지표수문해석모형을 활용한 동아시아 유출해석 및 평가

Runoff Analysis and Assessment Using Land Surface Model on East Asia

손 경 환* / 이 문 환** / 배 덕 효***

Son, Kyung Hwan / Lee, Moon Hwan / Bae, Deg Hyo

Abstract

The objective of this study is to evaluate the applicability of Land Surface Model (LSM) for estimating the runoff on East Asia. Global geographical and weather data are used as input for the model and for the model verification, the simulated runoff results are compared with observed data from 34 global observation stations provided by Global Runoff Data Center (GRDC). Köppen's climate zone is used to calculate the model parameter for ungaged basins. As a result, the simulated runoff shows good performance comparing with observed data in 17 basins assumed as ungaged basins. The Hydrologic components on East Asia area are estimated from the model and the continental water balance components are seasonally similar to each country. Also, it reveals that runoffs from southern China, Japan and Taiwan are much higher than those from mongolian and northern China.

Keywords : land surface model, GRDC, east Asia, Köppen's climate zone, runoff analysis

요 지

본 연구에서는 지표수문해석모형을 활용한 동아시아 지역의 유출해석을 수행하고 그 적용성을 평가하였다. 이에 전지구 자료를 수집한 후 모형의 입력자료로 재구성하였으며, 모의 결과의 검증에 위해 GRDC에서 제공하는 국외 34개 지점의 관측유량자료를 수집하였다. 쾨펜의 기후대 구분을 통한 매개변수 전이 방법을 이용하여 미계측지역의 유출 매개변수를 결정하였으며, 동아시아 지역에 유출해석을 수행하였다. 그 결과 미계측지역으로 가정한 17개 유역에서 모의치가 관측치와 유사하게 거동하는 것으로 나타나 결과의 신뢰성이 높음을 확인하였다. 최종 결정된 매개변수로부터 동아시아 전역에 수문성분을 산정하였으며, 대체로 동아시아 지역의 국가들의 수문성분 거동은 계절별로 유사한 것으로 확인되었다. 또한, 중국의 남부지역, 일본 및 대만은 동아시아 내에서도 유출의 발생이 가장 높은 반면, 몽골 및 중국 북부지역에서는 매우 낮은 것으로 분석되었다.

핵심용어 : 지표수문해석모형, GRDC, 동아시아, 쾨펜의 기후대 구분, 유출해석

1. 서 론

동아시아 지역은 우리나라를 비롯하여 몽골, 중국, 북

한 및 일본 등 다수의 국가로 구성되어 있으며, 계절풍의 영향을 받는 몬순 지대에 속해 있다. 따라서 각 국가별로 날씨의 계절적인 패턴은 유사하며, 강수의 대부분은 6~9

* 세종대학교 토목환경공학과 박사과정 (e-mail: skhdr@paran.com)

Ph.D. Course Student, Dept. of Civil and Environmental Engrg., Sejong Univ, Seoul 143-747, Korea

** 세종대학교 토목환경공학과 박사과정 (e-mail: ycleemh@paran.com)

Ph.D. Course Student, Dept. of Civil and Environmental Engrg., Sejong Univ, Seoul 143-747, Korea

*** 교신저자, 세종대학교 물자원연구소·토목환경공학과 교수 (e-mail: dhbae@sejong.ac.kr)

Corresponding Author, Prof. Dept. of Civil and Environmental Engrg., Sejong Univ, Seoul 143-747, Korea

월에 집중되어 있어 여름철에는 홍수, 겨울 및 봄철에는 가뭄이 발생하는 특징이 있다. 그러나 최근 기후변화로 인해 동아시아 지역은 과거와 달리 열파(heat wave)와 더운기간(hot spell)이 길어지고 여름철 강수량과 호우 일수가 증가한 반면 겨울철은 더욱 감소하고 있는 추세이다(IPCC, 2007). 이는 가뭄과 홍수와 같은 극치사상의 발생 빈도를 증가 시킨다고 볼 수 있으며, 실제로 국내의 경우 2008년 태백시 가뭄, 2010년 및 2011년 서울시 집중호우로 인한 인명 및 재산 피해를 겪은바 있다. 국외에서는 2007년 북한 황해남도 지역의 홍수피해로 수백명이 사망 또는 실종되었으며, 2011년 중국 남서부 지역의 가뭄피해와 2011년 태국 방콕에서 홍수로 인한 피해를 겪은바 있다. 이처럼 기후변화로 인한 피해는 우리나라와 더불어 동아시아 전역에 발생되고 있으며, 이로 인한 국내 수자원의 영향을 분석하기 위해서는 인접한 국가들과의 연계 분석을 수행하는 것이 필요하다.

한편, 국내에서는 동아시아 지역과 연계한 수문해석의 필요성을 언급한바 있으나(과학기술부, 2007), 국외 지역에 대한 수문모형 및 입력자료 활용의 문제로 그동안 국내에서 도외시 되어왔다. 그러나 국외 수문기상 선진국들은 전지구적으로 발생하는 기후변화에 대응하기 위해 해석 범위를 인접국가 및 전 세계로 확장하여 수문현상을 규명하고 있는 추세이며, 이를 위해 수년간 전 세계 수문해석이 가능한 지표수문해석모형(Land Surface Model, LSM)을 개발하고 국가별 기상 및 수문정보의 교류와 전문화된 위성영상 기술을 토대로 수문해석을 위한 국외 지형 및 기상 자료를 수집해 왔다. 주요 연구 성과로는 Fan and Dool (2004)는 지표수문해석모형을 활용하여 전 세계 토양 수분정보를 생산 및 평가하였으며, Oki and Kanae (2006)은 지표수문해석모형을 토대로 전 세계 물수지의 변화를 분석한바 있다. 또한, 미국 CPC (Climate Prediction Center)에서는 이러한 연구 성과를 현업에 적용하여 전세계 기상재해를 감시 및 전망하고 이를 웹상으로 제공하고 있다.

국내의 경우 손경환 등(2010)은 국내에 대한 지표수문해석모형의 적용성을 평가하였으며, 전지구 자료의 불확실성을 평가한바 있다. 또한, 지표수문해석모형 기반의 국내 가뭄 현상 감시를 위한 기술을 개발한바 있다(손경환 등, 2011). 그러나 국내에 대한 평가에 국한되어 있을 뿐 국외 지역에 대한 적용은 여전이 미흡한 실정이며, 수문해석이 가능할 지라도 해석결과의 신뢰성 및 매개변수 결정 문제로 이를 제시할 만큼의 수준이 되지 못한 실정이다. 이에 본 연구에서는 지표수문해석모형을 활용하여 동

아시아 지역에 대한 유출해석을 할 수 있는 방안을 제시하고, 국외지역에 대한 관측유량정보를 확보하여 유출결과의 신뢰성 검증 및 미계측지역에 대한 매개변수를 도출하여 동아시아 지역에 대한 수문성분의 특성을 평가하고자 한다.

2. 연구수행방법

본 연구의 목적은 물리적 기반의 지표수문해석모형을 활용하여 동아시아 지역에 대한 유출해석을 수행하고 적용성을 평가하고자 함이며, 이를 위한 연구수행 절차 및 방법은 Fig. 1과 같다. 우선 유출해석을 위한 동아시아 영역 및 해상도를 결정하고 모형의 입력자료 구축을 위해 전지구 기상, 지형 자료를 수집 및 구축한다. 유출모의를 수행하기 위해 계측 및 미계측 유역에 대한 매개변수 결정이 요구된다. 본 연구에서는 계측유역에 대해 관측유량정보를 수집하고 매개변수 추정 및 관측치와의 비교분석을 통해 유출결과의 적절성을 평가한다. 또한, 미계측 지역에 대한 매개변수 결정을 위해 기후대 구분에 따른 매개변수 전이 기법을 이용하여 동아시아 전 지역에 대한 유출해석을 수행하고 적용성을 평가한다. 마지막으로 동아시아 지역에 산정된 수문성분을 토대로 월별, 계절별 및 연도별 물수지 분석을 통해 각 국가별 수문성분의 거동을 평가한다.

2.1 지표수문해석모형

본 연구에서는 동아시아 전역에 대한 유출해석을 수행하고자 중규모 이상(mesoscale)의 수문해석에 있어 전 세계적으로 활용성이 높은 VIC (Variable Infiltration Capacity) 모델(Liang, et al. 1994)을 채택하였다. VIC 모형은 1994년 미국 University of Washington의 Dennis Lettenmaier 박사 연구팀에 의해 개발되었으며, 이미 국내에서도 그 적용성이 검증된바 있다(손경환 등, 2010). 현재 국외에서는 VIC 모델을 활용하여 대륙 또는 전지구 규모의 수자원 부족량 및 가뭄해석을 수행하고 있다. Nijssen et al. (1997)은 유역 면적이 795,000 km²인 Mekong River를 대상으로 0.5° 해상도를 적용하여 유출해석을 수행한바 있으며, Sheffield and Wood (2008)은 VIC 모형을 이용하여 전 세계 토양수분을 산정하고 평가한 바 있다.

모델의 특징은 대기와 식생 그리고 토양의 상호작용 등의 수문과정을 기반으로 물과 에너지의 유동(Water & Energy Flux)을 모의하는 분포형 모형으로써 크게 물수지(water balance), 하도추적(channel routing), 에너지수지(energy

Fig. 1. Methodology for Estimation and Assessment of LSM on East Asia Domain

balance) 등으로 구성되어 있으며, 각 모듈은 독립적으로 수행된다. 모형에서 적용 가능한 격자의 범위는 $1/8^{\circ} \sim 2^{\circ}$ 정도로 다양한 공간분해능이 가능하여, 기상모델(Global Climate Model, GCM; Regional Climate Model, RCM)과의 직접적인 연계에 용이하다. VIC 모델에 대한 상세한 설명은 손경환 등(2010) 또는 Liang et al. (1994)을 참조하기 바란다.

2.2 동아시아 영역 및 해상도 결정

본 연구에서는 동아시아 영역을 대상으로 전지구 수문 해석이 가능한 VIC 모델을 이용하여 유출모의 및 평가를 수행하고자 하며, 아시아 전역에서 동아시아에 해당하는 기본 영역을 결정하였다. 영역 결정은 우선 동아시아 지역에 속하는 국가를 결정하고, 그 중 중앙아시아에 포함되는 중국의 티벳(Tibet) 및 신장(Xinjiang)지역은 제외시켰다. 또한, 향후 수문기상 및 기상재해 예측을 위해 현재 기상청에서 수치예보에 활용하고 있는 전지구 통합모형인 UM(United Model)의 경계를 본 연구에 반영하였다. 선정된 영역의 범위는 위도 $21.15^{\circ} \sim 50.15^{\circ}$, 경도 $104.40^{\circ} \sim 149.65^{\circ}$ 에 위치해 있으며, Fig. 2는 본 연구에서 채택된 동아시아 영역을 도시하였다. 영역 내에 속한 국가는 러시아 일부를 포함하여 몽골, 중국, 북한, 남한, 대만 및 일본으로 총 7개 국가로 구성되어 있다.

해상도 결정은 VIC 모형 모의의 기초과정에 속하며, 여러 입력자료 구축에 있어 기준이 되는 중요한 사항이다. 손경환 등(2010)은 $1/8^{\circ}$ 의 해상도로 VIC 모형을 국내에 적용한바 있으나, 금회 동아시아 지역의 구축에 있어서는 입력자료 구축 및 모의시간의 문제로 기존의 해상도를 그대로 적용하는데 한계가 있다. 이에 본 연구에서는 국의 문헌조사를 수행하여 해상도를 결정하였다. 수행결과 Liang et al. (2004)은 VIC 모형에 5개의 해상도($1/32^{\circ}$, $1/16^{\circ}$, $1/8^{\circ}$, $1/4^{\circ}$, $1/2^{\circ}$)를 적용하여 유출결과를 분석한 결과 $1/8^{\circ}$ 까지는 결과에 큰 차이가 없었으나, 해상도가 $1/2^{\circ}$ 보다 낮을수록 유출의 정확도가 낮아진다는 결과를 제시한바 있다. 따라서 본 연구에서는 유출결과의 불확실성을 최소화하고 모의시간 및 기술수준 등을 감안하여 $1/4^{\circ}$ 간격의 해상도를 채택하였으며, 동아시아 지역내 총 10,571개의 격자를 생산하였다.

2.3 기후대 구분에 따른 미계측지역의 매개변수 전이

유출모의 목적이 미계측지역의 유출해석 또는 관측이 어려운 수문성분을 추정하기 위함이라고 할 때, 동아시아 지역에 대한 유출해석을 수행함에 있어서 미계측지역에 대한 합리적인 유출모의 방법을 찾는 것은 매우 중요하다. 통상, 이 방법은 ‘지역화’라고 불리며, 수행 방법으로는 모형 적용 시 필요한 매개변수를 계측지역에서 미계측

Fig. 2. Location of Selected Station and River Basins on East Asia

유역으로 전이, 계측유역의 홍수량 자료를 이용한 미계측 유역의 홍수해석, 수문학적 동질성을 갖는 유역구분 등 모형의 특성, 자료여건 및 활용목적에 따라 다양한 방법으로 구분된다.

이미 국내에서는 지역화와 관련하여 다양한 연구가 수행되어 왔으며, 배덕호 등(2007)과 정일원 등(2007)은 PRMS 모형의 8개 매개변수를 회귀식을 이용하여 미계측지역에 전이하였으며, 이병주 등(2009)은 다변량 통계분석을 이용한 매개변수 지역화를 통해 계측유역의 7개 매개변수를 우리나라 109개 중권역에 대해 전이하여 유출모의를 수행한 바 있다. 또한, 손경환 등(2010)은 VIC 모형을 이용하여 계측유역으로부터 추정된 매개변수를 대표하는 대표 매개변수를 산정하여 남한 전역에 대한 유출해석을 수행한 바 있다. 그러나 이 방법들은 유역단위로, 동아시아와 같이 Large-scale 기반의 유출해석에 있어서는 평가된 바 없다. 더욱이, 대표매개변수의 경우 동아시아 전역을 동일한 매개변수를 활용하여 유출해석을 수행해야 하기 때문에 지역적 특성을 제대로 반영하지 못한다는 단점이 있다.

한편, 국외의 경우 Nijssen et al. (2001)은 강우 및 온도 등의 기후인자로 부터 동일한 기후특성을 지닌 지역별로 매개변수를 구분한 후 전 세계에 대한 유출해석을 수행한

바 있으며, Xie et al. (2007)은 이와 동일한 방식으로 중국 전역에 대한 유출해석을 수행하고 적용성을 평가한 바 있다. 기후대 활용 근거는 유출해석에 있어 가장 민감한 변수가 기상정보이기 때문이며, 특히, 전지구 해석에서도 활용성이 높다는 특징이 있다. 본 연구에서는 동아시아 지역의 매개변수 지역화를 위해 기후대 구분에 따른 매개변수 전이 방식을 채택하였으며, 기후대 구분 방법으로는 이미 국내에서도 많이 알려진 쾨펜(Köppen, 1936)의 기후대 구분법을 활용하였다. Table 1은 쾨펜이 제시한 기후대 구분을 Hubert et al. (1998)이 강수 및 기온만을 이용하여 기후대를 구분할 수 있도록 수정한 것이다. 기후대 종류는 열대기후(A), 온난건조기후(Bh), 한랭건조기후(Bk), 온난중위도습윤기후(C) 및 대륙성습윤기후(Da) 등 총 8개가 있으며, 각 기후 특성에 대한 기후 조건으로부터 기후지역을 구분하게 된다. 각 기후 조건별 기후 특성을 살펴보면 A기후는 가장 추운달의 기온이 18℃ 이상, 연평균 강수량이 2,000 mm 이상에 속하며, Bh 기후는 연평균 기온이 18℃보다 크고 연강수량은 250 mm 이하로 강수량이 적고 대부분 사막으로 구성된 지역에서 볼 수 있다. Bk 기후는 연평균 온도가 18℃ 미만, 연 강수량이 250~500 mm로 일교차가 높고 약간의 강수가 있어 주로 초원 지

Table 1. Grouping of Köppen Climate Zone

Parameter transfer zone	Köppen climate zone	Climate characteristics
Tropical climate	A	Not a B climate and $\overline{T}_m^{\min} \geq 18^\circ\text{C}$
Dry, warm climate	Bh	B climate with $\overline{T}_a > 18^\circ\text{C}$
Dry, cold climate	Bk	B climate with $\overline{T}_a \leq 18^\circ\text{C}$
Rainy midlatitude climate	C	Not a B climate and $-3^\circ\text{C} < \overline{T}_a \leq 18^\circ\text{C}$
Continental climate with hot summer	Da	Not a B climate and $\overline{T}_m^{\min} < -3^\circ\text{C}$ and $\overline{T}_m^{\max} > 22^\circ\text{C}$
Continental climate with cool summer	Db	Not a B climate and $\overline{T}_m^{\min} < -3^\circ\text{C}$ and $\overline{T}_m^{\max} > 10^\circ\text{C}$ for at least 4 months
Continental climate with short cool summer	Dc	Not a B climate and $\overline{T}_m^{\min} < -3^\circ\text{C}$ and $\overline{T}_m^{\max} > 10^\circ\text{C}$ for less than 4 months
Polar climate	E	Not a B climate and $\overline{T}_m^{\max} < 10^\circ\text{C}$

* The B climates are defined as those climates.

• $\overline{P}_a < 20\overline{T}_a + 140$

• $\overline{P}_a < 20\overline{T}_a$ when 70% of the annual precipitation falls in the coldest season.

• $\overline{P}_a < 20\overline{T}_a + 280$ when 70% of the annual precipitation falls in the warmest season.

** Here, T is the temperature ($^\circ\text{C}$), P is the precipitation (mm), the subscripts m and a are used to indicate the monthly and annual periods, respectively, and the superscripts min and max indicate the coldest and warmest months, respectively.

대가 발달해 있다. C기후는 연평균 기온이 -3°C 에서 18°C 사이로 여름이 길고 더운 편이며, 겨울은 짧고 온화하다. Da 기후는 최한월의 기후가 -3°C 이하, 최난월의 기후는 22°C 이상으로 연강수량이 약 500~1,300 mm의 조건에 속하며, 국내 기후와 유사하다. 그 외에도 Db 기후는 4개월 이상 최한월의 기온이 -3°C , 최난월의 기온이 10°C 지역에 속하며, Dc 기후는 대륙성냉대기후로 시베리아, 알래스카 등의 지역에 속한다. E 기후는 극기후로써 그린랜드나 남극대륙처럼 연중 얼음이나 눈에 덮여있는 지역에 속한다.

3. 입력자료 구축

3.1 지형 및 기상자료

손경환 등(2010)은 이미 국내자료와의 비교분석을 통해 전지구 지형 및 기상자료의 가용여부를 평가한 바 있으며, 국내 자료와 비교할 경우 자료의 불확실성은 높으나, 기간별(월, 계절 등) 해석을 수행한다면 활용성은 충분하다고 제시한 바 있다. 이에 본 연구에서는 기존 연구 성과를 토대로 동아시아 지역에 대한 전지구 지형 및 기상자료를 수집하였으며, 수집된 자료는 DEM, 토지피복

도, 토양도, 최고기온, 최저기온, 평균풍속 및 강수 자료이다. 여기서 DEM은 미국지질조사국(United States Geological Survey, USGS)에서 제공하는 $30'' \times 30''$ 간격의 자료를, 토양자료는 국제연합식량농업기구(Food Agriculture Organization, FAO)에서 제공하는 $5' \times 5'$ 해상도 기반의 자료를, 토지피복도는 전지구를 대상으로 1 km 간격의 토지피복도를 제공하는 University of Maryland (UMD)의 토지피복(land cover) 자료를 활용하였다. 그 외에도 식생 및 토양의 물리적 특성에 대해서는 Hansen et al. (2000), Cosby et al. (1984) 및 Rawls et al. (1993)의 연구 성과를 이용하여 값을 결정하였으며, 본 연구에서는 이상의 수집된 자료를 $1/4^\circ$ 해상도에 맞춰 재가공하였다.

기상자료의 경우 국가기후자료센터(National Climate Data Center, NCDC)에서 제공하는 자료를 활용하였으며, Table 2는 동아시아 지역 내에 수집된 국가별 기상관측소 정보를 나타낸 것이다. 우선 자료기간은 1980~2009년으로 지정하였으며, 이상치 및 결측구간을 검토한 결과 국내외 지역에서는 총 477개의 관측소를 선별하였다. 또한, 남한의 경우 국내 기상청(Korea Meteorological Administration, KMA)에서 제공하는 ASOS(Automated Surface Observing System) 및 AWS(Automatic Weather System)

Table 2. Number of Selected meteorological Stations on East Asia Domain

Data Providers	Russia	Mongolia	China	North Korea	South Korea	Japan	Taiwan
NCDC	47	18	246	27	-	133	6
KMA	-	-	-	-	586	-	-

자료를 활용하였으며, 수집된 자료에 대해서는 Thiessen 기법을 이용하여 격자별 평균강우량으로 재구성하였다. 또한, AWS 등 자료기간이 짧은 관측소에 대해서는 연도별로 관측소를 갱신하여 Thiessen망을 재구성한 후 격자별 평균강우량을 재산정하는 방식으로 처리하였다.

3.2 국외 관측 유량자료 수집 및 품질검토

통상 유출해석을 수행함에 있어서는 모의 결과의 신뢰성을 검증하는 과정이 필요하며, 이를 위해서는 관측유량 자료를 수집하고 모의 결과와의 비교분석이 이루어져야 한다. 현재 세계기상기구(World Meteorological Organization, WMO)의 가입 국가들은 관측유량정보를 WMO에 전송하는 것으로 조사되었으며, WMO 산하 독일연방정부의 자금으로 운영되는 GRDC(Global Runoff Data Center)에서는 이러한 정보를 총괄적으로 수집하여 전 세계 약 7,300개 정도의 관측소별 관측유량 정보를 제공하고 있다. 자료의 기본 단위는 몇몇 관측소에서 일단위를 제공한다고 명시되어 있으나, 대부분 월단위 및 연도별 관측유량 정보를 제공하고 있다. 이에 본 연구에서는 동아시아 지역에 대해 GRDC의 전지구 관측유량정보를 수집하였으며, 구축된 관측소에 대한 현황은 다음 Fig. 2와 같다. 관측소 선정은 우선 해당 관측소가 속해 있는 유역이 댐 등의 수공구조물에 의한 인위적인 영향을 받는 지역인지를 검토하고 그 다음 관측값의 결측 및 가용기간 등을 검토하여 최종 가용한 관측소를 선정하였다. 검토 결과 Fig. 2에서 제시한 바와 같이 각 국가별 제공되는 가용 관측소의 개수는 26개로 선정되었으며, 러시아 1개소, 몽골 1개소, 중국 9개소, 북한 3개소 및 일본 12개소로 결정되었다. 또한, 남한의 경우 국토해양부(Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, MLTM)에서 제공하는 자료를 수집하였으며, 대상유역은 권역별로 한강권역에서 3개(충주댐, 소양강댐, 괴산댐), 낙동강권역에서 3개(임하댐, 안동댐, 합천댐), 금강권역에서 1개(대청댐), 섬진강권역에서 1개(섬진강댐)로 총 8개이다.

Table 3은 각 국가별로 선정된 관측소의 이름, 자료의 가용기간 및 대상유역 면적을 나타낸 것이다. 우선 국외

관측자료의 가용기간을 살펴보면, 러시아의 경우 1982~1986년, 몽골은 1982~1984년이었으며, 중국은 총 9개의 관측소에서 최소 1982년에서 최대 1997년으로 각 관측소별 자료보유 기간이 상이한 것으로 나타났다. 또한, 북한의 경우 3개의 관측소에서 1982~1984년으로 자료기간이 총 3년인 것으로 확인되었으며, 일본은 총 12개 관측소 모두 1993~2003년으로 자료기간이 동일한 것으로 나타났다. 유역 면적은 러시아의 경우 Bolshaya Bira 유역은 29,100 km², 몽골의 Kerulen 유역은 39,400 km²로 비교적 대유역에 속할만큼 규모가 큰 것을 알 수 있으며, 특히 중국의 Han Shui, Huai He 및 Liao He 유역의 경우 유역면적이 각각 105,535 km², 121,330 km² 및 120,764 km²으로 남한 면적(약 100,000 km²)을 월등히 넘는 것으로 확인되었다. 또한 북한의 경우 유역규모가 평균 2,266 km²으로 국내 유역과 비교할 경우 큰 차이가 없는 것으로 확인되었으며, 일본은 평균 5,458 km²로 중규모 이상의 유역이 다수 포함된 것으로 조사되었다.

한편, GRDC에서는 남한에 대해서도 관측유량자료를 제공하고 있으며, 관측소 지점은 국토해양부에서 제공하는 지점과 동일한 여주(한강), 공주(금강) 및 나주(영산강)로 총 3개의 지점인 것으로 조사되었다. 더욱이, 자료의 단위 기간은 일단위이며, 자료기간은 여주관측소의 경우 1997~2007년, 공주관측소는 1999~2009년 및 나주관측소는 1997~2009년으로 확인되었다. 이에 본 연구에서는 자료의 품질검토를 위해 GRDC와 동일 지점에서의 국내 자료를 비교분석하였다. Fig. 3은 여주 관측소를 대상으로 GRDC와 국내의 관측유량자료를 도시한 것이다. 평가 결과 대체로 두 자료의 유출 거동이 아주 유사한 것으로 확인되었으며, 나머지 2개의 관측소에서도 이와 같은 결과를 얻을 수 있었다. 다만, 저유량의 부분에서 국내 자료와 약간의 차이가 있는 것으로 확인되었는데, 이는 자료 전송에 따른 문제에 의한 것으로 판단된다. 따라서 GRDC의 자료의 신뢰성은 아주 높다고 판단되며, 본 연구에서는 이상의 수집된 자료를 토대로 국외 지역에 대한 유출 해석결과의 적절성을 평가에 활용하고자 한다.

Table 3. Characteristics of the Selected Study Basins and Available Data Period

Country	No.	Station Name	Study Basins	Characteristics	
				Aera(km ²)	Data Period (year)
Russia	①	Birobidzhan	Bolshaya Bira	29,100	1982~1986
Mongolia	②	Undurkhan	Kerulen	39,400	1982~1984
China	③	Ankang	Han Shui	105,535	1982~1986
	④	Xixia	Laoguan He	3,418	1991~1997
	⑤	Tiane	Hongshui He	105,535	1982~1989
	⑥	Bengbu	Huai He	121,330	1982~1993
	⑦	Gongtan	Wu Jiang	58,300	1982
	⑧	Jian	Gan Jiang	56,200	1982~1984
	⑨	Boluo	Dong Jiang	25,325	1982~1986
	⑩	Chiling	Liao He	120,764	1982~1985
	⑪	Jilin	Songhua Jiang	44,100	1982~1986
North Korea	⑫	Jonchon	Sangwangang	2,192	1982~1984
	⑬	Songchon	Biryugang	1,878	1982~1984
	⑭	Samdung	Namgang	2,727	1982~1984
Japan	⑮	Onobuchi	Sendai	1,348	1993~2003
	⑯	Senoshita	Chikugo	2,315	1993~2003
	⑰	Kashiwada	Oyodo	2,126	1993~2003
	⑱	Kawahira	Gono	3,807	1993~2003
	⑲	Miyasu	Yoshi	1,996	1993~2003
	⑳	Yoshino	Yoshino	3,044	1993~2003
	㉑	Hirakata	Yodo	7,281	1993~2003
	㉒	Kashima	Tenryu	4,880	1993~2003
	㉓	Fukawa	Tone	12,458	1993~2003
	㉔	Iwanuma	Abukuma	5,265	1993~2003
	㉕	Ishikari-ohashi	Ishikari	12,697	1993~2003
	㉖	Moiwa	Tokachi	8,277	1993~2003
Republic of Korea	㉗	Soyang	Soyang	2,703	1982~2010
	㉘	Chungju	Chungju	6,648	1986~2010
	㉙	Andong	Andong	1,590	1982~2010
	㉚	Imha	Imha	1,361	1993~2010
	㉛	Goesan	Goesan	676	1982~2010
	㉜	Daecheong	Daecheong	3204	1982~2010
	㉝	Seomjin	Seomjin	763	1982~2010
	㉞	Hapcheon	Hapcheon	925	1989~2010

Fig. 3. Comparison of Local (MLTM) and Global (GRDC) Runoff Data at Yeosu Station

4. 동아시아 유출해석 및 평가

4.1 동아시아 지역에 대한 기후대 구분

본 연구에서는 VIC 모델의 매개변수를 미계측유역으로 전이하기 위해 Table 1에 제시된 쾨펜의 기후대 조건에 따라 동아시아 지역을 구분하였다. Fig. 4는 동아시아 지역에 대해 기후대 현황을 도시한 것으로 구분된 기후대는 한랭건조기후(Bk), 온난중위도습윤기후(C), 대륙성습윤기후(Da) 및 대륙성한랭기후(Db)로 총 4개로 구성되었음을 알 수 있다. 따라서 금회 구분된 기후대와 해당 지역의 실제 기후특성을 살펴보면, 우선 몽골 남부 및 중국 서북부 지역에서는 한랭건조기후 지역으로, 해당지역의 Bk 기후특성과 일치하는 것으로 확인되었다. 또한 한반도의 경우 온난건조한 남부지역을 제외하고 대부분 대륙성습윤기후의 특성을 가지고 있으며, 금회 구분된 기후대에서도 C 및 Da 기후대가 분포하여 적절한 것으로 판단된다. 특히, C 기후대는 동아시아에서도 우리나라 동해, 황해 및 남해 연안, 일본의 대다수 지역 그리고 중국의 화중(華中)과 화동(華東)지방에 분포한 기후대로, 금회 산정된 결과에서도 이를 충분히 반영하는 것으로 나타났다. Table 3을 토대로 각 기후대에 위치한 유역의 개수를 살펴보면 총 34개 유역 중에서 Bk는 1개, C는 20개, Da는 15개 및 Db는 1개로 주로 C 및 Da 기후대에 가장 많이 분포된 것으로 나타났다.

4.2 동아시아 유출해석 및 적용성 평가

4.2.1 모델 매개변수

유출해석을 수행하기 위해서는 모델의 매개변수 특성을 파악하고 이를 활용하는 것이 중요하다. VIC 모델에서 이용되는 매개변수는 대부분 기 구축된 DEM, 토지피복도 및 토양도 등의 지형공간 자료와 기존에 연구된 식생과 토양특성 자료로부터 산정될 수 있지만, 금회 추정하고자 하는 모형의 매개변수는 유출결과에 민감하고 직·간접적인 계측 또는 추정이 어려운 변수들이다. Table 4는 기후대 구분을 통해 전이하고자 하는 매개변수 종류를 나타낸 것이다. 변수의 개수는 총 5가지로 구성되며, 각 변수의 이론적 특성을 살펴보면, $b_{infiltr}$ 는 지표로 유입되는 강우로부터 침투량을 결정하는 매개변수로써 값이 커질수록 지표유출은 증가한다. D_{smax} , D_s 및 W_s 는 기저유출의 거동 및 양을 결정하는 변수로 D_m 및 D_s 는 기저유출 감수부곡선의 거동을 결정하고, W_s 기저유출 발생량을 결정한다. d_1 , d_2 , d_3 는 최상부, 상부 및 하부 토층의 깊이 뜻하며, 토양층은 깊이가 낮을수록 저장할 수 있는 토양수분량이 감소하여 증발량은 감소하고 유출은 증가하는 특성이 있다. $root_depth$ 는 증산을 위한 각 토양층별 식생의 뿌리깊이를 의미하며, 증산되는 양은 깊이에 비례한다.

Fig. 4. Climate Zone in East Asia According to Köppen Climate Zone

Table 4. VIC Model Parameters

Parameters	Description	Realistic range
b_infil	Exponent of variable infiltration capacity curve	0.0-10.0
D _s	Fraction of maximum base flow	0.0-1.0
D _{smax}	Maximum velocity of baseflow (m/day)	0-40
W _s	Fraction of maximum soil moisture content of the lower layer	0.0-1.0
d ₁ , d ₂ , d ₃	Three soil layer thickness (m)	0.05-2.0
Root_depth	Root zone thickness (m)	0.05-2.0

4.2.2 매개변수 전이 및 평가

VIC 모델을 활용한 동아시아 전역의 유출해석을 수행하기 위해서는 계측 및 미계측 지역을 모두 만족할 수 있는 매개변수의 산정이 필요하다. 본 연구에서는 모형의 계산 및 검증에 위해 GRDC에서 수집된 34개 유역의 관측유량정보로부터 17개의 유역을 계측유역으로, 나머지 17개 유역을 미계측유역으로 가정하였다. 각 기후대별 계측유역을 만족하는 대표매개변수를 산정한 후, 미계측유역으로 가정한 17개 유역에 대해 유출해석 및 검증을 수행하였다. 여기서, GRDC에서 제공하는 관측유량자료의 기본 시간단위가 월단위로 구성되어 있어 일단위로 모의된 유출결과를 월단위로 환산하여 적절성을 평가하였다. 또한, Bk 및 Da 기후대의 경우 해당 기후에 속하는 유역이 각 1개씩만 존재하여 검증에서 제외하였다.

Table 5는 각 기후대별로 계측(Cal) 및 미계측(Ver) 유역에 대한 통계적 결과와 산정된 매개변수들을 제시한 것이다. 계측유역의 경우 대부분 유역이 상관계수(CC)가 0.68~0.94, 모형효율성계수(ME)는 0.12~0.95, 평균제곱오차(RMSE)는 9.09~77.00 mm/month, 유출용적오차(VE)는 약 1.37~35.00%로 나타났다. 그 중 몽골의 Kerulen 유역, 일본의 Yoshi와 Ishikari 유역에서 모형효율성 계수 및 유출용적오차의 정확도가 낮은 것으로 나타났는데, 이는 NCDC로부터 수집된 전지구 기상자료의 불확실성에 의한 것으로 확인되었다. 반면, 국내 자료로 구축된 임하(Imha), 섬진(Seonjin), 안동(Andong) 및 괴산(Goesan)댐의 경우 국외에 비해 통계분석 결과가 대부분 높게 산정되어 전지구 기상자료 품질의 중요성에 대해 간접적으로 확인할 수 있었다. 마지막, 미계측 유역에 대한 매개변수 전이를 위해 Table 5에 제시된 각 기후대별 대표 매개변수를 동일한 기후대에 속하는 미계측 유역에 그대로 전이하여 유출해석을 수행한 결과, 상관계수(CC) 0.62~0.98, 모형효율성계수(ME) 0.25~0.96, 평균제곱오차(RMSE)

9.09~77.03 mm/month 및 유출용적오차가 최대 35.57% 이내에 분포한 것으로 나타났다. 모형효율성계수 및 유출용적오차에서 다소 차이는 있으나, 나머지 통계치에서는 상당히 높은 정확도를 보이는 것으로 나타났다. 각 유역별 산정된 유출결과와 신뢰성 평가를 수행하였으며, 상관계수 및 모형효율성 계수가 0.60이상일 경우, 유출용적 오차가 30.00% 이내이면 양호로 그렇지 않으면 불량으로 구분하였다. 그 결과 보정 구간에서는 12개 유역이 양호로, 5개 유역이 불량으로 나타났으며, 검정 구간에서는 13개 유역이 양호로, 4개 유역이 불량으로 나타나 산정된 결과의 신뢰성은 적절하다고 판단된다.

Fig. 5는 전체 모의기간에 대해 일부 유역을 선정하여 관측 및 모의유량을 같이 도시한 것이다. Gang Jiang 및 Namkang 등 모의유량이 관측유량의 거동을 적절히 반영하지 못한 부분이 있었으나, 전체 기간 동안에 저수 및 고수 부분에서 모의치가 관측치와 유사하게 거동하는 것을 확인할 수 있다. 특히, Wu Jiang 유역의 경우 자료기간이 1년임에도 불구하고도 관측치와 거의 일치하는 것으로 나타났으며, Oyodo 유역은 12년 기간동안 관측치를 적절히 반영하는 것으로 확인되었다. 이와 같이 분석된 통계적 및 도시적 평가 결과 전지구 자료임을 감안할 경우 금회 산정된 유출결과는 적절한 것으로 확인되었으며, 금회 동아시아 지역에 구축된 VIC 모델의 활용은 적절하다고 사료된다.

4.3 동아시아 수문성분 산정 및 평가

본 연구에서는 기후대별로 산정된 매개변수를 동아시아 전역에 전이하고 VIC 모델을 이용하여 총 10,571개 격자에 대한 수문성분을 산정하였다. Fig. 6은 모의 기간인 1982~2009년 동안 산정된 수문해석 결과를 월별 평균값으로 도시한 것이다. 대상 국가는 몽골, 중국, 북한, 남한, 일본 및 대만으로 총 6개 국가이며, 강우, 증발산, 유출 및 토양수분량 순으로 결과를 제시하였다. 국가들 대부분이 6~9월 강수가 높고 12~2월 사이의 강수량이 낮은 것으

Table 5. Statistical Analysis of Simulated Runoffs on Selected each Basins

–	Climate Zone	No.	Basins Site	Statistics				Parameters			
				CC (–)	ME (–)	RMSE (mm/month)	VE (%)	b_infilt	D _s	D _{smax}	W _s
Cal	Bk	②	Kerulen	0.68	0.12	2.17	–39.21	0.030	0.0003	29.492	0.970
	C	③	Han Shui	0.95	0.83	22.01	–5.45	0.170	0.0054	29.492	0.910
		⑥	Huai He	0.89	0.79	22.21	6.17	0.170	0.0054	29.492	0.910
		⑨	Dong Jiang	0.92	0.77	23.98	2.16	0.350	0.1200	5.492	0.510
		⑮	Sendai	0.93	0.82	65.62	–20.60	0.350	0.0300	29.492	0.910
		⑲	Yoshi	0.83	0.50	48.06	–37.32	0.170	0.0054	29.492	0.910
		㉓	Tone	0.88	0.72	23.17	16.34	0.170	0.0300	29.492	0.910
		㉔	Abukuma	0.75	0.56	29.98	–4.66	0.170	0.0400	8.492	0.710
		㉟	Imha	0.98	0.95	18.27	7.74	0.170	0.0054	29.492	0.910
		㉡	Seomjin	0.98	0.95	20.77	3.76	0.170	0.0054	29.492	0.930
	Da	⑪	Songhua Jiang	0.69	0.35	14.29	–10.37	0.350	0.0650	10.492	0.810
		⑬	Biryugang	0.81	0.60	35.72	20.15	0.170	0.0054	29.492	0.910
		⑫	Sangwangang	0.66	0.40	44.55	–23.04	0.070	0.0054	29.492	0.710
		㉕	Ishikari	0.85	0.52	30.95	–24.61	0.270	0.06	12.492	0.550
		㉖	Andong	0.98	0.95	16.85	3.21	0.170	0.0054	29.492	0.862
		㉡	Goesan	0.97	0.93	22.83	–7.19	0.170	0.0054	29.492	0.862
	Db	⑩	Liao He	0.83	0.68	11.19	19.31	0.170	0.0054	29.492	0.910
Ver	C	⑤	Hongshui He	0.62	0.25	33.59	12.43	0.206	0.01	24.992	0.850
		④	Laoguan He	0.65	0.40	19.68	–14.27				
		⑦	Wu Jiang	0.97	0.95	9.09	1.37				
		⑧	Gan Jiang	0.92	0.79	30.24	–14.23				
		⑯	Chikugo	0.94	0.70	66.96	–35.57				
		⑰	Oyodo	0.91	0.79	77.03	–19.35				
		⑱	Gono	0.91	0.75	40.70	–20.80				
		㉐	Yoshino	0.83	0.65	51.78	15.96				
		㉑	Yodo	0.86	0.68	26.11	6.42				
		㉒	Tenryu	0.89	0.64	40.92	–26.39				
		㉔	Hapcheon	0.98	0.96	19.39	13.05				
	Da	①	Bolshaya Bira	0.84	0.58	22.50	24.40	0.170	0.015	27.242	0.750
		⑭	Namgang	0.86	0.68	37.18	2.39				
		㉖	Tokachi	0.82	0.62	26.83	–15.62				
		㉡	Daecheong	0.96	0.91	22.81	3.68				
		㉢	Chungju	0.98	0.93	26.91	–8.98				
		㉣	Soyang	0.97	0.93	29.06	–9.95				

Percent error in Volume (VE)= $100 \times (\sum S_i - \sum O_i) / \sum O_i$,

Root mean square error (RMSE)= $\sqrt{\sum (O_i - S_i)^2 / n}$, n is a number of data

Nash–Sutcliffe efficiency (ME)= $[\sum (O_i - \bar{O})^2 - \sum (O_i - S_i)^2] / \sum (O_i - \bar{O})^2$

Correlation coefficient (CC)= $SS_{os} / \sqrt{SS_o \times SS_s}$, $SS_{os} = \sum (O_i - \bar{O})(S_i - \bar{S})$, $SS_o = \sum (O_i - \bar{O})^2$, $SS_s = \sum (S_i - \bar{S})^2$

O is observed flow and S is simulated flow.

Fig. 5. Observed and Simulated Runoffs at Selected Basins

Fig. 6. Monthly Mean Analysis of Continental Water Balance Components

로 나타났으며, 유출 거동 역시 이와 유사한 것으로 확인되었다. 중국은 월별 유출량이 1월 14.60 mm에서 7월 65.01 mm로, 증발산량은 85.97 mm로, 7월 유출량보다 높은 것으로 나타났으며, 토양수분은 8~10월 사이가 약 394.48 mm로, 12~2월 사이가 약 374.74 mm인 것으로 확인되었다. 북한은 유출량이 8월에 113.50 mm, 증발산은 7월에 84.56 mm, 토양수분량은 8월에 457.80 mm로 가장 높았으며, 남한의 경우 북한과 양적인 차이는 있겠으나, 수문성분의 거동은 거의 유사한 것으로 나타났다. 일본은 강수량의 월별 평균이 78.89~192.62 mm, 유출량은 58~124 mm, 토양수분량은 528~544 mm로 대상 국가들 중에서 월별 수문성분의 차이가 가장 낮았으며, 대만은 월별 강수의 범위가 45.25~402.67 mm, 유출량은 25.98~312.04 mm로 월별 수문성분의 변화가 가장 높은 것으로 나타났다. 마지막 몽골의 경우 8월에 70.33 mm로 대상 국가들 중 월별 강수량이 가장 낮았으며, 증발산은 7월에 45.20 mm로 8월 유출량인 20.98 mm에 비해 24.22 mm 더 높은 것으로 나타났다. 특히, 유출량의 경우 5월에 20.80 mm로 8월과 거의 유사한 것으로 나타났는데, 이는 용설에 의한 영향으로 판단된다.

Fig. 7은 동아시아 영역내 계절별 유출의 공간적인 거동을 분석하고자 각 격자별 산정된 일단위 유출량을 계절단위로 구분한 후 IDW 기법을 이용하여 이를 도시한 것이다. 그림에서 DJF는 겨울철인 12, 1, 2월, MAM은 봄철인 3, 4, 5월, JJA는 여름철인 6, 7, 8월, SON은 가을철인 9, 10, 11월을 의미한다. 각 계절별로 여름, 가을, 봄 및 겨울 순으로, 유출은 여름철에 가장 높고 겨울철에 낮은 것으로 나타났으며, 특히, 일본 및 중국의 화중 및 화동(북위 35°, 동경 125° 이내) 지역에서 전 계절별 유출량이 타 국가에 비해 높은 것으로 분석되었다. 몽골은 동아시아 영역내에서 계절별 유출량이 가장 적었으며, 계절별로도 차이가 미비한 것으로 나타났다. 또한, 동경 40° 이상의 지역에서는 봄철에 유출량이 약 300 mm에 근접하는 것으로 나타났으며, 이는 해당지역의 강수 및 용설의 영향에 의한 것으로 판단된다. 중국은 남부지역인 화중 및 화동 지역을 제외하고는 대부분 몽골 지역과 유출의 계절적 패턴이 유사한 것으로 확인되었다. 이상의 결과는 동아시아 지역에 대한 수자원 및 가뭄 관리에 있어 정량적인 정보의 산출이 가능하다는 점에서 유용하게 활용될 것이라 사료된다.

Fig. 7. Seasonal Mean Runoff Analysis (1982~2009)

5. 결 론

본 연구에서는 동아시아 지역에 대한 유출해석을 위해 VIC 모델의 입력자료 구축 및 미계측 지역에 대한 매개변수 산정 방법을 제안하고, 해당 결과의 적절성을 검증하였다. 또한, 동아시아 지역의 수문해석을 수행하고, 산정된 수문성분에 대해 평가하였다. 본 연구에서 분석된 결과를 정리하면 다음과 같다.

- 1) 동아시아 지역에 대한 유출해석을 수행하기 위해 동아시아 영역 및 적정해상도를 결정하였다. 선정된 영역의 범위는 위도 $21.15^{\circ} \sim 50.15^{\circ}$, 경도 $104.40^{\circ} \sim 149.65^{\circ}$, 해상도는 $1/4^{\circ}$ 로 결정하였으며, 해당 영역에 대한 VIC 모델의 입력 자료를 수집하였다. 자료의 종류는 DEM, 토양도, 토지피복도, 강수, 최고기온, 최저기온 및 평균풍속으로 구성되며, 각 수집된 자료들을 $1/4^{\circ}$ 해상도로 재가공 하였다. 또한, 국외지역에 모의된 유출결과의 신뢰성을 평가하기 위해 GRDC에서 제공하는 국외 관측유량 정보를 조사하였으며, 남한을 제외한 러시아 1개소, 몽골 1개소, 중국 9개소, 북한 3개소 및 일본 12개소로 총 26개의 관측유량정보를 수집하였다. 자료의 품질을 검토하기 위해 국내 동일 관측소 자료와 비교분석을 수행하였으며, 그 결과 자료의 신뢰성이 높은 것으로 확인되었다.
- 2) 미계측유역에 대한 유출해석방법을 결정하기 위해 파펜의 기후대 구분에 따른 매개변수 전이 방법을 채택하였으며, 동아시아 영역에 대한 기후대 구분을 수행한 결과 Bk, C, Da 및 Db로 총 4개의 기후대가 구성된 것으로 나타났다. 전이 매개변수를 선정하고자 국내 자료를 포함한 총 34개 대상유역들 중 17개 유역은 계측유역으로, 나머지 17개 유역은 미계측유역으로 가정하였으며, 각 기후대별 계측유역에서 추정된 매개변수를 미계측 유역으로 전이하여 유출결과의 적절성을 평가하였다. 통계적 평가 결과 상관계수 $0.62 \sim 0.98$, 모형효율성계수 $0.25 \sim 0.96$, 평균제곱근오차 $9.09 \sim 77.03$ (mm/month), 유출용적오차가 최대 35.57% 이내로 분포한 것으로 나타났으며, 도시적 평가에서도 저수 및 고수 부분에서 모의치가 관측치와 유사하게 거동하는 것으로 나타났다. 전지구 자료로 구축된 결과임을 감안할 경우 금회 산정된 결과의 신뢰성은 높다고 판단되며, 특히, 기후대 구분에 따른 매개변수 전이 방법은 전지구 수문해석에 있어서 적절한 것으로 판단된다.

3) 기후대 구분에 따른 매개변수 전이를 통해 동아시아 전역에 대한 유출해석을 수행하였으며, 각 국가별 월별 평균 수문성분 분석 및 계절별 유출의 공간적인 거동을 평가하였다. 동아시아 지역에 속한 국가들 대부분 국내와 동일하게 6~9월 사이 유출의 발생이 높고, 12월~2월 사이가 낮은 것으로 나타났다. 그 중 C 기후대에 속하는 중국의 화중 및 화동지역, 일본과 대만 지역이 가장 높은 것으로 나타났다. 또한, 북한의 경우 남한 지역과 수문성분의 거동이 유사하였으며, 몽골은 낮은 강수량으로 인해 유출 및 토양수분량이 타 국가들에 비해 대체로 낮은 것으로 나타났다.

본 연구에서 제시한 동아시아 지역의 수문해석 기술은 국내에서 처음 수행된 것으로, 동아시아 지역내 국가별 수문성분 제공 및 활용이 가능하다는 점에서 그 가치가 충분히 높다고 판단된다. 본 연구에서 산정된 결과는 오늘날 국내 건설 산업의 세계시장 진출에 기술력 증진 및 경쟁력 확보에 큰 기여를 할 것이며, 동아시아 지역과 연계한 가뭄감시 및 전방과 물 관리에 있어 효율적으로 활용될 것으로 판단된다. 다만, 전지구 자료의 불확실성은 배제할 수 없는 상황이며, 추후 보다 정확한 자료의 수집을 통해 결과의 신뢰성 확보 및 보완이 이루어져야 할 것이다.

감사의 글

이 연구는 기상청 기후변화 감시·예측 및 국가정책지원 강화사업(RACS_2010-4601)의 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- 과학기술부(2007). **기후변화에 의한 수자원 영향평가 체계 구축**. 세종대학교, 수자원의 지속적 확보기술개발 사업, 연구보고서.
- 배덕효, 정일원, 권원태(2007). “수자원에 대한 기후변화 영향평가를 위한 고해상도 시나리오 생성(I): 유역별 기후시나리오 구축.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제40권, 제3호, pp. 191-207.
- 손경환, 이종대, 배덕효(2010). “전지구 수문해석 모형의 국내 적용성 평가.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제43권, 제12호, pp. 1063-1074.
- 손경환, 배덕효, 정준석(2011). “지표수문해석모형을 활용한 국내 가뭄해석 적용성 평가.” **한국수자원학회논문집**,

- 한국수자원학회, 제44권, 제8호, pp. 667-681.
- 이병주, 정일원, 배덕효(2009). “다변량 통계분석을 이용한 준분포형 유출모형 매개변수 지역화.” **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제42권, 제2호, pp. 149-160.
- 정일원, 배덕효, 임은순(2007). “수자원에 대한 기후변화 영향평가를 위한 고해상도 시나리오 생성(II): 유역별 유출시나리오 구축.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제40권, 제2호, pp. 147-158.
- Cosby, B.J., Hornberger, G.M., Clapp, R.B., and Ginn, T.R. (1984). “A statistical exploration of the relationships of soil moisture characteristics to the physical properties of soils.” *Water Resources Research*, Vol. 20, No. 6, pp. 682-690.
- Fan, Y., and Van den Dool H. (2004). “The CPC global monthly soil moisture data set at $\frac{1}{2}$ degree resolution for 1948-present.” *Journal of Geophysical Research*, 109:D10102, doi:10.29/2003JD004345.
- Hansen, M.C., Defies, R.S., Townshend, J.R.G., and Sohlberg, R. (2000). “Global land cover classification at 1 km spatial resolution using a classification tree approach.” *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 21, No. 6-7, pp. 1331-1364.
- Hubert, B., Francois, L., and Strivay, W.D. (1998). “Stochastic generation of meteorological variable and effects on global models of water and carbon cycles in vegetation and soils.” *Journal of hydrology*, Vol. 212, No. 213, pp. 318-334.
- IPCC (2007). climate Change 2007: The Scientific Basis, Summary for Policy Makers. Cambridge University Press, Cambridge.
- Köppen, W. (1936). Das geographische System der Klimate. In: Köppen, W., Geiger, R. (Eds.). Handbuch der Klimatologie, 1Part C. Gebr. Borntraeger, Berlin.
- Liang, X., Lettenmaier, D.P., Wood, E.F., and Burges, S.J. (1994). “A simple hydrologically based model of land surface water and energy fluxes for general circulation models.” *Journal of Geophysical Research*, Vol. 99, No. 7, pp. 14415-14428.
- Liang, X., Jianzhong, G., and Ruby Leung, L. (2004). “Assessment of the effects of spatial resolutions on daily water flux simulations.” *Journal of Hydrology*, Vol. 298, Issues. 1-4, pp. 287-310.
- Nijssen, B., Lettenmaier D.P., Liang, X., Suzanne, W., and Wetzel, F.W. (1997). “Streamflow simulation for continental-scale river basins.” *Water Resource Research*, Vol. 33, Issue 4, pp. 711-724.
- Nijssen, B., Schnur, R., and Lettenmaier, P. (2001). “Global Retrospective Estimation of Soil Moisture Using the Variable Infiltration Capacity Land Surface Model, 1980-93.” *Journal of Climate*, Vol. 14, Issue. 8, pp. 1790-1808.
- Oki T., and Kanae, S. (2006). “Global Hydrological Cycles and World Water Resources.” *Science*, Vol. 314, No. 5804, pp. 1387-1388.
- Rawls, W.J., Ahuja, L.R., Brakensiek, D.L., and Shirmohammadi, A. (1993). “Infiltration and soil water movement.” *Handbook of Hydrology*, D.R. Maidment, McGraw-Hill, New York, pp. 5-51.
- Sheffield, J., and Wood, E.F. (2008). “Global trends and variability in soil moisture and drought characteristics, 1950-2000, from observation-driven simulations of the terrestrial hydrologic cycle.” *Journal of Climate*, Vol. 21, No. 3, pp. 432-458.
- Xie, Z., Yuan, F., Duan, Q., Zheng, J., Liang, M., and Chen, F. (2007). “Regional Parameter Estimation of the VIC Land Surface Model: Methodology and Application to River Basins in China.” *Journal of Hydro-meteorology*, Vol. 8, Issue. 3, pp. 447-468.

논문번호: 11-118	접수: 2011.11.01
수정일자: 2011.12.12	심사완료: 2011.12.12