韓國水資源學會誌 論文
第29卷 第5號·1996年 10月
pp. 203~214

人工衛星 資料에 근거한 한반도 물수지 분포의 推定

Estimation of Water Balance based on Satellite Data in the Korean Peninsula

신 사 철*
Shin, Sha Chul

Abstract

Quantifying water balance components is crucial to understanding the basic hydrology and hydrochemistry. An importance of water balance has been suggested in order to grasp actual condition of water resources and environmental changes including climatic changes. The present paper proposes an evaluation method of the water balance components based on vegetation monitoring from remote sensing data. In this study, evapotranspiration model adopts a direct method by using NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) calculated from NOAA/AVHRR data and the detailed description of water balance by using the evapotranspiration in all over the Korean Peninsula. Areal distribution data sets of evapotranspiration, runoff ratio, water surplus and deficit are produced using NDVI and simplified water balance model. This method enables to discuss the hydrological problems for North Korea where enough meteorological and hydrological data are unavailable.

요 지

물수지항의 정량적 평가는 수문학의 기본이 되는 중요한 개념이다. 물수지는 수자원의 실태 파악과 기후 변화를 포함한 환경 변화를 이해하기 위하여 그 중요성이 인식되고 있다. 본 논문은 인공위성 자료로부터 얻을 수 있는 식생자료를 근거로 하여 물수지항을 평가하기 위한 방법을 제안한다. 본 연구에서는 NOAA/AVHRR 자료로부터 얻어지는 식생지표 NDVI를 이용하여 직접 실제증발산량을 구하는 방법을 개발하여 그 결과로서 한반도 전역에 대한 물수지해석을 수행한다. 증발산량, 유출률, 과잉수분량과 부족수분량의 공간적 분포를 NDVI와 간략한 물수지모형을 이용하여 얻고 있다. 이 방법을 이용함으로서 충분한 지상 자료를 얻을 수 없는 북한 지역을 포함한 한반도 전역에 대한 수문학적 문제의 논의가 가능하게 된다.

* 한국수자원공사 수자원연구소 선임연구원

1. 서 론

물수지는 수자원 개발, 환경보전 등을 생각할 때 기본이 되는 중요한 개념이다. 그 이유는 更新 가능한 자원으로서 수자원을 이용하기 위해서는 물수지의 實態 把握이 불가결하며 또한 생태계가 물의 흐름에 규제되어 인간 활동이 전개되기 때문이다.

최근, 지구 환경의 관심이 높아지면서 공간적으로도 廣域的인 연구가 활발해 지고 있다. 기후 변동을 포함한 환경 변화의 문제는 廣域 물수지 파악의 중요성을 示唆하고 있다. 그 때문에 현재 이용가능한 全 地球規模의 자료를 이용한 물수지해석의 例가 보고되고 있다. Willmott와 Rowe(1985), Legates와 Mather(1992)는 修正 Thronthwaite 물수지모형에 의한 全 지구 물수지의 결과를 보고하였다. 그러나, 이들의 연구는 全 地球를 대상으로 하고 있기 때문에 제한된 자료만을 이용하여 대단히 簡略化된 방법에 의해 물수지를 분석하고 있다. 따라서, 어느 특정 지역 물수지의 時間的, 空間的인 분포를 정량적으로 평가하기 위해서는 어려움이 많다. 본 연구에서는 대상 지역을 한반도로 규정하고 한반도 내에서의 각 물수지항의 定量的 분포를 파악하고자 한다.

여러 종류의 水文量 중에서 蒸發散은 지표로부터 수분이 氣化되어 대기 중으로 放出되는 현상으로서 특정 지역의 물수지를 생각할 때 중요한 量임에도 불구하고, 그 廣域의 분포량을 지표면 상황을 직접 고려하여 산정 가능한 방법은 확립되어 있지 않다.

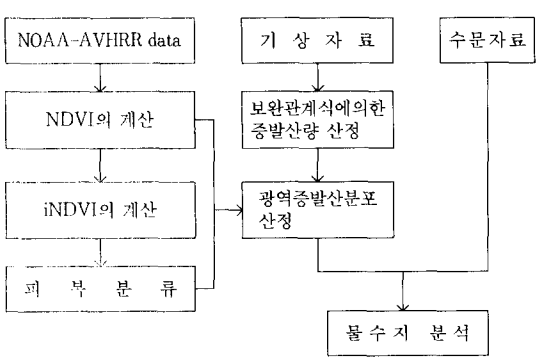


그림 1. 연구의 흐름도

그러나 廣域 蒸發散量의 파악이 불가능한 이상 서로 관련되어 있는 각 물수지항의 분포를 파악한다는 것은 상당히 어려운 문제가 야기된다. 따라서, 본 연구에서는 인공위성 자료로부터 비교적 容易하게 파악될 수 있는 植生情報를 토대로 한 증발산량의 산정방법을 개발하여 그에 파급되는 각 물수지항의 분포를 추정하고자 한다. 개략적인 연구의 흐름도를 그림 1에 표시하였다.

2. 廣域蒸發散 推定 模型

2.1 植生情報의 獲得

Remote sensing의 가장 보편적인 응용의 하나는 陸域의 식생 평가 및 그의 monitoring이다. 여기서 식생상황을 평가하기 위한 지표로서 NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)가 폭넓게 이용되고 있다(Justice 등, 1985 ; Tucker 등, 1985a,b ; Townshend와 Justice, 1986 ; Benedetti 등, 1994).

廣域面에 있어서 槪略的인 식생상태를 파악하기 위해서는 NOAA위성에 탑재되어 있는 AVHRR 센서가 有效하다. NOAA/AVHRR data를 이용하면 NDVI는 다음식으로 정의된다.

$$NDVI = \frac{Ch.2-Ch.1}{Ch.2+Ch.1} \quad (1)$$

여기서 Ch.1은 Channel 1(可視)의 반사율이며, Ch.2는 Channel 2(近赤外)의 반사율이다.

식물의 잎에 포함되어 있는 클로로필은 可視域의 波長帶를 잘 흡수한다. 그 결과 可視域의 赤 band의 반사율은 낮아지게 된다. 또한, 近赤外域에서는 반사율이 대단히 높아진다. 이와 같은 赤band에서의 강한 吸收와 近赤外 band에서의 강한 反射를 갖는 특수성에 의해 可視, 近赤外 領域이 식생조사에 이용되고 있다.

또한, 어느기간중의 NDVI의 總量을 定量的으로 표현하기 위하여 다음과 같은 iNDVI(integrated NDVI)도 이용되고 있다.

변수가 많아지게 되며 그에 대응하는 많은 위성자료를 준비하지 않는 이상 전체의 경향은 얻어지지 않는다. 따라서, 현재의 data set로부터 最適의 n의 값을 구할 필요가 있다.

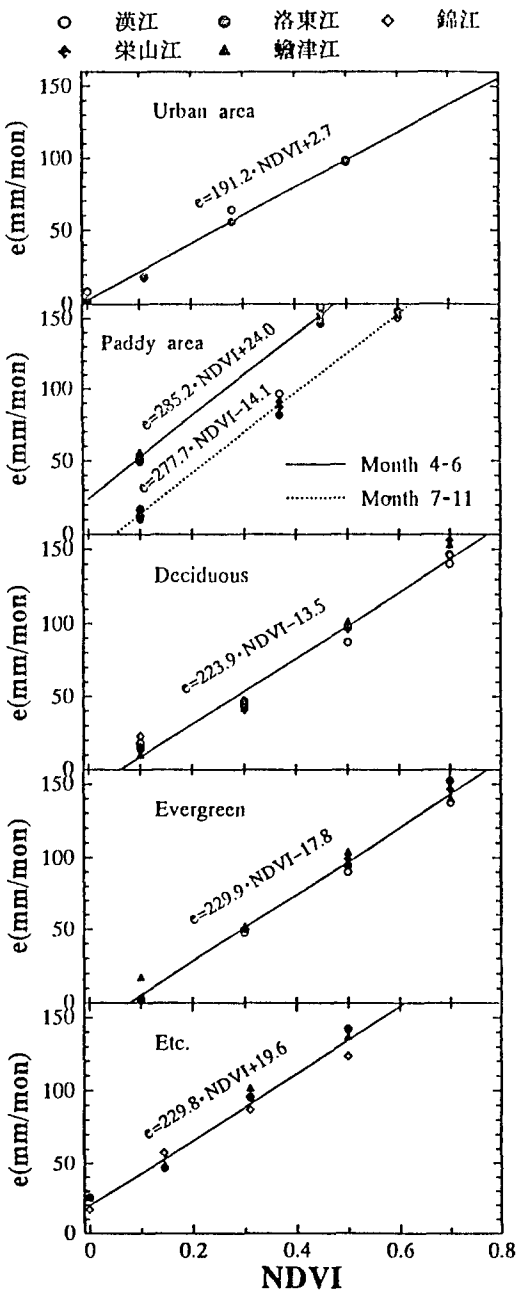


그림 2. NDVI와 증발산량의 관계

우선 우리 나라 5대유역에 대하여 1989년 4월부터 11월까지의 대표 NDVI를 이용하여 NDVI와 증발산량과의 관계를 계산하였다. 본 연구에서는 월 단위의 증발산량으로서 목적변수가 8개(4월~11월)이며, 논 이외에는 n=4의 경우에 가장 좋은 相關關係가 얻어졌다. 논의 경우, 4월~6월의 NDVI는 낮은 값을 나타내지만, 水面으로부터의 증발에 의해 증발산량은 비교적 많아지게 된다. 따라서, 수면으로부터의 증발에 의해 증발산량이 지배되는 시기와 벼의 성장과 함께 증산에 의해 지배되는 시기로 2개의 경우로 분리하여 적용하는 것

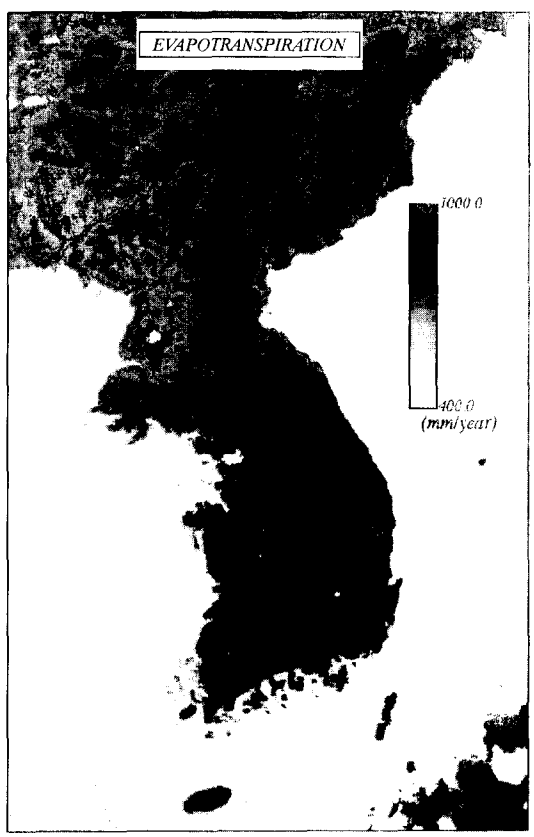


그림 3. 한반도의 증발산 분포(1989년)

$$iNDVI = \frac{\Sigma(NDVI_j \times d_j)}{\Sigma d_j} \quad (2)$$

여기서, $NDVI_j$는 j번째의 NDVI이며, d_j는 $NDVI_j$에 대응하는 관측 일수이다.

본 연구에서 이용된 위성 자료는 1989년 4월부터 11월까지로 積雪의 영향으로 지표면의 정확한 관측이 불가능한 겨울철의 자료는 대상에서 제외하였다. 또한 지상의 관측을 沮害하는 要素가 되는 구름이 존재하는 경우 NDVI는 실제보다 대단히 낮아지게 된다. 따라서, 1개월에 3-4개의 맑은 날의 위성자료를 선정하여 각 畵素別로 NDVI가 最大値를 나타내는 자료를 선택하여 구름의 영향이 최소화된 NDVI 화상을 작성하였다.

또한 각 피복 조건별로 고유의 특징적인 식생분포를 형성한다는 점으로부터 NDVI를 이용하여 한반도의 槪略的인 피복 분류를 수행하였다. 이것은 NDVI의 계절 변화로부터 공통의 식생환경을 하나의 項目으로 분류하는 것으로, 각 항목별의 물수지를 산정하기 위한 것이다. 그 분류 방법에 대해서는 신사철 등(1996)에 자세히 기술되어 있으므로 여기서는 생략하기로 한다.

2.2 廣域蒸發散量의 算定

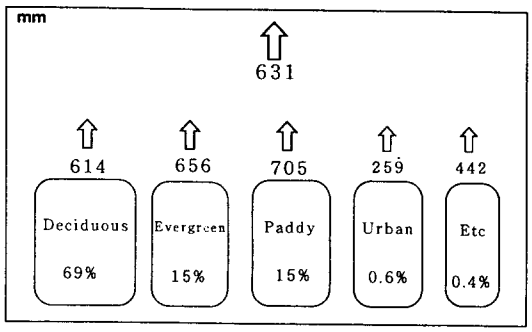
다양한 지표면 過程이 관계하는 증발산량을 추정하기 위해서는 廣域에서의 土地利用 狀況, 水文條件을 고려하여 얻을 수 있는 인공위성 자료의 이용이 특히 유효하다. 한반도는 그 대부분이 森林으로 구성되어 있으며 식생을 변수로 하는 廣域蒸發散分布의 추정법은 대단히 유효하게 이용될 수 있다. 어느 지점의 NDVI가 그 지점의 식생상태를 잘 표현하고 있다는 것은 이미 言及하였다. 따라서, NDVI와 증발산량과는 기후 조건 등의 밀접한 관계가 있다는 점에 着眼하여 인공위성 자료를 이용하여 광역면에서의 증발산량을 추정한다. 申士澈과 澤本正樹(1995)에 의해 한강 유역과 같이 森林이 많은 지역에 있어서는 NDVI와 증발산량과의 사이에 높은 상관관계가 성립된다는 점이 확인되었다. 따라서 다음과 같은 NDVI와 증발산량과의 관계 추정법을 개발한다. NDVI의 히스토그램(histogram)이 식생의 계절 변화를 잘 반영하고 있는 점으로부터 NDVI를 어느 일정한 값으로 分割하고, 각각의 화소수를 변수로 하는 다음의 重回歸分析을 피복 조건별로 年間을 통하여 실시함으로서 어느 지점의 NDVI에 대응하는 그 지점의 증발산량이 구해진다.

$$E = \frac{1}{P} \sum_{i=1}^{n} e_i p_i \quad (3)$$

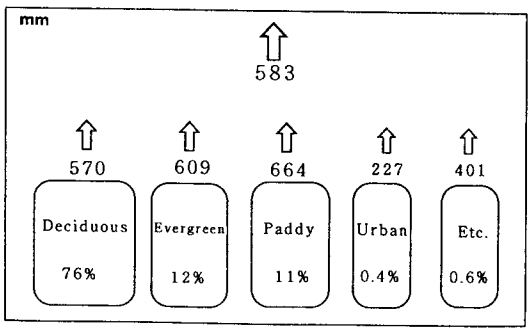
여기서 E=평균증발산량(mm/mon), P=총 畵素數, p_i=분할된 각 단계에서의 화소수, e_i=NDVI에 대응하는 증발산량(mm/mon), n=NDVI의 분할 수이다.

여기서 본 해석을 수행하기 위해서는 실제증발산량을 구할 필요가 있다. 그러나 현단계에서 복잡한 지형 조건 등을 고려하여 직접 실제 증발산량을 구하는 것은 불가능에 가깝기 때문에 旣存의 방법을 이용하여 평균증발산량을 구하기로 한다. Morton (1978)은 실제증발산량과 Penman법에 의한 가능증발산량은 서로 補完關係에 있으며 兩者의 합은 Priestly와 Taylor(1972)에 의한 가능증발량의 2배에 상당한다는 관계식을 제안하였다. 그러나 Morton에 의한 관계식은 산정 과정에서 경험식을 이용하여 구하는 요소가 대단히 많으며, 불필요하게 복잡한 산정법을 취하는 경향이 지적되어 왔다. 따라서, Brutsaert와 Stricker(1979)에 의한 Penman법과 Priestly와 Taylor법을 직접 이용할 수 있는 補完關係式을 이용하여 실제증발산량을 각 피복별로 算定하였다.

보완관계식으로부터 구한 증발산량을 목적변수, NDVI 자료로부터 구해지는 분할된 각 段階에서의 화소수를 설명변수로 하면, 회귀분석에 의해 n개의 회귀계수 e_i가 구해진다. 즉, 어느 화소에서의 NDVI를 위성자료로부터 구해 놓으면, 그 NDVI에 대응하는 e_i의 값이 그 지점에서의 증발산량이 된다. NDVI의 히스토그램 분할 수 n은 결과의 정확도를 左右하는 중요한 변수이며, NDVI에 의한 증발산량과 보완관계식에 의한 값을 일치시키기 위해서는 n을 가능한 한 목적변수의 수만큼 크게 할 필요가 있을 것이다. 그러나, n의 값이 커질수록



(a) 한 국



(b) 북 한

그림 4. 남북한의 각 피복조건별의 년증발산량(1989년)

으로 하였다. 이 경우, 목적변수의 감소에 의해 4월~6월에는 n=2, 7월~11월은 n=3으로 정하여 각각의 상관을 구하였다. 이로부터 우리 나라 5대유역의 피복 조건별 NDVI와 증발산량과의 관계를 추정할 수 있으며 이 양자의 사이에는 상관이 높은 비례 관계가 확인되었다. 따라서, 이 관계를 한반도 전역으로 확장하여 피복 조건별의 NDVI와 증발산량과의 관계를 구할 수 있다. 각 유역에서 얻어진 NDVI와 증발산량과의 관계를 피복 조건별로 직선으로 근사시키면, 그림 2과 같이 각각의 피복에 대하여 NDVI를 변수로 하는 일차회귀식을 구할 수 있다. 이식을 한반도 전역에 적용하면, 1989년 4월부터 11월까지의 증발산 분포가 얻어진다. 그림 3는 한반도의 1989년의 증발산분포를 표시하고 있으며 그림 4은 남북한의 각 피복조건별의 년증발산량을 표시한 것이다.

3. 북한의 대표 유역에 대한 유출량 산정

3.1 Tank 모형

유출 계산에 있어서 모형의 구조가 간단하고 이해가 용이하며, 어느 정도 물리적인 의미가 있다는 점, 또한 비교적 정확도가 높다는 점으로부터 일본의 菅原正巳(1972, 1979)이 제안한 Tank 모형이 이용될 수 있다. 直列 탱크의 유출수문곡선은 上部의 탱크일수록 강우에 대하여 敏感하게 대응하며, 下部의 탱크일수록 서서히 상승 및 하강하는 성분을 표시한다. 각 段의 탱크가 구체적으로 표면유출, 중간유출, 또는 지하수유출의 각 성분에 대응하는 것은 아니나, 상부의 탱크일수록 표면유출에 가까운 성분을, 하부의 탱크일수록 지하수유출에 가까운 성분이 된다. 이 모형은 선형 응답에서 비선형응답까지 대응하며, 단기유출로부터 장기유출까지 폭 넓게 사용할 수 있으나, 실제의 유출해석을 수행함에 있어서는 적절한 모형정수의 결정이 이 방법의 최대의 결점이다.

비선형함수의 최소치를 검색하기 위한 방법으로서 Powell의 공액방향법(Powell, 1964)은 Tank 모형과 같이 미정 계수가 많은 유출모형의 동정에는 상당히 유력한 방법중 하나이다. 그러나, Powell법은 응답면을 타원면으로 보아 그의 공액방향에 해를 검색하는 방법으로서, Tank 모형과 같이 미정계수의 변화폭이 클 경우에는 응답면이 극단적으로 편평하게 되어 공액방향의 결정에 어려움이 발생하여 수렴하지 않는 결과가 생긴다. 이 난점을 해소하기 위한 하나의 방법으로서 각 모형정수를 각각의 초기치로 기준화한 것을 변수로 하여 응답면을 원형에 가깝도록 한 基準化Powell법(Standardized Powell Method, SP법)이 제안되었다(永井明博과 角屋, 1979 ; 角屋과 永井明博, 1980). 이 방법에 의해 계산효율이 월등히 개선되며 저류함수법 등에도 유용하다고 보고하고 있다.

3.2 북한의 주요유역에 대한 월단위 유출량 산정

본 연구에서 사용한 Tank 모형으로는 그림 5와

같은 直列4段 탱크로서 총 16개의 미정계수를 기준화 Powell법에 의해 최적동정을 수행하였다. 그러나 북한 지역에 대한 유출량의 관측치를 얻는 것은 현실적으로 불가능하기 때문에 Tank 모형의 정수를 직접 산정하는 것은 불가능하다. 따라서, 우리 나라의 유역에 대한 정수를 북한의 유역에 준용하는 것으로 한다. 우선, 우리 나라의 5대유역에서의 월단위 유출량을 Tank 모형으로부터 산정한다. 인공적으로 水量이 조절되는 대규모 댐을 경계로 하여 12개의 소유역으로 분할하고 상류부의 소유역에서의 유출량이 하류부의 소유역에의 유입량으로서 유출량의 계산이 이루어진다. 또한, 유역 최하류부의 수위관측소로는 조석의 영향이 없는 관측소 중 가장 신뢰도가 높다고 생각되는 관측소를 선정하여 수위-유량 관계식을 이용하여 수위를 유량으로 환산하였다.

본 유출계산의 목적은 우리 나라의 유역에 대한 유출량을 구하는 문제가 아니라, 북한 지역에도 적용 가능한 모형정수를 실측자료가 이용 가능한 우리 나라에서 유추하기 위한 것이다. 이를 위하여 각소유역의 정수가 그다지 분산이 크지 않게 하여 평균을 취하는 것을 목표로 한다. 그러나 일시에 모든 정수를 동정하게 되면, 각 소유역 단위에서 구한 정수는 분산이 커지게 되며, 따라서 다음과 같은 방법으로 동정을 수행하도록 하였다.

월단위의 유출을 고려할 때, 총유출량이 많으며 그 유출량은 제1, 2단 탱크에 의하여 지배된다. 즉, 제3, 4단 탱크로부터의 유출량은 월단위의 많은 유출량의 정확도를 좌우할 정도의 양이 아님을 알 수 있다. 따라서, 제1, 2단 탱크의 정수를 적당한 값으로 고정시키고, 제3, 4단 탱크의 정수를 동정한다. 다음은, 얻어진 제3, 4단 탱크의 정수와 고정된 제1,2단의 정수를 이용하여 재동정한다. 이

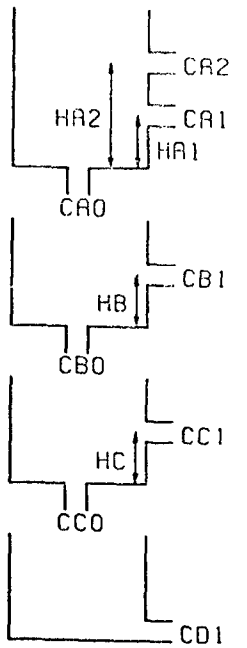


그림 5. 직렬4단 Tank 모형

와 같은 방법을 반복하여 표 1과 같은 Tank 모형의 정수를 얻을 수 있다.

북한지역에 대하여 지리적으로 가장 가깝고, 기후학적, 수문학적 특징이 가장 유사하다고 생각되는 한강유역의 평균정수를 이용하여 유출량을 산정하도록 한다. 그림 6는 한강유역의 평균정수를 이용하여 유출계산을 수행한 결과(Q_{cl})와 우리 나라 5대유역의 평균정수를 이용한 결과(Q_{ol})를 비교한 것이다. 제1, 2단 탱크의 측방유출孔의 정수를 보면, 5대유역의 평균치보다 한강유역의 평균정수가 약간 큰 값을 나타내고 있으며, 이로 인하여 한강유역의 평균정수를 이용할 경우에 약 20% 크게 산정된다. 이런 점으로볼때, 한강유역의 평균정수

표 1. Tank 모형의 최적화된 정수

	CA1	CA2	CA0	HA1	HA2	CB1	CB0	HB	CC1	CC0	HC	CD1
Han Gang	0.663	0.247	0.041	25.64	33.93	0.102	0.0069	29.94	0.0129	0.0199	46.59	0.00006
Nakdong Gang	0.467	0.166	0.064	39.49	56.11	0.083	0.0219	43.15	0.0145	0.0050	56.54	0.00025
Keum Gang	0.295	0.256	0.091	10.85	32.63	0.034	0.0095	29.87	0.0017	0.0013	41.95	0.00099
Yongsan Gang	0.570	0.225	0.103	39.56	52.90	0.018	0.0499	86.79	0.0151	0.0666	14.52	0.00233
Sumjin Gang	0.674	0.158	0.059	36.22	49.30	0.090	0.0181	57.51	0.0453	0.0266	59.63	0.00006

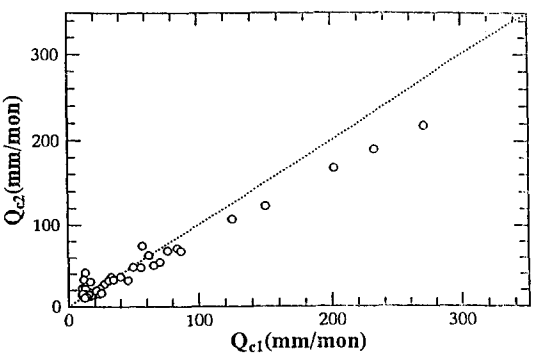


그림 6. 유출계산의 비교
(Q_{c1} : 한강유역의 평균점수를 이용
Q_{c2} : 5대유역의 평균점수를 이용

를 이용하여 북한의 유출량을 구할 경우, 同程度의 오차가 포함될 가능성을 시사하고 있다. 이 결과로부터 정확한 정량적 평가는 어려운 점이 많으나, 유출량의 자료를 전혀 얻을 수 없는 상황하에서 어느 정도의 정확도로서 북한의 주요유역에 대한 유출량을 구하는 것어 가능하게 될 것이다.

4. 한반도의 물수지

4.1 주요유역의 물수지

유역규모의 물수지를 검토하기 위한 물수지식은 지하수유출이 무시가능한 경우, 다음과 같은 식이 성립한다.

$$P = Q+E\pm\Delta S \qquad (4)$$

여기서 P=강수량(mm/year), Q=유출량(mm/year), E=증발산량(mm/year), ΔS=저류량의 변화(mm/year)이다.

여기서 강수량과 증발산량의 분포는 이미 前項에서 구하였으며, 유출량의 자료로서 우리 나라의 경우에는 관측치가, 북한의 유역에 대해서는 계산치가 이용되어진다. 또한, 저류량 S의 경우는, ΔS=0가 되는 기간을 선정함으로서 해결 가능하다. 본 연구에서는 년간의 ΔS를 평가할 필요가 있으므로 이 기간을 1월부터 12월까지로 한다. 이것은 우리 나라의 경우, 우기와 건기가 비교적 확실하며 年間을 통하여 습윤 및 건조상태가 반복됨에 착안해 볼 때, 이 기간의 ΔS는 대단히 적은 양이 되며, 다른 물수지항과 비교하여 무시할 수 있는 量으로 생각할 수 있다. 이 경우, 년간의 물수지는 다음과 같이 간단하게 표시된다.

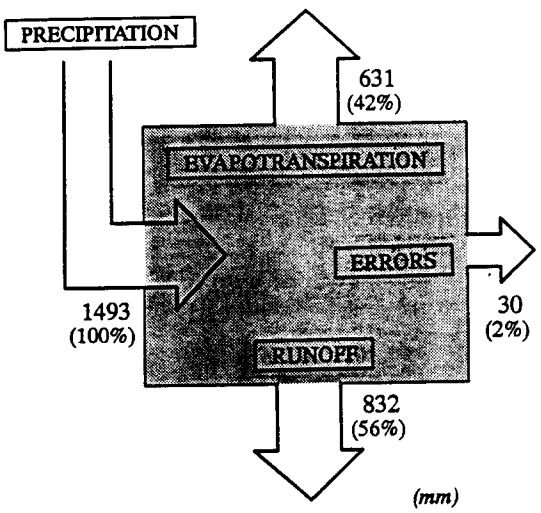
$$P = Q+E \qquad (5)$$

그림 7에 한반도에 대한 1989년의 물수지를 표시하였다. 우리 나라의 경우, 강수량의 약 56%가 유출되며, 약 42%에 상당하는 量이 증발산에 의해 손실되어 진다. 또한, 1990년과 1991년의 수문자료로부터 우리 나라 5대유역에서의 평균유출률을 구해 보면 각각 72%와 51%가 유출된다. 1990년 9월에 대규모의 홍수가 발생하였으며 그 결과로서 년간의 유출률이 크게 산정되었다고 생각할 수 있다. 이에 비하여, 1991년은 1989년에 비하여 전체적으로 강수량이 적고, 그로 인하여 유출률도 약간 작다. 결국, 1989년의 강수량은 평년보다 약간 많은 양이며, 유출률도 약간 큰 값으로 생각할 수 있다. 그러나 북한 지역에 대해서는 강수량의 50% 이상이 증발산에 의해 손실되어 유출량보다 증발산량의 비율이 크게 나타나 있다. 따라서, 북한지역의 물수지에 있어서는 증발산량의 역할이 상당히 중요함을 알 수 있다.

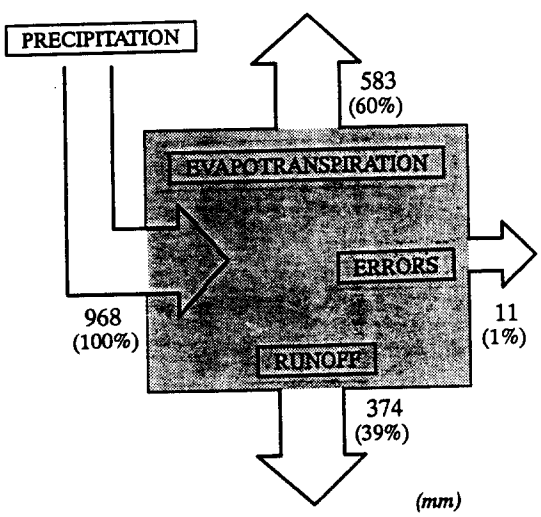
또한, 1년간의 물수지기간이 정확하다면, 식(5)가 만족되어져야 하나, 년간의 물수지를 보면, 반드시 오차를 포함하고 있다. 이것은, 실제로 유역 내의 저류량변화를 무시할 수 있는 기간을 선정하는 것은 불가능한 것 또는, 수문자료의 정확도의 문제에 의한 것으로 생각할 수 있다. 이들의 불확실성을 고려할 때, 한반도의 주요10대유역에서의 1989년의 물수지는 잘 일치한다고 말할 수 있을 것이다.

4.2 기후학적 물수지의 평가

기후학적 물수지법은 기후 구분을 위하여 Thronthwaite에 의해 개발된 이래, 다양한 수문학적



(a) 남 한



(b) 북 한

그림 7. 한반도의 물수지(1989년)

문제의 정량적인 정보를 얻는 하나의 방법으로서 응용되어 왔다(Legates와 Mather, 1992).

물의 공급(강수)과 기후학적 물수요(증발산량)와의 비교에 의해 복잡한 조건하에서의 물의 보류량 등의 정보가 파악 가능하다. 여기서 부족수분량(D)은 기후학적 물수요와 실제의 공급량과의 차로 정의된다. 또한, 과잉수분량(S)은 식물에 의한 수요량 이상의 수분량으로 정의된다. 부족수분량은 식물의 성장을 유지하기 위하여 관개 등에 의하여 공급되어야 할 양이다. 또한, 과잉수분량은 지하에 침투하는 양과 하천수에 의해 손실되는 수분이다. 과잉수분량에는 표면류와 중간류에 의한 유출량을 포함하고 있다. 또한, 강수량 분포의 계산은 건설교통부 관할의 우량관측소 중 결측이 없는 모든 우량관측소로부터 관측된 자료로부터 각 화소에서의 강수량을 보간하여 구한다. 보간 방법으로는 결측강우량 보완방법으로 널리 사용되고 있는 거리 가중 평균법인 RDS(Reciprocal Distance Squared)방법을 이용하였다. 그러나, 북한의 경우에는 기상청에서 발행하고 있는 기상월보로부터의 강수량 등치선도를 이용하여 보간하였다.

$$S_i = P_i - E_i \tag{6}$$

$$D_i = PE_i - P_i \tag{7}$$

여기서 S_i=과잉수분량(mm/year), D_i=부족수분량(mm/year), P_i=강수량(mm/year), E_i=실제증발산량(mm/year), PE_i=가능증발산량(mm/year)이다.

이 관계를 이용하여 한반도에 있어서 1989년의 과잉수분량과 부족수분량을 구할 수 있으며, 그중 과잉수분량에 대한 결과를 그림 8에 표시하였다. 영산강과 섬진강유역은 년간의 강수량이 많으며 그 결과 과잉수분량이 많아지게 되며 부족수분량은 그 역의 현상이 나타나고 있다. 그러나 두만강유역의 경우 년간의 강수량이 대단히 적으며 과잉수분량은 거의 존재하지 않는다. 이것은 대부분의 강수량이 증발산에 의해 손실되어 하천유량은 대단히 적음을 알 수 있다.

또한 Shahin(1985)은 미국의 Victoria湖 유역의 수문기상학적 조사에 있어서 다음과 같은 습윤지표를 이용하였다. 여기서는 가능증발산량만을 이용하여 과잉과 부족수분량을 계산하고 있다.

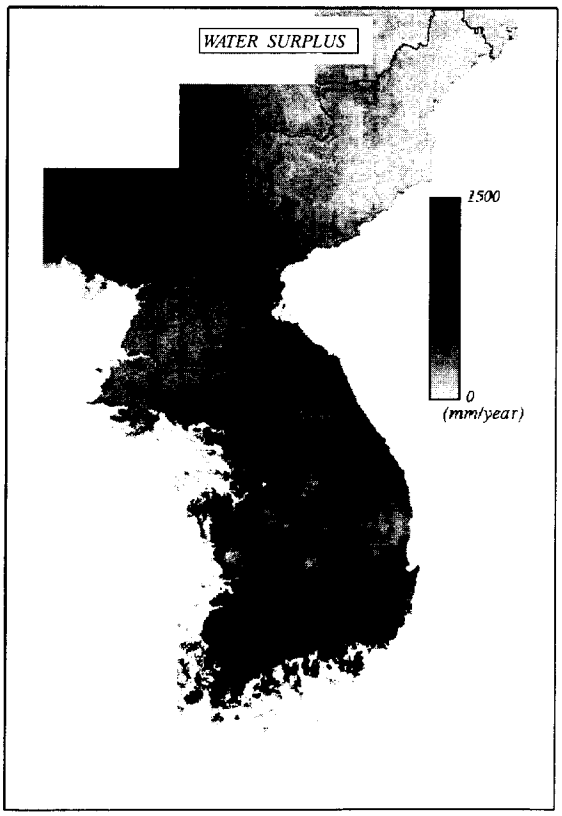


그림 8. 한반도의 과잉수분량의 분포(1989년)

$$I_{mi} = \frac{100(S_i - 0{,}6D_i)}{PE_i} \quad (8)$$

여기서 I_{mi}=습윤지표, S_i=과잉수분량(P_i-PE_i), D_i=부족수분량(PE_i-P_i)이다.

그림 9에 한반도의 1989년의 습윤지표의 분포를 나타내었다. 또한 Shahin(1985)은 계산된 습윤지표에 대응하는 기후 형태를 표 2와 같이 분류하고 있다. 우리 나라의 남부 지역에는 습윤지표가 300에 달하는 지역도 있으며 대단히 습윤 상태임을 알 수 있다. 그러나, 두만강 유역에는 습윤지표가 음(-)이 되는 지역도 존재하며 건조 지역에 포함되고 있다. 한반도 전역을 보면, 1989년의 평균 습윤지표가 91이 되며 습윤 지역에 해당됨을 알 수 있다.

표 2. 습윤지표에 대응하는 기후구분

Type	I_m
Perhumid	100 and above
Humid	20 to 100
Moist sub-humid	0 to 20
Dry sub-humid	-20 to 0
Semi-arid	-40 to -20
Arid	-100 to -40

5. 유출률 분포의 추정

유출률은 어느 일정기간내에 어느 관측점을 유하

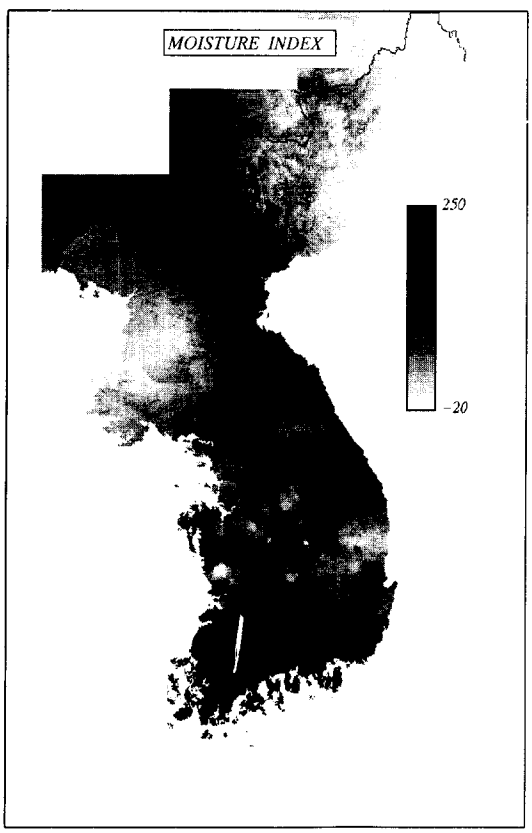


그림 9. 한반도의 습윤지표(1989년)

한 총유출량과 같은 기간 내에 그 관측점의 유역면적에 내린 총 강수량과의 비로 정의된다. 유출현상은 많은 인자에 의해 지배되어 동일 지점이라 하더라도 그 값을 명확하게 추정하는 것은 대단히 어려운 일이다. 따라서, 과거의 여러 수문자료를 참고로 하여 대략적인 값을 구하는 방법이 이용되고 있다. 더욱이, 그 값도 유역 내의 평균적인 유출률을 구하는데 그치고 있으며, 공간적인 분포를 구한다는 것은 극히 어려운 문제이다.

본 연구에서는 이미 구해진 증발산량과 강수량의 분포자료를 이용하여 한반도의 유출률 분포를 물수지 관계로부터 간접적으로 구하는 방법에 대하여 검토를 수행하였다. 어느 임의의 지점에 있어서의 유출량은 미지량이므로 물수지식으로부터 간접적으로 구하게 된다. 또한, 그 지점의 저류량변화 (ΔS)도 미지량이지만, 현단계에서 변화된 저류량의 분포상황을 해석적으로 구하는 방법은 확립되어 있지 않다. 따라서, 년간의 강수량을 보정하여 어느 지점의 ΔS를 0으로 가정하는 방법을 이용한다. 이것은 장기간에 걸친 ΔS가 거의 무시할 수 있는 양이며, 수문년이 1년이라 하더라도 건기와 우기가 비교적 확실한 우리 나라의 경우에서는 건기에서 다음 건기까지를 하나의 수문년으로 정할 경우 ΔS는 비교적 적은 양으로 생각되기 때문이다. 따라서 1월을 기준으로 하여 그 다음해의 1월까지를 수문년으로 할 경우의 ΔS는 다른 물수지항에 비하여 상당히 적을 것으로 예상된다. 결국 다음과 같이 년간의 ΔS가 0이 되도록 강수량에 일정의 할증율을 곱하여 강수량을 보정하기로 한다.

$$P_{ri} = C_P \cdot P_i \tag{9}$$

$$C = \frac{\sum_{j=1}^{12}(Q_j + E_i)}{\sum_{j=1}^{12} P_i} \tag{10}$$

여기서 P_{ri}=보정된 각 pixel에서의 강수량(mm/year), P_i=보정하기 전의 년강수량(mm/year), C_p=강수량 할증계수, P_i=관측된 월 강수량(mm/mon), Q_j=월 유출량(mm/mon), E_j=월평균증발산량(mm/mon)이다.

각 유역별로 강수량 할증계수 C_p를 구한 결과, 약 10%정도의 ΔS가 존재하였으며, 이 양은 다른 물수지항에 비교하여 미소한 양이므로 이 양을 일정하게 년강수량에 보정을 가하는 처리를 하도록 한다. 단, 한반도의 10대유역 이외의 지역에서는 보정을 하지않고, C_p=1.0을 이용하였다. 결국, 각 화소에서의 유출률 R_n은 다음의 관계로부터 얻어진다.

$$R_n = \frac{Q_i}{P_i} \tag{11}$$

$$= \frac{P_i - E_i \pm \Delta S_i}{P_i} \tag{12}$$

$$= \frac{P_{ri} - E_i}{P_i} \tag{13}$$

한반도의 1989년의 유출률의 분포를 그림 10에 표시하였다. 남북한을 포함한 1989년의 한반도의 평균 유출률은 약 0.48정도로 추정된다. 연강수량이 많은 영산강과 섬진강유역에서는 유출률이 비교적 높고, 강수량이 적은 두만강유역에서는 대단히 적음을 알 수 있다. 또한, 증발산량이 적으며, 포장면이 많은 도시지역에서 유출률이 대단히 높음을 용이하게 파악할 수 있다.

6. 결 론

지역적인 수자원의 부존량의 평가와 관리에 대하여 불가결한 자료를 제공함을 목적으로, 한반도에서의 수문량의 광역 공간분포의 특성 및 물수지에 관하여 검토를 수행하였다.

증발산량을 위성자료로부터 직접 구하는 방법을 이용함으로서 지상의 정보가 획득 불가능한 지역에 있어서도 증발산량의 분포가 용이하게 파악 가능하다. 또한, 증발산량, 강수량, 유출량을 이용하여 물수지를 구한 결과 대단히 양호한 결과를 얻을 수 있었다.

북한의 유역에 대한 유출량을 구하기 위하여 우리나라의 유역으로부터 얻어진 Tank모형정수를 이용하는 방법을 이용하여, 유출자료가 전혀 얻어지지않는 북한유역에서의 개략적인 유출현상을 파악할 수 있었다. 또한, 기후학적 측면에서의 물수지에 관하여 검토를 수행하여 지역적인 수자원의 분포와 결손량에 대한 평가가 가능하게 되었다.

통상의 방법으로는 추정이 곤란한 유출률의 분포를 물수지법으로부터 간접적으로 구하는 방법에 관

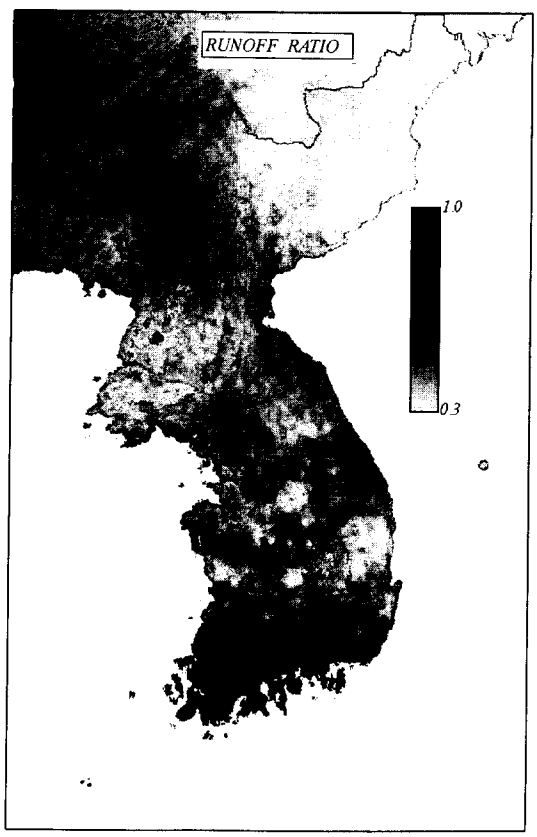


그림 10. 한반도의 유출률의 분포(1989년)

하여 고찰을 수행하였으며, 광역면을 대상으로 하는 분포정보의 획득이 가능하게 되었다.

본 연구로부터 자세한 기상정보나 수문정보가 얻어지지않는 조건하에서도 다양한 수문량의 분포가 파악가능하며, 물순환을 구성하고 있는 수문시스템의 입출력의 정량적 평가가 가능하다.

참 고 문 헌

신사철, 최윤수, 안기원 (1996). "NDVI를 이용한 한반도의 피복분류." 대한토목학회 논문집, 제16권, 제Ⅲ-3호, pp. 139-146.

申十澈, 澤本正樹 (1995). 漢江流域における水文量の廣域空間特性の解析." 日本水文·水資源學會誌, 第8卷, 第6號, pp. 560-567.

菅原正巳 (1972). 流出解析法. 共立出版.

菅原正巳 (1979). 續 流出解析法. 共立出版.

永井明博, 角屋 (1979). "流出モデル定數の最適化手法." 京都大學防災研究所年報, 第22卷, 第B-2號, pp. 209-224.

角屋, 永井明博 (1980). "長短期流出兩用モデルの永源寺ダム流域への適用と考察" 日本 農業土木 學會論文集, 第137卷, pp. 71-78.

Benedetti, R., Rossini, P., and Taddei, R. (1994). "Vegetation classification in the Middle Mediterranean area by satellite data." *Int. J. Remote Sens.*, Vol. 15, pp. 583-596.

Brutsaert, W., and Stricker, H. (1979). "An advection-aridity approach to estimate actual regional evapotranspiration." *Water Resour. Res.*, Vol. 15, pp. 443-450.

Justice, C.O., Townshend, J.R.G., Holben, B.N., and Tucker, C.J. (1985). "Analysis of the phenology of global vegetation using meteorological satellite data." *Int. J. Remote Sens.*, Vol. 8, pp. 1271-1318.

Legates, D.R., and Mather, J.R. (1992). "An evaluating of the average annual global water balance." *Geographical Review*, Vol. 82, pp. 253-267.

Morton, F.I. (1978). "Estimating evapotranspiration from potential evaporation: Praticality of an iconoclastic approach." *J. Hydrol.*, Vol. 38, pp. 1-32.

Powell, M.J.D. (1964). "An efficient method for finding the minimum of several variables without calculating derivatives." *Computer*

Journal, Vol. 7, pp. 155–162.

Priestly, C.H.B., and Taylor, R.J. (1972). "On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters." *Mon. Weather Rev.*, Vol. 100, pp. 81–92.

Shahin, M. (1985). *Hydrology of the Nile basin.* Elsevier.

Townshend, J.R.G., and Justice, C.O. (1986). "Analysis of the dynamic of African vegetation using the normalized difference vegetation index." *Int. J. Remote Sens.*, Vol. 7, pp. 1435–1446.

Tucker, C.J., Townshend, J.R.G., and Goff, T.E. (1985a). "African land-cover classification using satellite data." *Science*, Vol. 227, pp. 369–375.

Tucker, C.J., Vanpraet, C.L., Sharman, M.J., and Van Ittersum, G. (1985b). "Satellite remote sensing of total herbaceous biomass production in the Senegalese Sahel : 1980–1984." *Remote Sens. Environ.*, Vol. 17, pp. 233–249.

Willmott, C.J., and Rowe, C.M. (1985). "Climatology of the terrestrial seasonal water cycle." *J. Climatology*, Vol. 5, pp. 589–606.

〈접수 : 1996년 5월 29일〉