

ORIGINAL ARTICLE

기후변화 시나리오에 따른 강정천 유역의 유출특성 분석

이준호 · 양성기* · 김민철

제주대학교 토목공학과

Runoff Analysis of Climate Change Scenario in Gangjung Basin

Jun-Ho Lee, Sung-Kee Yang*, Min-Chul Kim

Department of Civil Engineering, Jeju National University, Jeju 690-756, Korea

Abstract

Jeju Island is the highest rain-prone area in Korea that possesses affluent water resources, but future climate changes are predicted to further increase vulnerabilities as resultant of increasing of extreme events and creating spatial-temporal imbalance in water resources. Therefore, this study aimed to provide basic information to establish a proper water resources management plan by evaluating the effects of climate change on water resources using climate change scenario. Direct runoff ratio for 15 years (2000~2014) was analyzed to be 11~32% (average of 23%), and average direct runoff ratio for the next 86 years (2015~2100) was found as 28%, showing an increase of about 22% compared to the present average direct runoff ratio (23%). To assess the effects of climate change on long-term runoff, monthly runoff variation of future Gangjeong watershed was analyzed by dividing three time periods as follows: Present (2000~2030), Future 1 (2031~2070) and Future 2 (2071~2100). The estimated results showed that average monthly runoff increases in the future and the highest runoff is shown by Future 2. Extreme values has been expected to occur more frequently in the future as compared to the present.

Key words : SWAT, ADCP, Climate change scenario, Jeju island

1. 서론

기후변화란 광의적인 의미로 현재의 기후계가 자연적인 요인과 인위적인 요인에 의해 점차 변화하는 현상을 말한다. 최근 기후변화의 중요한 요인은 주로 인위적인 요인에 의해 기존의 기후변화 속도가 급격하게 증가하는 현상으로 정의하고 있다(Song and Choi, 2012). 지구온난화로 인해 지난 100여 년 동안 지구의 평균기온은 약 0.74℃ 증가 하였으며(IPCC, 2007), 이상기후 및 기후변화는 전 지구뿐만 아니라 한반도의 온난화에도 더욱 심화 될 것으로 추정하고 있다(Meteorological Administ

-ration, 2011).

지구 온난화 현상은 미래의 기후현상과 물순환 과정에 큰 변화를 불러일으킬 것으로 예상되고 있으며, 특히 물순환 과정의 변화는 곧 강수량, 증발산량, 지표수 유출, 토양 함수량 등이 달라지는 것을 의미하는 것으로 미래의 수자원의 변동뿐만 아니라 홍수와 가뭄 또한 극심해질 것으로 보고되고 있다(Trenberth, 1998; Ahn et al., 2001; Yang, 2006).

미국, 영국 등의 선진국에서는 기후변화가 수자원에 미치는 영향을 면밀히 분석하고, 이에 따른 수자원 계획, 관리에 활용하기 위한 다양한 연구가 진행되고 있다. 미

Received 20 October, 2015; Revised 2 December, 2015;

Accepted 11 December, 2015

*Corresponding author : Sung-Kee Yang, Professor, Department of Civil Engineering, Jeju National University, Jeju 690-756, Korea
Phone: +82-64-754-3451
E-mail: skyang@jeju.ac.kr

© The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.
© This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

국은 기후변화 영향으로 인한 수자원관리를 정책수립 활용과 기후변화의 영향을 정량화하고 이에 관련한 정보를 제공하고 있다(CDWR, 2006). 국내에서는 기후변화에 따른 수자원 관련 연구로는 Yoon et al.(1999)이 기후변화에 따른 홍수 및 가뭄 발생빈도의 변화를 분석하였으며, Kim et al.(2004)은 YONUGCM 결과를 통계적 방법으로 기후시나리오를 상세화 하였다. Shin(2000)은 기온과 강수량의 변화에 대한 유출량의 민감도를 분석하였으며, Ahn(2001)은 국지기후모델인 IRSHAM96 모형과 물수지모형을 이용하여 지역적인 기후특성을 반영하여 분석하였다.

Kwon et al.(2007)은 강우자료와 실측자료를 비교하여 기상청 RCM(remote control processing module)을 수문학 분야에서 적용하여 적정성을 검토하였고, Han et al.(2009)은 SWAT(Soil and Water Assessment Tool) 모형을 이용하여 토지피복도 변화에 따른 직접유출량 분석하였으며 Kim et al.(2015)은 SWAT-MODFLOW (Modular Three-Dimensional Finite-Difference Ground-Water Flow)을 이용한 외도천유역에 통합 물수지 분석을 실시하였다.

제주도는 수자원의 98% 이상을 지하수에 의존하기 때문에 기후변화에 따른 수자원 영향에 대해 지속적인 관심과 연구가 필요한 지역이다(Song and Choi, 2012). 이러한 기후변화에 따른 수자원의 영향을 분석하기 위해서는 과거의 수문현상 분석과 미래의 수문변동에 대한 합리적인 예측이 필요하다. 향후 예상되는 극치사상의 증가와 수자원의 시공간적 불균형은 더욱 취약성을 증가시킬 것으로 보이며, 안정적인 수자원의 공급 및 확보를 위해서는 장기적이고 효율적인 수자원계획이 요구되지만 기후변화로 인해 변동성이 커지게 된다면 수자원확보에 대한 불확실성도 더욱 커질 것으로 예측하고 있다.

이러한 문제를 해결하기 위해 본 연구에서는 기후변화시나리오를 활용하여 SWAT 모형을 이용하였으며 기후변화가 수자원에 미치는 영향을 평가하여 수자원관리

계획 수립에 필요한 기초정보를 제공하고자 하였다.

2. 자료 및 방법

2.1. 온실가스 배출 시나리오

IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change) 5차 평가 보고서에서는 인간 활동이 대기에 미치는 복사량으로 온실가스 농도를 결정하였다. RCP(representative concentration pathways)시나리오는 최근 온실가스 농도 변화경향을 반영하였으며 최근 예측모델에 맞게 해상도 등을 업데이트 하였다. 통상 미래 기후 및 수문 시나리오를 생산하기 위해서는 선정된 온실가스 배출시나리오를 기반으로 기후모델을 이용하여 예측 시나리오를 생산하고 수문 모형에 적용하여 수문 시나리오를 생산하는 단계를 거치게 된다(Lee et al., 2011).

기존 온실가스 시나리오(special report on emissions scenarios; SRES)는 인위적인 기후변화 요인 중에서 온실가스와 에어로졸의 영향에 의한 강제력만 포함하였으나, RCP시나리오는 토지이용변화에 따른 영향을 포함하여 제시되었다. RCP 시나리오의 숫자는 복사강제력, 즉 온실가스 등으로 에너지의 평형을 변화시키는 영향력의 정도를 의미하는 양으로서 단위는 W/m² 지상에 도달되는 태양복사가 약 238 W/m²이므로 RCP 8.5/6.0/4.5/2.6의 복사강제력은 입사 태양복사량의 약 3.6%, 2.5%, 1.9%, 1.1%에 해당된다(Jeung et al., 2014). 이 연구에서는 국내 기후변화정보센터에서 제공하고 있는 RCP 8.5를 이용하여 기후변화가 수자원에 미치는 영향을 분석하였다.

2.2. 입력자료 선정

기후변화에 따른 유출특성 분석하기 위한 제주도 남부지역에 위치한 강정천은 용천수에 의해 상시 흐름을 형성하는 기저유출 하천으로서 유로연장은 16.63 km이고 유역면적은 38.23 km²이며 하상경사가 1/12 ~ 1/37로 비교적 급경사를 이루고 있다(Table 1). 해당 유역의

Table 1. Watershed characteristic factor

Watershed	Watershed Area (km ²)	Stream Length (km)	Average width (A/L)	Form factor (A/L ²)
Gangjeong stream	38.23	16.63	2.30	0.14

특성인자를 분석 유역의 형상을 나타내는 수치표고모델 (digital elevation model; DEM), 토지이용상황을 나타내는 토지이용 혹은 토지피복도, 그리고 토양의 특성을 나타내는 토양도 등의 GIS 데이터를 사용하였다.

2.2.1. 수치표고모델(DEM)

DEM은 일반적으로 격자형태로 만들어져 있으며 각 격자에는 표고값이 속성정보로 입력되어 있다. 본 연구에서는 대상유역의 DEM을 30 m × 30 m 해상도의 DEM을 이용해 가공하여 사용하였으며, 대상유역에 대한DEM은 Fig. 1과 같다.

2.2.2. 토지이용도 및 토양도

환경부에서는 대분류, 중분류, 세분류의 해상도에 해당하는 토지이용도를 제공하고 있으며, 2007년 Landset 위성영상을 이용하여 피복 분류된 자료를 이용하였다. 연구대상유역의 토지피복도(landuse map) 자료의 중분류 토지이용도를 GIS 프로그램을 이용하여 구축하였다 (Fig 2(a)). 자연초지(PAST)는 전체유역의 약 55.8%, 주거지역(URLD)이 19.0%로 분포하는 것으로 나타났으며, 그 외 밭지역(AGRR) 15.0%, 침엽수림지역 (FRSE) 3.0% 순으로 분포한다.

토양도(soil type map) 자료는 농업과학기술원의 농업토양정보시스템에서 제공하고 있는 1:25,000 축척의 정밀 토양도를 사용하였다. 토지이용도와 같이 동일한 공간해상도로 가공하여 구축하였으며(Fig. 2(b)), 각 토양도에 대한 면적은 Table. 2과 같다.

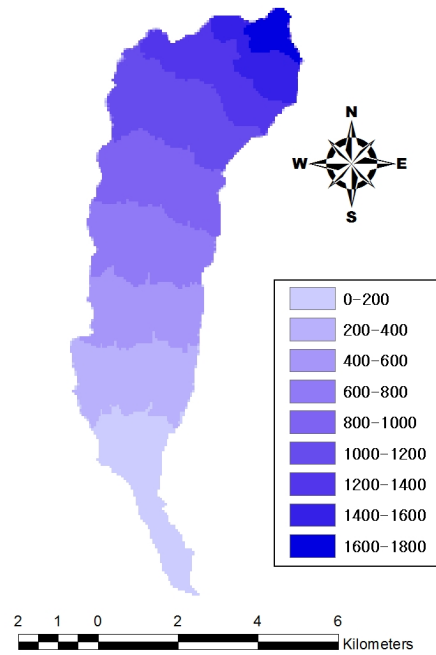


Fig. 1. Digital elevation model.

3. 결과 및 고찰

3.1. SWAT 모형의 보정 및 적용

장기유출 모델인 SWAT모형을 이용하여 강정천 유역의 2100년까지 미래 유출량을 모의하기 위해 매개변수 민감도 분석 결과를 바탕으로 보정을 실시하였다.

Table 2. Hydrologic soil groups in Gangjeong watershed

NAME	Area(Km ²)	Ratio(%)	NAME	Area(Km ²)	Ratio(%)
YONGHEUNG	0.78	2.04%	NONGO	4.95	12.95%
RB	2.55	6.68%	JUNGMUN	5.01	13.10%
GUEOM	0.39	1.03%	PYEONGDAE	0.12	0.31%
SARA	0.28	0.73%	JEJU	0.69	1.82%
DONGGUI	0.65	1.69%	MINAG	0.78	2.04%
ORA	0.87	2.29%	JOCHEON	0.02	0.05%
DAEJEONG	0.03	0.08%	ARA	0.89	2.33%
HEUGAG	14.57	38.10%	GAMSAN	0.14	0.37%
NORO	3.36	8.79%	GYORAE	0.11	0.29%
JEOGAG	1.00	2.61%	DONGHONG	0.04	0.10%
GUNSAN	0.64	1.67%	SONGAG	0.16	0.42%
Rock outcrop	0.21	0.54%			

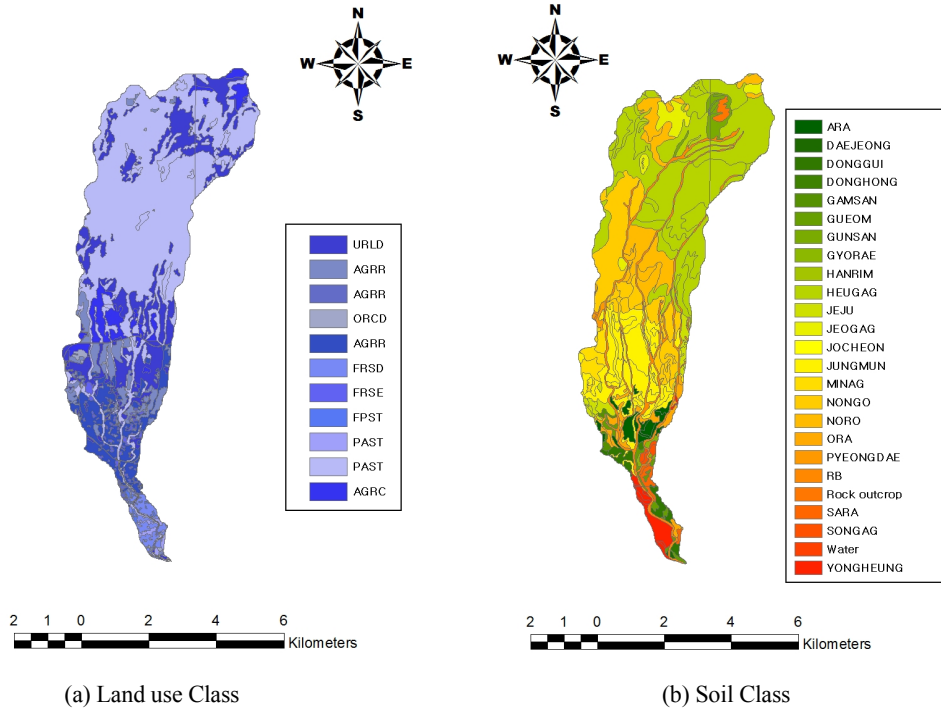


Fig. 2. Map of (a) land use and (b) soil classes of the study area.

SWAT 모형의 매개변수 중에서 지리적 특수성을 띄고 있는 제주도 하천에 대하여 선행된 연구를 참고하였으며 (Jung et al., 2009; Han et al., 2009; Kang et al., 2013,

대상 연구유역의 유출량 자료는 ‘제주형 물순환 해석 및 수자원 관리 기반 구축(MLTMA and KICTEP, 2015)’ 연구를 통해 2011년 7월부터 2014년 12월까지 최신

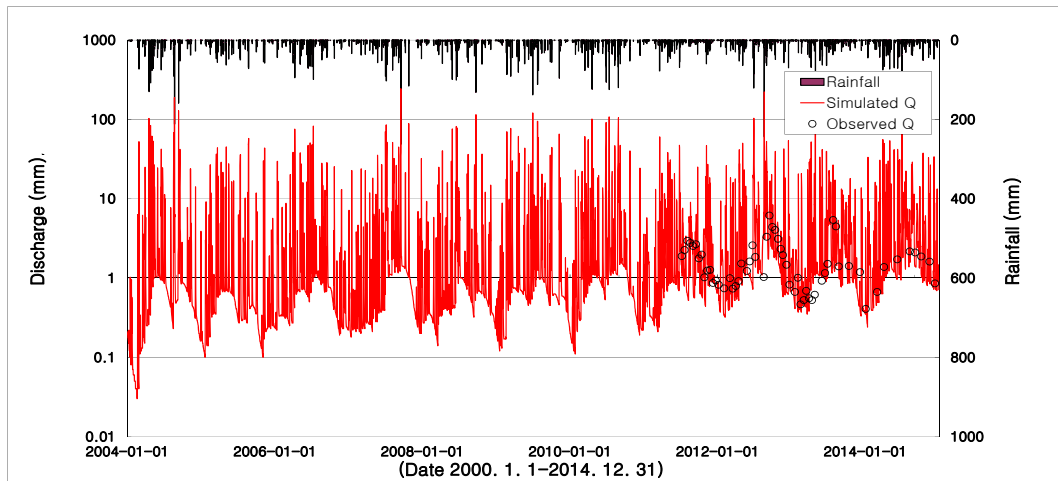


Fig. 3. Result of the present runoff simulation of the basin of Gangjeong stream.

Table 3. Calibrated parameters

Parameter	Definition	Min.	Max.	Calibrated value
CN2	SCS runoff curve number	-8%	+8%	-4%
ESCO	Soil evaporation compensation factor	0	1	0.75
SOL_AWC	Available water capacity of the soil layer	0	1	0.03

정밀 관측기기인 ADCP(acoustic doppler current profiler)를 이용한 현장실측자료를 이용하여 보정을 실시하였으며, Fig. 3은 최근 자료인 2004년부터 제시하였다.

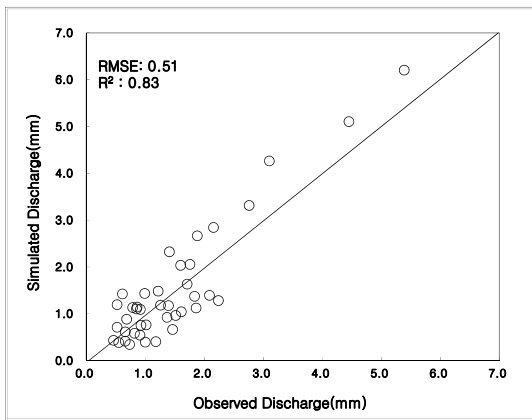


Fig. 4. Result of calibration.

ADCP 관측결과를 이용한 모델의 매개변수 적용은 CN_2를 -4 하향 고정, ESCO +0.75, SOL_AWSC +0.03 상향하였으며(Table 3.) 모의결과 값을 보정한 결과, 결정계수 R^2 값은 0.83, 평균제곱근오차(root mean square error; RMSE) 값은 0.51으로 나타났다(Fig. 4.). 보정된 매개변수를 활용하여 실측치에 가까운 모사가 가능하였으며 15년간(2000~2014년)의 직접유출율은 11~32%(평균 23%)으로 분석되었다.

3.2. 기후변화에 따른 유출량 예측

본 논문에서는 강정천 유역에 각 지형자료를 SWAT 모형에 적용하여 대상유역으로 장기유출을 모의하였으며, 2100년까지 미래 유출량의 변화를 비교하기 위하여 현재의 유출량 보정에 적용되었던 매개변수를 그대로 적용하였다.

미래(2015~2100) 86년간의 평균 직접유출율은 28%로 산정되었다. 현재의 평균 직접유출율(23%)에 비해 약 22% 증가하는 것으로 나타났으며, 직접유출의 증

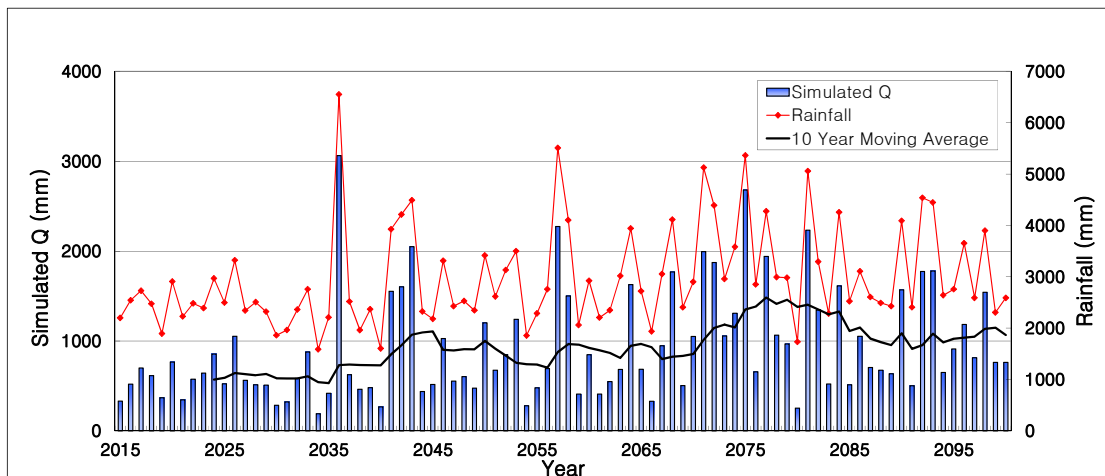


Fig. 5. Future present comparison of direct runoff.

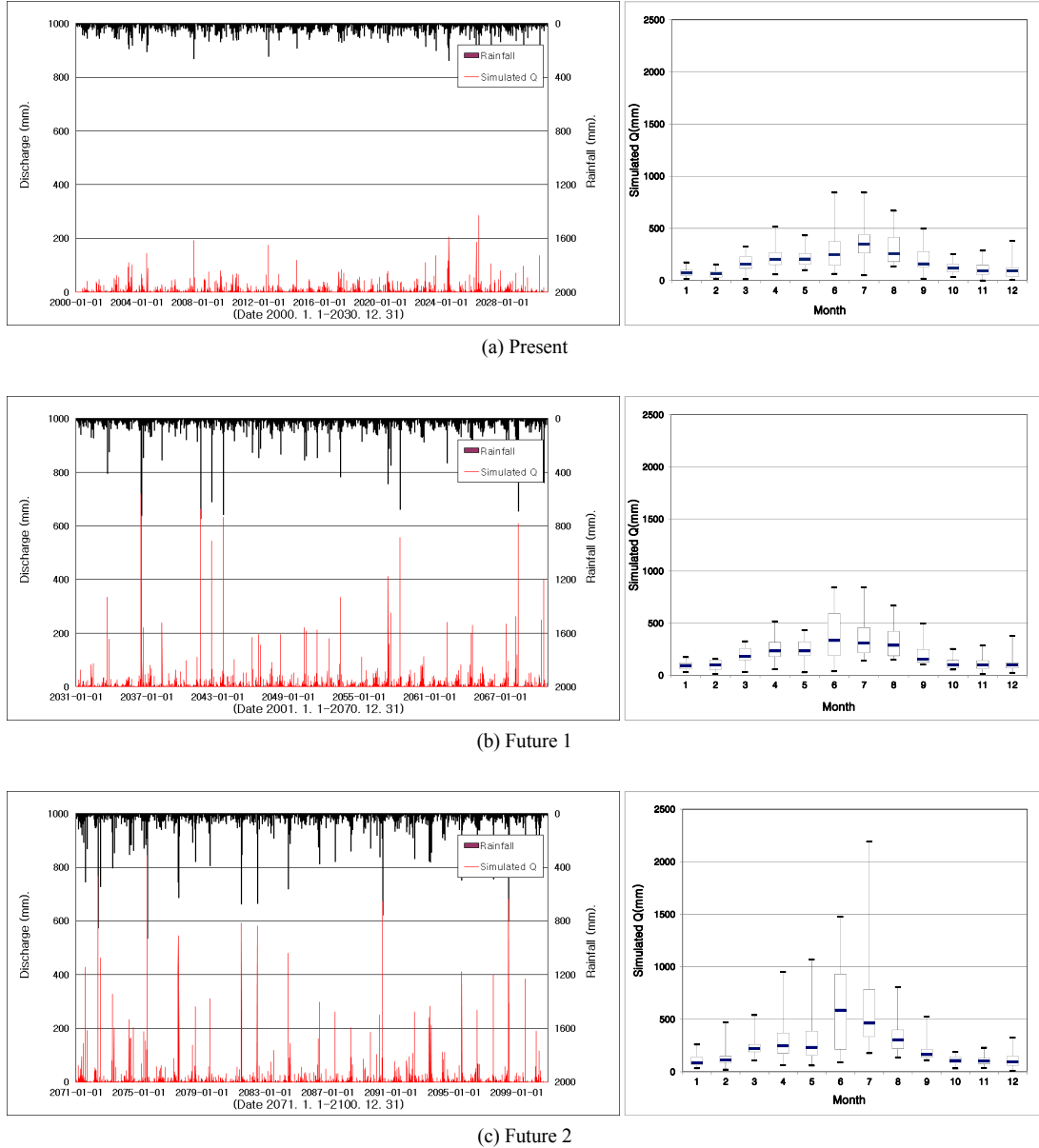


Fig. 6. Future present comparison of direct runoff and Box-Plot.

가와 미래로 갈수록 극치값이 현재보다 자주 발생할 것으로 전망되었으며, Lee et al.(2015)은 제주도 강우량은 과거에 비해 1.45배 정도 증가하는 것으로 제시하였다 (Fig. 5). 또한, 10년 이동평균이 약 2070년부터 평균이 높게 산정됨을 알 수 있었다.

따라서 기후변화가 장기유출에 미치는 영향을 평가하기 위해 Present: 2000~2030년, Future 1: 2031~2070년, Future 2: 2071~2100년 3개의 유형으로 나누어 미래 강정천유역에서의 월별 유출 변동성 분석을 수행하였다(Fig. 6). 미래로 갈수록 월 평균 유출량이 증가

하고, Future 2(2070~2100년) 일 때 유출량이 가장 증가할 것으로 전망되었으며 Box-Plot를 확인 결과, 미래로 갈수록 극치값이 현재보다 자주 발생할 것으로 전망되었다.

4. 결론

제주도는 우리나라 최다우 지역으로 풍부한 수자원을 보유하고 있지만 앞으로 기후변화는 극치사상의 증가와 수자원의 시공간적 불균형으로 더욱 취약성을 증가시킬 것으로 예측하고 있다. 또한, 안정적인 수자원의 공급 및 확보를 위해 장기적이고 효율적인 수자원계획이 요구되지만, 기후변화로 인해 변동성이 커지게 된다면 수자원 확보에 대한 불확실성도 커질 것이다. 따라서 본 연구에서는 기후변화시나리오를 활용하여 기후변화가 수자원에 미치는 영향을 평가하여 수자원관리계획 수립에 필요한 기초정보를 제공하고자 하였다.

1) 현재와 미래의 기후변화에 따른 직접유출량을 모의하기 위하여 준분포형 유출모형인 SWAT 모형을 제주도 남부지역의 강정천 유역에 적용하였다. 입력 자료인 수문기상 자료는 기상청, 기후변화시나리오는 기후변화정보센터에서 자료를 받아 구축하였으며, DEM, 토양도, 토지피복도를 각각 구축하였다.

2) 강정천 유역의 2100년까지 미래 유출량을 모의하기 위해 매개변수 민감도 분석 결과를 바탕으로 보정을 실시하였다. 2011년 7월부터 2014년 12월까지 최신 정밀 관측기기인 ADCP(Acoustic Doppler Current Profiler)를 이용한 현장실측자료를 이용하여 보정을 실시하였다. 매개변수 적용은 CN₂를 -4 하향 고정, ESCO +0.75, SOL_AWSC +0.03 상향하였다.

3) 보정된 매개변수를 활용하여 실측치에 가까운 모사가 가능하였으며 15년간(2000~2014년)의 직접유출율은 11~32%(평균 23%)으로 분석되었고, 2100년까지 미래 유출량의 변화를 비교하기 위하여 현재의 유출량 보정에 적용되었던 매개변수를 그대로 적용하였다. 미래(2015~2100) 86년간의 평균 직접유출율은 28%, 현재의 평균 직접유출율(23%)에 비해 약 22% 증가하는 것으로 나타났으며, 직접유출의 증가에 가장 큰 영향으로 미래로 갈수록 극치값이 현재보다 자주 발생할 것으로 전망되었다.

4) 기후변화가 장기유출에 미치는 영향을 평가하기 위해 Present: 2000~2030년, Future 1: 2031~2070년, Future 2: 2071~2100년 3개의 유형으로 나누어 미래 강정천유역에서의 월별 유출 변동성 분석을 수행하였다. 미래로 갈수록 월 평균 유출량이 증가하고, Future 2(2070~2100년) 일 때 유출량이 가장 증가와 미래로 갈수록 극치값이 현재보다 자주 발생할 것으로 전망되었다.

감사의 글

본 연구는 2015학년도 제주대학교 교원성과지원사업에 의하여 연구되었습니다.

REFERENCES

- Ahn, J. H., Yoon, Y. N., Yoo, C. S., 2001, On the change of hydrologic conditions due to global warming : 2. An analysis of hydrologic changes in daechung dam basin using water balance model, Journal of Korea water Resources Association, 34(5), 511-519.
- CDWR(California Department of Water Resources), 2006, Progress on incorporating climate change into management of california's water resources, Technical memorandum report, available at <http://baydeltaoffice.water.ca.gov/climatechange/reports.cfm>.
- IPCC, 2007, Climate change 2001 : The scientific basis, IPCC contribution of working group I to the third assessment report of the intergovernmental panel on climate change, Cambridge University Press, Cambridge.
- Jeung, S. J., Kim, B. S., Jun, K. W., Choi, J. I., 2014, Impact assessment of climate change on long term runoff in the Young San river based on the RCP 8.5 climate change scenarios, Korean Review of Crisis & Emergency Management, 10(2), 289-305.
- Jung, W. Y., Yang, S. K., 2009, Simulation on runoff of rivers in Jeju island using SWAT model, Journal of the Environmental Sciences, 18(9), 1045~1055.
- Kang, M. S., Yang, S. K., Jung, W. Y., Kim D. S., 2013, Characteristics of runoff on southern area of Jeju island, Korea, Journal of the Environmental Sciences, 22(5), 591~597.
- Kim, U. T., Lee, D. R., Yoo, C. S., 2004, Effects of

- climate change on the streamflow for the daechung dam watershed, *Journal of Korea water Resources Association*, 37(4), 305-314.
- Kim, N. W., Chung, I. M., Na, H. N., 2015, An integrated water budget analysis of Oedocheon watershed in Jeju island, *Journal of the Environmental Sciences*, 24(4), 471~480.
- Kwon, W. T., Boo, K. O., Heo, I. H., 2007, Climate change during the recent 10 years in Korea, *Conference of Korean Water Resources Association*, 278-280.
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (MLTMA), and Korea Institute of Construction and Transportation Technology Evaluation and Planning (KICTEP), 2015, Jeju water circulation interpretation and water resource management infrastructure establishment.
- Lee, M. H., Jung, I. W., Bae, D. H., 2014, Korean flood vulnerability assessment on climate change, *Journal of Korea water Resources Association*, 44(8), 653-666.
- Lee, J. H., Yang, S. K., Jung W. Y., Yang, W. S., 2015, Estimation of design rainfall based on climate change scenario in Jeju island, *Journal of the Environmental Sciences*, 24(4), 383~391.
- Meteorological Administration, 2011, the report : Climate change scenario in Area - Jeju Island -.
- Shin, S. C., 2000, Analysis of river flow change based on some scenarios of global warming, *Journal of Korea water Resources Association*, 33(5), 623-634.
- Song, S. H., Choi, K. J., 2012, An appropriate utilization of agricultural water resources of Jeju island with climate change(I), *Koran Society of Soil and Groundwater Environment*, 17(2), 62-70.
- Trenberth, K. E., 1998, Atmospheric moisture residence times and cycling : Implications for rainfall rates with climate change, *Climatic Change*, 42, 327-339.
- Yang, H. K., 2006, Impact of climate change on hydrological disasters, *Journal of the Korean Geomorphological Association*, 13(3), 45-54
- Yoon, Y. N., Yoo, C. S., Lee, J. S., Ahn, J. H., 1999, On the change of flood and drought occurrence frequency due to global Warming : 2. Estimation of the change in daily rainfall depth distribution due to global warming, *Journal of Korea water Resources Association*, 32(6), 627-636.
- Han, W. K., Yang, S. K., 2009, A runoff simulation using SWAT model depending on changes to land use in Jeju island, *Journal of the Environmental Sciences*, 18(9), 1057~1063.