼 진동수 합성 개구 레이더 등이 탑재되어 실시되었다.

실험 동안의 주요한 목표는 종래의 방법과 원격탐지법을 사용하여 공간적으로 분포되는 수문 자료의 수집과 2차원 토양수분 시계열 자료를 수집하는데 있었다. 즉 2차원 수문자료 시계열의 획득과 원격측

정을 통하여 획득한 수문자료의 수문모형에 대한 적용성을 검증하는데 있었고, 또한 목표와 센서 사이의 상호작용 알고리즘을 위한 데이터베이스의 개발 및 새로운 원격 측정 장치의 개발과 검정 확인을 하기 위한 것이었다. 가용한 자료 및 실험에 대한 보다 상세한 자료는 다음의 USDA web sites를 참조하기 바란다. <http://hydrolab.arsusda.gov/washita92/wash92.htm>. Washita'92 실험으로부터 획득된 토양수분의 공간 변화도에 관한 연구가 여러 연구자들에 의하여 수행되었다. Rodriguez-Iturbe (1995) 등은 토양수분 분포의 변화도가 격자크기의 변화에 상관하여 power law 따르는 것을 보여주었다. 그리고 이러한 변화 양상은 공극률과 같은 토양의 특성과 비슷함을 보여주었다. Hu (1997) 등은 Rodriguez-Iturbe가 보여준 변화양상의 한계인 1km^2 보다 더 큰 스케일 32km^2 까지 변화도가 동일함을 보여주었다.

3.2 Southern Great Plain 1997 Hydrology Experiment

토질의 특성과 토양 표면 속성의 불균질성은 정확한 토양 수분의 측정과 그 변화에 대한 이해에 있어서 어려운 점이였다. 또한, 대 축척의 경우 토양 수분의 변화에 있어서의 토양의 특성과 토양 표면 속성의 불균질성은 토양 표면 에너지 밸런스와 물 수지 밸런스에 복잡하게 영향을 미치게 되며 특히 식물이 번성한 곳일 경우 그 영향은 훨씬 복잡하게 된다. 따라서 1997년 Oklahoma 지역에서 약 한달 동안에 습한 환경을 설정하여 (6/18/1997 - 7/17/1997) NASA, USDA 및 여러 정부기관 및 교육기관의 공조 하에 SGP97 실험이 수행 되었다. SGP97 실험의 목적은 1) 트럭 과 항공기에 설치된 센서를 사용하여 관측된 높은 공간적 분해능에서의 복귀 알고리즘이 낮은 공간 해상력으로 인공위성에서 관측된 자료에서도 활용이 가능한가를 점검하고, 가능 하게 하기위해, 2) 위

성 관측을 통해 토양 수분의 공간적인 분포를 측정할 수 있는지 확인하고, 수문 모델링에서 가상 변환 함수의 사용성을 점검하기 위해, 3) 현지 실측에서 토양 표면 수분 실측에 사용하고 있는 토양 수분과 온도의 특성과의 타당한 관계성을 조사 하기위해, 4) 따뜻한 계절 동안 Southern Great Plains 위의 대기 경계층의 발달, 구름의 발달과 토양 수분과의 관계를 조사하기 위하여 실시되었다.

SGP97은 표면 토양 수분의 일일 지도 작성을 위해 항공기를 사용한 실험으로서 착수하게 되었다. 다양한 분야의 관심을 만족시키기 위하여 일일을 기준으로 가능한 한 많은 공간을 커버 할 수 있게 하였고, 다양한 축척으로 관측 자료를 언제나, 어디서나 획득할 수 있게 하여, 활용성을 최대한 높이게 하였다. SGP97 실험은 약 $10000\text{km}^2(40 \times 250\text{km}^2)$ 크기의 지역에 격자변의 크기 800m 토양수분을 ESTAR기기를 사용하여 수집하였고, 또한 단일 열적외선 센서 기관과 이중 편극 C-band, 극초단파 방사계에 의해 관측 되었다. 또한 시계열 자료는 하루에 한번 비행기로 관측되는 자료를 보완하기 위해서 극초단파 방사계를 탑재한 트럭을 사용하여 24시간동안 계속하여 관측되어 졌으며, 이 시스템은 열적외선뿐만 아니라 L, S와 C-band 계기로 구성되어 있었다.

기상 및 보정상의 문제로 29일의 실험기간 중 16일 동안의 자료가 가용하다. 실험기간 동안에 세 번의 주된 강우사상이 발생하였으며 이중 두 번은 관측 지역 북부에서 발생하였다. 이는 토양수분자료의 강한 남북기울기를 발생하게 하였다. 가용한 자료 및 실험에 대한 보다 상세한 자료는 다음의 NASA와 USDA 각각의 web sites에서 얻을 수 있다. 가용한 자료 및 실험에 대한 보다 상세한 자료는 <http://hydrolab.arsusda/sgp97> 와 http://daac.gsfc.nasa.gov/CAMPAIGN_DOCS/SGP97에서 얻을 수 있다. 저자는 SGP97 실험기간 동안 지상 관측팀 일원으로 참여하였다.

3.3 Southern Great Plain 1999 Experiment

SGP97가 성공적으로 효용성을 보여주었던 Southern Great Plains 지역에서는 1997년 저주파수 극초단파 방사계(1.4 GHz L-band)를 사용하여 토양 수분 자료를 만들었다. 더 높은 해상도 자료를 사용하면서 개발된 토양 수분 검색 알고리즘은 더 낮은 해상도에서도 연장이 가능하다는 것이 증명되었다. L-band의 센서를 이용한 장치는 토양 수분 측정을 위해 최적이라고 입증된 바 있다. 그러나 위성관측을 위한 L-band 센서가 실용화되기 위해서는 장기간의 준비기간이 필요하다. 또한 대안인 AMSR 기기는 토양수분 측정에 유용한 기기임에도 불구하고 AMSR 기기(C-band)에 대한 토양수분 측정 알고리즘이 확립되지 못한 실정이었다. 그리하여 1999년도에 7월의 7일에서 7월 22일 까지 Oklahoma에서는 AMSR 기기가 제공하는 C-band 측정기구와 유사한 비행기에 탑재된 C-band 측정기기를 사용한 토양수분 자료를 생산하고 분석하였다. 선택된 관측 지역인 미국의 Oklahoma, Southern Great Plains 지역은 이전에 수차례 관측을 실시하였던 지역으로 이전 관측 자료와 비교하여 새로운 관측 장비 센서와 알고리즘을 평가하기가 좋은 지역이다. 이 지역에서의 토지 피복 상태는 특히 7월경에는 C-band로 표면 토양 수분을 검색하기에 더욱 알맞았다. 실험을 통해 광범위한 토양 수분에 관한 자료들을 얻을 수 있었으며 원격탐측에 필요한 매개 변수들을 구할 수 있었다. 이 실험의 주된 목표는 지금이나 가까운 미래에 이용할 수 있는 위성 마이크로파 자료를 효과적으로 해석하고 이용하는 방법을 이해하기 위해 공간성으로부터 토양 수분을 측정하는 능력을 강화할 수 있는 새로운 접근법을 찾고 GOES, AVHRR, TM 과 온도 감지 센서에서 얻은 자료를 해석하기 위해 이 영역의 실측 지면 온도 변이성에 대한 이해가 있어야 할 것이다.

SGP99 실험은 C, S 및 L-band 마이크로웨이브 기기를 이용하여 동시에 토양수분을 관측한 첫 지상

실험으로 여러 band 기기의 토양수분 측정 가능성을 제시하였다. AMSR 장비는 최저 주파수가 6.9GHz (C-band)이며 관측각이 55° 이다. SGP99 기간 동안 사용된 PSR은 편파 마이크로 웨이브 방사를 측정하기 위하여 Georgia Institute of Technology와 NOAA Environmental Technology Laboratory에 의하여 개발된 항공측정 마이크로 웨이브 라디오미터로 C-band 토양수분 측정에 사용되었다.

3.4 Soil Moisture Experiment in 2002, 2003, 2004와 2005

토양수분의 진구 관측 준비를 위한 현장실험이 매우 성공적으로 수행되어 왔으며 현장실험에서 획득된 자료들을 사용한 토양수분 산정 알고리즘 등이 개발되었다. 2002년에 토양수분과 물순환에 관한 현장 실험이 AMSR, NASA Global Water and Energy Cycle Program, 그리고 지구수문학을 위한 미래 위성 임무의 지원으로 수행되었다. 이 실험의 중요한 요소는 AMSR의 brightness temperature의 검증과 토양수분 산정 그리고 좀더 확실한 식생 상태의 관측과 알고리즘을 알기 위한 기기의 확장, 지표면과 경계층 관측의 통합, 토양수분 원격 관측을 위한 새로운 기기의 평가를 위하여 6월 중순과 7월 중순 사이 한달 동안에 IOWA에서 실행되었다. 상세한 내용은 <http://hydrolab.arsusda.gov/smex02>을 참조하기 바란다.

2003년 NASA Aqua와 일본의 ADEOS-II Advanced Microwave Scanning Radiometer Program이 전구의 일-토양수분자료를 생산하고 제공하고 있다. 이것은 이전까지는 한번도 시도되지 않았던 일로 보다 나은 관측 결과를 위해서 전 지구적 범위의 다양한 시간대의 관측과 다양한 범위의 식생 상태를 고려했다. 이러한 연구의 검증을 위하여 Oklahoma의 초지와 밀밭과 함께 아마존의 우림 같은 범위까지 다양한 식생 상태의 현장실험이 수행되

었다. 이러한 실험은 Envisat ASAR 같은 새로운 위성 관측 기기의 테스트에도 많은 도움이 될 것으로 판단된다. SMEX03 은 6월과 7월에 미국의 Oklahoma, Georgia, Alabama 지역과 12월에 Brazil에서 수행되었다.

2004년 SMEX04-NAME(North American Monsoon Experiment)현장실험이 수행되었다. 북아메리카 대륙 내부의 많은 부분에서 여름철 강수는 경년주기의 특징을 가지고 있다. 지표경계 상태는 이러한 지역에서 여름철 강수에 영향을 끼치는 North American Monsoon System의 시작과 지속에 중요한 역할을 한다. 이러한 과정을 이해하는 것이 NAME의(<http://www.joss.ucar.edu/name/>) 중요한 관심사항이다. NAME 의 기본가정은 NAMS의 시작과 그 강도를 제어하는 지표면 선행 경계상태가 토양수분이라는 것이다. 지표면은 지표증발과 관련된 토양수분에 영향을 받는 지표 냉각, 지형, 그리고 식생 상태를 통해 영향을 주고받는다. 토양 수분과 특히 지표습윤도는 호우 사상 후에 급격히 변화될 수 있다. 강수 후에 증가된 토양수분은 강우사상 사이에 증발산능을 향상시킨다. 이것은 향상된 대류와 장래 강수예측에 영향을 줄 것이다.

2005년 SMEX05/POLEX(Polarimetry Land Experiment) 현장실험이 다음과 같은 목적을 달성하기 위하여 수행되었다. 1) 비행관측 장비의 지원과 함께 Windsat과 CMIS로부터 획득한 편광정보의 토양수분관측 활용성 2) 오전6시와 오후6시에 관측되는 Hydros, SMOS, CMIS와 Windsat 관측치의 토양, 식생 및 대기와 관련한 일변화 특성 3) Aqua AMSR-E 토양수분검증의 개선 4) 각종 통계량 획득과 CMIS 위험도 감소를 위한 RFI 경감. 상세한 내용은 <http://www.ars.usda.gov/Research/docs.htm?docid=8996>을 참조하기 바란다.

소개된 것 보다 훨씬 많은 토양수분 관측이 각 나라에서 이루어져왔으나 지면관계상 미국을 중심으로 수행되어져온 토양수분원격관측을 중심으로 기술하였다. 다음 호에서는 토양수분 시공간변화도에 대해

서 알아보려고 한다.

참고문헌

- Bardossy, A. and Lehmann, W., (1998). Spatial distribution of soil moisture in a small catchment. Part 1: geostatistical analysis, *Journal of Hydrology*, Vol. 206, pp. 1-15.
- Brubaker, K.L. and Entekhabi, D., (1994). Nonlinear dynamics of water and energy balance in land-atmosphere interaction, MIT Department of Civil Engineering Technical Report No. 341, 147 pp., Cambridge, MA
- Dubayah, R., Wood, E.F., and Lavallee, D., (1997). Multiscaling analysis in distributed modeling and remote sensing: An application using soil moisture, *Scale in remote sensing and GIS*, ed. Quattrochi, D.A. and Goodchild, M.F., pp. 93-112.
- Gupta, V. and Waymire, E., (1990). Multiscaling properties of spatial rainfall and river flow distributions. *J. Geophys. Res.*, Vol. 95, No. D3, pp. 1999-2009.
- Hu, Z., Islam, S. and Cheng, Y., (1997). Statistical characterization of remotely sensed soil moisture image, *Remote Sensing Environments*, Vol. 61, pp. 310-318.
- Jackson T.J., Le Vine, D.E., Swift, C.T., Schmugge, T.J., and Schiebe, F.R., (1995). Large area mapping of soil moisture using the ESTAR passive microwave radiometer in Washita 92 experiment, *Remote Sensing Environments*, Vol. 53, pp. 23-37.
- Jackson, T.J., (1997) Soil moisture estimation using Special Satellite Microwave/Imager

- Satellite data over a grassland region, *Water Resources Research*, Vol. 33, No. 6, pp. 1475-1484.
- Kim, G. (1999). Characterization of the spatial-temporal variability of soil moisture by remote sensing, Ph. D dissertation, Texas A&M University.
- Kim, G., Valdes, J.B., North, G.R. and Yoo, C., Sampling error analysis for soil moisture estimation, *J Hydro.* (in review)
- Kim, G and Barros, A.P., (2002). Spatial characterization of soil moisture fields using passive remotely sensed soil moisture images, *Remote Sens. Environ.* Vol. 81, pp. 393-403.
- Kim, G. and Barros, A.P., (2002). Down-scaling of remotely-sensed soil moisture with a modified fractal interpolation method using contraction mapping and ancillary data, *Remote Sens. Environ.*, Vol. 83, pp. 400-413.
- Nolan, M. and Fatland, D.R., (2003). Penetration depth as a DInSAR observable and proxy for soil moisture, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 41, No. 3, pp. 532-537.
- Oh, Y., Sarabandi, K., and Ulaby, F.T., (1992). An empirical model and an inversion technique for radar scattering from bare soil surfaces, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 30, No. 2, pp. 370-381.
- Rind, D., (1982). The influence of ground moisture conditions in North America on summer climate as modeled in the GISS GCM, *Monthly Weath. Rev.*, Vol. 100, pp. 501-526.
- Rodríguez-Iturbe, I., Vogel, G.K., Rigon, R., Entekhabi, D., Castelli, F. and Rinaldo, A., 1995. On the spatial organization of soil moisture fields, *Geophysical Research Letters*, 22 (20), 2757-2760.
- Western, A.W., and Blöschl, G., (1999). On the spatial scaling of soil moisture, *J. Hydrol.*, Vol. 217, pp. 203-224. 