



SWAT 모델링을 이용한 한강유역의 RCP 시나리오에 따른 미래수문 및 응설 영향평가

Assessment of Climate Change Impacts on Hydrology and Snowmelt by Applying RCP Scenarios using SWAT Model for Hanriver Watersheds

정충길* · 문장원** · 장철희** · 이동률***,†

Jung, Chung Gil · Moon, Jang Won · Jang, Cheol Hee · Lee, Dong Ryul

ABSTRACT

The objective of this study is to assess the impact of potential climate change on the hydrological components, especially on the streamflow, evapotranspiration and snowmelt, by using the Soil Water Assessment Tool (SWAT) for 17 Hanriver middle watersheds of South Korea. For future assessment, the SWAT model was calibrated in multiple sites using 4 years (2006-2009) and validated by using 2 years (2010-2011) daily observed data. For the model validation, the Nash-Sutcliffe model efficiency (NSE) for streamflow were 0.30-0.75. By applying the future scenarios predicted five future time periods Baseline (1992-2011), 2040s (2021-2040), 2060s (2041-2060), 2080s (2061-2080) and 2100s (2081-2100) to SWAT model, the 17 middle watersheds hydrological components of evapotranspiration, streamflow and snowmelt were evaluated. For the future precipitation and temperature of RCP 4.5 scenario increased 41.7 mm (2100s), +3 °C conditions, the future streamflow showed +32.5 % (2040s), +24.8 % (2060s), +50.5 % (2080s) and +55.0 % (2100s). For the precipitation and temperature of RCP 8.5 scenario increased 63.9 mm (2100s), +5.8 °C conditions, the future streamflow showed +35.5 % (2040s), +68.9 % (2060s), +58.0 % (2080s) and +63.6 % (2100s). To determine the impact on snowmelt for Hanriver middle watersheds, snowmelt parameters of SWAT model were determined through evaluating observed streamflow data during snowmelt periods (November-April). The results showed that average SMR (snowmelt/runoff) of 17 Hanriver middle watersheds was 62.0 % (Baseline). The annual average SMR were 42.0 % (2040s), 39.8 % (2060s), 29.4 % (2080s) and 27.9 % (2100s) by applying RCP 4.5 scenario. Also, the annual average SMR by applying RCP 8.5 scenario were 40.1 % (2040s), 29.4 % (2060s), 18.3 % (2080s) and 12.7 % (2100s).

Keywords: SWAT; climate change; RCP scenario; streamflow; snowmelt

1. 서 론

2007년 2월 2일 유엔 (United Nations, UN) 정부 간 기후 변화위원회 (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)는 기후변화에 관한 종합 보고서를 6년 만에 발표해 지구 온난화는 인간이 초래한 것이라고 강력히 지적하고 금세기 안에 지구표면 온도가 섭씨 1.8~4.0도 상승할 것이라고 전망하였으며, 이러한 기후변화가 앞으로 더 심한 폭우와 해빙, 가뭄, 폭염,

그리고 해수면 상승을 초래할 수 있을 것이라고 경고하였다 (IPCC, 2007). 우리나라는 이와 같은 기후변화 상태에서 기온상승이 가장 높은 지역으로 예측되어 2100년에는 아열대 기후로 변화할 것으로 예측되었다. 이러한 지구온난화로 인한 기후패턴의 변화는 기온의 상승, 강수패턴의 변화, 증발산량의 증가 및 유출의 계절적 변동 등을 초래하여 미래의 수문순환과정을 과거와는 다른 양상으로 변화시키며, 미래 기온의 상승과 강수량의 패턴변화는 증발산이나 토양수분 등의 변화로 이어져 궁극적으로는 물 순환의 변화를 초래하고 유출량 변화로 이어지게 된다 (Park et al., 2009).

이상 기후에 대한 대응 방안 마련을 위해서는 기후변화가 야기하는 수문학적 변화의 정확한 예측이 필수적으로 이루어져야 한다. IPCC에서는 산업화의 양상에 따른 온실가스 배출시나리오를 적용하여 지구의 기후변화를 예측하고 있다. 지구의 온도가 높아지자 세계 곳곳에서 우리가 기대한 이상의 복잡한 기상 변

* 한국건설기술연구원 수자원연구실 연구원
 ** 한국건설기술연구원 수자원연구실 수석연구원
 *** 한국건설기술연구원 수자원연구실 연구위원
 † Corresponding author Tel.: +82-31-9100-685
 Fax: +82-31-9100-251
 E-mail: dryi@kict.re.kr

2013년 6월 10일 투고
 2013년 8월 21일 심사완료
 2013년 8월 22일 게재확정

화를 가져왔다. 이러한 기후변화에 따라 2020년에는 전 세계적으로 최대 17억명 가량이 물 부족으로 고통 받을 것이며, 장기적으로 2080년대는 해수면 상승으로 해안지역의 30 % 이상이 유실되고 전 세계 인구의 20 % 이상이 홍수로 인한 위협에 노출될 것이라는 비관적인 미래를 예측하고 있어 이에 따른 대응 방안 마련이 시급하다고 할 수 있다 (Park, 2011).

국내에서는 그동안 봄 가뭄, 몬순기후에 의한 장마시기, 가을 태풍에 의한 집중호우, 특정지역에서의 용설 예측 등의 기상 사 이클에 의존하는 수자원 개발과 관리에 의존하여 왔다. 이는 향후 작은 기후변화로도 심각한 수자원 문제를 발생시킬 수 있는 위협에 노출될 가능성이 높아지고 있음을 나타낸다. IPCC는 매 4~5년 마다 평가보고서를 발행하고 있으며, 2007년의 제4차 평가보고서 발간에 이어 2013/14년에 제5차 평가보고서를 발 간할 계획이다. IPCC는 보다 신뢰성 높은 기후변화 예측을 위하 여 제5차 평가보고서 작성에는 기존의 배출시나리오인 Special Report on Emissions Scenarios (SRES)를 대체할 대표농도경 로 (Representative Concentration Pathway, RCP) 시나리오 를 개발하여 기후변화 예측 연구에 사용하도록 하였다 (Chung, 2012). 우리나라는 협소한 국토면적과 과다한 인구조로 토지나 수 자원 등 국토자원 이용의 강도가 다른 나라에 비하여 현저하게 높기 때문에 지구온난화에 따른 기후변화와 같은 약간의 기후변 동으로도 심각한 수자원 문제가 발생할 가능성이 내포되어 있다. 그러므로 기후변화에 따른 수자원 예측과 대응 방안을 마련하기 위해서는 기후변화와 수문순환과의 관계가 지역 (유역 규모)차원 에서 예측되고 평가되기 위한 시스템이 구축되어야 하며, 장기적 인 국가 수자원계획을 위해서는 기후변화에 의한 한반도 및 유 역 규모의 수자원에 미치는 영향 예측 및 평가가 필요하다고 할 수 있다. 또한, 우리나라의 경우 지형적으로 70 % 정도가 산지인 점을 감안할 때 지형적 영향에 의해 국지 규모의 다양한 기후특 성과 수문환경의 변화가 나타난다. 북동부 산악지형의 경우, 강 수의 빈도 및 수량이 현격한 차이를 나타내는데 이때의 수자원에 대한 양적측면 평가에서 겨울철 적설과 용설의 연구는 필수 적이라고 할 수 있다. 특히 우리나라는 장마와 집중호우가 주를 이루는 여름철 강수량에 비해 겨울철 강수량은 약 20 % 수준으 로 그 양이 미미하여 국내 수자원 계획에서 겨울 강설에 대한 용 설 해석은 수자원실무에 큰 영향을 미치지 않을 것이라 하여 많 이 무시되어 왔다. 하지만, 여러 가지 이수 목적으로 이용될 수 있는 수년 혹은 수십 년의 장기유출해석을 위해서는 적설 및 용 설의 영향을 고려한 연구가 필요하다 (Kim et al., 2006). 따라 서 우리나라의 새로운 수자원 계획에 필요한 전반적인 장기유출 변화 및 유역별 특성을 파악하고 그에 따른 대책이 마련되어야 시점이 되었다고 판단할 수 있다.

본 연구에서는 기후변화에 따른 각 요소가 유출 및 증발산, 용 설과 같은 수자원에 직접적인 영향을 미치는 수문 요소들의 변 화 기여 정도를 분석하고 준 분포형 모형인 SWAT (Soil and Water Assessment Tool)을 이용하여 우리나라의 주요 하천유 역인 한강유역의 17개 중권역을 대상으로 전반적인 수문요소 및 유역특성 변화를 파악하고자 하였으며, 이를 위해 기상청에서 지 역기후변화 시나리오로 제공되는 RCP 4.5 및 8.5 시나리오를 이 용하여 기후변화가 하천유출 및 용설에 미치는 영향을 평가하고 자 하였다.

II. 재료 및 방법

1. SWAT 모델

SWAT 모델은 미국 농무성 농업연구소 (Agricultural Research Service, ARS)에서 개발된 유역모델이다. SWAT은 대규모의 복 잡한 유역에서 장기간에 걸친 다양한 종류의 토양과 토지이용 및 토지관리 상태에 따른 물과 유사 및 농업화학물질의 거동에 대한 토지관리 방법의 영향을 예측하기 위하여 개발되었다. SWAT 모델 내에서 물수지는 유역 내에서 발생하는 모든 것 중에서 중 요한 요소이다. 유사 또는 영양물질의 이동을 정확히 예측하기 위해서는 모델에 의해 모의되는 수문순환이 유역 내에서 발생하 는 일들과 일치하여야 한다. 유역의 수문현상에 대한 모의는 두 개의 주요 항목으로 나눌 수 있다. 첫 번째는 수문순환의 토지부 분이며, 수문순환에서 토지부분은 각 소유역의 주 하천에 물과 유사, 영양물질 및 살충제의 부하량을 조절한다. 두 번째 부분은 유역의 하천 조직에서 출구까지의 물과 유사 등의 이동으로 정 의될 수 있는 수문순환의 추적 혹은 물에 대한 부분이다 (Park et al., 2008).

모델에서는 수문순환을 정확히 예측하기 위하여 물수지 방정 식에 근거를 두고 강수, 증발산, 지표유출, 기저유출, 지하수 등 에 대한 모의를 각 수문반응단위 별로 계산할 수 있다. 수문순 환에서 토지부분은 각 소유역의 주 하천에 물과 유사, 영양물질 및 살충제의 부하량을 조절한다.

Kim et al. (2006)은 충주댐 유역을 대상으로 우리나라 지형 에 대해서 용설고려 및 미고려시에 유역에 수문학적 거동을 분 석하여 SWAT 모형에 대해 우리나라 용설평가를 위한 모형 적 합성을 판단하였다. 또한, Kim et al.(2007)은 SWAT 모형을 이 용하여 쌍천유역을 대상으로 모형내에 용설모형에 대한 적용성 을 평가한 후 유행분석을 실시하여 용설관련 장기유출 모형에 적합성을 증명하였다. 따라서, 본 연구에서는 선행연구에서 증명 된 SWAT 용설모형을 적용하여 용설모의를 실시하였다.

2. 대표농도경로 (Representative Concentration Pathway, RCP) 시나리오

2007년 IPCC 4차 기후변화 평가보고서 발간 이후, 발간 예정인 IPCC 5차 기후변화 평가보고서를 위하여 국제사회는 표준 온실가스 시나리오를 대표농도경로 (RCP)로 새롭게 선정하였다. SRES가 인위적인 기후변화 요인 중에서 온실가스와 에어로솔 등의 영향에 의한 강제력 (forcing)만을 반영하였다면, RCP 시나리오는 온실가스와 에어로솔 등의 영향뿐만 아니라 인간의 활동이 대기에 미치는 요인까지 반영하고 있고, 토지 이용에 관련된 강제력도 반영하고 있다 (Back et al., 2011). RCP 시나리오는 복사강제력 (radiative forcing)에 따라 4종으로 구분된다 (RCP 8.5, 6.0, 4.5, 2.6). 본 연구의 대상이 되는 RCP 8.5는 현재 추세로 저감 없이 온실가스가 배출되는 경우의 시나리오, RCP 4.5는 온실가스 저감 정책이 상당히 실현되는 시나리오이다. 이 4개의 시나리오는 대기 중 온실가스 농도가 방사강제력의 상승에 미치는 영향의 크기를 이유로 특징지어져 있으며, 각각 RCP 8.5, RCP 6.0, RCP 4.5, RCP 2.6 시나리오들은 공업화 이전과 비교하여 방사성 강제력이 금세기말에 각각 8.5 W/m², 6.0 W/m², 4.5 W/m², 2.6 W/m² 상승한다는 시나리오에 대응하고 있다 (Kim et al., 2013).

일반적인 두시나리오의 경향을 살펴보면 다음과 같다. 우리나라의 월평균 강우량 총 증가율은 상대적으로 RCP 4.5보다 RCP

8.5가 더 크게 증가하였다. 하지만 월별로 증가한 개월 수를 보면 RCP 8.5가 더 많은 증가율을 보이는데 이는 다른 달보다 7월에 RCP 4.5가 크게 증가하여 총 증가율을 높인 것으로 판단된다. 미래의 월평균 기온을 살펴보면 RCP 4.5보다 RCP 8.5 시나리오가 월별 평균 1.3 °C 높은 것으로 나타났고, 다른 달에 비해 9월과 10월달에 평년기온보다 높은 기온을 나타낼 것으로 예측되었다. 기온은 두 시나리오 모두 점차 높아지는 경향을 나타내고 최저 기온의 경우도 과거대비 점차 올라가는 양상을 나타내고 있다. RCP 기준으로 보면 RCP 4.5 보다 RCP 8.5에서 기온 증가가 더 큰 것으로 나타났으며 미래로 갈수록 꾸준히 증가할 것으로 예측되었다 (Chung, 2012).

3. 대상유역 및 자료

본 연구의 대상유역으로는 한강유역을 선정하였으며, 한강유역의 17개 중권역을 대상으로 미래 기후변화에 따른 수문변화를 모의하였다 (Fig. 1). 17개 중권역 지형적인 특징으로 평균표고는 404.7 m, 유역 평균경사는 35.9 %이다. 전체유역 면적 중 토지이용현황은 산림이 대부분 (73.3 %)이며, 나머지 도시, 밭, 논 순으로 구성되어 있다. 이 외에 토양통 면적 비율은 Sandy loam (51.0 %)이 절반 이상을 차지하고 있다.

공간입력 자료 중 가장 기본이 되는 DEM (Digital Elevation Model) 자료를 NGIS (National Geographic Information System)

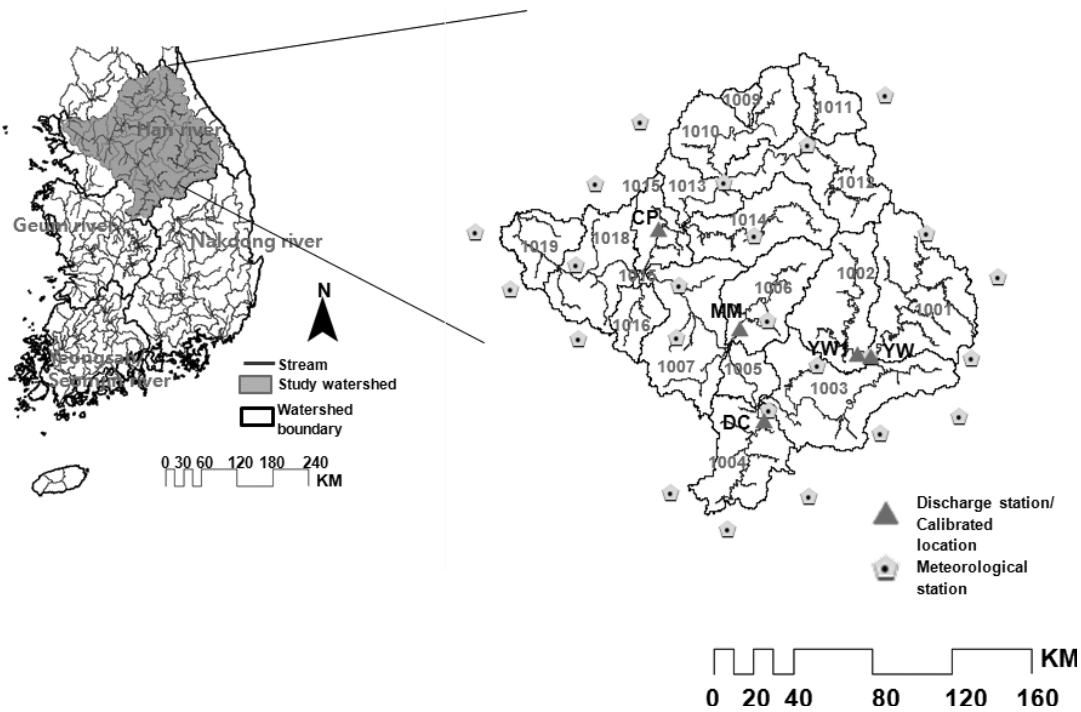


Fig. 1 The location of study area

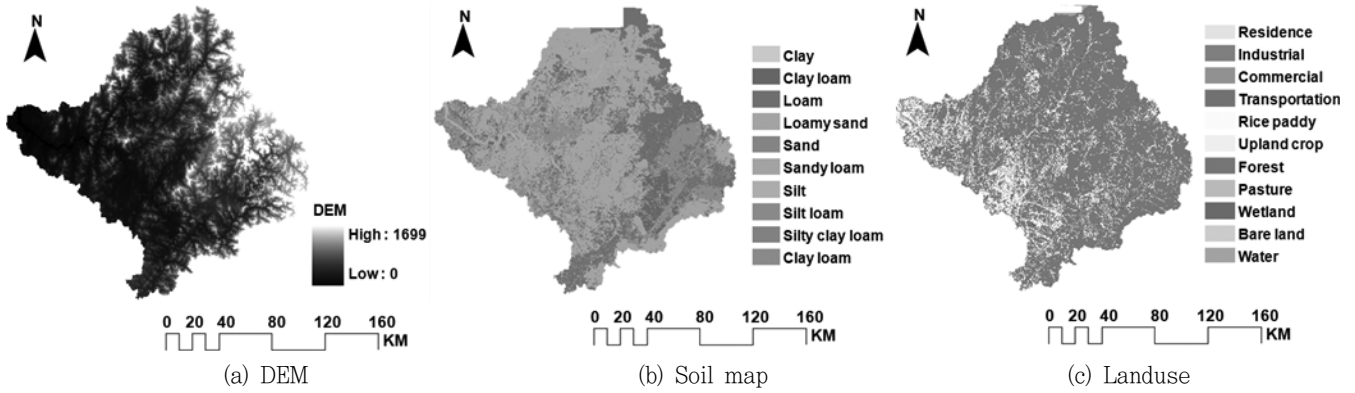


Fig. 2 Spatial input data for model setup

의 1/5,000 수치지도로부터 검수과정을 거쳐 격자크기 30 m의 DEM으로 제작하였다 (Fig. 2(a)). 토양도는 농촌진흥청에서 제공하는 1/25,000 정밀토양도를 수문학적 토양그룹 (Hydrologic Soil Group) A, B, C, D로 분류하였다 (Fig. 2(b)). 토양층의 개수 및 토양층별 깊이 등은 농업과학기술원의 자료를 사용하여 구축하였으며, 토양층의 유효수분량, 포화수리전도도 등의 물리적 값들을 구분하였다. 토지이용도는 수문해석 및 비점오염원 평가에 있어 필수 정보 중에 하나이다. 토지이용 정보는 유출량의 변화뿐만 아니라 질소와 인으로 대표되는 비점오염원 부하량에 직접적인 영향을 미친다. 수문해석 및 비점오염원 평가에 있어 필수 정보 중에 하나인 토지이용도는 환경부로부터 1/25,000 토지이용도를 이용하여 구축하였다 (Fig. 2(c)). 17개 중권역 지형적인 특징으로 평균표고는 404.7 m, 유역 평균경사는 35.9 %이다. 전체유역 면적중 토지이용현황은 산림이 대부분 (73.3 %)이며 나머지 도시, 밭, 논 순으로 구성되어 있다. 이 외에 토양통면적 비율은 Sandy loam (51.0 %)로 차지하고 있다.

한강유역의 17개 중권역별 강우/기상관측소 현황은 철원 관측소를 비롯한 총 23곳에 관측소가 위치해 있다. 기상자료 현황은 1990년부터 2011년까지의 일별강우량, 온도, 풍속, 상대습도, 일사량 자료를 기상청으로부터 제공받아 입력자료를 구축하게 되었다. 미래 기후변화에 따른 유역별 수문변화량을 모의하기 위한 자료로 새로운 온실가스 시나리오인 대표농도경로 (Representative Concentration Pathway, RCP) 시나리오 자료를 이용하였으며, 우리나라 73개 기상관측소별로 추출된 시나리오 자료를 기상청으로부터 제공받아 이용하였다.

모형 결과에 대한 검증단계로 유역별 검보정을 실시하기 위한 자료로 중권역 유역출구에 위치하고 저수지 및 댐 운영에 따른 영향을 최소화하여 자연유량에 대한 모의가 가능한 상류유역과 유량 검보정을 위해 5년 이상의 충분한 유량자료가 구축된 유역으로 영월 (YW), 영월1 (YW1), 달천 (DC), 문막 (MM) 및 청평 (CP) 상류 5개의 지점을 선택하여 유량, 수위자료를 2006

~2011년까지 일단위로 구축하여 유출량으로 산정하였다. 대부분에 유량 관측지점은 겨울철에서 하천유량의 동결 및 소량의 유출량 발생으로 인한 결측일수가 많아 실질적으로 동결시에 유출을 고려되지 않았다고 판단된다. 실제로 완전동결시에 유출발생이 없는 것으로 간주되므로 따라서, 겨울철에서의 결측된 유출량은 유출이 없는 것으로 판단하고 모의하였다.

4. 다변량 통계분석을 이용한 미계측 유역에 매개변수 추정

Lee et al. (2009)은 미계측 유역에 대한 강우-유출모형을 적용하기 위한 방법으로 두 개의 다변량 통계기법인 주성분분석과 계측정 군집분석을 연계하여 103개 미계측 유역에 대한 매개변수 지역화를 실시하였다. 따라서, 본 연구에서는 Lee et al. (2009)이 사용한 연계분석방법을 이용하여 한강중권역 12개 미계측 유역에 대한 매개변수 지역화를 실시하였다.

미계측 유역을 포함한 매개변수 지역화를 위해 다변량 통계분석을 이용하였으며 계측된 유역에 대해 적용성 평가에 따른 주요 검보정 매개변수를 선정한 후 미계측 유역으로 전이하기 위한 매개변수들과 상관성이 높은 유역/수문인자를 추출하였다. 추출된 인자들은 군집분석에 적용될 변수로 사용되며, 서로 독립된 변수 적용과 군집분석의 효율성을 높이기 위해 주성분분석을 이용하여 산정된 성분점수를 군집분석에 사용될 설명변수로 채택하고 이들 설명변수로부터 군집분석을 실시하여 유역 간에 유사성 분석을 통해 미계측 유역을 계측된 유역으로부터 분류하게 된다.

가. 주성분분석

주성분분석 (Principal Component Analysis, PCA)은 해석하고자 하는 다차원의 데이터를 포함된 정보의 손실을 가능한 한 적게 하여 데이터를 축약하는 방법이다. 주성분분석은 다수의 지

표를 통합한 종합적인 지표작성과 관측대상을 몇 개의 그룹으로 나누기 위한 목적 등으로 이용된다. 일반적으로 다양한 특성을 가지는 자료 또는 현상을 해석하기 위해 사용되거나 재생산 또는 축소된 자료는 다른 통계기법에 적용될 수 있다. 주성분분석은 평균과 분산의 통계적 성질을 이용한 기법으로 자료를 설명하기 위해 투영시켜 분산이 최대가 되는 기본벡터를 찾게 되고, 이때 분산의 크기는 기본 벡터가 가질 수 있는 자료의 정보량을 의미한다. 이들 기본벡터 중 서로 직교하는 성질을 만족하는 기본벡터를 주성분이라고 하고 이 벡터에 해당하는 성분점수를 새로운 자료로 이용하게 된다 (Rho, 2005). 주성분분석의 해석과정을 간단하게 설명하면 다음과 같다. 주성분분석은 선형모형으로 나타낼 수 있으며 일반적인 형태는 Eq. (1)과 같다. Eq. (1)에서 주성분점수로 이루어진 행렬 PC는 각 관측단위와 주성분들의 관계 정도를 나타낸다. X는 $(p \times 1)$ 을 가지는 기존자료의 행렬, v 는 고유값 (eigenvalue)에 대한 고유벡터 (eigenvector)를 의미한다. 고유값은 Eq. (2)와 같이 각 PC의 분산으로부터 산정된다. 또한 주성분은 상호 독립이기 때문에 i 와 k 가 다를 경우 Eq. (3)과 같이 공분산은 0의 값을 가지고 공분산행렬은 고유값 $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_p \geq 0$ 로 이루어지게 된다. 여기서 i 번째 주성분은 다음의 3가지 제약조건하에서 분산을 최대화하는 선형결합으로 나타낼 수 있다. 1) 분산은 선형결합계수로 사용되는 고유벡터 v 에 따라 증가될 수 있기 때문에 요소들의 자승합이 1이 되도록 제한한다; 2) 주성분분석에서 두 개의 선형결합관계는 서로 독립이라고 가정하기 때문에 두 주성분의 공분산은 0이 되어야 한다; 3) 자료에서 최대의 고유값을 산출하기 위해 특성방정식 (characteristic equation) $|A - \lambda I| = 0$ 이 성립하여야 한다. 여기서 A는 기존자료의 상관관계수행렬 또는 표준화된 변수의 분산-공분산 행렬, I는 단위행렬을 의미한다 (Lee et al., 2009).

$$PC = v' \cdot X \quad (1.a)$$

$$PC_1 = v_1' X = v_{11}X_1 + v_{21}X_2 + \dots + v_{p1}X_p \quad (1.b)$$

$$PC_2 = v_2' X = v_{12}X_1 + v_{22}X_2 + \dots + v_{p2}X_p$$

⋮

$$PC_p = v_p' X = v_{1p}X_1 + v_{2p}X_2 + \dots + v_{pp}X_p$$

$$\text{Var}(PC_i) = v_i' \Sigma v_i = \lambda_i ; i = 1, 2, \dots, p \quad (2)$$

$$\text{Cov}(PC_i, PC_k) = v_i' \Sigma v_k = 0 ; i \neq k \quad (3)$$

나. 군집분석

객체들을 군집화 하는 방법은 자료의 특성, 군집방법의 특성, 도출하고자 하는 결과 등에 따라 다양하다 (Lee et al., 2009).

자료를 구성하고 있는 관측대상 (혹은 속성)을 어떠한 기준에 의해서 분류하는 것을 생각할 수 있다. 군집분석 (Cluster analysis)은 이와 같은 목적을 위한 기법이다. 대부분의 방법은 군집내의 객체 간 유사성 거리는 되도록 가깝게 하고 군집 간 유사성 거리는 가능한 멀게 하는 것이 기본원리이다. 군집화 방법은 계층적 방법과 비계층적 방법으로 구분할 수 있다. 계층적 방법에는 각 군집간의 유사성을 계산하는 방법에 따라 최단연결법, 최장연결법, 중심연결법, 중위수연결법, 군집 간 평균연결법, 군집 내 평균연결법, Ward 방법 등이 있고 비계층적 방법은 K-평균법이 대표적인 방법이다. 계층적 방법은 지구과학분야 (Davis, 1986)와 수문지리분야 (Steinhorst and Williams, 1985; Schot and vander Wal, 1992; Ribeiro and Macedo, 1995; Güler et al., 2002; Cloutier et. al., 2008)에서 수문학적 동질성 분석을 위해 널리 활용되고 있는 방법이다. 본 연구에서 적용될 계층적 방법은 크게 4단계로 이루어진다. 첫 번째 단계로 N개의 각 관측대상 간 상호의 유사성 (거리)을 계산하고 M개의 그룹을 형성한다. 두 번째 단계로 M개의 그룹 중에서 가장 유사성이 큰 (거리가 짧은) 쌍을 구하여 그것을 하나의 그룹에 융합한다. 세 번째 단계로 새로 만들어진 그룹과 다른 그룹과의 유사성 (거리)을 계산하고 그 정보를 가지고 두 번째 단계로 되돌아간다. 마지막 단계로 이상의 연산법으로 축차적으로 형성된 그룹의 계층적 과정을 출력하고 계산을 종료한다 (Rho, 2005).

본 연구에서는 준분포형 유출모형의 매개변수를 미계측 유역으로 전이하기 위한 방법으로 앞서 언급한 방법을 직접적으로 적용하기는 어렵다. 따라서 계층적 군집방법 중 최단연결법을 적용하였다. 기존 최단연결법은 유사성거리가 가장 가까운 객체들을 묶는 것을 시작으로 순차적으로 유사성거리가 가까운 객체 또는 객체와 집단을 서로 군집시키는 방법이다.

III. 결과 및 고찰

1. 모델 검보정 및 미계측유역 검정

SWAT 모델에 매개변수 추정을 위하여 SWAT User's Manual Version 2009의 Input Type별 매개변수 정리를 이용하여 총 유출량 및 침투유량과 감수곡선 (recession) 형태에 영향을 미치는 매개변수를 선정하고 각각의 모듈에서 수문 모의를 위한 매개변수에 대하여 민감도 분석 및 검보정을 실시하여 모델별 적용 매개변수를 결정하였다 (Table 1). 민감도 분석결과 지표 수흐름관련 매개변수로는 CN2, ESCO, SOL_AWC 순으로 민감하게 반응하며, 지하수흐름은 GWQMN, GW_REVAP, REVAPMN 등이, 감수곡선 매개변수로는 ALPHA_BF 등이 민감하게 나타났다.

Table 1 The calibrated SWAT model parameters

Parameter	Definition	Range				Adjusted Value			
		LB	UB	Default	YW	YW1	DC	MM	CP
CN2	SCS runoff curve number	-	-	-	+ 5	-	-	+ 10	+ 5
ESCO	Soil evaporation compensation coefficient	0	1	0	1	-	-	1	-
GWQMN	Threshold water level in shallow aquifer for base flow	-1000	1000	0	650	-	300	-	-
GW_DELAY	Delay time for aquifer recharge	-10	10	31	41	100	-	81	-
GW_REVAP	Revap coefficient	-0.036	0.036	0.02	-	-	-	-	-
REVAPMN	Threshold water level in shallow aquifer for revap	-100	100	1	-	2	0	-	0
ALPHA_BF	Baseflow recession constant	0	1	0.048	0.01	0.05	0.01	0.01	0.01
RCHRG_DP	Deep aquifer percolation fraction	0	1	0.01	-	0.4	0.6	0.05	-
SFTMP	Snow fall Temperature	0	5	1	5	5	5	5	5
SMTMP	Snow melt base temperature	-25	25	0.5	2	2	2	2	2
SMFMX	Maximum melt rate for snow during the year	0	10	4.5	2	2	2	2	2

LB: Lower bound, UB: Upper bound

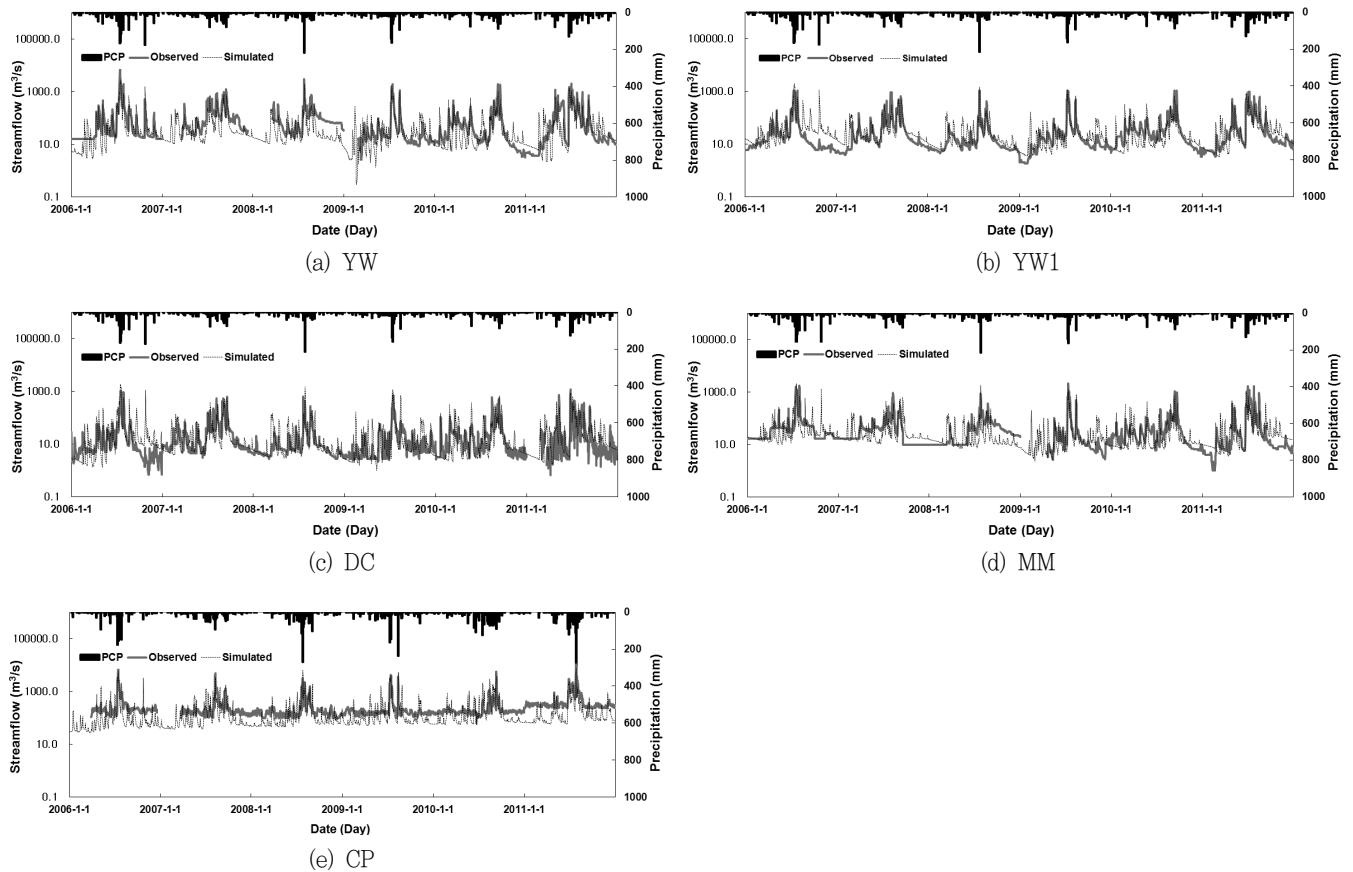


Fig. 3 Comparison of observed and simulated daily streamflow: (a) YW, (b) YW1, (c) DC, (d) MM, and (e) CP

본 연구에서 검보정기간은 실측자료가 양호한 2006~2011년 까지의 유출량을 구축하여 보정 (2006~2009년) 및 검증(2010~2011년)기간 동안 중권역의 유역출구지점에 위치한 5개 지점에서 검보정을 실시하였다. Fig. 3은 보정 및 검증기간 동안의

각 지점별 실측치와 모의치의 수문곡선을 비교하여 나타낸 것이다. 결과의 적합성과 상관성을 판단하기 위해서 유출량에 대한 R^2 (determination coefficient)와 Nash와 Sutcliffe (1970)가 제안한 모델 효율성계수 (NSE)를 사용하였다. Table 2는 유출

Table 2 The SWAT results of streamflow during calibration and validation periods

Year	PCP (mm)	Streamflow (mm)		Runoff ratio (%)		R ²	NSE	
		Obs.	Sim.	Obs.	Sim.			
YW	2006	2147.7	1556.2	1498.3	72.5	69.8	0.52	0.46
	2007	1424.2	1026.3	993.5	72.1	69.8	0.72	0.64
	2008	1147.2	837.2	755.8	73.0	65.9	0.78	0.72
	2009	1096.9	778.6	746.4	71.0	68.1	0.76	0.75
	2010	1237.4	901.2	804.0	72.8	65.0	0.50	0.49
	2011	1791.1	1336.8	1211.8	74.6	67.7	0.72	0.69
YW1	2006	2149.0	876.4	1440.3	40.8	67.0	0.65	0.51
	2007	1425.0	973.8	903.6	68.3	63.4	0.45	0.62
	2008	1147.9	557.4	656.7	48.6	57.2	0.81	0.64
	2009	1354.4	604.8	772.1	44.7	57.0	0.70	0.60
	2010	1238.1	810.5	700.0	65.5	56.5	0.40	0.56
	2011	1792.2	1158.5	1065.2	64.6	59.4	0.53	0.52
DC	2006	2140.6	1250.5	1335.8	58.4	62.4	0.83	0.52
	2007	1419.5	802.6	842.8	56.5	59.4	0.47	0.35
	2008	1143.4	491.3	624.3	43.0	54.6	0.41	0.31
	2009	1349.1	547.1	710.8	40.6	52.7	0.56	0.54
	2010	1233.2	616.0	675.0	49.9	54.7	0.43	0.40
	2011	1785.2	796.1	1023.1	44.6	57.3	0.43	0.46
MM	2006	2149.0	1462.0	1624.9	68.0	75.6	0.53	0.60
	2007	1425.0	1041.1	1068.5	73.1	75.0	0.58	0.52
	2008	1147.9	924.0	769.4	80.5	67.0	0.62	0.51
	2009	1354.4	742.2	849.0	54.8	62.7	0.48	0.49
	2010	1238.1	952.3	803.6	76.9	64.9	0.42	0.39
	2011	1792.2	1436.9	1188.4	80.2	66.3	0.41	0.35
CP	2006	1381.2	1056.5	885.6	76.5	64.1	0.49	0.45
	2007	1306.3	864.9	845.3	66.2	64.7	0.52	0.47
	2008	1541.8	883.2	977.5	57.3	63.4	0.62	0.30
	2009	1551.5	993.5	1060.0	64.0	68.3	0.53	0.72
	2010	1969.6	958.8	1137.2	48.7	57.7	0.46	0.35
	2011	2347.0	1838.8	1237.0	78.3	52.7	0.85	0.75
Mean	1499.1	915.4	937.6	60.4	62.2	0.79	0.71	

Obs.: Observed data, Sim.: Simulated data

보정 및 검정 결과와 유출율을 검보정 지점별로 각각 정리하여 나타낸 것으로 영월 (YW)과 영월1 (YW1) 지점에 대해 검보정기간 동안의 년 평균 일 유출량을 비교한 결과 NSE는 0.46~0.75, 0.51~0.64이고 R²는 0.52~0.78과 0.40~0.81로 각각 분석되었다. 달천 (DC), 문막 (MM) 및 청평 (CP) 지점에서의 실측유출량과 모의유출량에 대한 NSE는 0.31~0.54, 0.35~0.60, 0.30~0.75로 나타났고 R²는 각각 0.41~0.83, 0.41~0.62, 0.46~0.85로 나타났으며, 상류 4개 유역에서는 어느 정도 유사성이 있음을 나타냈다. 반면 중하류부에 해당되는 CP 지점에서는 상

류에서의 청평댐, 춘천댐 및 평화의댐 등에서의 댐 운영에 따른 댐 방류량 및 유입량이 자연유량과는 다른 결과를 나타내고 있다. 이러한 제한적인 부분을 감안하더라도 침투유출과 관련하여 모의 값이 실측값의 경향성을 반영하고 있다고 볼 수 있다. 여기서, YW 및 CP는 겨울철 용설의 영향을 제대로 반영하지 않는 것으로 보인다. CP에 위치한 청평댐 유역에서는 상류에 의암댐, 춘천댐 및 평화의 댐이 위치하여 하천유지관리 용수등 겨울철 용설에 해당되는 2월~5월 사이에 인위적인 조절에 의해 정확한 자연유량 측정이 어려워 모의값과 실측값에 제대로 된 반영이 어려웠으며 또한, YW가 위치한 남한강 상류에서는 12월~3월까지 겨울철에 유출 실측값에 결측이 많아 실측치에서의 용설 영향을 반영하지 못한 것으로 판단된다. 또한, 모델특성상 겨울철 하천동결시에 유출량이 미량 발생하는 부분은 모델에 제한적인 특성으로 본다.

용설영향평가를 위해 Kim (2012)이 제시한 용설기간을 11월, 12월, 1월, 2월, 3월, 4월로 설정하여 용설기간동안에 검보정 결과를 살펴보면 영월 (YW)과 영월1 (YW1) 지점에 대해 용설기간동안에 평균 일 유출량을 비교한 결과 R²는 0.30~0.48과 0.35~0.51로 각각 분석되었다. 달천 (DC), 문막 (MM) 및 청평 (CP) 지점에서의 용설기간에 대한 유출량 비교결과 R²는 각각 0.25~0.58, 0.40~0.58, 0.36~0.71로 나타났다. 전체기간동안의 R²보다 낮은 R²값을 나타냈다. 이는, 검보정 실시를 전체기간동안에 일유출량을 비교로 실시하여 상대적으로 유출량이 큰 여름기간동안에 검보정 값이 지배적이어서 정확도가 낮게 나타났으며 겨울철 기간에 실측 유출량 값 또한 결측 및 손실이 커 신뢰성 있는 정확한 값을 측정하였다고 보기 어렵다고 판단된다.

다음 단계로 미세측유역에 대한 매개변수 전이를 위해 유출에 영향을 미치는 유역특성인자를 선정하였다. 본 연구에서는 Lee et al. (2009)이 선정한 유역특성인자로 유역면적 (area), 유역평균포고 (elevation), 유역평균경사 (slope), 산림면적비 (percentage of forest cover), 최대토양수분량(AWC), 포장용수량 (FC), 영구위조점 (Permanent Wilting Point, PWP) 등 7개의 인자를 적용하여 주성분분석을 실시하였다. 이상의 설명변수는 서로 독립적이기 때문에 유사한 상관성을 가지는 다수의 설명변수를 채택할 경우 군집분석의 결과는 왜곡될 수 있다. 선정된 7개 인자의 상관관계를 분석한 후 군집분석에 필요한 설명변수를 선정하기 위해 주성분분석을 실시하였으며, 그 결과 제 1, 2 성분의 누가 분산비는 76.3 %로 선정되었고 누가분산비가 통상 80 %를 넘는 성분까지 취한다는 경험적 기준에 의해 제1 주성분과 제2주성분을 채택하였다. Fig. 4(a)는 두 성분 축에 대한 7개 변수의 상관관계를 도시한 것이다. 군집분석에 적용될 두 성분 축의 성분점수 결과를 토대로 5개 지점의 계측유역 (YW,

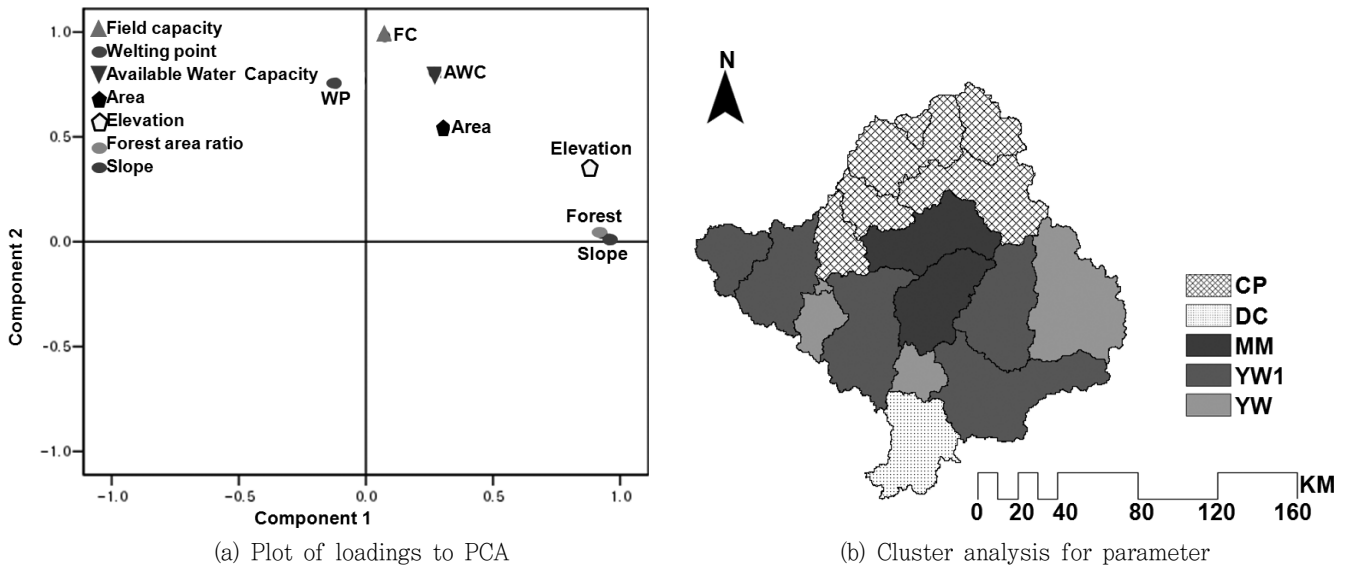


Fig. 4 The results of multivariate analysis for ungaged middle watersheds

YW1, DC, MM 및 CP)을 기준으로 미계측유역 간의 유클리드 거리를 계산하여 미계측유역을 유사성 거리가 가장 가까운 계측 유역을 총 17개 중권역을 5개의 동일군집으로 나누어 같은 군집에 속한 유역별로 동일한 매개변수의 전이를 각각 실시하였다 (Fig. 4(b)).

2. 기후변화에 따른 수문-용설 변화 분석

강수량 변화에 의한 수자원 부족량의 변화는 유역의 이수 및 치수계획에 가장 큰 영향을 미치는 변수로서 다양한 기후변화 시나리오의 검토 및 적용이 필요하다. 또한 온도변화에 따른 증발산량 등의 변화는 수문학적 변화뿐만 아니라 식물의 생장과정 등 생태계에 직접적인 영향을 미친다. 따라서 본 연구에서는 SWAT 모형의 적용성을 평가한 후, 기후변화에 따른 한강중권역의 수문학적 거동 변화 양상을 파악하기 위해 검토된 매개변수의 보정 값을 이용하여 SWAT 모형에 기후변화 시나리오를 적용하였다. Table 3은 두 RCP 시나리오별 강수 (PCP), 잠재증발산 (PET), 실제증발산 (Evapotranspiration, ET), 유출총량 (WY) 및 용설량 (Snowmelt, SM)에 대한 변화를 Baseline (1992-2011)를 기준으로 2040s (2021-2040), 2060s (2041-2060), 2080s (2061-2080), 2100s (2081-2100)에 변화율을 기간별 연평균으로 나타내었다. 여기서, Baseline을 기준으로 증감률 ((Future-Baseline) / Baseline*100)을 계산하여 평균 증가율을 increasing percent (▲, %)로 평균 감소율을 decreasing percent (▼, %)로 표시하였다. 특히, 용설량은 Kim (2012)이 제시한 용설기간을 고려하여 11월, 12월, 1월, 2월, 3월 4월 동안에 나타나는 용

설량을 산정하였고 그 용설기간 동안 총 유출량에 대한 용설량에 비율 (SMR)을 비율단위 (%)로 산정하여 유역별 겨울철에 수자원에 미치는 용설비율 (%)을 비교분석하였다.

먼저, 물 순환과정의 구성요소 중의 하나인 증발산량은 미래 가용 수자원의 양을 가늠할 수 있는 정보를 제공하므로 기후변화 시나리오 적용에 따른 증발산량 변화의 추정은 매우 중요하다. RCP 4.5 및 8.5 두 시나리오 모두 2040s에서 2100s로 가면서 증가하는 경향을 나타냈다. 기준년 (Baseline)과 비교했을 때, 특히 겨울철과 여름철 증발산량이 점차 증가하는 것으로 분석되었으며, 가을철 증발산량에는 큰 변화가 없는 것으로 분석되었다. 한강 17개 중권역 전체 평균변화율을 살펴보면 RCP 4.5 시나리오에서, 총유출물에 대한 변화는 현재를 기준으로 2040s, 2060s, 2080s 및 2100s기간에 각각 +16.6 %, +10.6 %, +28.9 % 및 +29.5 % 증가하였으며, 연 평균 온도가 각각 상승함에 따라 총 강우량에 대한 증발산량 비율은 각각 +31.3 %, +36.8 %, +39.7 % 및 +41.8 %로 꾸준히 증가하는 것으로 분석되었다. 이와 같은 방법으로 RCP 8.5 시나리오에서의 분석 결과, 총 유출물은 현재를 기준으로 2040s, 2060s, 2080s 및 2100s기간에 각각 +4.2 %, +28.4 %, +15.2 % 및 +11.3 % 증가하였으며, 연 평균 온도가 각각 상승함에 따라 총 강우량에 대한 증발산량 비율은 각각 +24.7 %, +33.4 %, +40.5 % 및 +46.1 %로 RCP 4.5에 비해 유출량은 평균 약 10 % 이상 감소하였으며 증발산량은 RCP 8.5에서 RCP 4.5에 비해 평균 약 3~5 % 높게 증가하는 것으로 분석되었다.

용설 기간 동안의 총 유출량에 대한 용설량의 기여변화는 RCP 4.5 및 8.5 모두 감소하는 추세를 보였으며 특히 겨울철 용설로

Table 3 Summary of SMR (snowmelt/runoff) and changes in increasing percent (▲, %) and decreasing percent (▽, %) for future annual hydrological components by the RCP scenarios

Watershed code	Period	PCP		WY		PET		ET		SM		SMR (%)	
		RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5
1001	Baseline (1992-2011)	1873.6 mm		1421.3 mm		910.4 mm		398.6 mm		298.7 mm		92.0	
	2040s	▲9.8	▲6.8	▲4.8	▽3.9	▲0.3	▲2.1	▲28.0	▲30.5	▽12.1	▽2.0	66.2	70.0
	2060s	▲4.6	▲17.8	▽3.1	▲6.6	▲5.0	▲8.4	▲33.1	▲37.7	▽26.8	▽4.2	62.2	62.8
	2080s	▲32.0	▲7.7	▲24.3	▽7.1	▲9.0	▲19.4	▲34.8	▲41.3	▽29.6	▽36.6	45.3	45.6
	2100s	▲19.7	▲31.3	▲15.1	▲8.3	▲9.8	▲26.3	▲37.1	▲47.3	▽31.7	▽53.6	49.0	27.7
1002	Baseline (1992-2011)	1296.5 mm		719.7 mm		991.5 mm		448.3 mm		93.9 mm		76.6	
	2040s	▲19.4	▲8.3	▲16.3	▲2.4	▽10.3	▽7.5	▲21.8	▲14.8	▲9.8	▲14.3	54.2	51.0
	2060s	▲13.3	▲24.1	▲5.5	▲22.3	▽7.3	▽3.9	▲25.4	▲20.2	▽4.8	▲6.7	51.9	39.8
	2080s	▲22.1	▲20.9	▲17.1	▲15.3	▽4.4	▲2.5	▲28.6	▲24.5	▽4.7	▽33.8	40.5	24.3
	2100s	▲24.4	▲22.6	▲20.7	▲4.4	▽5.2	▲5.1	▲28.0	▲25.1	▽8.9	▽47.7	34.8	17.9
1003	Baseline (1992-2011)	1467.6 mm		1000.3 mm		999.8 mm		450.4 mm		107.2 mm		76.6	
	2040s	▲21.7	▲12.4	▲14.3	▲3.9	▲7.3	▲9.6	▲36.4	▲27.8	▲19.6	▲24.2	68.1	58.0
	2060s	▲17.4	▲30.3	▲7.8	▲23.0	▲7.9	▲12.0	▲37.0	▲29.9	▲9.7	▲9.4	67.1	43.7
	2080s	▲60.5	▲22.8	▲27.8	▲14.0	▲12.9	▲21.5	▲41.7	▲38.5	▲0.3	▽20.4	48.8	28.7
	2100s	▲30.2	▲31.4	▲23.7	▲10.9	▲13.4	▲27.0	▲42.3	▲41.4	▲5.3	▽34.2	44.8	24.0
1004	Baseline (1992-2011)	1287.1 mm		679.6 mm		1060.9 mm		470.0 mm		80.9 mm		83.6	
	2040s	▲24.4	▲14.6	▲16.4	▲2.8	▲2.2	▲3.5	▲32.5	▲24.0	▲10.5	▲14.7	59.7	51.5
	2060s	▲20.5	▲37.4	▲9.5	▲23.3	▲4.7	▲8.5	▲34.2	▲29.5	▽2.4	▽2.1	57.1	36.4
	2080s	▲64.4	▲30.0	▲28.8	▲18.1	▲7.2	▲14.9	▲36.9	▲33.2	▽10.8	▽45.1	39.7	18.0
	2100s	▲33.0	▲49.2	▲27.9	▲2.6	▲7.3	▲19.2	▲37.2	▲34.0	▽13.3	▽63.5	33.3	12.9
1005	Baseline (1992-2011)	1292.2 mm		807.0 mm		1073.0 mm		468.3 mm		80.9 mm		70.4	
	2040s	▲24.4	▲14.6	▲18.7	▲8.6	▲2.1	▲3.4	▲32.8	▲23.2	▲10.5	▲14.7	56.3	45.1
	2060s	▲20.5	▲37.4	▲11.9	▲31.5	▲4.6	▲8.4	▲33.8	▲28.1	▽2.4	▽2.1	53.3	32.4
	2080s	▲64.4	▲30.0	▲29.6	▲23.2	▲7.0	▲14.7	▲36.4	▲30.9	▽10.8	▽45.1	37.8	16.2
	2100s	▲33.0	▲49.2	▲29.3	▲8.6	▲7.2	▲18.9	▲37.2	▲32.3	▽13.3	▽63.5	31.6	11.1
1006	Baseline (1992-2011)	1415.0 mm		934.1 mm		951.6 mm		447.6 mm		82.7 mm		46.4	
	2040s	▲24.6	▲13.9	▲27.2	▲10.1	▽2.5	▽0.6	▲17.7	▲20.1	▽10.0	▲2.7	25.0	28.0
	2060s	▲20.0	▲31.8	▲19.4	▲30.9	▲0.7	▲3.6	▲20.0	▲24.9	▽15.2	▽15.4	25.4	19.9
	2080s	▲50.1	▲25.4	▲47.4	▲21.7	▲1.8	▲8.9	▲20.4	▲26.6	▽32.2	▽49.8	15.6	10.7
	2100s	▲29.1	▲33.3	▲32.2	▲18.6	▲2.3	▲12.0	▲20.4	▲27.6	▽33.1	▽66.0	15.3	7.3
1007	Baseline (1992-2011)	1399.9 mm		905.5 mm		1024.9 mm		475.8 mm		81.2 mm		71.1	
	2040s	▲26.3	▲12.5	▲23.7	▲5.1	▲2.9	▲4.3	▲29.1	▲20.4	▽5.6	▲6.4	45.8	41.3
	2060s	▲19.5	▲37.0	▲13.0	▲33.0	▲4.8	▲8.0	▲29.8	▲23.8	▽22.0	▽9.5	40.2	28.9
	2080s	▲39.4	▲30.5	▲30.5	▲21.4	▲6.9	▲14.3	▲32.3	▲29.2	▽19.3	▽42.2	32.0	17.4
	2100s	▲41.7	▲63.9	▲44.7	▲19.2	▲7.8	▲18.9	▲32.8	▲30.8	▽20.6	▽66.4	27.3	10.4
1010	Baseline (1992-2011)	1241.6 mm		981.2 mm		839.4 mm		375.7 mm		81.2 mm		44.9	
	2040s	▲21.5	▲12.2	▲14.1	▲5.0	▲3.2	▲4.7	▲35.5	▲25.0	▲8.7	▲27.8	35.1	37.0
	2060s	▲21.9	▲35.2	▲14.6	▲33.5	▲4.8	▲8.2	▲38.5	▲31.0	▽12.3	▲10.1	30.8	25.9
	2080s	▲28.8	▲22.0	▲23.3	▲14.9	▲8.0	▲15.7	▲41.1	▲35.5	▽4.3	▽27.1	26.8	18.3
	2100s	▲32.6	▲20.4	▲27.5	▲9.4	▲8.1	▲19.9	▲42.3	▲37.4	▲0.7	▽50.4	26.9	12.7
1011	Baseline (1992-2011)	1161.4 mm		844.2 mm		885.8 mm		365.8 mm		82.9 mm		45.6	
	2040s	▲24.7	▲13.2	▲21.2	▲8.5	▲7.6	▲9.8	▲38.7	▲28.6	▲12.2	▲28.6	32.3	36.1
	2060s	▲22.6	▲36.6	▲12.6	▲38.0	▲10.5	▲14.5	▲44.9	▲36.8	▽4.8	▲10.0	32.5	25.3

Table 3 Continued

Watershed code	Period	PCP		WY		PET		ET		SM		SMR (%)	
		RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5
1011	2080s	▲32.5	▲18.5	▲29.0	▲9.5	▲14.2	▲22.9	▲50.8	▲42.1	▽5.8	▽36.0	25.3	16.9
	2100s	▲31.6	▲22.3	▲24.8	▲9.6	▲13.8	▲27.3	▲52.4	▲44.9	▲2.9	▽55.7	27.7	11.4
1012	Baseline (1992-2011)	1309.7 mm		856.0 mm		1017.6 mm		431.4 mm		82.9 mm		52.7	
	2040s	▲24.7	▲13.2	▲17.7	▲5.0	▲7.5	▲9.7	▲39.6	▲29.5	▲12.2	▲28.6	37.8	40.8
	2060s	▲22.6	▲36.6	▲12.0	▲35.4	▲10.4	▲14.2	▲43.9	▲36.3	▽4.8	▲10.0	37.4	28.1
	2080s	▲32.5	▲18.5	▲25.4	▲8.0	▲14.0	▲22.6	▲48.9	▲41.1	▽5.8	▽35.9	29.1	18.5
	2100s	▲31.6	▲22.3	▲22.7	▲5.0	▲13.7	▲27.0	▲49.7	▲43.3	▲2.9	▽55.7	31.2	12.7
1013	Baseline (1992-2011)	1424.2 mm		983.3 mm		964.0 mm		427.9 mm		81.1 mm		45.4	
	2040s	▲21.5	▲12.2	▲15.2	▲4.6	▲3.2	▲4.7	▲33.6	▲25.8	▲8.7	▲27.8	34.2	36.7
	2060s	▲21.9	▲35.2	▲16.1	▲32.9	▲4.8	▲8.2	▲36.4	▲32.2	▽12.3	▲10.1	29.6	25.8
	2080s	▲28.8	▲22.0	▲24.2	▲14.8	▲8.0	▲15.7	▲39.1	▲35.8	▽4.3	▽27.1	25.9	17.9
	2100s	▲32.6	▲20.4	▲29.2	▲9.2	▲8.1	▲19.9	▲40.1	▲38.5	▲0.7	▽50.4	25.9	12.5
1014	Baseline (1992-2011)	1472.6 mm		990.3 mm		946.0 mm		448.9 mm		84.0 mm		39.4	
	2040s	▲21.9	▲14.7	▲14.7	▲4.4	▲5.2	▲7.2	▲38.0	▲28.5	▲3.6	▲21.5	28.8	30.8
	2060s	▲20.8	▲39.9	▲12.3	▲27.9	▲7.4	▲10.9	▲40.9	▲34.3	▽11.5	▲8.4	26.7	23.4
	2080s	▲58.5	▲20.6	▲35.6	▲10.3	▲9.8	▲17.7	▲43.9	▲37.9	▽1.5	▽29.4	23.0	16.1
	2100s	▲31.9	▲22.9	▲25.3	▲6.6	▲10.6	▲22.9	▲44.7	▲41.2	▽8.0	▽51.0	22.5	11.4
1015	Baseline (1992-2011)	1499.1 mm		1047.1 mm		1002.8 mm		441.0 mm		76.8 mm		45.7	
	2040s	▲22.0	▲12.7	▲16.2	▲1.7	▲7.4	▲9.0	▲35.4	▲31.0	▽6.6	▲9.9	29.2	30.3
	2060s	▲18.0	▲43.2	▲9.2	▲27.8	▲9.0	▲12.5	▲37.5	▲34.6	▽16.3	▽10.1	28.9	20.2
	2080s	▲33.1	▲30.5	▲30.9	▲17.3	▲9.6	▲17.1	▲40.3	▲36.9	▽29.2	▽48.2	19.0	11.4
	2100s	▲40.8	▲33.5	▲39.1	▲13.2	▲10.1	▲21.4	▲41.1	▲40.3	▽18.5	▽66.9	19.8	7.6
1016	Baseline (1992-2011)	1401.3 mm		918.8 mm		1020.4 mm		457.3 mm		81.2 mm		69.1	
	2040s	▲26.3	▲12.5	▲23.6	▲5.5	▲2.9	▲4.3	▲30.3	▲20.6	▽5.6	▲6.4	46.1	41.0
	2060s	▲19.5	▲37.0	▲12.9	▲33.0	▲4.8	▲8.0	▲31.2	▲24.3	▽21.9	▽9.5	40.7	28.9
	2080s	▲39.4	▲30.5	▲36.0	▲21.4	▲6.9	▲14.3	▲32.8	▲31.4	▽19.3	▽42.2	32.0	17.4
	2100s	▲41.7	▲63.9	▲45.0	▲19.2	▲7.8	▲19.0	▲32.6	▲31.9	▽20.6	▽66.4	27.2	10.4
1017	Baseline (1992-2011)	1501.4 mm		1073.4 mm		1126.9 mm		538.7 mm		76.8 mm		60.0	
	2040s	▲22.0	▲12.7	▲16.2	▲2.5	▲7.1	▲8.5	▲25.2	▲20.7	▽6.6	▲9.9	38.2	37.4
	2060s	▲18.0	▲43.2	▲9.1	▲29.5	▲8.2	▲11.4	▲27.7	▲23.5	▽16.3	▽10.1	38.6	25.0
	2080s	▲33.1	▲30.5	▲28.7	▲17.7	▲8.9	▲15.7	▲29.9	▲27.1	▽29.2	▽48.2	25.2	14.3
	2100s	▲40.8	▲33.5	▲39.7	▲14.2	▲9.2	▲19.4	▲28.3	▲30.7	▽18.5	▽66.9	25.1	9.2
1018	Baseline (1992-2011)	1556.6 mm		1075.7 mm		1256.4 mm		460.1 mm		59.7 mm		50.3	
	2040s	▲14.2	▲7.4	▲10.8	▽2.6	▲4.6	▲6.2	▲19.2	▲15.9	▽19.1	▽6.4	28.0	28.6
	2060s	▲13.1	▲32.0	▲8.6	▲22.7	▲8.5	▲12.0	▲20.7	▲18.4	▽25.2	▽29.8	27.2	16.2
	2080s	▲32.3	▲23.4	▲26.7	▲13.8	▲9.8	▲17.5	▲19.7	▲25.4	▽42.4	▽58.6	16.7	9.7
	2100s	▲27.2	▲26.3	▲27.8	▲6.7	▲11.2	▲22.9	▲21.9	▲28.7	▽38.3	▽65.5	15.7	8.3
1019	Baseline (1992-2011)	1557.1 mm		1059.4 mm		1272.1 mm		498.9 mm		59.7 mm		53.9	
	2040s	▲14.2	▲7.4	▲10.4	▽3.6	▲4.4	▲5.9	▲18.0	▲13.7	▽19.1	▽6.5	28.3	28.4
	2060s	▲13.1	▲32.0	▲7.9	▲20.6	▲8.1	▲11.6	▲19.9	▲17.3	▽25.2	▽29.8	27.5	16.8
	2080s	▲32.3	▲23.4	▲26.2	▲12.8	▲9.5	▲17.0	▲19.7	▲23.4	▽42.4	▽58.6	16.8	9.7
	2100s	▲27.2	▲26.3	▲27.1	▲4.9	▲10.8	▲22.3	▲21.9	▲26.9	▽38.3	▽65.5	15.8	8.2

PCP: Precipitation (mm), WY: Water yield (mm), PET: Potential evapotranspiration (mm), ET: Actual evapotranspiration (mm), SM: Snowmelt during snow period (mm), SMR: ratio of snowmelt/runoff (%)

인한 유출율이 높은 남한강상류(1001)와 달천(1004) 유역에서는 용설 영향을 고려한 수자원관리가 요구되어진다. 전체 유출량에 대한 용설 기간 동안의 유출량과 용설량을 비교분석한 결과, Baseline 기간 동안 전체유출량에 대한 용설량의 비(SMR)가 17개 중권역 전체 평균 60.2%였으나 미래에서는 RCP 4.5 시나리오 적용 시 전체 중권역 평균 SMR은 42.0% (2040s), 39.8% (2060s), 29.4% (2080s), 27.9% (2100s)로 나타났으며, RCP 8.5에서는 40.1% (2040s), 29.4% (2060s), 18.3% (2080s), 12.7% (2100s)로 크게 감소되는 것으로 나타났다. 특히 감소율이 가장 높게 나타난 중권역은 SMR이 가장 높았던 남한강상류(1001)와 달천(1004)유역으로 각각 26.7~44.0 및 23.4~50.3%의 감소율이 나타나 겨울철 용설 고려지역에서 용설 미고려 지역으로 유역특징이 바뀌게 되는 것으로 판단할 수 있다.

IV. 결 론

본 연구에서는 한강 17개 중권역을 대상으로 미래 기후변화가 수자원에 미치는 영향을 분석하고자 RCP 4.5, RCP 8.5 시나리오의 미래 기상자료를 구축하였으며, 수문-용설 모의가 가능한 SWAT 모형을 선정하여 모형의 적용성 평가와 미계측유역에 지역화를 실행하여 17개 중권역에서의 수문학적 거동 특성 및 용설 영향 변화를 분석하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 기후변화 시나리오는 기상청에서 제공하고 있는 73개 기상 관측소 지점별 RCP 4.5 및 8.5 시나리오 및 기후변화 시나리오 적용을 위한 수문 및 용설 모의가 가능한 SWAT 모형을 선정하였다. 모의방법은 5개 지점의 유출량 계측유역에서의 매개변수 검보정을 실시한 후 다변량 통계분석을 통해 미계측유역의 매개변수 전이를 위한 지역화를 수행하였다. 5개 지점의 유출량에 대한 다지점 검·보정을 통한 모형의 적용성 평가 결과, 영월(YW)과 영월1(YW1) 지점에 대해 검보정기간 동안의 년 평균 일 유출량에 대한 NSE는 0.46~0.75, 0.51~0.64이고 R^2 는 0.52~0.78과 0.40~0.81로 분석되었다. 달천(DC), 문막(MM) 및 청평(CP) 지점에서의 NSE는 0.31~0.54, 0.35~0.60, 0.30~0.75와 R^2 는 각각 0.41~0.83, 0.41~0.62, 0.46~0.85로 나타났으며, 청평(CP)을 제외한 4개 유역에서는 어느 정도 유사성이 있음을 나타냈다.

2. 두 RCP 시나리오별 수문학적 거동 변화를 살펴보면, RCP 4.5 시나리오에서 한강유역의 17개 중권역 전체 총 유출량의 변화는 현재를 기준으로 2040s (2021-2040), 2060s (2041-2060), 2080s (2061-2080) 및 2100s (2081-2100)기간에 각각 +16.6%, +10.6%, +28.9% 및 +29.5% 증가하였으며, 연

평균 온도가 각각 상승함에 따라 총 강우량에 대한 증발산량 비율은 각각 +31.3%, +36.8%, +39.7% 및 +41.8%로 꾸준히 증가하였다.

3. RCP 8.5 시나리오에서의 분석결과, 총 유출량은 현재를 기준으로 2040s, 2060s, 2080s 및 2100s기간에 각각 +4.2%, +28.4%, +15.2% 및 +11.3% 증가하였다.

4. 용설 기간 동안의 총 유출량에 대한 용설량의 기여변화는 RCP 4.5 및 8.5 모두 감소하는 추세를 보였으며, 특히 겨울철 용설로 인한 유출율이 높은 남한강상류(1001)와 달천(1004) 유역에서는 용설 영향을 고려한 수자원관리가 필요하다는 결론을 얻을 수 있었다. 전체 유출량에 대한 용설 기간 동안의 유출량과 용설량을 비교분석한 것으로 Baseline 기간의 전체유출량에 대한 용설량의 비(SMR)는 17개 중권역 전체 평균이 60.2%였으나 미래에서는 RCP 4.5 시나리오 적용 시 전체 중권역 평균 SMR은 42.0% (2040s), 39.8% (2060s), 29.4% (2080s), 27.9% (2100s)로 나타났으며, RCP 8.5에서는 40.1% (2040s), 29.4% (2060s), 18.3% (2080s), 12.7% (2100s)로 크게 감소되는 결과를 확인할 수 있었다.

본 연구에서 적용한 기후변화 시나리오는 현재를 기준으로 온실가스저감 정책에 의해 안정화되는 저농도시나리오로 RCP 4.5와 저감추세 없이 온실가스가 가장 크게 배출되는 RCP 8.5의 시나리오들의 특징을 잘 반영되고 있다. 미래 기후변화에 따른 겨울철 강수량 증가에 따라 용설량이 증가되는 유역은 장기적 측면에서의 대응방안을 검토할 필요가 있으며, 대부분 유역에서 겨울철 전체 유출량에 대한 용설량의 비율 감소로 현재와는 다른 겨울철 및 봄철 가뭄에 대비한 농업용수 확보가 필요할 것으로 전망된다. 또한 본 연구 이외에 유출량 감소에 따른 하천수질 악화문제와 비점오염원 관리를 위한 연구 또한 병행되어야 할 것이다.

본 연구에서 적용한 기후변화 시나리오는 여러 가지 요인에 의한 많은 불확실성을 내포하고 있어 그에 따른 모의결과의 불확실성은 더욱 커지게 마련이다. 또한 기후조건이외에 산업 정책 변화 등에 유역환경변화를 고려하지 않았기 때문에 본 연구의 결과를 절대적 판단기준으로 적용하기에는 무리가 있다. 하지만 기후조건 변화에 따른 수문학적 거동변화와 용설 변화를 가시적으로 파악할 수 있다는 점에서 미래 수자원의 변동성을 전망하고 효과적인 적응 정책을 마련하는 데 유용한 정보를 제공할 수 있을 것으로 판단된다.

이 연구는 기상청 기후변화 감시·예측 및 국가정책지원 강화사업 (CATER 2012-3090)의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

1. Back, H. J., C. H. Cho, W. T. Kwon, S. K. Kim, J. Y. Cho, and Y. S. Kim, 2011. Development strategy for new climate change scenarios based on RCP. *Korea Climate Change Research* 2(1): 55-68 (in Korean).
2. Chung, S. O., 2012. Projection of paddy rice consumptive use in the major plains of the Korean peninsula under the RCP scenarios. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 54(5): 35-41 (in Korean).
3. Cloutier V., R. Lefebvre, R. Therrien, and M. M. Savard, 2008. Multivariate statistical analysis of geochemical data as indicative of the hydrogeochemical evolution of groundwater in a sedimentary rock aquifer system. *Journal of Hydrology* 353: 294-313.
4. Davis, J. C., 1986. Statistics and data analysis in Geology. John Wiley et Sons Inc., New York.
5. Güler, C., G. D. Thyne, J. E. McCray, and A. K. Turner, 2002. Evaluation of graphical and multivariate statistical methods for classification of water chemistry data. *Hydrogeology Journal* 10: 455-474.
6. Kim, D. G., J. U. Jeong, J. H. Park, and C. G. Park, 2007. Long-term runoff simulation in consideration of snow pack and snow melt. *Journal of the Korean Society of Water and Wastewater* 21(3): 265-272 (in Korean).
7. Kim, J. S., and C. U. Choi, 2013. Impact of changes in climate and land use/land cover change under climate change scenario on streamflow in the basin. *Journal of the Korean Society for Geospatial Information System* 21(2): 107-116 (in Korean).
8. Kim, N. W., B. J. Lee, and J. E. Lee, 2006. An evaluation of snowmelt effects using SWAT in Chungju dam basin. *Journal of the Korea Water Resources Association* 39(10): 833-844 (in Korean).
9. Kim, S. B, 2013. Assessment of future climate change impacts on snowmelt and stream water quality for mountainous watershed using SWAT. Master's. D. thesis, Konkuk University (in Korean).
10. Lee, B. J., I. W. Jung, and D. H. Bae, 2009. Parameter regionalization of semi-distributed runoff model Using multivariate statistical analysis. *Journal of the Korea Water Resources Association* 42(2): 149-160 (in Korean).
11. Park, J. Y., M. S. Lee, Y. J. Lee, and S. J. Kim, 2008. The analysis of future land use change impact on hydrology and water quality using SWAT model. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers* 28(2B): 187-197 (in Korean).
12. Park, J. Y., M. J. Park, S. R. Ahn, and S. J. Kim, 2009. Watershed modeling for assessing climate change impact on stream water quality of Chungju dam watershed. *Journal of the Korea Water Resources Association* 42 (10): 877-889 (in Korean).
13. Park, M. J., 2011. Projection of Hydrologic response and stream water quality considering climate and land use change. Ph. D. diss., Konkuk University (in Korean).
14. Rho, H. J., 2005. Multivariate data analysis with theory and practice. Seoul: Hyungseul.
15. Ribeiro, L., and M. E. Macedo, 1995. Application of multivariate statistics, trend and cluster analysis to groundwater quality in the Tejo and Sado aquifer. in: groundwater Quality: Remediation and Protection. Proceeding of the Prague Conference, 39-47. May 1995. IAHS publ. 225.
16. Schot, P. P., and J. van der Wal, 1992. Human impact on regional groundwater composition through intervention in natural flow patters and changes in land use. *Journal of Hydrology* 134: 297-313.
17. Steinhorst, R. K., and R. E. Williams, 1985. Discrimination of groundwater sources using cluster analysis, MANOVA, canonical analysis and discriminant analysis. *Water Resources Research* 21: 1149-1156.