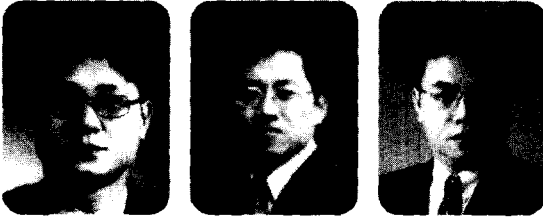


# 원격탐사 자료를 이용한 미계측 구역의 수문정보 추출



**채 호 석** | 책임연구원, 한국수자원공사 수자원연구원 물정보화연구소, chaehs@kowaco.or.kr

**김 성 준** | 부교수, 건국대학교 생명환경과학대학 사회환경시스템공학과, kimsj@konkuk.ac.kr

**고 덕 구** | 수석연구원, 한국수자원공사 수자원연구원 물정보화연구소, dkkoh@kowaco.or.kr

## 서론

지표 수문학(surface hydrology)은 강수에 의한 수자원의 발생, 육지나 하천, 그리고 해양에서 발생하는 증발이나 유출 등에 의한 수자원의 손실과 저수지나 댐에서 수위 상승, 토양수분이나 적설의 증가, 그리고 지하수면의 상승 등에 의한 저류량의 증가 등을 종합적으로 설명하는 과학이다. 수자원의 발생이나 손실, 그리고 저류량의 증가를 설명하기 위해서는 질량 보존의 법칙과 같은 단순한 물수지 방정식을 이용한다. 그러나, 지표면에서 발생하는 증발이나 식물에 의해서 발생하는 증산 등과 같은 증발산 작용은 에너지를 수반하기 때문에 수문학적인 수지를 규명하기 위해서는 물수지와 에너지수지를 동시에 이용해야 한다.

그러나, 현실적으로 현장에서 이루어지는 수문관측은 노동 집약적이고 매우 고비용적인 요소가 많기 때문에 넓은 지역이나 장기간에 걸친 직접적인 수문관측을 통한 수문학적인 수지의 정량화는 매우 어렵다. 특히, 하천에 대한 유량 자료가 없거나 부족하고, 수문학적 변수들에 대한 공간적인 분포를 파악하거나 예측하기 위한 수문관측이 제대로 이루어지지 않은 경우 등 수문관측 밀도가 낮은 미계측 구역의 경우 수문학적 수지에 대한 정량화는 불가능하다. 따라서, 미계측 구역에 대한 수문 모델링은 거의 현실적으로 어렵다. 따라서, 이러한 미계측 구역에 대한 수문정보의

취득이나 분석을 위해서는 원격탐사 기술의 적용이 필요하다. 위성에 의한 원격탐사는 넓은 공간적인 커버리지 및 반복적인 시간 커버지리를 가지고 있어 그러한 단점을 극복할 수 있는 방법이다.

위성에 의한 원격탐사 자료를 활용하여 예측할 수 있는 수문인자 중에서 가장 많은 연구가 이루어진 것은 레이더나 위성에 의해서 획득된 자료를 활용한 강수예측 분야이다. 강수 패턴은 공간이나 시간적인 요소에 의해서 크게 변화하게 된다. 내륙지역의 경우 토양, 지형, 조도계수 및 식생 등 매우 다양한 요소에 의해 그 특성이 반영되어 있으므로, 원격탐사 자료만을 이용하여 예측한 강수 자료는 하천 유량을 정확하게 예측하지 못하고 있다. 따라서, 강우를 유출로 단순히 변환하는 것은 불가능하며, 토양수분, 지표면 온도, 식생정보 및 대기 온도 등 다른 수문학적 인자에 대한 원격탐사 영상을 동시에 이용하는 것이 필요하다.

본 고에서는 미계측 구역과 관련하여 원격탐사 영상의 향후 가능 분야나 제약점 등 수문 인자를 생성하는 데 이용될 수 있는 다양한 원격탐사영상에 대해서 소개하고자 한다.

## 위성 자료와 수문인자

본 장에서는 지표 수문학 연구에 사용되는 다양한 원격탐사 자료들에 대해 먼저 소개한다. 수문학에서

토양수분, 강수, 유출, 증발산, 지표면 온도, 입사하는 단파장 및 장파장에 대한 정보 등은 원격탐사 자료를 이용하여 직간접적으로 관측하거나 예측할 수 있다 (그림 1).

그림 1의 왼쪽 상부에 나타나 있는 것처럼 전지구적 규모의 물순환(hydrologic cycle)은 아래와 같은 3가지 성분으로 나누어 고려할 수 있다.

- 대기중의 물수지(Atmospheric Water Balance)

$$\frac{dW}{dt} = E + T - P - \text{div}Q \quad (1)$$

- 지표면 물수지(Water Balance)

$$\frac{d\theta}{dt} = P - E - T - R \quad (2)$$

- 에너지수지(Energy Balance)

$$R_n + H + LE + G = 0 \quad (3)$$

식생에 대한 정보는 AVHRR(Advanced Very High Resolution Radiometer)의 적색영역(0.5-0.68  $\mu\text{m}$ )과 근적외선영역(0.725-1.10  $\mu\text{m}$ )의 합과 차의 비를 이용하여 계산되는 정규화 식생지수(NDVI; Normalized Difference Vegetation Index)에 의해서 분석할 수 있다. 현재, 식생지수는 오전과 오후 10시 30분에 획득되는 TERRA 위성과 오전과 오후 1시 30분에 획득되는 AQUA 위성에 탑재되어 있는 MODIS(Moderate Resolution Imaging Spectrometer)에 의해서 관측되고 있다. NDVI는 Beer의 법칙에 의해서 엽면적지수(LAI; Leaf Area Index)로 변환될 수 있다. MODIS는 AVHRR에 비해 많은 밴드와 향상된 분광해상도 및 시간해상도를 가지고 있다. 수문학 분야에서 식생 정보는 입사하는 태양 에너지에 대한 지표면 상에서의 음영효과(shadow effect), 식생에 의한 차단(interception) 효과 및 강수에 대한 정보, 식생의 상층부에 의한 증산 정보, 그리고 현열과 잠열에 대한 조도 및 대기역학적 저항에서의 변화 등에 대한 정보를 간접적으로 제공할

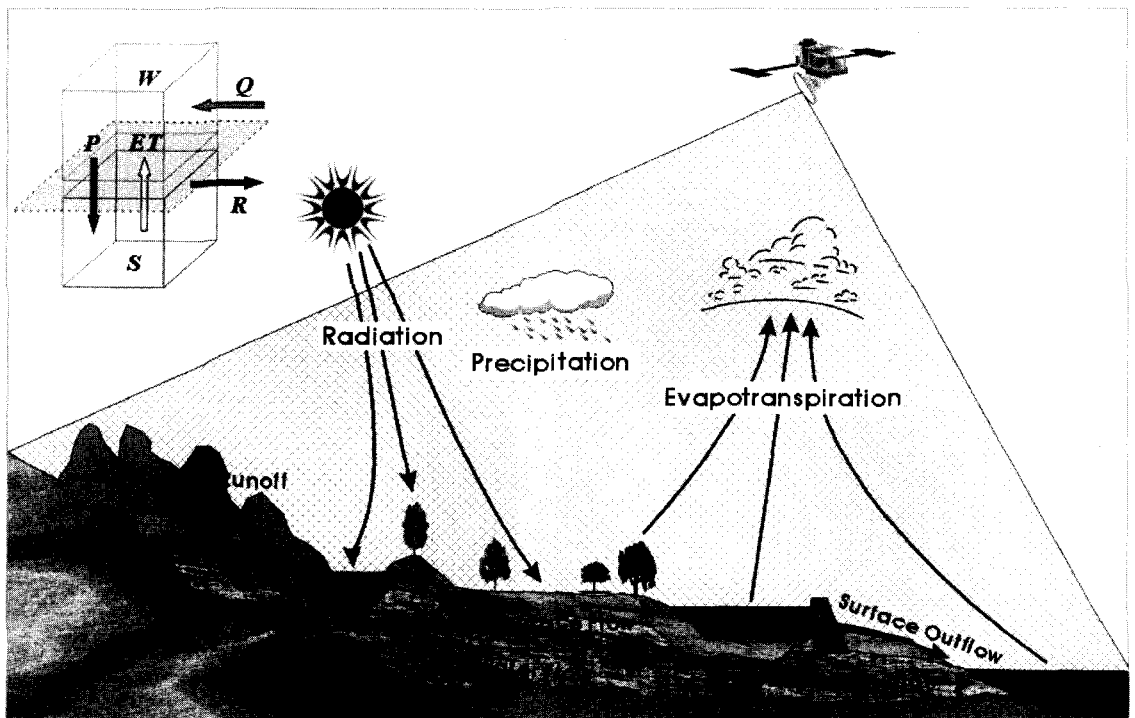


그림 1. 물순환에 있어서 원격탐사를 이용한 인자 추출 개념도

수 있다.

현재 식생자료는 수백 미터의 공간해상도를 가지는 자료의 생산이 가능하지만, 이러한 해상도를 가지는 자료를 수십 km<sup>2</sup> 정도의 소유역에 적용하는 것은 어렵다. 따라서, 그러한 경우에는 좀더 높은 해상도를 가지고 있는 SPOT, IKONOS 및 Landsat 등 상업용 위성자료를 활용하는 것이 좋다.

토양수분의 경우, 물 분자가 극성을 가지고 있기 때문에 마이크로파는 토양수분의 변화에 가장 잘 반응한다. 2002년 6월 AQUA 위성과 2002년 12월 ADEOS II의 성공적인 발사에 따라 AMSR(Advanced Microwave Scanning Radiometer)에 의한 자료가 하루에 두 차례 획득되고 있다. 즉, AQUA 위성의 경우에는 오전과 오후 1시 30분에, ADEOS 위성의 경우에는 오전과 오후 10시 30분 두 차례 관측하고 있다. AMSR 영상으로부터 토양수분을 계산하기 위한 알고리즘이 Jackson(1993)과 Njoku와 Li(1999)에 소개되었다. 6.9 GHz를 가지고 있는 AMSR의 C 밴드는 SSM/I(Special Sensor Microwave Imager)의 19.4 GHz보다 토양수분을 계산하는 데 있어 좀더 민감하다. 과거에는 19, 37 및 85 GHz를 가지는 SSM/I를 사용하여 토양수분을 관측했다. 이때, 민감도는 낮은 주파수에서 가장 좋았으며, 대기와 식생으로부터의 영향이 커짐으로써 관측 주파수가 증가할수록 민감도는 떨어졌다. 토양수분은 강수, 침투, 유출 및 증발산 등 수문학적 인자에 대한 지표면의 전체적인 반응을 반영하고 있다.

50km 정도의 공간해상도를 가지고 있는 토양수분 자료는 유역 스케일의 연구에 대해서는 부적합하며, 따라서 향후에는 10km 정도의 공간해상도를 가지는 원격탐사 시스템이 개발될 것으로 기대되며, 그 정도의 공간해상도를 가지는 자료도 유역 스케일의 모델링을 위해서 사용하기에는 부적합하다. 따라서, 원격탐사자료로부터 관측되는 토양수분은 유역과 주변에 대한 정량적인 참고자료로 사용될 필요가 있다. 다른 센서를 사용한 고해상도의 토양수분의 변화에 대한 연구가 현재 진행되고 있다.

지표면 온도의 경우 AVHRR의 TOVS(TIROS

Operational Vertical Sounder), AIRS(Advanced Infrared Sounder) 및 ASTER(Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) 등에 의해서 계산할 수 있다. 이러한 센서에 의해서 관측되는 열적외선 밴드를 이용할 경우 방사되는 에너지는 지표면 온도와 직접적인 관계를 가지고 있다. 지표면 온도는 에너지수지나 물수지와 직접적인 관련이 있으며, 일반적으로 증발산량이 증가하면 지표면 온도는 감소하게 된다.

지표면 온도는 현재 90 m 정도의 고해상도 자료로 획득되며, 방사량에 대한 소유역에서의 열적 반응 현상과 증발산과 에너지수지와와의 관계를 이해하는 데 쉽게 이용될 수 있다.

지표면 대기온도는 TVOS와 AVHRR로부터 쉽게 계산될 수 있으며, 최근에는 AIRS 자료로부터도 얻어질 수 있다. 지표면 대기온도는 지표면과 지표면 대기온도에서의 차이를 통해 현열의 계산에 있어서 중요한 역할을 한다. 대기온도가 약 50km 정도의 크기로 얻어지고 있지만, 수십 km의 이상의 큰 스케일에 대해서 대기온도의 공간적인 변화가 적기 때문에 소유역에 대해서 그대로 사용할 수 있다.

강우자료는 SSM/I, AMSR 및 TRMM(Tropical Rainfall Measuring Mission) 등 마이크로파를 이용하여 얻어지고 있다. 마이크로파는 대기 중의 수분에 반응하게 되며, 이러한 반응은 강우 확률로 변환될 수 있다.

강우는 지표 수문학에서 가장 중요한 인자이다. 하천에서의 수위 관측 자료가 없거나 적을 경우, 유역 출구에서의 유출은 유역 내의 강우량에 의해서 역으로 분석할 수 있다. 강우의 경우 1 내지 2km 정도의 공간적인 변화와 30분 이하의 시간적인 변화가 크기 때문에 정확한 공간 및 시간적인 관측이 필요하다. 대부분의 미세측 유역은 강우관측 자료의 부족이나 부정확하게 관측된 강우 자료에 의해서 어려움을 겪고 있다. 따라서, 원격탐사 자료는 또 다른 해결책을 제공할 수 있을 것으로 기대된다. 그러나, 아직 위성에 의한 원격탐사 자료의 경우 10 내지 20km 정도의 낮은 공간해상도와 하루나 이틀 정도의 시간해상도를

표 1. 미계측 구역의 수문인자 추출을 위한 원격탐사 자료 현황

수문 인자	위성명	파장대	해상도/정확도	World Wide Web
토양수분(□)	AMSR	Microwave	5~50km	<a href="http://weather.msfc.nasa.gov/AMSR">http://weather.msfc.nasa.gov/AMSR</a>
	SMOS*	Microwave	50km	<a href="http://www.esrin.esa.it/export/esaLP/smos.html">http://www.esrin.esa.it/export/esaLP/smos.html</a>
	HYDROS*	Microwave	3km, 40km	<a href="http://hydros.gsfc.nasa.gov">http://hydros.gsfc.nasa.gov</a>
강우(P)	TRMM/TMI	Microwave	20km	<a href="http://trmm.gsfc.nasa.gov">http://trmm.gsfc.nasa.gov</a>
	SSM/I	Microwave	50km	<a href="http://dmsp.ngdc.noaa.gov/html/sensors/doc_ssmi.html">http://dmsp.ngdc.noaa.gov/html/sensors/doc_ssmi.html</a>
	GPM	Microwave	4km	<a href="http://gpm.gsfc.nasa.gov">http://gpm.gsfc.nasa.gov</a>
증발량(E)/지표면습도	AIRS/AMSU	Infrared/Microwave	50km	<a href="http://daac.gsfc.nasa.gov/www/atmodyn/airs">http://daac.gsfc.nasa.gov/www/atmodyn/airs</a>
증산량(T)/식생지수	MODIS	Visible/Infrared	500m~1km	<a href="http://modis.gsfc.nasa.gov">http://modis.gsfc.nasa.gov</a>
	AVHRR	Visible/Infrared	8~16km	<a href="http://edc.usgs.gov/product/satellite/avhrr.html">http://edc.usgs.gov/product/satellite/avhrr.html</a>
	GLI	Visible/Infrared	250m~1km	<a href="http://sharaku.eorc.jaxa.jp/GLI/index.html">http://sharaku.eorc.jaxa.jp/GLI/index.html</a>
유출(R)	HYDRASAT*	Laser	5cm 정도	<a href="http://topex-www.jpl.nasa.gov/mission/topex.html">http://topex-www.jpl.nasa.gov/mission/topex.html</a>
	TOPEX	Laser	5cm 정도	
방사량(Rn)	GOES	Visible	1~8km	<a href="http://www.goes.noaa.gov">http://www.goes.noaa.gov</a>
	AIRS/AMSU	Infrared/Microwave	50km	<a href="http://daac.gsfc.nasa.gov/www/atmodyn/airs">http://daac.gsfc.nasa.gov/www/atmodyn/airs</a>
지표면 온도(H, G)	AIRS	Thermal Infrared	50km	<a href="http://daac.gsfc.nasa.gov/www/atmodyn/airs">http://daac.gsfc.nasa.gov/www/atmodyn/airs</a>
	AVHRR	Thermal Infrared	500m~1km	<a href="http://edc.usgs.gov/product/satellite/avhrr.html">http://edc.usgs.gov/product/satellite/avhrr.html</a>
	MODIS	Thermal Infrared	8~16km	<a href="http://modis.gsfc.nasa.gov">http://modis.gsfc.nasa.gov</a>
구름정보	GOES	Visible/Infrared	1~8km	<a href="http://www.goes.noaa.gov">http://www.goes.noaa.gov</a>
수증기(LE)	AIRS/AMSU	Infrared/Microwave	50km	<a href="http://daac.gsfc.nasa.gov/www/atmodyn/airs">http://daac.gsfc.nasa.gov/www/atmodyn/airs</a>

\* 발사 예정인 위성

가지는 강우자료를 제공할 수 있는 것이 현실이다. 그러나, 기상 레이더는 1 내지 2km 정도의 공간해상도와 15 내지 30분 정도의 시간해상도를 가지는 자료를 제공하고 있다. 이러한 것은 결국 수문학적인 예측을 보다 향상시킬 뿐만 아니라 미계측 구역에 대한 예측의 불확실성을 감소시킬 것이다.

표 1은 수문 인자를 추출할 수 있는 각종 원격탐사 자료에 대한 현황을 소개한 것으로, 구체적인 원격탐사 센서에 대한 특성이나 자료의 활용 방법 등에 대해서는 표 1에 있는 인터넷 주소를 참고하기 바란다. 또한, 현재 미항공우주국(NASA)에서 추진하고 있는 HYDRA-SAT(HYDRological Altimetry SATellite)에 대한 구체적인 정보는 아직 인터넷에서 찾아 볼 수 없었으나, 성공적인 발사가 이루어진다면 하천이나 호

수 등의 유출량이나 체적 등의 평가가 가능하게 됨으로써 미계측 구역의 물순환 과정을 이해하는 데 좋은 자료를 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

### 위성자료의 역할

현재 물순환 과정을 보다 과학적이고 체계적으로 해석하기 위한 다양한 인자들을 제공할 수 있는 다양한 공간해상도 및 시간해상도를 가지는 위성의 발사 계획이 미국이나 유럽 등 세계 각국에 의해서 추진되고 있어 향후에는 원격탐사 자료의 활용성이 크게 증가할 것으로 예측되고 있다. 그림 1에서 볼 수 있는 바와 같이 물순환 과정을 규명하기 위해 필요한 여러 가지 인자들이 서로 관련되어 있기 때문에 원격탐사

자료의 다양성에도 불구하고 사용에 있어서는 많은 문제점이 있는 것이 사실이다. 그러나, 미계측 유역의 경우에는 이러한 여러 가지 원격탐사 자료를 함께 활용함으로써 수문학적 순환과정을 좀더 과학적이고 정량적으로 이해할 수 있는 시너지 효과가 있을 것이다. 또한, 이러한 시너지 효과가 발휘될 수 있도록 하기 위해서는 원격탐사 및 수자원 분야의 전문가 등 관련 전문가들이 서로 협력하여 정보를 공유하는 것이 중요하다.

미계측 유역의 수문학적 순환과정을 과학적이고 정량적으로 이해하고, 관련 인자들의 평가를 위해 원격탐사자료를 활용하는 것은 수문학 분야에 있어서 다음과 같은 과학적인 목표를 달성하는 데 기여할 수 있을 것이다.

첫째, 수문 인자의 예측에 있어 불확실성을 평가하고, 아울러 미계측 유역 내의 물순환 과정과 관련된 각종 수문 인자들의 정확한 예측을 위해 필요한 전문가들의 기술력 향상

둘째, 수문학적 예측 과정에서 발생할 수 있는 불확실성을 제거하기 위해 물순환 과정에 있어서 기후나 지형의 역할에 대한 지식과 이해를 넓히는 것

셋째, 수문자료와 예측 가능한 불확실성 사이의 연결고리를 찾아 해결함으로써 수문학적 예측에 있어서 관련 자료들의 가치를 증명하고, 향후 보다 향상된 물순환 과정에 대한 이해를 위해 필요한 자료들의 기준이나 항목 등의 제시

넷째, 수문학의 과학적인 기초를 발전시키고, 지속 가능한 유역관리 등에 대한 정확하고 과학적인 기초 정보 제공

이상과 같은 수문학 분야의 과학적인 목표를 달성하기 위해서 원격탐사자료는 많은 역할을 할 수 있을 것으로 기대된다. 수문모델의 입력자료로 활용되고 있는 식생정보나 대기 온도 등과 지표면 유출이나 하천 유출의 계산에 있어서 검증 변수로써 이용되고 있는 지표면 온도나 토양수분 등과 같은 원격탐사자료

로부터 얻을 수 있는 정보를 이용함으로써 미계측 유역 내의 물순환 과정에 대한 보다 체계적이고 과학적인 규명이 가능하게 될 수 있다. 또한, 지표면에 대한 공간적인 정보의 획득이 가능해짐으로써 지표면 상에서 발생하는 물의 흐름에 대한 특성을 파악하여 포화 정도의 분석이나 식생이 크기, 그리고 침투가 발생하는 지역 등에 대한 분석이 쉽게 이루어질 수 있다.

원격탐사기술의 발전속도를 고려할 때, 수문 모델링의 입력 자료를 원격탐사자료로부터 활용할 경우 시너지 효과가 발생하여 좀더 과학적이고 정확한 물순환 과정에 대한 이해가 가능할 것이다. 특히, 수위나 체적을 관측할 수 있는 HYDRASAT 등과 같은 위성 자료의 경우, 현장에서 관측한 자료를 이용하여 작성한 유출곡선 등과 함께 이용할 수 있을 것이다. 또한, 두 자료 사이에서 발생할 수 있는 오차의 규명을 통해서 미계측 유역에 대한 수문 자료의 정확도를 향상시킬 수 있다.

## 결론

수자원에 대한 향후 평가를 위해서는 지표수와 지하수의 근원에 대한 보다 정확한 예측이 필요하며, 원격탐사자료를 활용하여 지표수와 지하수에 대한 공간적인 매핑이 가능할 수 있다. 우주로부터 지구상에 존재하고 있는 수자원에 대한 정확한 평가는 위성 센서와 현존하는 관측망 자료의 결합에 의해서 해결할 수 있는 향후의 과제이다. 실제로, 관측되지 않은 지구상의 수자원에 대한 정량적 분석은 위성 수문학(satellite hydrology) 분야에 있어서 정의가 명확하고 중요한 문제가 되고 있다.

현재 유역의 크기가 수십 km<sup>2</sup>보다 작은 유역의 경우 원격탐사 자료를 활용하여 모든 수문 인자를 추출하는 것은 불가능하다. 지금까지 획득되고 있는 원격탐사자료의 공간해상도가 매우 크기 때문에 10 내지 1,000m<sup>2</sup> 정도의 크기를 가지는 사면 프로세스에 있어서 광학 위성이나 레이더 자료는 크게 활용되지 않고 있는 실정이다. 그러나, 10 내지 100km<sup>2</sup> 정도의 크기를 가지는 중간 유역은 대부분의 위성 자료나 레

이더 자료를 활용할 수 있으며, 100 내지 1,000km<sup>2</sup> 정도의 크기를 가지는 대유역은 다양한 해상도의 자료가 유효하기 때문에 위성 및 레이더 자료의 활용이 가장 적절하다고 할 수 있다.

미계측 영역에 있어서 원격탐사 자료는 지표면 상에서 관측되는 각종 수문 인자들의 정확도나 결측자

료 등의 보완을 위한 가교 역할을 할 수 있으며, 원격탐사분야의 기술발전에 의해서 우주로부터 소유역에 대한 관측도 가능할 것으로 기대된다. 아울러, 수문분야의 해석공간이 점과 같은 1차원 공간에서 3차원 공간으로 확대될 수 있어 과학적이고 체계적인 물순환 과정에 대한 규명이 가능할 수 있을 것이다.

### 참/고/문/헌

채효석 외 6인, 2003. 환경원격탐사, 시그마프레스.  
Alsdorf, D. E. and Lettenmaier, D. P., 2003. Tracking fresh water from space, Science, Vol. 301, pp. 1491~1494.  
Jackson, T. J., 1993. Measuring surface soil moisture using passive microwave remote sensing, Hydrological Process, Vol. 7, pp. 139~152.  
Lakshmi, V., 2004. The role of satellite remote sensing in the prediction of ungauged basins, Hydrological Process, Vol. 18, pp. 1029~1034.

Njoku, E. G. and Li, L., 1999. Retrieval of land surface parameters using passive microwave measurements at 6 to 18GHz, IEEE Trans. On Geoscience and Remote Sensing, Vol. 41, No. 2, pp. 215~229.  
<http://www.swa.com/hydrawg>  
<http://daac.gsfc.nasa.gov/hydrology>  
<http://www.noaa.gov/satellites.html>  
[http://www.jaxa.jp/missions/projects/sat/eos/index\\_j.html](http://www.jaxa.jp/missions/projects/sat/eos/index_j.html)