

연구논문

원격탐사자료를 활용한 지표면 조도계수 통합의 영향: 홍수유출 변화를 중심으로 Impacts of Surface Roughness Integration Using Remote Sensing Data: Concentration of Flood Flow Variation

강신욱* · 유승엽** · 이길하*** · 황만하****

Kang, Shin Uk · Rieu, Seung Yup · Lee, Kil Ha · Hwang, Man Ha

要 旨

원격탐사 자료를 이용한 토지피복도로부터 지역의 식생상황을 고려한 지표면 조도계수를 추정하기 위한 물리적 기반의 지표면 조도계수 추정방법을 제안하였다. 사전 연구로써 지표면 조도계수의 변화에 따른 침투유량, 유출체적, 침투시간에 대한 반응을 분석하기 위하여 NWS-PC 모형을 사용하였다. predominant, arithmetic mean, aggregation 방법으로 구해진 지표면 조도계수가 강우-유출 모형의 매개변수에 미치는 영향을 분석하였다. 지표면 조도계수에 대한 민감도 분석에서는 침투유량이 약 10%의 변화를 나타내었고, 유출체적의 경우 약 2%의 변화를 나타내었다. 침투시간은 지표면 조도계수에 비례하여 증가하는 것으로 나타났다. 물리적 기반의 aggregation 방법에 의해 구한 지표면 조도계수를 사용하였을 때의 강우-유출 모의결과는 STDEV, RMSE, NSE, PME 통계량에서 나온 결과를 보였지만, 각각의 통합 방법에 대해 크게 다른 결과를 보이지는 않았다. 그러나, 모형에서 지표면 조도계수의 설정에 따라 기저유량을 표현하는 하층부의 매개변수는 민감하게 변화하는 것으로 나타났다.

핵심용어 : 지표면 조도계수, 토지피복, 개념적 강우-유출 모형

Abstract

A physical-based aggregation method was suggested to estimate surface roughness, which adequately represents the spatial heterogeneity of vegetation factors, from land cover property obtained from the remote sensing data. For the sensitivity analysis of surface roughness, the peak flow, peak time, and total volume were simulated by the NWS-PC. Effects of surface roughness estimated by three different integration methods (predominant, arithmetic mean, and aggregation approach) on the conceptual rainfall-runoff model parameters was analyzed. In the preliminary sensitivity test to surface roughness, the peak time had 10% variation and total volume had 2% variation. The peak time increased with surface roughness. A physical-based aggregation method was better than the existing method in the Soyonggang Dam basin for the results of STDEV, RMSE, NSE, and PME, but difference between them were small. The parameters related on the total baseflow were changed significantly with change of the surface roughness.

Keywords : Surface roughness, Land cover, Conceptual rainfall-runoff model

1. 서 론

강우를 상호 연결된 수학적 함수를 통해 유량으로 변환하는 주요 수단으로 개념적 강우-유출 모형(conceptual rainfall-runoff model)이 개발되어 하천의 유출량을 계산하는데 주요한 도구로 이용되어 왔다. 이러한 개념적 강우-유출 모형은 매개변수의 보정이 이루어질 당시의 시·공간적 스케일에 의해 크게 영향을 받으며, 이에 대한 연구가 주요 이슈가 되어왔으며, 특히 원격탐사자료가 강우-

유출 모형에 접목된 이후에는 더욱 주요한 연구사항이 되어왔다.

개념적 강우-유출 모형을 효과적으로 수행하기 위해서는 일반적으로 두 가지의 입력자료가 필요한데, 하나는 기상자료이고 다른 하나는 지역의 특성자료이다. 기상자료는 지상에 설치된 레이더, 지상관측, 인공위성에서 측정된 지역의 평균값 등이고, 지역의 특성자료는 토양도, 식생피복도, 수치고도지도 등에서 추출된 자료이다. 시·공간 스케일에 따른 강우자료가 강우-유출 모형에 대한

2007년 4월 4일 접수, 2007년 5월 7일 채택

* 정희원·한국수자원공사 수자원연구원 연구원 (sukang@kwater.or.kr)

** 한국수자원공사 수자원연구원 연구원 (rieusy@kwater.or.kr)

*** 경원대학교 GIS 연구소 선임연구원 (klee@kwater.or.kr)

**** 한국수자원공사 수자원연구원 수석연구원 (hwangmh@kwater.or.kr)

반응은 원격탐사 경우자료의 출현과 동시에 많은 연구가 이루어져 왔다(Reed et al., 2004; Koren et al., 1999; Finnerty et al., 1997). 또한 대기모형에서 대기-지표면의 상호작용을 관찰할 때 스케일에 관한 연구가 있어 왔다(Shuttleworth, 1998; Arain et al., 1996; Raupach, 1995; Koster and Suarez, 1992; Entekhabi and Eagleson, 1992). 그러나 개념적 강우-유출 모형에서 토지피복도의 스케일링에 관한 연구는 간과되어 왔다.

강우가 발생하면 지표상에 떨어진 강우는 여러 경로를 통해 하천이나 지하로 침투하게 된다(Maidment, 1993). 유역의 식생에 의해 차단되고 남은 물은 토양을 통해 침투되고 토양의 침투능을 초과하면 지표면 흐름이 발생한다. 이러한 흐름은 식생과 지표 토양에 의해 흐름이 조절된다. 최근에 많이 사용되고 있는 원격탐사기법은 유역의 식생상태를 정량화 하는 효율적인 도구이다.

원격탐사자료는 보통은 2차원 토지피복도로부터 강우-유출 모형이 필요로 하는 지표면 조도계수 값을 간접적으로 얻게 된다(Vieux, 2004). 그러나 강우-유출 모형이 사용하는 수치격자 크기가 토지피복도의 격자크기와 반드시 일치하지는 않으므로 적절한 방법을 사용하여 내삽·외삽하여 유역의 대표값을 찾아줄 필요가 있는데, 이러한 과정은 흔히 주관적이나 직관적으로 이루어진다. 강우-유출 모형에서 식생의 공간적 이질성을 나타내는 유역 대표값을 찾는 방법에 따라 하천의 유출량은 차이를 보인다. 따라서 식생의 공간적 이질성을 나타내는 대표값을 찾는 방법에 대해 연구할 필요가 있다.

본 연구에서는 원격탐사 자료를 이용한 토지피복도로부터 유역의 식생상태를 고려한 지표면 조도계수를 추정하기 위한 물리적 기반의 지표면 조도계수 추정방법을 제안하였다. 사전 연구(preliminary study)로써 소유역별 지표면 조도계수의 변화에 따라 침투유량, 유출체적, 침투시간 등에 어떠한 영향을 미치는 지을 분석하였다. 그리고 목시적으로 사용해 온 2가지 방법과 Manning 식과 같은 물리적 기반의 방법으로 구한 유역 지표면 조도계수가 강우-유출 모형의 매개변수에 미치는 영향을 분석하였다. 이러한 분석을 위해 소양강 유역에 개념적 강우-유출 모형인 NWS-PC 모형(Tabios III et al., 1986)을 적용하였다. NWS-PC 모형을 사용한 이유는 지표 흐름 추적법으로 운동과 추적법을 사용할 수 있기 때문이다. 이 연구는 강우-유출 모형에서 식생과 관련된 지표면 조도계수의 유역 대표값을 계산할 때 그 방법의 선택에 있어 공학적 직감을 제공함으로써 강우-유출 모형의 거동을 이해하는데 도움이 될 것으로 판단된다.

2. 강우-유출 모형 및 매개변수 최적화

2.1 NWS-PC 모형

NWS-PC 모형은 토양 함수상태 계산(SAC-SMA) 모형과 유역 및 하도 흐름에 대한 추적 모형으로 구분된다. SAC-SMA의 모형 분류는 확정론적, 집중입력, 집중 매개변수 모형에 속하며, 이는 수문순환과정의 토지부분에서 입력된 강우를 하도 흐름의 유입량으로 변환시킨다. 흐름에 대한 추적모형의 기능은 하도 유입량을 유역 또는 소유역 출구의 유출로 추적하며, 운동과 추적법이나 단위도-Muskingum 방법의 조합을 사용한다. 일반적으로 운동과 추적법은 수리학적 방법중에서 가장 간단한 하도 추적법으로 분류될 수도 있고, 단위도-Muskingum 방법은 대표적인 수문학적 추적법이다. 따라서 운동과 추적법은 보다 정확한 방법이라고 말할 수 있다. 한편 정확성에 반하여 요구되는 입력자료는 그만큼 많아지게 된다(한국수자원공사, 1995).

SAC-SMA 모형은 유역을 상층부와 하층부로 구분한다. 상층부는 상부 토양층과 차단 저류지를 나타내고, 하층부는 토양수분체나 지하수체를 표시한다. 이와 관련하여 모형에는 상층부에서의 지표면 유출, 하층부에서의 지표하 유출 2가지 주요 유출성분이 있다. 이러한 유출 과정을 효과적으로 묘사하기 위한 16개의 주요 매개변수를 가지고 있으며, 매개변수 추정을 위해 모형의 보정을 필요로 한다. Table 1은 SAC-SMA 모형의 매개변수별 기능을 설명한 것이다.

운동과 추적법에서의 운동량 방정식은 하상, 에너지경사항만을 고려한 경우이므로, 식 (1)과 같이 표시된다.

$$S_0 = S_f \quad (1)$$

여기서 S_0 은 하상경사 또는 유역경사, S_f 는 에너지경사이다. 식 (1)을 유량의 항으로 나타내기 위해 Manning 공식으로 표시하면 식 (2)와 같다.

$$Q = \frac{1}{n} AR^{2/3} S_f^{1/2} = \frac{1}{n} AR^{2/3} S_0^{1/2} \quad (2)$$

여기서 Q 는 유량, n 은 Manning 조도계수, A 는 단면적, R 은 동수반경이다. 식 (2)는 하도의 형상과 조도계수에 따른 고유의 값 α , m 을 써서 다음과 같이 단순화된다.

$$Q = \alpha A^m \quad (3)$$

그리고 연속방정식은 단면적 A 와 유량 Q 를 써서 식 (4)와 같이 나타내진다.

Table 1. Functional description of the model parameters in the SAC-SMA model

| Parameter | Description |
|-----------|--|
| UZTWM | Upper zone tension water maximum storage (mm) |
| UZFWM | Upper zone free water maximum storage (mm) |
| LZTWM | Lower zone tension water maximum storage (mm) |
| LZFPM | Lower zone free water primary maximum storage (mm) |
| LZFSM | Lower zone free water supplemental maximum storage (mm) |
| ADIMP | Additional impervious area (decimal fraction) |
| UZK | Upper zone free water lateral depletion rate (day ⁻¹) |
| LZPK | Lower zone primary free water depletion rate (day ⁻¹) |
| LZSK | Lower zone supplement free water depletion rate (day ⁻¹) |
| ZPERC | Maximum percolation rate (dimensionless) |
| REXP | Exponent of the percolation equation (dimensionless) |
| PCTIM | Impervious fraction of the watershed area (decimal fraction) |
| PFREE | Fraction of water percolating from upper zone directly to lower zone free water storage (decimal fraction) |
| RIVA | Riparian vegetation area (decimal fraction) |
| SIDE | Ratio of deep recharge to channel base flow (dimensionless) |
| RSERV | Fraction of lower zone free water not transferable to lower zone tension water (decimal fraction) |

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = q \quad (4)$$

Eqs. (3) and (4)에서 Q 를 소거하면 다음 식과 같다.

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \alpha m A^{(m-1)} \frac{\partial A}{\partial x} = q \quad (5)$$

여기서 q 는 보통 초과강우량(excess rainfall)으로 일컬어지는 총 하도유입량이거나 측방유입량이다.

식 (3)과 (4) 또는 (5)는 지표면 흐름이나 하도추적의 지배방정식이 된다. 이 식의 수치해는 유한차분 양해법을 사용한다(USACE, 1985). 총 하도유입량 q 는 지표면 흐름요소를 통하여 추적되며, 이때 흐름요소는 넓은 사각형 하도록 취급되어 $m = 5/3$, $\alpha = S^{1/2}/n$ 이다. 그리고 지표면 흐름요소의 유출량은 집수하도가 있을 경우에 이 하도의 유입량이 되어 하도추적된다. 다시 집수하도의 유출량을 주하도의 유입량으로하여 하도추적하면 최종적으로 유역출구의 지표흐름 유출량이 된다.

2.2 매개변수 최적화

SCE-UA 알고리즘(Duan, 1991)은 미국 국립기상국의 NWSRFS(National Weather Service River Forecasting System)의 보정모듈 중 하나이며, 최적해를 탐색하기 위해 4가지 중요한 개념을 포함하고 있다(Duan et. al., 1994): 1)확정론적 및 확률론적 접근의 결합, 2)컴플렉스

의 구조적 진화, 3)경쟁 진화(competitive evolution), 4)컴플렉스 혼합(complex shuffling). SCE-UA 알고리즘은 초기에 해가 존재하는 전체 매개변수 공간에서 표본을 생성하고 컴플렉스들로 분할한다. 각 컴플렉스는 downhill simplex 알고리즘을 사용하여 독립적으로 진화한다. 진화를 거친 컴플렉스들은 다시 혼합되고, 새로운 컴플렉스들이 생성된다. 진화와 혼합의 과정은 수렴조건이 만족될 때까지 반복된다.

3. 대상유역 및 입력자료

소양강댐 유역은 1974년부터 현재까지 양질의 수문자료가 축적되어져 있고, 과거부터 많은 연구들이 이루어져, 본 연구의 대상유역으로 선정하였다. 상류 유역면적은 2,703km²이며, 유로연장은 166.2km, 유역의 고도분포는 해발 146~1,687m 범위에 있다. 유역의 유출체계 구성을 위해 Figure 1과 같이 9개의 소유역으로 분할하였고 이는 수자원단위지도의 표준권역구분과 같다.

본 연구에 사용한 토지피복분류도는 위성사진을 주된 자료로 사용하여 지표면의 자연상태를 분석·표시한 지도로서 환경관리를 위한 전형적인 주제로 널리 활용되고 있다. 이 지도 제작에 사용된 원격탐사 기술인 토지피복분류는 인공위성자료와 같은 다중분광 영상자료를 이용하여 지표면의 물리적 상태(숲, 초지, 콘크리트 포장)를

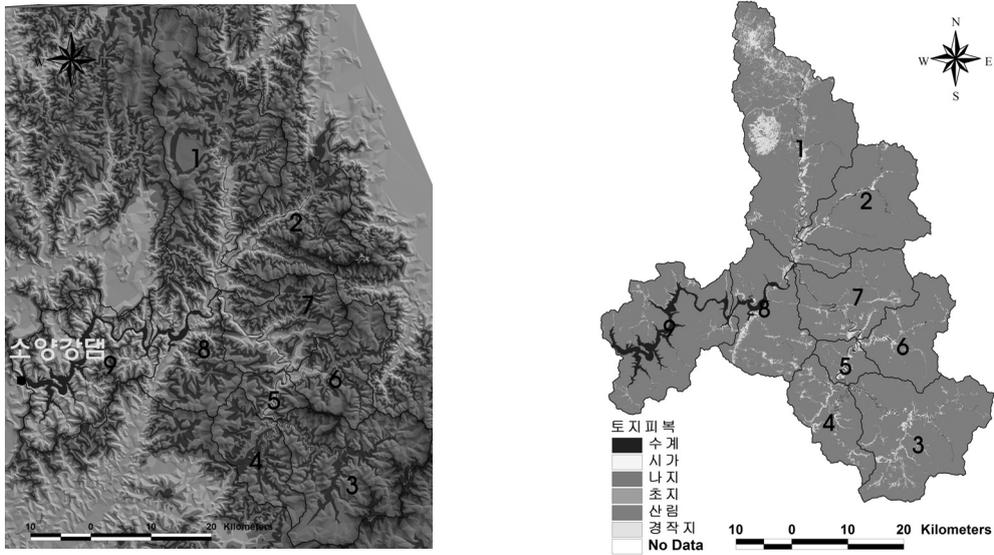


Fig. 1. The Soyanggang basin located at east Korea. The Soyanggang basin was divided in to 9 sub-basin in this study.

Table 2. Portion of each vegetation type derived from the remotely sensed land cover map for each sub-basin in the Soyanggang basin (in %)

| Vegetation type | Sub. 1 | Sub. 2 | Sub. 3 | Sub. 4 | Sub. 5 | Sub. 6 | Sub. 7 | Sub. 8 | Sub. 9 |
|--|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Water bodies (0.015) | 0.047 | 0.005 | 0.000 | 0.000 | 0.223 | 0.011 | 0.149 | 1.213 | 7.566 |
| Urban and built-up land (0.015) | 0.278 | 0.460 | 0.022 | 0.010 | 0.203 | 0.048 | 0.095 | 0.125 | 0.034 |
| Barren or sparsely vegetated (0.025) | 0.281 | 0.376 | 0.206 | 0.047 | 0.206 | 0.036 | 0.221 | 0.264 | 0.347 |
| Mixed shrubland/grassland (0.040) | 1.239 | 0.521 | 0.460 | 0.113 | 0.463 | 0.337 | 0.572 | 0.691 | 0.710 |
| Mixed forest (0.100) | 85.80 | 95.70 | 93.70 | 91.54 | 88.23 | 95.40 | 93.42 | 89.81 | 88.57 |
| Mixed dryland/irrigated and Crop/pasture (0.035) | 12.36 | 2.937 | 5.615 | 8.288 | 10.68 | 4.169 | 5.542 | 7.895 | 2.775 |

분류하는 것으로 유럽등 선진국에서는 이미 80년대부터 국토의 환경관리를 위한 주제도 제작에 널리 활용하는 전형적인 원격탐사 기술이다. 토지피복분류도는 국토공간의 피복상태를 표현하므로 피복변화의 시계열 분석이 가능하며, 국토의 공간구조의 실태를 파악하고 변환추이를 용이하고 신속하게 할 수 있다. 토지피복분류도의 분류체계는 환경의 특성을 반영하고 국토이용, 공간계획 등의 여타 분야에서 요구하는 항목들을 반영하여 대분류, 중분류, 세분류의 3단계 피복분류체계로 설정되어 있다 (환경부, 2001). 토지피복분류도는 Landsat TM 위성영상을 기본자료로 하고, 참조자료로 1:50,000 지형도, 북한

의 1:50,000 전술기본도 및 지형도, 항공사진, 고해상도 영상, 다중시기 Landsat TM영상을 이용하여 확인한 후 부족한 지역에 대하여는 현지조사를 실시하여 작성되었다.

각 소유역에 대해 운동파 추적법으로 지표면 흐름을 모의하기 위해서는 유역면적, 주하도길이, 유역폭, 유역의 경사, 지표면 조도계수가 필요하고, 유역의 조도계수를 제외한 나머지 유역특성 인자들은 수치지도에서 구하였다. 유역의 조도계수는 토지피복도에서 각 소유역별 식생상태를 구하여, 4절에 제시하는 방법으로 산정하였다. Table 2에서 보는 바와 같이 모든 소유역의 식생상태는 산림이 대부분이었다. 하도흐름을 모의하기 위해서는 단

면형태, 하천 조도계수, 하도경사 등이 필요하다. 이 자료들은 기존 연구(한국수자원공사, 1995)와 건설교통부의 하천정비기본계획보고서 정보시스템에서 수집하였다.

모형수행에 필요한 면적평균강우량과 소양강댐 유입량은 한국수자원공사에서 수집하였고, 수집한 자료중 결측값이 없고 자료가 양호하다고 판단되는 2000년 8월 25일부터 30일까지의 시간단위 자료를 사용하였다. 증발산량은 기상청 산하 인제 관측소의 기상자료를 사용하여 FAO-56 Penman-Monteith 식(Allen et al., 1998)을 이용하여 계산하였다.

4. 원격탐사 자료를 이용한 지표면 조도계수 계산

유역 식생의 공간적 이질성 때문에 유역의 지표면 조도계수 대표값을 산정하는 것은 어려운 일이다. 지표면 조도계수는 토지이용과 토지피복에 따라 적절히 정할 수 있다. 지표면 조도계수는 항공사진이나 일반적인 토지이용도, 토지피복도, 식생 원격탐사 등을 포함한 다양한 스스로부터 얻어질 수 있으며, 각각의 자료들을 사용하여 하천유역과 같이 넓은 범위에서의 조도계수를 설정할 수 있다. 넓은 지역의 지표면 조도계수를 세부적으로 조사하는 것은 시간과 비용적인 측면에서 실용적이지 못하다. 따라서 토지이용도, 토지피복도와 같은 GIS 주제도로부터 지표면 조도계수를 구하는 것은 재분류 과정에서의 오차를 감안하더라도 보다 매력적이다(Vieux, 2004).

본 연구에서는 환경부의 토지피복도를 이용해 각 소유역의 지표면 조도계수를 구하였다. 이를 위해서는 적절한 방법이 필요하고, 현재까지 목시적으로 사용되어왔던 2가지 방법과 본 연구에서 제안하는 방법을 사용해 유역의 지표면 조도계수를 구하였다.

4.1 Predominant 방법

소유역내에 포함되는 토지피복도의 격자 크기는 30m 이고 이러한 격자를 많이 포함하고 있다. predominant 방법은 소유역의 토지피복 격자 중에서 가장 많이 나타나는 값을 유역의 대표값으로 사용하는 방법이다. 지리정보시스템을 통해 강우-유출 모형의 유역 지표면 조도계수를 산정하는데 자주 사용된다.

4.2 Arithmetic mean 방법

산술평균 방법은 소유역내 격자의 토지피복형태에 따른 조도계수 값을 산술평균하는 방법이다. 소유역이 N 개의 격자로 구성되어 있다면 산술평균 방법에 의한 지표면 조도계수 계산은 다음 식과 같다.

$$n = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N W_i n_i \quad (6)$$

여기서 W 는 가중계수이고, n 은 지표면 조도계수, 아래첨자 i 는 소유역의 각 격자번호를 의미한다. 이 방법은 단순하지만 매우 직관적인 방법이다.

4.3 Aggregation 방법

위에서 설명한 2가지 방법은 이론적인 근거가 없다. 소유역 규모에서 식생에 관련된 지표면 조도계수는 물리적 근거에 의해 대표값이 정해지는 것이 필요하다. 픽셀 스케일의 식생관련 매개변수들을 조합하여 유역 스케일 면적평균 유량의 특성을 설명하는 관계식을 정의할 경우 다음과 같은 사항들에 유의해야 한다(McNaughton, 1994): 1) 면적평균 유량은 두 가지 스케일에서 일치해야 한다. 2) 사용한 모형이 두 가지 스케일 모두에서 동일한 유량을 보여주는 것이 편리하다. 이러한 요구조건을 만족시키기 위해 여기서는 Manning 식을 연결식으로 사용하여 두 가지 스케일간의 관계식을 유도하였다. 이는 대부분의 물리적인 유출모형들이 Manning 식을 기반으로 하고 있으므로, 일반성의 극대화를 기대할 수 있을 것으로 생각된다. 유역 스케일과 픽셀 스케일에 적용된 Manning 식은 각각 다음과 같다.

$$Q = A C_1 R^{2/3} S^{1/2} / n \quad (7)$$

$$q_i = A_i C_1 R_i^{2/3} S_i^{1/2} / n_i \quad (8)$$

여기서 Q 와 A 는 유역 스케일에서의 평균유량과 단면적을 나타낸다. C_1 은 SI 단위계에서 1.0이며 영국단위계로는 1.49에 해당한다. S 와 R 은 유역 스케일에서의 경사와 수리반경이며, n 은 소유역 스케일에서의 Manning 계수이다. q_i 와 A_i 는 픽셀 스케일에서의 평균유량과 단면적이다. S_i 와 R_i 는 픽셀 스케일에서의 경사와 수리반경이며, n_i 는 픽셀 스케일에서의 Manning 계수이다.

유역 평균유량 Q 는 다음과 같이 픽셀당 평균유량 q_i 의 합으로 표현된다.

$$Q = \sum_{i=1}^N q_i \quad (9)$$

식 (7)과 (8)을 식 (9)에 삽입하면 스케일간의 관계식과 aggregation 식을 얻을 수 있다.

$$\frac{1}{n} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N W_i \frac{1}{n_i} \quad (10)$$

여기서 n 는 유역 스케일의 Manning 계수 또는 지표면 조도계수, n_s 는 픽셀 스케일의 Manning 계수 또는 지표면 조도계수이며, 본 연구에서는 동일한 가중치를 가정하였다.

4.4 3가지 방법에 의한 소유역의 지표면 조도계수 산정

Table 2에서 보는 바와 같이 환경부의 토지피복도는 미국 USGS의 분류체계와 유사하게 7개로 분류되고, 시가화/건조지역, 농업지역, 산림지역, 녹지/초지, 습지, 나지, 수역으로 나누어진다. 대상유역인 소양강댐 유역은 습지가 나타나지 않아 Table 2에서 제외하였다. 나머지 6개의 지역들에 대한 조도계수는 Vieux의 문헌(2004)에서 참고하였고, Table 2의 첫째 열 괄호안에 제시하였다. 4.1절에서 4.3절에 걸쳐 설명한 3가지 방법을 사용하여 유역의 지표면 조도계수를 구하였다.

Table 3는 소양강 유역의 9개 소유역별로 구해진 통합 조도계수를 표시한 것이다. 방법별로 5~15%의 차이가 발생하였다. Predominant 방법은 토지피복 격자 중에서 가장 많이 나타나는 값을 유역의 대표값으로 사용하는 방법으로, 소양강 유역의 각 소유역의 산림지역은 소유역 1이 85.8%, 소유역 2가 97.7% 등이다. 그래서 이 방법에 의한 소유역별 조도계수는 모두 0.1이다. Arithmetic mean 방법은 소유역내 격자의 토지피복형태에 따라 조도계수 값을 산술평균하는 방법으로, 식 (6)을 사용하여 각 소유역의 지표면 조도계수를 계산하였다. 9개 소유역에서 계산된 값은 최소 0.091, 최대 0.097이었다. Aggregation 방법은 Manning 식과 같은 물리적 근거에 의해 대표값이 정하는 방법으로, 소양강 유역 9개의 소유역에 대해 식 (10)을 사용하여 지표면 조도계수를 구하였다. 계산된 값은 Table 3에서 보는 바와 같이 최하류 유역인 9번 소유역이 0.067로 최소값이었고, 상류 유역인 6번 소유역이 0.092로 최대값을 나타내었다.

5. 적용 결과

5.1 지표면 조도계수에 대한 민감도 분석

5.1.1 민감도 분석 방법

사전 연구로써 지표면 조도계수로 설정된 값들의 범위

에 따른 하천유량의 민감도를 분석해야 할 필요가 있으며, 이 절에서는 지표면 조도계수에 대한 유량의 민감도 분석을 수행하였다. 조도계수의 변화에 따라 침투유량, 유출체적, 침투시간의 변화를 검토하였다. 이를 위해 2000년 8월 25일부터 30일까지의 시간단위 수문자료와 모형 수행에 필요한 유역특성자료들을 이용해 입력 자료를 생성하였다. 그리고 각 소유역별 지표면 조도계수는 모두 동일하다고 가정하고, 0.01~0.12까지 0.005 단위로 변화시키면서 23번의 모의를 수행하였다. 이때 모의에 사용한 NWS-PC 모형의 매개변수는 predominant 방법에서 얻은 지표면 조도계수를 각 소유역별로 할당하고, 관측유량과 모의유량의 편차를 최소화하는 목적함수와 SCE-UA 전역 최적화 방법을 사용하여 구한 것이다.

5.1.2 민감도 분석 결과

Figure 2는 조도계수를 변화시켜 23번 모의한 결과를 관측유량과 함께 나타내었다. 검은 실선은 지표면 조도계수를 0.01로 할당했을 때의 유량수문곡선이며, 점선은 조도계수를 0.12로 했을 때의 유량수문곡선이다. 나머지 회색실선은 그 사이의 값을 할당했을 때 유량수문곡선이다. 그림에서 보는 바와 같이 지표면 조도계수가 증가함에 따라 침투시간이 늦어지고, 침투유량이 줄어드는 것을 볼 수 있다.

조도계수 변화에 따른 침투유량의 변화량을 Figure 3에 나타내었으며, 지표면 유출의 저항을 결정하는 조도계수에 반비례하는 결과를 보여주고 있다. 그림에서와 같이 침투유량은 조도계수의 실정에 따라 약 10%의 유량 차이를 나타내었다. 강우-유출과정에서 강우량의 일부는 수목의 잎에 의해 차단되며, 지표로 떨어진 나머지 강우량의 일부는 나지 토양(bare soil) 또는 식생에 뒤덮인 토양으로부터 증발하거나 식물에 의해 증산(蒸散)된다. 지표에 떨어진 강우의 일부는 토양으로 침투하고, 침투능이 초과되면 지표면 유출이 발생한다. 이런 점을 생각하면 어떤 강우사상이 발생하는 기간 동안 조도계수가 증가할수록 지표유출의 총체적은 추가적인 차단이나 증발산에 의해 더 감소할 것이라고 예상할 수 있다.

Figure 4는 주어진 기간동안 관측유량의 총 체적에 대한 모의유량의 총 체적의 비를 지표면 조도계수 n 의 합

Table 3. The integrated Manning's roughness coefficient by three different methods for each sub-basin in the Soyanggnag basin. The values are integrated from each vegetation type in Table 1.

| Method | Sub. 1 | Sub. 2 | Sub. 3 | Sub. 4 | Sub. 5 | Sub. 6 | Sub. 7 | Sub. 8 | Sub. 9 |
|-----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Predominant | 0.100 | 0.100 | 0.100 | 0.100 | 0.100 | 0.100 | 0.100 | 0.100 | 0.100 |
| Arithmetic mean | 0.091 | 0.097 | 0.096 | 0.095 | 0.092 | 0.097 | 0.096 | 0.093 | 0.091 |
| Aggregation | 0.078 | 0.091 | 0.089 | 0.086 | 0.081 | 0.092 | 0.088 | 0.081 | 0.067 |

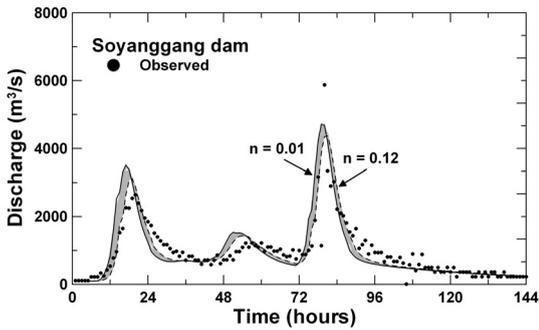


Fig. 2. Simulated discharge hydrograph for a range of values of the surface roughness coefficient, n .

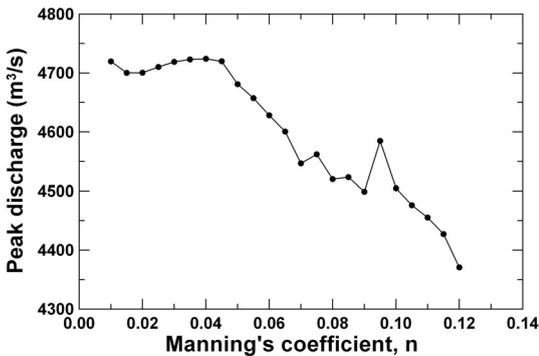


Fig. 3. Simulated peak discharge for a range of values of the surface roughness coefficient, n .

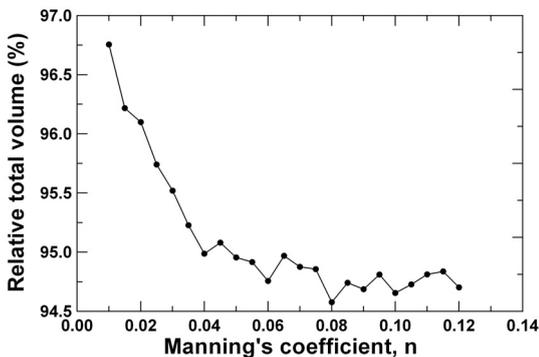


Fig. 4. Relative total volume (simulated volume divided by observed volume) in percentage for a range of values of the surface roughness coefficient, n .

수로 표현한 것이다. 조도계수 0.01~0.12의 범위에서 상대 총 체적의 차이는 약 2%로 작은 변화를 나타내었다. NWS-PC 모형은 개념적인 모형으로 완전히 물리적인 설명이 쉽지 않으므로 이에 대한 일반론적인 해석을 내리지 않았다. 이 차이는 모형 선택, 강우 사상, 유역 특성

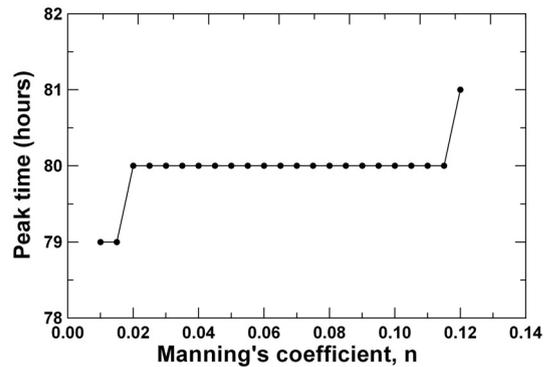


Fig. 5. A time course of the simulated streamflow for a range of values of the surface roughness coefficient, n . The figure shows about 2 hour difference in peak time depending on the surface roughness coefficient.

에 따라 매우 달라질 것이다. 그림의 유량모의 결과에서 나타나는 약간의 진동은 모형의 특성으로 생각된다. 이는 Figure 5에서 보는 바와 같이 조도계수 0.02~0.115 범위에서 80시간동안 침투시간이 일정하기 때문에, SAC-SMA 모형이 모형의 물수지를 맞추기 위해 나타난 현상이라 판단된다.

Figure 5는 지표면 조도계수의 변화에 따른 모의 유량의 침투시간을 나타내었다. 침투시간은 조도계수 n 에 비례하여 증가하였다. 그러나 침투시간은 0.02~0.115의 범위에서의 80 시간 동안 일정하였으나, 모형의 최소시간 단위가 1시간인 점을 고려한다면 일반적으로 증가한다고 판단된다. 지표면 조도계수의 선택에 따라 침투시간은 2시간 차이가 발생함을 알 수 있다. 설계나 계획측면에서는 침투시간 2시간의 차이는 중요하게 여겨지지 않을 수도 있지만, 호우기간 동안의 홍수조절 측면에서는 중요한 사안된다.

5.2 3가지 지표면 조도계수 통합방법에 의한 유출 모의 및 결과

5.2.1 3가지 방법에 의한 강우-유출 모의

식생관련 매개변수, 즉 지표면 조도계수 통합의 영향을 파악하기 위해, 4.4절에서 3가지 방법으로 구한 소유역별 지표면 조도계수를 이용해 모형의 입력자료를 각각 생성하였다. 입력자료를 이용하여 3가지 방법에 상응하는 매개변수를 추정하기 위해 모형 보정을 수행하였다. 이때 관측유량과 모의유량의 편차절대값의 합을 최소화하는 목적함수를 사용하여, SCE-UA 전역최적화 방법을 사용하였다. 목적함수 형태를 편차절대값의 합으로 한 이유는 홍수위, 저수위를 포함하는 전체 유량규모에 대해 동일한 비율로 가중값을 주기 때문이다(Sefe and Boughton, 1982).

3가지 방법에 의한 지표면 조도계수를 모형에 입력하고 각각을 수행하였을 때, 모의결과를 비교하기 위해 평균, 표준편차와 함께 Gupta et al.(1999)이 제시한 4가지 통계량으로 평가하였다. 4가지 통계량은 평균제곱근오차(RMSE, root mean squared error), 평균편차의 비율(PBIAS, percent bias), Nash-Sutcliffe 효율성 지수(NSE, Nash-Sutcliffe efficiency), 지속모형 효율성 지수(PME, persistence model efficiency)이다. 각 통계량의 관련 식은 다음과 같다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (q_t^{sim} - q_t^{obs})^2} \quad (11)$$

$$PBIAS = \frac{\sum_{t=1}^N (q_t^{obs} - q_t^{sim})}{\sum_{t=1}^N q_t^{obs}} \times 100\% \quad (12)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^N (q_t^{sim} - q_t^{obs})^2}{\sum_{t=1}^N (q_t^{obs} - q^{mean})^2} \quad (13)$$

$$PME = 1 - \frac{\sum_{t=1}^N (q_t^{sim} - q_t^{obs})^2}{\sum_{t=1}^N (q_t^{obs} - q_{t-1}^{obs})^2} \quad (14)$$

여기서 q_t^{sim} 은 t 시간의 모의유량, q_t^{obs} 는 관측유량, q^{mean} 은 관측유량의 평균, q_{t-1}^{obs} 는 $t-1$ 시간의 관측유량이다. 첫 번째 통계량인 RMSE의 단위는 m^3/s 이고, 단순히 모형 예측 오차의 표준편차를 계산하는 것이며, 값이 작을수록 모형 성능이 더 좋을음을 나타낸다. 두 번째 통계량인 PBIAS의 단위는 m^3/s 이고, 모의 유량이 관측 유량에 비해 크거나 작은 정도에 대한 평균적인 경향을 측정한다. 최적값의 경우 0.0이고, 양수인 경우 과소추정, 음수인 경우 과대추정되는 방향으로 모형 오차가 발생함을 의미한다. NSE와 PME는 무차원이고, 기준 대비 모형의 성능을 나타내는 정규화된 척도이다. NSE는 관측유량의 분산에 대한 잔차 분산의 상대적인 크기에 대한 척도이고, 최적값은 1.0이며 최소한 0.0을 초과해야만 받아들일 수 있는 성능을 보인다고 할 수 있다. 값이 0.0인 경우는 모형을 사용하는 예측에 비해 관측유량 평균을 사용하는 것이 더 낫다는 것을 의미한다. PME는 단순 지속 모형(persistence model)을 사용했을 때 얻어지는 오차의 분산에 대한 잔차 분산(잡음)의 상대적인 크기를 나타낸다. 여기서 최적값은 1.0이고 값은 0.0을 초과해야 받아들일 수 있는 최소한의 모형성능이라고 할 수 있으며, 단순 지속 모형이란 현 단계의 관측유량에 의해 주어지는 다음 단계의 관측유량이 최적 유량 추정값이라고 가정할 경우와 같이 최소한의 정보를 이용한 상황을 나타낸다. 즉, 간편 지속형 모형에 의해 얻어진 한 단계 이전 예측에 의한 오차가 강우-유출 모형에 의한 오차보다 큰 경우

($PME < 0$), 이 모형에 의한 유출예측은 적절하다고 할 수 없다.

5.2.2 결과

각 방법에 의해 모형의 매개변수를 추정하고 추정된 매개변수를 사용하여 Figure 6과 같이 관측값과 함께 모의 유량 시계열을 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 각각의 경우 모두 관측값을 잘 묘사하였다.

각 방법에 대한 모의결과를 평균, 표준편차와 4가지 통계량으로 Table 4에 나타내었다. 관측유량의 평균값과 가장 유사한 것은 arithmetic mean 방법에 의한 지표면 조도계수를 사용했을 때의 결과였고, 표준편차는 aggregation 방법에 의한 결과가 관측값과 가장 유사했다. 예측 오차의 표준편차인 RMSE는 aggregation 방법에 의한 결과가 $353m^3/s$ 로 가장 작았다. 모의유량이 관측유량에 비해 크거나 작은 정도에 대한 평균적인 경향을 나타내는 PBIAS의 값은 3가지 방법 모두 음수로 과대 추정되었고, arithmetic mean에 의한 결과가 약 1%정도였다. NSE 통계량은 3가지 방법 모두 유사한 결과를 나타내었지만 근소하게 aggregation에 의한 결과가 우세하였다. PME 통계량 역시

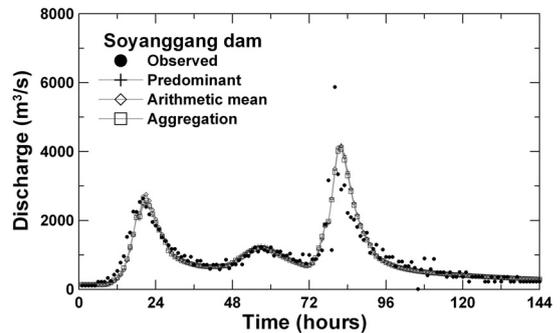


Fig. 6. A time course of simulated streamflow using three different integration methods.

Table 4. Basic error statistics of the simulated streamflow compared to observations.

| Index | Observed | Predominant | Arithmetic mean | aggregation |
|-------|----------|-------------|-----------------|-------------|
| MEAN | 959.3 | 946.3 | 948.8 | 937.1 |
| STDEV | 786.2 | 801.6 | 817.1 | 789.5 |
| RMSE | - | 363.1 | 359.7 | 353.0 |
| PBIAS | - | -1.361 | -1.095 | -2.316 |
| NSE | - | 0.785 | 0.789 | 0.797 |
| PME | - | 0.525 | 0.534 | 0.551 |

aggregation 방법에 의한 지표면 조도계수를 사용한 모의의 결과가 근소하게 좋았다.

aggregation 방법에 의한 결과는 표준편차, RMSE, NSE, PME 기준에서 보다 나은 결과를 보였지만, 각각의 통합 방법에 대해 크게 다른 결과를 보이지는 않았다. 이는 지표면 조도계수의 설정 이후 관측유량에 대해 매개변수 보정을 수행하였기 때문으로 생각된다. 즉, 선호되는 매개변수 세트는 통합 방법별로 각각의 지표면 조도계수를 정의하였음에도 불구하고 관측유량을 가장 잘 모의하도록 조정된 것이다. 따라서 통합방법별로 보정된 NWS-PC 모형 매개변수 값들을 분석하였다.

Table 5에는 16개의 추정된 매개변수를 상층부, 하층부, 침투관련 변수로 나타내었고, 2열에서 4열까지 각 방법에 의한 추정 매개변수를, 5열과 6열에는 aggregation 방법을 기준으로 하여 매개변수별로 상대적인 차이(%)를 나타내었다. 표에서 보는 바와 같이 하층부의 매개변수 성분에서 주목할 만한 차이를 보였다. Predominant 방법에 의한 매개변수는 하층부 부착수의 최대값인 LZTWM을 제외하고는 모두 30%~64%의 차이를 보였다. 이는

개념적인 모형인 SAC-SMA 모형이 식생에 대해 상부층의 매개변수 보다는 하부층의 매개변수가 추적과정의 관측유량에 맞추어지도록 민감하게 반응했기 때문이라고 판단된다. 따라서 침투에 관련된 매개변수인 PFREE는 지표면 조도계수의 변화에 민감하였다. 한편 arithmetic 방법에 의한 매개변수는 하층부 자유수중 증발산에 의해 소모되지 않는 비를 나타내는 매개변수인 RSERV만을 제외하고는 차이가 적었고, PFREE는 민감하게 변화하였다. 다. 하층부의 토양부착수의 최대값을 나타내는 매개변수인 LZTWM은 3가지 방법 모두에 대해 변화가 적었다.

이러한 결과는 개념적인 수문모형인 NWS-PC 모형에서 지표면 조도계수의 설정에 따라 유출성분 중 기저유량을 표현하는 하층부의 매개변수를 민감하게 변화시킴으로 인하여, 기저유량이 과다산정 또는 과소산정될 수 있다는 점을 의미한다. 개념적인 수문모형이 수자원 계획과 관리, 토지이용 변화, 기후변화 영향을 조사하는데 사용되는 경우가 많으므로 이러한 점은 주의해서 검토되어야 할 것으로 판단된다.

Table 5. Relative differences of each parameter in percentage using the parameter derived from the aggregation method as a reference

| Parameters | Optimized parameters | | | Relative differences (%) | | |
|-----------------|----------------------|-----------------|-------------|--------------------------|-----------------|-------------|
| | Predominant | Arithmetic mean | Aggregation | Predominant | Arithmetic mean | Aggregation |
| (a) Upper zone | | | | | | |
| UZTWM | 89.835 | 88.276 | 89.582 | 0.282 | -1.458 | - |
| UZFWM | 79.904 | 72.040 | 75.190 | 6.269 | -4.189 | - |
| UZK | 0.314 | 0.326 | 0.323 | -2.786 | 0.929 | - |
| ADIMP | 0.300 | 0.272 | 0.276 | 8.696 | -1.449 | - |
| PCTIM | 0.100 | 0.098 | 0.100 | 0.000 | -2.000 | - |
| RIVA | 0.190 | 0.174 | 0.203 | -6.404 | -14.29 | - |
| (b) Lower zone | | | | | | |
| LZTWM | 311.027 | 311.118 | 311.039 | -0.004 | 0.025 | - |
| LZFPM | 275.427 | 188.302 | 210.701 | 30.72 | -10.63 | - |
| LZFSM | 34.121 | 101.376 | 96.100 | -64.49 | 5.490 | - |
| LZPK | 0.015 | 0.012 | 0.011 | 36.36 | 9.091 | - |
| LZSK | 0.018 | 0.029 | 0.031 | -41.94 | -6.452 | - |
| RSERV | 0.155 | 0.145 | 0.279 | -44.44 | -48.03 | - |
| (c) Percolation | | | | | | |
| ZPERC | 128.429 | 141.044 | 124.080 | 3.505 | 13.67 | - |
| REXP | 3.954 | 3.676 | 3.542 | 11.63 | 3.783 | - |
| PFREE | 0.233 | 0.289 | 0.182 | 28.02 | 58.79 | - |

6. 요약 및 결론

본 연구는 유역의 식생상황을 표현하는 지표면 조도계수를 원격탐사 자료를 기반으로 만들어진 토지피복도에서 Manning 식과 같은 물리적 기반의 방법으로 구하는 방안을 제시하였다. 사전 연구로써 소유역별 지표면 조도계수의 변화에 따라 침투유량, 유출체적, 침투시간 등에 어떠한 영향을 미치는지를 분석하였다. 그리고 predominant, arithmetic mean 방법과 Manning 식과 같은 물리적 기반의 aggregation 방법으로 구한 유역 지표면 조도계수가 유출 모형의 매개변수에 미치는 영향을 분석하였다. 이를 위해 9개의 소유역을 가진 소양강 유역에 대해 NWS-PC 모형을 사용하여 강우-유출 모의를 수행하였다. 연구의 주요 결론은 다음과 같다.

1. 소양강댐 유역에서 지표면 조도계수 0.01~0.12의 범위에서 침투유량은 약 10%의 유량 차이를 나타내었고, 유출체적의 차이는 약 2%로 작은 변화를 나타내었다. 침투시간은 조도계수 n 에 비례하여 증가하였다. 그러나 침투시간은 0.02~0.115의 범위에서의 80시간 동안 일정하였으나, 모형의 최소시간 단위가 1시간인 점을 고려한다면 일반적으로 증가한다고 생각된다.

2. 소양강댐 유역에서 물리적 기반의 aggregation 방법에 의한 결과는 표준편차, RMSE, NSE, PME 기준에서 보다 나은 결과를 보였지만, 각각의 통합 방법에 대해 크게 다른 결과를 보이지는 않았다. 이러한 결과는 개념적인 수문모형인 NWS-PC 모형에서 지표면 조도계수의 설정에 따라 유출성분 중 기저유량을 표현하는 하층부의 매개변수를 민감하게 변화하였다.

이 연구는 강우-유출 모형에서 식생과 관련된 지표면 조도계수의 유역 대표값을 계산할 때 그 방법의 선택에 있어 공학적 직감을 제공함으로써 강우-유출 모형의 거동을 이해하는데 도움이 될 것으로 판단된다.

참고문헌

- 한국수자원공사, 1995, *한강수계 다목적댐 하류 연속유출 모형과 동역학적 하도추적 모형 연구(2차년도)*, 수자원연구소 WRR1-WR-95-2.
- 환경부, 2001, *토지피복분류도: 대분류(90년대 남한1)*.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. and Smith, M., 1998, *Crop evapotranspiration (guidelines for computer crop water requirements)*, FAO Irrig. and Drain. Paper No. 56, Food and Agricultural Organization of the United Nations, Rome.
- Arain, M.A., Michaud, J.D., Shuttleworth, W.J. and Dolman, A.J., 1996, "Testing of vegetation parameter aggregation rules applicable to the Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme (BATS) at the FIFE site", *Journal of Hydrology*, Vol. 177, Issues 1-2, pp. 1-22.
- Duan, Q., 1991, *A global optimization strategy for efficient and effective calibration of hydrologic Models*, Ph.D. dissertation, Dept. of Hydrol. and Water Resour., Univ. of Arizona, Tucson.
- Duan, Q., Sorooshian, S. and Gupta, V.K., 1994, "Optimal use of the SCE-UA global optimization method for calibrating watershed model", *Journal of Hydrology*, Vol. 158, Issues 3-4, pp. 265-284.
- Entekhabi, D. and Eagleson, P.S., 1992, "Land surface hydrology parameterization for atmospheric general circulation models including subgrid scale spatial variability", *Journal of climate*, Vol. 2, No. 8, pp. 816-831.
- Finnerty, B.D., Smith, M., Seo D., Koren, V. and Molglen, G.E., 1997, "Space-time scale sensitivity of the Sacramento model to radar-gage precipitation inputs", *Journal of Hydrology*, Vol. 203, Issues 1-4, pp. 21-38.
- Gupta, H.V., Sorooshian, S. and Yapo, P.O., 1999, "Status of automatic calibration for hydrologic models: comparison with multilevel expert calibration", *Journal of Hydrologic Engineering*, Vol. 4, No. 2, pp. 135-143.
- Koren, V.I., Finnerty, B.D., Schaake, J.C., Smith, M.B., Seo, D. and Duan, Q.Y., 1999, "Scale dependencies of hydrologic models to spatial variability of precipitation", *Journal of Hydrology*, Vol. 217, Issues 3-4, pp. 285-302.
- Koster, R.D. and Suarez, M.D., 1992, "A comparative analysis of two land surface heterogeneity representations", *Journal of Climate*, Vol. 5, No. 12, pp. 1379-1390.
- Maidment, D.R., 1993, *Handbook of hydrology*, McGraw Hill, Inc., New York, USA.
- McNaughton, K.G., 1994, "Effective stomatal and boundary layer resistances of heterogeneous surfaces", *Plant Cell and Environment*, Vol. 17, No. 1, pp. 1061-1068.
- Raupach, M.R., 1995, "Vegetation-atmosphere interaction and surface conductance at leaf, canopy, and regional scales", *Agric. For. Meteorol.*, Vol. 73, pp. 151-179.
- Reed, S., Koren, V., Smith, M., Zhang, Z., Moreda, F. and Seo, D., 2004, "Overall distributed model intercomparison project results", *Journal of Hydrology*, Vol. 298, Issues 3-4, pp. 27-60.
- Sefe, F.T. and W.C. Boughton, 1982, "Variation of model parameter values and sensitivity with type of objective function", *Journal of Hydrology (NZ)*, Vol 21(1), pp. 117-132.
- Shuttleworth, W.J., 1998, "Combining remotely sensed data using aggregation algorithms", *Hydrology and Earth system Sciences*, 2(2-3), pp. 149-158.
- Tabios III, G., Obeysekera, J.T. and Salas, J.D., 1986, *National weather service model -PC version*, Colorado State Univ., Ft. Collins, Colorado.
- U.S. Army Corps of Engineers, 1985, *HEC-1 Flood Hydrograph Package User's Manual (Revised Edition)*, Hydrologic Engineering Center, Davis, CA.
- Vieux, B.E., 2004, *Distributed hydrologic modeling using GIS*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands.