

기후변화에 따른 대청호 유역의 물 순환 및 토양 유실량 영향

예 령 · 정세웅[†] · 오동근 · 윤성완

충북대학교 환경공학과

Impact of Climate Change on Water Cycle and Soil Loss in Daecheong Reservoir Watershed

Lyeong Ye · Se Woong Chung[†] · Sung Wan Yoon · Dong Geun Oh

Department of Environmental Engineering, Chungbuk National University

(Received 11 March 2009, Revised 22 September 2009, Accepted 29 September 2009)

Abstract

The study was aimed to assess the expected impact of climate change on the water cycle and soil losses in Daecheong Reservoir watershed, Korea using the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) that was validated for the watershed in a previous study. Future climate data including precipitation, temperature and humidity generated by introducing a regional climate model (Mesoscale Model Version 5, MM5) to dynamically downscale global circulation model (European Centre Hamburg Model Version 4, ECHAM4) were used to simulate the hydrological responses and soil erosion processes in the future 100 years (2001~2100) under the Special Report on Emissions Scenario (SRES) A1B. The results indicated that the climate change may increase in the amount of surface runoff and thereby sediment load to the reservoir. Spatially, the impact was relatively more significant in the subbasin Bocheongcheon because of its lower occupation rate of forest land compared to other subbasins. Seasonally, the increase of surface runoff and soil losses was more significant during late summer and fall season when both flood control and turbidity flow control are necessary for the reservoir and downstream. The occurrence of extreme turbidity flow events during these period is more vulnerable to reservoir operation because the suspended solids that remained water column can be resuspended by vertical mixing during winter turnover period. The study results provide useful information for the development of adaptive management strategy for the reservoir to cope with the expected impact of future climate change.

keywords : A1B scenario, Climate change, Daecheong reservoir, Soil erosion, SWAT

1. 서론

기후변화의 원인에 대해서는 온실가스(GHGs) 이외도 여러 가지 분석과 주장이 있다. 이러한 주장과 관련된 연구로는 지구 공전궤도의 이심률 변화에 의한 천문학적 요인(Imbrie and Imbrie, 1980), 태양 흑점 활동의 변화 영향(Fries-christensen and Lassen, 1991; Judith et al., 1995), 그리고 화산활동과 같은 지구 내부적 영향(Kirchner et al., 1999) 등이 있다. 그리고 남극에서 시추한 얼음 코어를 분석하여 과거 50만년의 기온, 먼지, 이산화탄소의 주기를 분석한 결과 지구기온 변화 추이와 일치한다는 사실도 밝혀냈다(Petit et al., 1997). IPCC(International Panel for Climate Change, 2007)는 기후변화는 자연적인 요인과 인위적인 요인에 의해 발생되지만, 최근의 기후변화는 인간 활동에 의해 더욱 가속화되고 있다고 주장한다. 일부에서는 기후변화에 대한 시각을 과학적 관점뿐만 아니라 정책과

언론에 대한 연구도 이루어졌다(Weingart et al., 2000).

이와 같이 기후변화의 원인에 대한 분석은 다양하지만, 다양한 실측자료는 지구의 기온이 상승하는 추세에 있다는 것을 증명하고 있다. 따라서 기후변화에 대한 여러 가지 불확실성에도 불구하고 선진국에서는 생태계, 사회, 경제적인 취약성 분석과 이에 대한 대응 및 적응 방안에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다(Adams et al., 1990; Gyalistas et al., 1994; Lettenmaier and Gan, 1990). 특히, 기후변화는 미래의 수자원에 많은 영향을 미칠 것으로 예상되고 있으며(Srikanthan and McMahon, 2001; Xu and Singh, 2004), 시공간적인 강우 빈도와 강도의 변화는 유출량과 유출특성에 적지않은 영향을 미칠 것으로 예측된다(Whitfield and Cannon, 2000; Muzik, 2001; Risbey and Entekhabi, 1996). 이러한 유출의 변동은 중요한 상수원인 저수지 저수량에도 큰 영향을 준다(Christensen et al., 2004). 기후변화에 의한 유역의 강우강도와 유출량 증가는 유기물이 풍부한 표층 토양의 유실을 초래하여 유역의 농업생산능력을 저하시킬 수 있다. 유역의 토양 유실량 증가는 최근 중요한 환경문제로 대두되고 있는 저수지 탁수 장기화를 가중하게 되며

[†] To whom correspondence should be addressed.
schung@chungbuk.ac.kr

비점오염 부하량 증가에 따른 수질문제를 야기할 수 있다 (Bouraoui et al., 2002). 따라서 적응적(Adaptive) 수자원관리를 위해서는 신뢰성 있는 기후변화 시나리오를 구축하고 이에 따른 유역의 유출량, 증발산 등의 물 순환 및 수질변동에 대한 연구가 이루어져야 할 것이다.

기후변화 시나리오에 따른 유역의 수문평가 연구는 국외에서 많이 이루어지고 있으며(Hanratty and Stefan, 1998; Krysanova et al., 2005; Stone et al., 2003; Thomson et al., 2005; Varanou et al., 2002), 국내에서도 기후변화에 따른 수자원 및 유역의 유출 영향평가가 꾸준히 진행되고 있다(김영오, 1998; 윤용남 등, 1999; 배덕효 등, 2007a, 2007b, 2007c; 신사철, 2000; 황준식 등, 2007). 이 중 대청댐과 용담댐 유역을 대상지역으로 한 연구들을 분석해 보았다. 안재현 등(2001)은 대기순환모형(General Circulation Model, GCM)과 물수지 방정식을 이용하여 대청댐 유역의 유출량 변화를 분석하였다. 그 결과 강수량은 평균 6.8%, 기온은 평균 4.0°C 상승하였으며, 이에 따라 증발산량은 평균 14.7% 증가하고 토양함수비는 감소하였으며 대청댐 상류 유역의 유출량은 평균 3.4% (-29.2~40.7% 범위) 정도 증가할 것으로 예측하였다. 또한, 유출량의 계절적 변화로는 여름과 가을에 증가하고 겨울에는 감소가 뚜렷할 것으로 분석하였다. 김웅태 등(2004)은 대기 중의 CO₂ 농도가 2배 증가한 상태(배중 CO₂)의 GCM 모의결과를 Markov 연쇄 추계 모형에 적용하여 장래의 기온과 강수량을 모의발생 시킨 후, NWS-PC 모형을 이용하여 대청댐 상류 유역을 모의하였다. 그 결과 미래시점 유출의 변화에 있어서 봄·겨울에는 유출이 감소하고 여름철에는 시나리오에 따라 -14~8%의 변화를 보였다. 그러나 두 연구 모두 GCM 자료를 지역 상세화(Downscaling) 하지 않은 한계가 있었다. 이러한 한계를 극복하고자 김병식 등(2004)은 용담댐 유역을 대상으로 YONU (Yonsei University) GCM에 의해 작성된 기후변화 시나리오를 전이함수로 지역 상세화하여 SLURP 유출 모형에 적용하였다. 연구결과 배중 CO₂ 상황에서 연평균 유출량은 감소하였고, 계절별로는 겨울철과 가을철의 유출량은 증가하고 여름철은 감소하는 상반된 결과를 도출하였다. 그러나 위 연구는 통계적 방법의 지역상세화는 실시하였지만, 단순히 배중 CO₂ 상태의 분석을 실시하였고, IPCC에서 제시한 사회경제적 변화를 고려한 SRES(Special Report on Emissions Scenarios) 시나리오와는 차이가 있다. 이용준 등(2008)은 안성천 유역을 대상으로 CCCma (Canadian centre for climate modeling and analysis) GCM 자료를 Random cascade 모델을 이용하여 2 km 해상도로 지역상세화하여 SWAT 모형에 적용하였다. 본 연구는 토지이용도와 기후변화 시나리오를 이용하여 미래 수문 변화를 분석했다는 의의가 있다. 그러나 수문에 영향을 미치는 여러가지 기상요소 중 강우량과 기온만을 이용했으며, 미래 기상자료(강우, 기온)를 기상발생기가 아닌 통계학적인 지역상세화를 통하여 특정 강우를 사용했다는 한계가 있다. 이 밖에 SLURP모형을 이용하여 기후변화 시나리오에 따른 경안천 유역의 수문 순환 해석에 관한 연구가 있었다(안소라 등, 2008, 2009).

IPCC 보고서 “기후변화와 물(Bates et al., 2008)”에 의하면 전 세계적으로 기후변화가 토양 침식에 미치는 영향에 대한 연구는 아직 부족하다. 특히, 우리나라는 댐 저수지 탁수 장기화 문제가 가장 중요한 상수원 수질문제 중 하나임에도 불구하고, 기후변화가 유역의 토양침식량에 미치는 영향에 대한 과학적 평가와 적응 노력은 전무한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 대청댐 유역을 대상으로 기후변화 시나리오에 따른 유역의 유출량 및 토양 유실량 변화를 전망하고, 이것이 대청댐 저수지에서 탁수 발생 특성에 미치는 영향을 분석하고자 하였다. 이를 위해 선행연구(예령 등, 2009)에서 구축한 대청댐 유역의 SWAT 모델을 사용하였으며, 기후변화가 유역의 장기 유출량과 토양 유실량 변화에 미치는 영향을 모의하였다. 선행연구에서는 연구대상 유역에 대하여 SWAT 모델을 구축하고 장기간 검·보정을 수행한 후 기후인자의 민감도 평가를 실시하였으며, 본 연구에서는 신뢰성 있는 기후변화 시나리오를 사용하기 위하여 국립기상연구소(2005)에서 제공한 A1B 기후변화시나리오를 적용하여 미래 100년을 3개의 분석기간 2015s(2001~2030년), 2045s(2031~2060년), 2080s(2061~2100년)로 구분하여 기후변화에 따른 유역의 유출량과 토양 유실량을 모의하고 그 결과를 공간정보시스템으로 분석하였다. 연구결과는 대청댐 유역의 기후변화에 따른 저수지 상수원의 적응적 관리를 위한 기초 정보로서 활용 가치가 있으며, 타 댐 저수지 유역에도 동일한 연구방법의 적용이 가능하다고 사료된다.

2. 연구방법

2.1. 대상유역

대상유역은 금강 중상류에 위치한 대청댐 유역이며 상류에 위치한 용담댐 유역(930 km²)을 제외한 유역의 면적은 3,204.0 km²이다. 대청댐 상류 유역 내 토지이용현황 분석은 환경부 환경지리정보서비스(<http://egis.me.go.kr/egis/>)에서 제공하는 2001년 중분류 토지 이용도(1:25,000)를 사용하였으며 Fig. 1(a)와 같다. 금강 상류 6개 주요 지류 하천인 보청천, 봉황천, 초강천, 무주남대천, 소옥천, 영동천의 토지이용 비율은 Table 1과 같다. 6개 지류 모두 산림의 비율(72.4%)이 가장 컸으며, 다음으로 논(9.8%), 밭(10.3%) 순이었으며 도시 및 수계지역과 기타는 10% 미만이었다.

Fig. 1(b)는 기상연구소로부터 제공받은 27 km의 해상도를 가지고 있는 유역내의 기후변화 예측 격자점 위치를 나타낸 것이다. 기상연구소로부터 제공받은 총 격자점의 수는 위도방향 44개, 경도방향 36개로 총 1584로 구성되어 있었으며, 이 중 유역에 걸쳐 있는 8개의 격자점 정보를 사용하였다.

2.2. SWAT 모형

SWAT 모형은 미국 농무성 농업연구소(USDA Agricultural Research Service, ARS)에서 개발된 유역모델로서 일 단위의 모의가 가능한 유역단위의 준 분포형 강우-유출 모

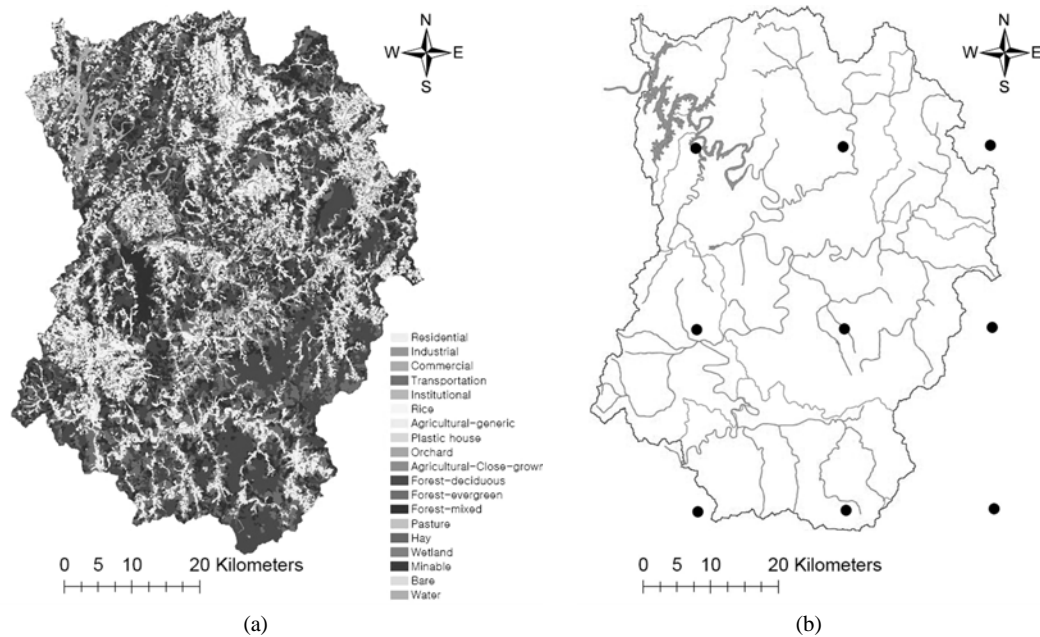


Fig. 1. Daecheong Reservoir watershed: land use (a) and RegCM Grid Spacing (b).

Table 1. Land use data of the major six sub-basins of the Daecheong Reservoir watershed

Land use type	Percentage of sub-basin area (%)					
	BOC*	BON*	CHO*	MUJ*	SOO*	YEO*
Industrial	5.61	3.73	2.46	2.84	6.51	5.36
Rice	15.7	14.79	10.62	4.89	11.63	3.79
Agricultural land	14.16	10.30	11.12	9.65	11.72	12.86
Forest-Mixed	16.95	20.78	18.07	15.67	26.85	21.08
Forest-Evergreen	25.51	25.58	20.98	30.40	19.99	20.09
Forest-Deciduous	20.17	22.51	34.69	34.77	20.10	35.44
Water	0.78	1.35	1.03	0.54	1.86	0.62
Others	1.02	0.97	1.04	1.21	1.31	0.75
Percent area (%)	7.67	17.16	5.99	20.50	13.92	4.47
Area (km ²)	247.34	553.19	193.19	661.00	448.72	144.15

*BOC : Bocheong stream, BON : Bonghwang stream, CHO : Chogang stream, MUJ : Mujunamdae stream, SOO : So-oak stream, YEO : Yeongdong stream

형으로 대규모 유역에서 장기간에 걸친 토지이용에 따른 물과 유사, 비료 및 농약 등 오염물질의 거동에 대한 해석과 토지관리 방법에 따른 영향을 예측하기 위해 개발되었다. SWAT모형은 1990년대 초에 개발되어 현재도 기능이 계속 확장 중인 모델로서 초기 버전인 AVSWAT96.2 버전에서는 기후변화에 따른 농업생산성을 평가하기 위해 CO2 항목이 추가되었으며, SWAT2000 버전에서는 기상발생기 기능이 추가되었다. 본 연구에 사용된 ArcSWAT2005는 기존의 ArcView 3.x 기반에서 확장(Extension)되어 구동되었던 AVSWAT에서 벗어나 GIS 최신버전인 ArcGIS 9.x에서 구동되어 좀 더 쉬운 사용자 인터페이스(User Interface)를 구현한다(Olivera et al., 2006).

SWAT모형에서 모의되는 수문순환은 식 (1)에 의한 물수지 방정식에 기초한다.

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - w_{seep} - Q_{gw}) \quad (1)$$

SW_t : 시간 t 경과 후 토양함수량 (mm)

SW_0 : 초기토양함수량 (mm)

t : 시간 (days)

R_{day} : 강수량 (mm)

Q_{surf} : 직접 지표 유출량 (mm)

E_a : 증발산량 (mm)

w_{seep} : 침투량 (mm)

Q_{gw} : 지하수 회귀수량 (mm)

SWAT모형에서 모의되는 강우 사상별 토양 침식량을 산정하는 MUSLE 모형은 식 (2)와 같다(Williams, 1995).

$$Y = 11.8 \times (Q_{surf} \times q_{peak} \times A_{hru})^{0.56} \times K_{USLE} \times C_{USLE} \times P_{USLE} \times LS_{USLE} \times CFRG \quad (2)$$

Y : 유사량 (metric tons)

- $11.8 \times (Q_{surf} \times q_{peak} \times area_{hru})^{0.56}$: 유출에너지 인자
- Q_{surf} : 지표유출량 (m^3/ha)
- q_{peak} : 첨두유출량 (m^3/sec)
- A_{hru} : 수문응답단위(HRU)의 면적(ha)
- K_{USLE} : 토양침식인자
- C_{USLE} : 작물관리인자
- P_{USLE} : 토양보전인자
- LS_{USLE} : 경사길이와 경사도인자
- $CFRG$: 토양입자의 형상계수

2.3. 기상발생기(weather generator) 및 기후분석

미래의 기후를 예측하기 위하여 SWAT 모형에 탑재된 WXGEN 기상발생기 모형(Sharpley and Williams, 1990)을 이용하여 일 자료를 생성하였다. 기상발생기는 10년 이상의 통계화된 기상자료를 요구하며, 본 연구에서는 미래 기후에 대한 기상자료 생성을 위하여 기상청(www.kma.go.kr)이 제공하는 30년간 기후(1971~2000년)의 월별 평균값을 기상발생기 변수로 입력하였다.

WXGEN 기상발생기는 일 강우와 풍속은 독립적으로 생성하며, 최대기온, 최소기온, 일사량, 상대습도는 생성된 일 강우량의 생성 유무에 기초하여 발생한다. 일 강우의 발생은 Markov chain-skewed 모형(Nick, 1974) 또는 Markov chain-exponential 모형을 사용한다. 1차 Markov chain을 사용하여 강수일(wet day)과 무강수일(dry day)을 정의하며, 강수량의 경우 왜분포(skewed distribution) 또는 지수분포(exponential distribution)를 사용하여 강우를 발생시킨다. 본 연구는 왜분포법을 이용하였다. 일 최고기온, 일 최저기온, 일 일사량은 Matalas(1967)가 제안한 weakly stationary generating 방법을 기초로 만들어진다(Richardson, 1981; Richardson and Wright, 1984). 일 평균 상대습도는 월평균 상대습도와 삼각분포(triangular distribution)를 사용하여 발생하며, 일평균 풍속은 수정 지수 방정식(modified exponential equation)을 사용하여 발생시켰다.

기상 자료는 대청댐 유역내에 상류유역에 위치한 대전, 보은, 금산, 추풍령 4곳의 1973~2006년 기상자료(최대·최소 기온, 풍속, 상대습도)를 사용하였다. Fig. 2는 이 중 보은 지점을 대표지역으로 하여 최대·최소 기온과 강우자료를 나타내었다.

2.4. A1B 기후변화 시나리오

신뢰성 있는 미래 기후전망을 위해서는 지구시스템의 주요성분들을 모두 포함하고 현실적인 상호작용이 고려되는 포괄적인 수치기상모델과 보다 정확한 CO₂, CH₄, N₂O, SO₂ 등 여러 온실가스들의 미래 방출량 추정이 요구된다(국립기상연구소, 2006). 그러나 미래 기후를 예측하기 위해 온실가스 배출요소들을 모두 고려하는 것은 불가능하다. IPCC는 인구변화 추이, 경제와 사회의 발전방향, 에너지 이용, 기술의 발달 및 토지이용 변화를 고려하여 “배출시나리오에 관한 특별보고서(Special Report on Emission Scenario, SRES)”를 발간한 바 있다.

SRES 시나리오는 크게 4개 그룹(A1, A2, B1, B2)으로 배출시나리오를 제시한다. A와 B는 경제성장(Economic) 지향(A)인가, 환경보존(Environmental)지향(B)인가를, 1과 2는 지구주의(Global) 지향(1)인가, 지역주의(Regional) 지향(2)인가를 나타낸다. A1 시나리오의 C, G, B, T는 각각 석탄 주도형, 가스 주도형, 뿔런스형, 고효율 에너지 기술 주도형을 뜻한다. A1 시나리오는 세계가 매우 빠른 경제성장, 전세계 인구는 이번 세기 중반까지 증가 후 감소 추세, 새롭고 효과적인 기술의 빠른 개발로 표현된다. 반면 A2 시나리오는 지속적인 인구증가와 지역적으로 편중된 경제성장 및 기술의 변화가 점진적으로 표현된다. B1은 A1과 같은 인구 변화 추이를 보이며 서비스와 정보산업에 대한 빠른 경제구조의 변화, 효율적인 자원이용과 청정 기술의 도입을 가정하고 있다. B2는 A2보다 낮은 비율의 세계인구 증가, 중간정도의 경제성장, A1과 B1보다 상대적으로 느리지만 더 다양한 기술의 변화를 가정하고 있다(IPCC, 2001). 본 연구에서는 A1B 시나리오(경제성장 지향, 지구주의

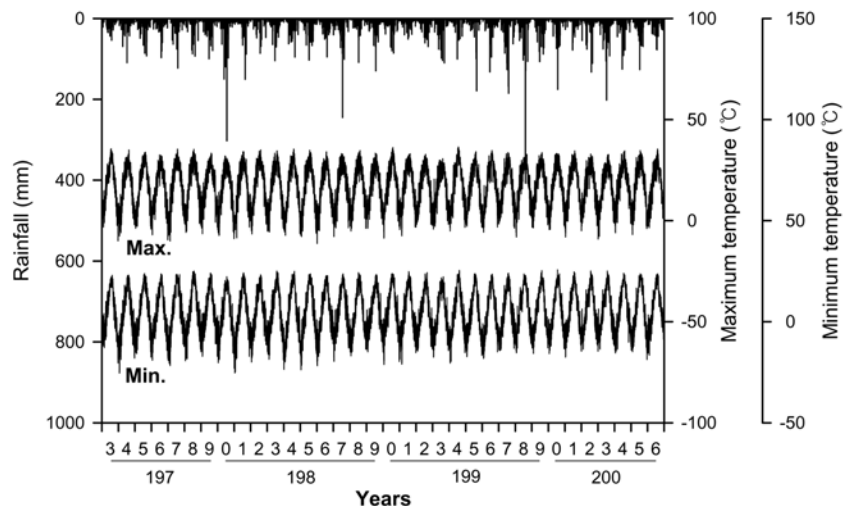


Fig. 2. Observed rainfall, maximum and minimum daily temperature over the 34 years period at the Boeun station.

지향, 밸런스 형 에너지 정책)를 선정하였으며, 기후변화 시나리오의 신뢰성을 위하여 국립기상연구소 기후연구팀에서 “기후변화협약대응 지역기후시나리오 활용기술개발”(2005~2007)의 일환으로 생산한 예측자료를 사용하였다. A1B 시나리오는 현재 이산화탄소의 배출량이 점차 증가하여 2050년경 정점에 도달한 다음 그 이후 다소 감소하는 시나리오로 대기 중 이산화탄소 농도는 2100년경 720 ppm 까지 도달할 것으로 예상되는 시나리오로써, 화석 에너지 및 고효율 에너지원이 균형 있게 사용된다고 가정하며 현실에 가장 잘 부합되는 시나리오이다(권영아 등, 2007).

기상연구소에서 사용한 기후모델인 ECHO-G는 대기모델인 ECHAM4(Roeckner et al., 1996)와 해양모델인 HOPE-G(Legutke and Maire-Reimer, 1999)로 구성된 모델이다. ECHO-G에서 생산된 자료는 약 400 km의 해상도를 가지고 있기 때문에 우리나라와 같이 복잡한 지형에 대해서 적용하는 것은 한계가 있다. 따라서 전 지구 기후변화 시나리오를 우리나라에 활용하기 위해서는 우리나라의 지형특성이 반영된 수십 km 규모의 고해상도의 자료 생산이 필요하다. 이를 위하여 지역기후모델인 MM5(Mesoscale Model Version 5)를 적용하여 역학적 상세화 기법(Down-scaling method)을 통하여 A1B 시나리오에 대한 한반도 기후변화 시나리오를 생산하였다(국립기상연구소, 2007). 격자점은 27 km의 해상도를 가지고 있으며, 본 연구에서는 8개의 격자점(Fig. 1(b))에 대한 2001~2100년까지 월별 기온(°C), 강수(%), 상대습도(%) 편차 자료를 사용하였다.

A1B 시나리오에서 온실가스의 증가에 따른 변화를 보면 21세기말의 동아시아는 과거 30년 평균에 대해 기온은 4.06°C, 강수량은 5.14% 증가하였다(국립기상연구소, 2005). A1B의 변수들을 보면 격자점 8곳을 미래 100년을 3개의 분석기간 2015s(2001~2030년), 2045s(2031~2060년), 2080s

(2061~2100년)로 구분하여 변화량을 나타내었다. 기온의 경우 2015s(0.9°C), 2045s(1.7°C), 2080s(3.9°C)로 미래로 갈수록 더 증가하였으며, 8월, 9월, 12월의 기온 상승이 크고, 1월, 2월, 3월의 상승폭이 작았다(Table 2). 강우도 2015s(0.9%), 2045s(4.3%), 2080s(15.8%)로 미래로 갈수록 증가폭이 증가하여 기온과 비슷한 경향을 보였다. 계절별로 보면 늦여름철(8월)의 경우 강수량은 감소하는 것으로, 가을철(9월, 10월) 강수량은 증가하는 것으로 나타났다. Table 3은 강우 변수의 범위를 보여주고 있으며, 변동폭이 매우 큰 것을 볼 수 있다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 지역별 증발산량 변화

기상청의 A1B 시나리오에 따른 대청명 유역의 공간별 계절별 실제 증발산량에 대한 모의 결과는 Fig. 3과 같다. 세로축은 각각 2015s, 2045s, 2080s를 나타내며, 가로축은 각각 봄, 여름, 가을, 겨울을 나타낸다. 증발산량의 계절별 범위를 보면, 봄 17~66 mm, 여름 42~116 mm, 가을 13~55 mm, 겨울 12~26 mm로써 기온이 가장 높은 여름의 증발산이 가장 크고 봄·가을, 겨울 순이었으며, 동일 계절에 대해서도 연간 변동 폭이 크게 나타났다.

지역별로 보면 보청천 유역의 증발산량이 상대적으로 작았으며, 초강, 영동천 유역의 증발산량이 컸다. 이것은 보청천 유역에서 산림의 점유율은 62.6%인 반면, 영동천과 초강 유역의 산림 평균 점유율은 75.2%로써 약 15%의 차이가 있기 때문으로 보인다. 장기 전망을 보면, 봄, 여름, 가을에는 미래로 갈수록 증발산량이 증가하는 경향을 보였으나, 겨울철에는 2045s에 증가하였다가 2080s에는 감소하였으며 지역적 편차도 줄었다.

Table 2. Projected changes of monthly climate parameters in A1B SRES scenarios

Scenario	Climate parameter	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	
A1B	CO ₂ (ppm)	720	720	720	720	720	720	720	720	720	720	720	720	
	Precipitation (%)	2015s	-25.1	38.8	-1.3	-4.7	-21.3	-11.2	4.7	-24.3	30.6	14.2	-12.1	22.2
		2045s	-36.1	-12.4	28.6	2.1	-15.2	0.1	14.4	-4.9	34.3	36.6	-18.1	21.7
		2080s	16.0	42.4	22.5	6.4	-5.2	12.2	-7.7	-4.9	77.0	18.6	-1.1	13.4
	Temperature (°C)	2015s	0.6	0.6	0.4	0.9	0.6	1.0	0.7	0.8	1.1	1.1	1.0	1.6
		2045s	1.1	0.6	1.5	1.7	1.5	1.7	1.8	2.2	2.2	1.9	1.8	2.3
		2080s	4.0	4.2	3.4	3.4	3.0	3.7	3.6	4.5	4.8	3.9	4.1	4.6
	Humidity (%)	2015s	0.7	-0.8	1.4	1.3	0.9	0.8	0.7	-0.3	1.5	1.3	1.3	2.1
		2045s	0.1	-0.8	2.7	2.2	2.0	1.8	1.0	-0.4	1.0	2.2	1.3	1.3
		2080s	2.8	1.9	3.1	3.5	2.8	2.2	0.6	-0.1	3.3	2.3	3.5	3.3

Table 3. Projected changes of monthly precipitation range in A1B SRES scenarios

Scenario	Climate parameter	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	
A1B	Precipitation (%)	2015s	118~ -88	317~ -75	166~ -71	190~ -87	50~ -82	91~ -70	320~ -86	107~ -86	353~ -96	181~ -86	120~ -93	154~ -79
		2045s	147~ -99	206~ -85	316~ -57	175~ -73	80~ -66	154~ -99	364~ -88	513~ -94	264~ -88	299~ -89	115~ -83	221~ -95
		2080s	327~ -91	318~ -81	188~ -88	162~ -88	97~ -73	183~ -95	308~ -95	637~ -86	637~ -86	227~ -89	194~ -86	259~ -93

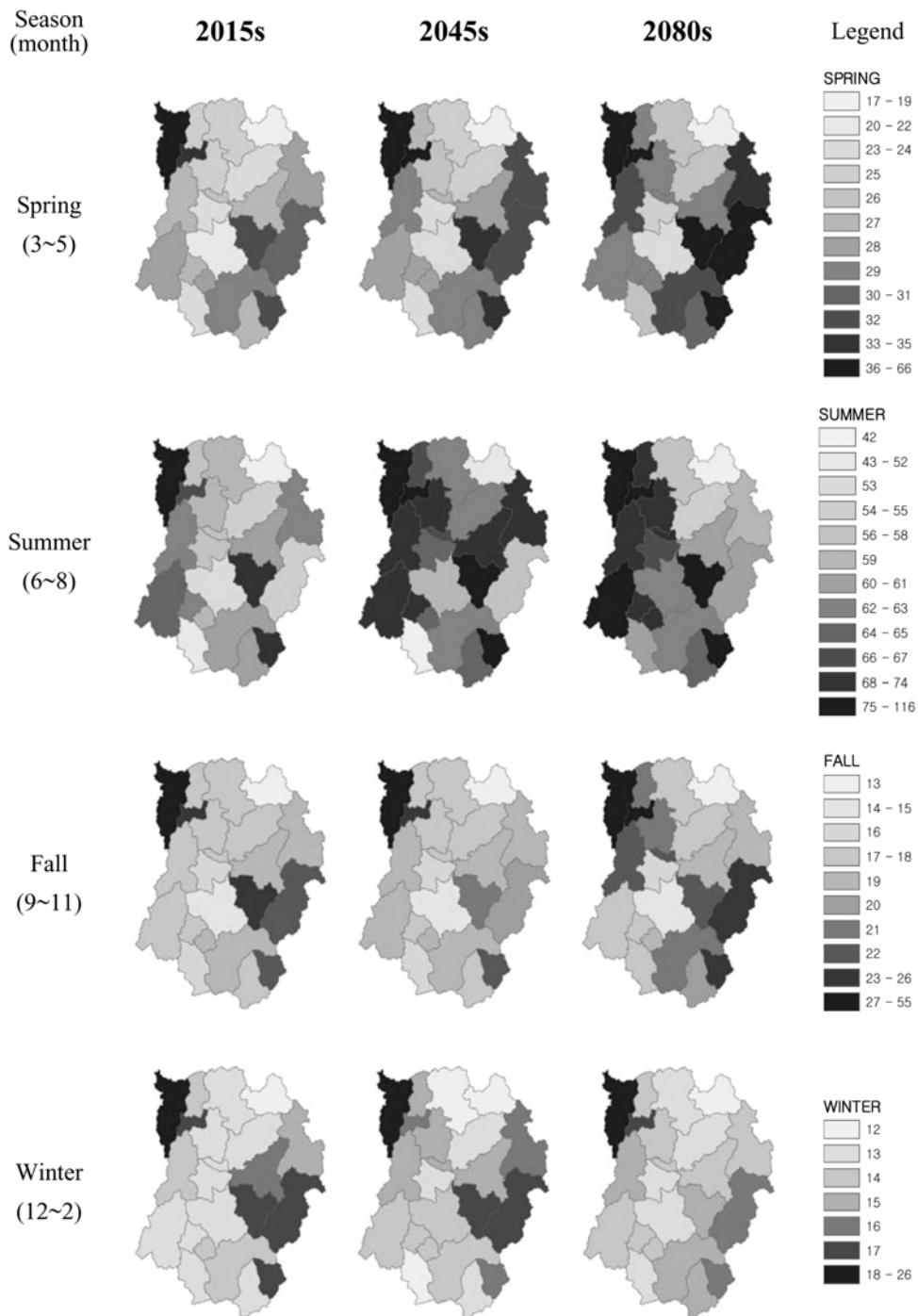


Fig. 3. Spatial distribution of evapotranspiration (mm) in the Daecheong Reservoir watershed for different season and time period.

3.2. 지역별 유출량 변화

기상청의 A1B 시나리오에 따른 대청댐 유역의 공간별 계절별 유출량에 대한 모의 결과는 Fig. 4와 같다. 지역별로 보면 상대적으로 증발산이 작았던 보청천의 유출량은 컸으며, 증발산이 컸던 영동천, 초강 유역은 유출량이 작았다.

유출량의 계절별 범위를 보면, 봄 31~56 mm, 여름 122~258 mm, 가을 66~107 mm, 겨울 13~37 mm로써 여름에 가장 큰 값을 보이며 가을·봄, 겨울 순이었으며, 동일 계절에 대해서도 연간 변동 폭이 크게 나타났다.

대청댐 유역 유출량의 장기 전망을 보면, 여름을 제외한 봄, 가을, 겨울에는 미래로 갈수록 유출량 (또는 변동)이 증가하는 경향을 보였으며, 여름철에는 2015s에 최고로 증가하였다가 2045s에는 감소한 후 다시 2080s에 증가하였다. 시기별로 보면 2080s인 미래로 갈수록 유출량 변화는 커지며, 그 양은 증가하였으며, 지역별 편차도 커졌다.

3.3. 지역별 토양유실량 변화

기상청의 A1B 시나리오에 따른 대청댐 유역의 공간별

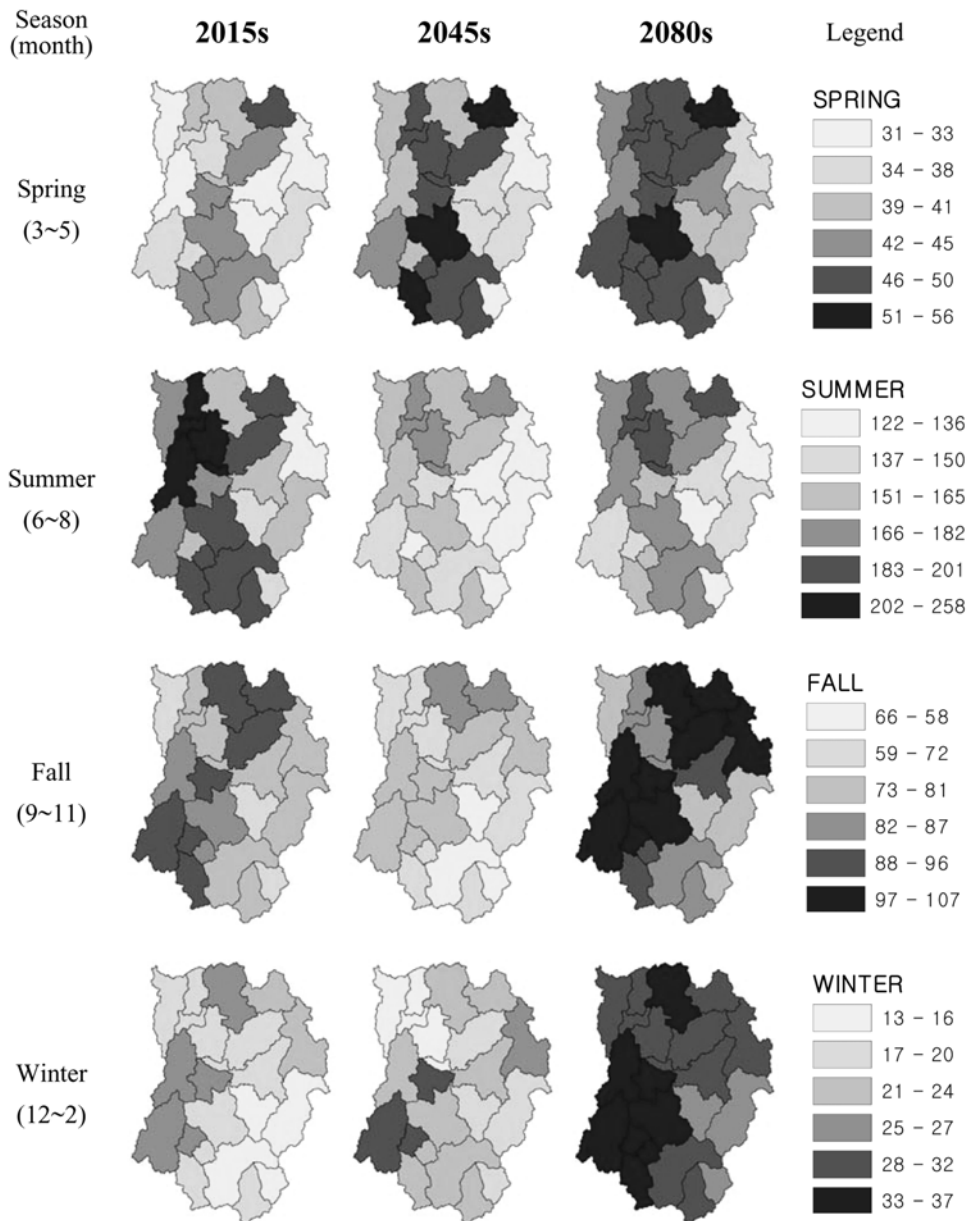


Fig. 4. Spatial distribution of surface runoffs (mm) in the Daechong Reservoir watershed for different season and time period.

계절별 토양유실량에 대한 모의 결과는 Fig. 5와 같다. 지역별 토양유실량은 유출량이 많았던 보청천 유역이 컸으며, 유출량이 작았던 영동천, 초강 유역은 상대적으로 적은 토양유실량을 보였다. 봉황천의 토양유실량은 봄철의 경우 미래로 갈수록 커졌으며, 여름철의 경우는 작아졌다. 시기별로 보면 미래로 갈수록 토양유실량은 더 많아졌으며, 지역별 편차는 더 증가하였다. 기상청에서 연구한 기후변화 시나리오에 따른다면 미래에 대한 유출과 유사량은 모두 커질 것으로 예상된다. 유역을 기준으로 살펴보면 보청천과 초강 하류의 유출 변화량이 크게 나타났다.

3.4. 기후변화가 물순환 및 토양유실량에 미치는 영향

기상청의 A1B 시나리오에 따른 대청댐 유역의 모의기간별 미래 수문성분 분석결과와 토양유실량 변화를 소유역별

면적가중평균법으로 계산한 후 과거 30년(1971~2000년)의 분석결과와 비교하여 Table 4에 나타내었다. 강수량은 2045s까지 증가하는 경향을 보이다 2080s에서는 2045s와 유사하게 나타났다. 강수량의 변화에 따라 유출량 또한 2045s까지 큰 폭으로 증가하다 2080s에서는 증가폭이 둔화되었으며, 유출률은 2080s까지 지속적으로 증가하는 것으로 나타났다. 증발산의 경우 2045s에 증가하였다가 2080s에 감소하였으며, 토양수분량은 큰 변동을 보이지 않았다.

기후변화에 따른 유역의 증발산량 변동을 보면, 기온의 상승에도 불구하고 오히려 과거 30년보다 감소하는 경향을 보이고 있다. 이는 유역의 대부분을 차지하는 임야로부터 발생하는 식물의 증산량이 기온뿐만 아니라 대기 중 CO₂ 농도, 엽면적 지수 등 다양한 인자에 영향을 받기 때문으로 유추된다. CO₂ 농도는 식물생장에 영향을 주며, CO₂ 농도가

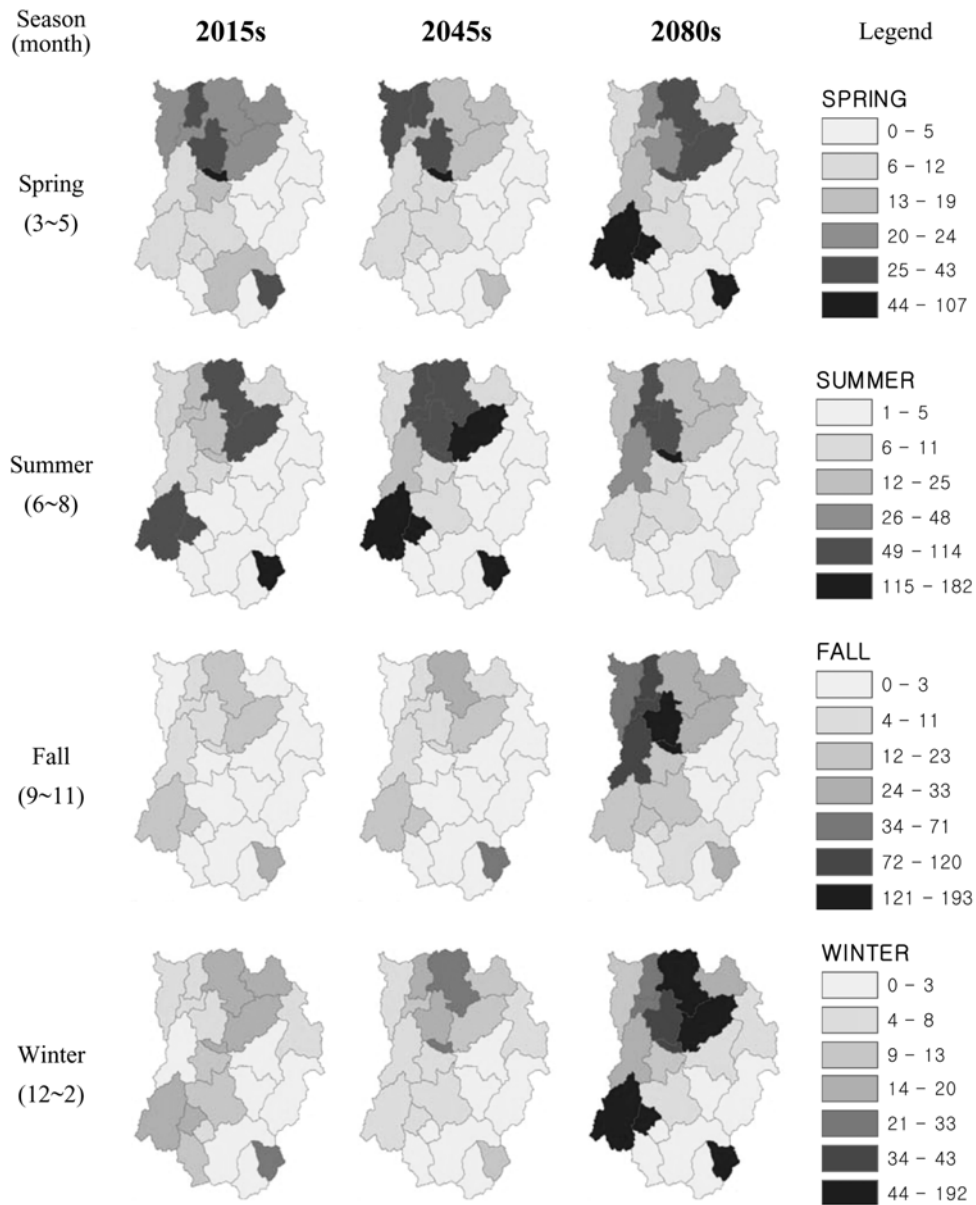


Fig. 5. Spatial distribution of soil losses (t/ha) in the Daecheong Reservoir watershed for different season and time period.

Table 4. Impact of climate change on the hydrological characteristics and soil loss in Daecheong Reservoir watershed

Variable	1971~2000	2015s (2001~2030)	2045s (2031~2060)	2080s (2061~2100)
Precipitation (mm/yr)	1194.1 (714.6~1931.9)	1219.4 (848.5~1784.6)	1391.9 (1024.1~1980.7)	1390.4 (1056.8~2076.6)
Evapotranspiration (mm/yr)	435.6 (395.6~491.6)	374.8 (277.2~414.7)	403.4 (380.6~424.7)	384.1 (355.8~412.1)
Soil water content (mm/yr)	128.8 (119.1~141.5)	133.3 (130.4~150.1)	132.2 (131.2~147.6)	134.9 (130.6~141.6)
Water yield (mm/yr)	717.3 (346.8~1385.6)	837.6 (545.4~1468.8)	979.5 (615.2~1538.8)	997.3 (661.8~1652.4)
Soil loss (t/ha/yr)	2.1 (0.3~5.4)	2.0 (0.7~7.0)	2.2 (0.8~4.2)	2.9 (0.9~7.2)
Water yield / Precipitation (%)	0.60	0.69	0.70	0.72
Evapotranspiration / Precipitation (%)	0.36	0.31	0.29	0.28
Q>1,000 m ³ /s frequency/yr	124	120	129	141

증가할수록 식물생산성(plant productivity)은 증가하고, 식물이 필요로 하는 물은 감소한다. Morison and Gifford (1983)는 CO₂의 농도가 330 ppmv에서 660 ppmv로 증가하면, 그 결과 식물 엽면의 기공전도도(leaf conductance)는 40% 정도 감소하며, 이 범위 안에서 기공전도도는 선형 감소한다고 하였다. Easterling 등(1992)은 CO₂ 농도가 증발산에 미치는 영향을 식 (3)과 같이 제안하였다.

$$g_{i,CO_2} = g_i \left[1.4 - 0.4 \left(\frac{CO_2}{330} \right) \right] \quad (3)$$

- g_{i,CO_2} : CO₂ 농도를 고려하여 수정된 엽면 기공전도도(m/s)
- g_i : 최대 유효 엽면 기공전도도 (m/s)
- CO₂ : 대기중 CO₂ 농도 (ppmv)

따라서 미래 CO₂ 농도 증가는 식물의 기공전도도를 감소시키고, 식물 엽면의 단위면적당 증산량을 감소시키게 된다. 본 연구에서 사용한 Penman-Monteith 공식의 식생피복저항(r_c)은 이산화탄소의 농도에 의해 변하는데, 식생피복저항(r_c) 항은 식 (4)와 같이 산정된다. 따라서 이산화탄소의 농도가 증가하면 r_c 가 증가하며 PET는 감소한다. 그러나 식물의 기공전도도는 수목의 종류에 따라 다르기 때문에, 수목별 차이를 고려하지 않을 경우 기공전도도의 감소 영향이 크게 모의되어 증산량이 과소모의 될 우려가 있다 (Echhart and Ulbrich, 2003). 따라서 기후변화에 따른 유역의 증발산량 변화를 보다 정확히 예측하기 위해서는 CO₂ 농도의 증가에 따른 식물의 기공전도도 변화를 수목별로 구분하여 모의하도록 SWAT 모델을 수정할 필요가 있다.

$$r_c = r_l \left[(0.5LAI) \left(1.4 - 0.4 \frac{CO_2}{330} \right) \right]^{-1} \quad (4)$$

- LAI : 식물의 엽면적 계수
- r_l : 최소 유효 식생피복 저항 (m/s)

토양유실량은 비록 소유역별로 큰 편차를 보이고 있으나 대청댐 전체 유역에서 지속적으로 증가하는 것으로 나타났다. 특히, 대청댐 저수지에 유입한 탁수층이 댐축까지 도달할 수 있는 홍수규모인 유입량 1,000 m³/s 이상인 홍수의 발생빈도가 점진적으로 증가하여 2080s에는 141회까지 예상되어 탁수 발생빈도는 증가할 것으로 예상된다.

Fig. 6은 기상청의 A1B 시나리오에 따른 월별 유출량, 증발산량, 토양유실을 3기간으로 나누어 나타내었다. 계절별로 살펴보면 여름철은 6월부터 9월의 유출이 증가하였으며, 2080s에는 전 기간에 걸쳐 토양유실량이 커져 미래로 갈수록 유역의 유출량과 토양 유실량이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 미래 시기별 증발산량의 변화는 대체로 유출량과 토양유실량 증가폭보다 작게 나타났다. 가을철로 접어드는 9월에 유출량과 토양유실량이 증가하는 것은 수자원관리를 위한 적응적 측면에서 유의할 필요가 있다. 왜

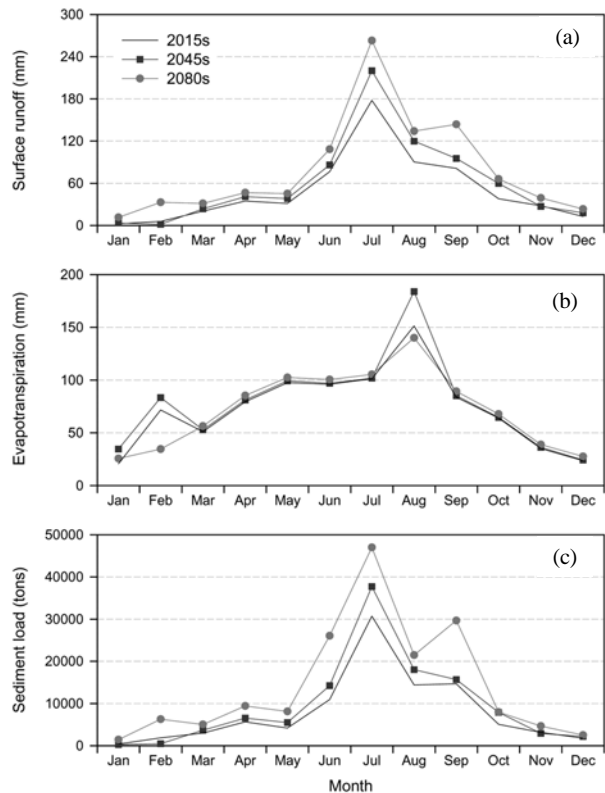


Fig. 6. Predicted monthly averaged (a) surface runoff (b) evapotranspiration (c) sediment load by climate change during 2001~2100.

나하면 9월에 댐 저수지 운영은 홍수조절과 수자원 확보를 동시에 달성해야 하는 어려움이 있으며, 큰 규모의 탁수가 유입할 경우 겨울철 수직혼합에 의한 전도현상 때문에 미처 가라앉지 못한 부유물질들이 다시 부상하여 탁수를 장기화시키는 요인이 될 수 있기 때문이다. 이러한 결과는 기후변화가 대청댐 유역의 농업생산능력을 저하시키고, 저수지 탁수 장기화와 비점오염 부하량 증가에 따른 수질문제를 가중할 수 있는 것으로 해석되며, 보다 적극적인 유역관리 정책이 필요함을 시사한다.

4. 결론

본 연구에서는 대청댐 유역을 대상으로 선행 연구에서 구축한 SWAT 모델과 국립기상연구소에서 제공한 A1B 기후변화시나리오를 사용하여 미래 100년을 3개의 분석기간 2015s(2001~2030년), 2045s(2031~2060년), 2080s(2061~2100년)으로 구분하여 기후변화에 따른 유역의 유출량과 토양 유실량을 예측하고 그 결과를 공간정보시스템으로 분석하였다. 본 연구를 통해 도출한 주요 결론은 다음과 같다.

- 1) 장래 기후변화(A1B시나리오)에 따라 대청댐 유역으로 유입하는 유출량과 유사량은 미래로 갈수록 증가하였으며, 공간적으로는 산림의 면적이 타 소유역에 비해 상대적으로 적은 보청천 유역이 가장 큰 영향을 받는 것으로 나타났다.

- 2) 계절별로는 여름과 가을철에 유출량과 유사량의 증가가 상대적으로 크게 예측되었으며, 이러한 결과는 중부권의 중요한 상수원인 대청댐 저수지의 적응적 관리의 필요성을 시사한다. 왜냐하면 이 기간 동안 댐 저수지 운영은 홍수조절뿐만 아니라 용수공급을 위한 수자원 확보를 동시에 달성해야 하는 어려움이 있으며, 큰 규모의 탁수가 유입할 경우 겨울철 전도현상 때문에 부유물질들이 재부상하여 탁수를 장기화시키는 요인이 될 수 있기 때문이다.
- 3) 전 지구적 기후변화는 대청댐 유역의 토양 유실량 증가로 인한 농업생산능력 저하, 저수지 탁수 장기화 문제의 가중, 비점오염 부하량 증가에 따른 수질문제 등을 야기할 수 있는 것으로 예측되므로 적응적 수자원관리를 위해 보다 적극적인 유역관리 정책이 필요한 것으로 판단된다.
- 4) 기후변화는 유역에 서식하는 식생과 토지이용 형태에도 변화를 가져올 수 있으나, 본 연구에서는 이러한 변화를 반영하지 못한 한계점이 있으므로 향후 이에 대한 추가 연구가 필요할 것이다. 또한 기후변화에 의한 유역의 오염부하 특성 변동과 저수지 수질 및 수생태계변화에 미치는 영향 연구도 필요하다.

사 사

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비 지원(과제번호 : 1-6-3)에 의해 수행되었습니다. 기후시나리오를 제공한 국립기상연구소 기후연구팀 여러분에게 감사드립니다.

참고문헌

- 국립기상연구소(2005). 기후변화협약대응 지역기후시나리오 활용기술 개발(I).
- 국립기상연구소(2006). 기후변화협약대응 지역기후시나리오 활용기술 개발(II).
- 국립기상연구소(2007). 기후변화협약대응 지역기후시나리오 활용기술 개발(III).
- 권영아, 권원태, 부경은, 최영은(2007). A1B 시나리오 자료를 이용한 우리나라 아열대 기후구 전망. *대한지리학회지*, **42**(3), pp. 355-367.
- 기상청(2009). <http://www.kma.go.kr/>.
- 김병식, 김형수, 서병하, 김남원(2004). 기후변화가 용담댐 유역의 유출에 미치는 영향. *한국수자원학회논문집*, **37**(2), pp. 185-193.
- 김영오(1998). 기후변화를 고려한 수자원 관리 기법. *한국수자원학회논문집*, **31**(4), pp. 407-413.
- 김용태, 이동률, 유철상(2004). 기후변화에 따른 대청댐 유역의 유출 영향 분석. *한국수자원학회논문집*, **37**(4), pp. 305-314.
- 배덕효, 정일원, 권원태(2007a). 수자원에 대한 기후변화 영향평가를 위한 고해상도 시나리오 생산(I). *한국수자원학회논문집*, **40**(3), pp. 191-204.

- 배덕효, 정일원, 권원태(2007b). 수자원에 대한 기후변화 영향평가를 위한 고해상도 시나리오 생산(II). *한국수자원학회논문집*, **40**(3), pp. 205-214.
- 배덕효, 정일원, 이병주(2007c). A2 시나리오에 따른 국내 수자원의 변동성 전망. *한국수자원학회논문집*, **40**(12), pp. 921-930.
- 신사철(2000). 기후변화 시나리오에 의한 하천 유황의 해석. *한국수자원학회논문집*, **33**(5), pp. 623-634.
- 안소라, 이용준, 박근애, 김성준(2008). 미래토지이용 및 기후변화에 따른 하천유역의 유출특성 분석. *대한토목학회논문집*, **28**(2B), pp. 215-224.
- 안소라, 박민지, 박근애, 김성준(2009). 기후변화가 경안천 유역의 수문요소 에 미치는 영향 평가. *한국수자원학회논문집*, **42**(1), pp. 33-50.
- 안재현, 유철상, 윤용남(2001). GCM 결과를 이용한 지구온난화에 따른 대청댐 유역의 수문환경 변화 분석. *한국수자원학회논문집*, **34**(4), pp. 335-345.
- 예령, 정세웅, 이흥수, 윤성완, 정희영(2009). SWAT 모형을 이용한 대청댐 유역의 기후인자에 따른 유출 및 유사량 민감도 평가. *수질보전 한국물환경학회지*, **25**(1), pp. 7-17.
- 윤용남, 유철상, 이재수, 안재현(1999). 지구온난화에 따른 홍수 및 가뭄 발생빈도의 변화와 관련하여: 2. 지구온난화에 따른 일강우량 분포의 변화 추정. *한국수자원학회논문집*, **32**(6), pp. 627-636.
- 이용준, 안소라, 강부식, 김성준(2008). SWAT 모형을 이용한 미래 기후변화 및 토지이용 변화에 따른 안성천 유역 수문-수질 변화 분석(II). *대한토목학회논문집*, **28**(6B), pp. 665-673.
- 황준식, 정대일, 이재경, 김영오(2007). 기후변화 영향평가를 위한 월 물수지모형의 적용성 검토. *한국수자원학회논문집*, **40**(2), pp. 147-158.
- Adams, R. M., Rosenzweig, C., Peart, R. M., Ritchie, J. T., McCarl, B. A., Gler, J. D., Curry, R. B., Jones, J. W., Boote, K. J., and Allen, Jr., L. H. (1990). Global climate change and US agriculture. *Nature*, **345**(6272), pp. 219-224.
- Bates, B. C., Kundzewicz, Z. W., Wu, S., and Palutikof, J. P. (eds.) (2008). Climate Change and Water. Technical Paper of the Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC Secretariat, Geneva, pp. 210.
- Bourouai, F., Galbiati, L., and Bidoglio, G. (2002). Climate change impacts on nutrient loads in the Yorkshire Ouse catchment (UK). *Hydrology and Earth System Sciences*, **6**(2), pp. 197-209.
- Christensen, N. S., Wood, A. W., Voisin, N., Lettenmaier, D. P., and Palmer, R. N. (2004). The effects of climate change on the hydrology and water resources of the colorado river basin. *Climate Change*, **62**(1-3), pp. 337-3634.
- Easterling, W. E., Rosenburg, N. J., McKenney, M. S., Jones, C. A., Dyke, P. T., and Williams, J. R. (1992). Preparing the Erosion productivity impact calculator (EPIC) model to simulate crop response to climate change and the direct effect of CO₂. *Agricultural and Forest Meteorology*, **59**, pp. 17-34.
- Echhardt, K. and Ulbrich, U. (2003). Potential impacts of climate change on groundwater recharge and streamflow in a central European low mountain range. *Journal of Hydrology*, **284**, pp. 24-252.
- Fries-christensen, E. and Lassen, K. (1991). Length of the

- solar cycle: An indicator solar activity closely associated with climate. *Science*, **254**, pp. 698-700.
- Gyalistras, D., Storch, H. V., and Beniston, M. (1994). Linking GCM simulated climatic changes to ecosystem models: Case studies of statistical downscaling in the Alps. *Climate Research*, **4**(3), pp. 167-191.
- Hanratty, M. P. and Stefan, H. G. (1998). Simulating climate change effects in a Minnesota agricultural watershed. *Journal of Environmental Quality*, **27**(6), pp. 1524-1532.
- Imbrie, J. and Imbrie, J. Z. (1980). Modeling the climatic response to orbital variations. *Science*, **207**, pp. 943-953.
- IPCC (2001). *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.
- IPCC (2007). *Climate change 2007 : The Scientific Basis, IPCC Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Judith, L., Juerg, B., and Raymond, B. (1995). Reconstruction of solar irradiance since 1610: Implications for climate change. *Geophysical Research Letters*, **22**(23), pp. 3195-3196.
- Kirchner, I., Stenchikov, G. L., Graf, H. F., Robock, A., and Antuna, J. C. (1999). Climate model simulation of winter warming and summer cooling following the 1991 Mount Pinatubo volcanic eruption. *Journal of Geophysical Research*, **104**(16), pp. 19039-19055.
- Krysanova, V., Hatterman, F., and Wechsung, F. (2005). Development of the ecohydrological model SWIM for regional impact studies and vulnerability assessment. *Hydrological Processes*, **19**(3), pp. 763-783.
- Legutke, S. and Maire-Reimer, E. (1999). *Climatology of the HOPE-G Global Ocean General Circulation Model*. Technical report No. 21, German Climate Computer Centre (DKRZ), Hamburg, Germany, pp. 90.
- Lettenmaier, D. P. and Gan, T. Y. (1990). Hydrologic sensitivities of the Sacramento-San Joaquin river basin, California, to global warming. *Water Resources Research*, **26**(1), pp. 69-86.
- Matalas, N. C. (1967). Mathematical assessment of synthetic hydrology. *Water Resource Research*, **3**(4), pp. 937-945.
- Morison, J. I. L. and Gifford, R. M. (1983). Stomatal sensitivity to carbon dioxide and humidity. *Plant Physiology*, **71**(4), pp. 789-796.
- Muzik, I. (2001). Sensitivity of hydrologic system to climate change. *Canadian Water Resources Journal*, **26**(2), pp. 233-253.
- Nick, A. D. (1974). Stochastic generation of the occurrence, pattern, and location of maximum amount of daily rainfall. In *Proc. Symp. Statistical Hydrology*, pp. 154-171.
- Olivera, F., Valenzuela, M., Srinivasan, R., Choi, J., Cho, H., Koka, S., and Agrawal, A. (2006). ArcGIS-SWAT: A Geodata Model and GIS Interface for SWAT, *Journal of the American Water Resources Association*, **42**(2), pp. 295-309.
- Petit, J. R., Basile, I., Leruyet, A., Raynaud, D., Lorius, C., Jouzel, J., Stievenard, M., Lipenkou, V. Y., Barkov, N. I., Kudryachow, B. B., Davis, M., Saltman, E., and Kotlyakov, V. (1997). Four climate cycles in the Vostok ice core. *Nature*, **399**, pp. 429-436.
- Richardson, C. W. (1981). Stochastic simulation of daily precipitation, temperature, and solar radiation. *Water Resource Research*, **17**(1), pp. 182-190.
- Richardson, C. W. and Wright, D. A. (1984). *WGEN: A Model for Generating Daily Weather Variables*. U. S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service.
- Risbey, J. S. and Entekhabi, D. (1996). Observed Sacramento Basin streamflow response to precipitation and temperature changes and its relevance to climate impact studies. *Journal of Hydrology*, **184**, pp. 209-223.
- Roeckner, E., Arpe, K., Bengtsson, L., Christoph, M., Claussen, M., Dumenil, L., Esch, M., Girogetta, M., Schlese, U., and Schulzweide, U. (1996). *The Atmospheric General Circulation Model ECHAM-4: Model Description and Simulation of Present-day Climate*. Max-Planck-Institute for Meteorology Report No. 218.
- Sharpley, A. N. and Williams, J. R. (1990). EPIC, Erosion/Productivity Impact Calculator, 1. Model documentation. U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service, Tech. Bull. 1768.
- Srikanthan, R. and McMahon, T. A. (2001). Stochastic generation of annual monthly and daily climate data: a review. *Hydrology and Earth Systems Sciences*, **5**(4), pp. 653-670.
- Stone, M. C., Hotchkiss, R. A., and Mearns, L. O. (2003). Water yield response to high and low spatial resolution climate change scenarios in the Missouri River Basin. *Geophysical Research Letters*, **30**(4), pp. 351-354.
- Thomson, A. M., Brown, R. A., Rosenberg, N. J., Srinivasan, R., and Izaurralde, R. C. (2005). Climate change impacts for the conterminous USA: An integrated assessment, Part 4: Water resource. *Climate Change*, **69**(1), pp. 67-88.
- Varanou, E. E., Gkouvatsou, E. B., and Mimikou, M. (2002). Quantity and quality integrated catchment modeling under climatic change with use of Soil and Water Assessment Tool model. *Journal of Hydrology*, **7**(3), pp. 228-244.
- Weingart, P., Engels, A., and Pansegrau, P. (2000). Risks of communication: Discourses on climate change in science, politics, and the mass media. *Public Understanding of Science*, **9**(3), pp. 261-283.
- Williams, J. R. (1995). Chapter 25. The EPIC Model, In *Computer Models of Watershed Hydrology*, Water Resources Publications, Highlands Ranch, CO, pp. 909-1000.
- Whitfield, P. F. and Cannon, A. J. (2000). Recent variation in climate and hydrology in Canada. *Canadian Water Resources Journal*, **25**(1), pp. 19-65.
- Xu, C. Y. and Singh, V. P. (2004). Review on regional water resources assessment models under stationary and changing climate. *Water Resources Management*, **18**, pp. 591-612.