

A2 시나리오에 따른 국내 수자원의 변동성 전망

Outlook on Variation of Water Resources in Korea under SRES A2 Scenario

배 덕 효* / 정 일 원** / 이 병 주***

Bae, Deg Hyo / Jung, Il Won / Lee, Byong Ju

Abstract

The objective of this study is to present temporal-spatial variation of water resources on climate change impacts using the IPCC SRES A2 scenario and dynamical downscaling of the results (using the MM5 model with a resolution of 27km by 27km) at 139 sub-basins in Korea. The variation of runoff shows differences in the change of rate according to the each sub-basins and analysis durations. It has increased in the sub-basins located in Han river basin and east part of it, the other basins have decreased. In seasonal analysis, runoff in autumn and winter have increased, while in spring and summer have decreased. The results of frequency analyzing classified runoff(Low flow($Q \leq 5\text{mm}$), Normal flow($5 < Q < 100\text{mm}$), High flow($Q \geq 100\text{mm}$)) show that low flow increase in most of the sub-basins for 2031-2060 and 2061-2090. In the case of high flow, it have higher frequency ranging from -100% to 500% than low flow. Regardless of the variation of mean runoff, maximum discharge appeared to be increase in process of time. The regression method is used to figure out the relationship between the rate of runoff change and mean temperature, mean precipitation under A2 scenario. The mean actual evapotranspirations from the regression equations increased by 3.4~5.3% for the change of 1°C. Also, for the precipitation change of $\pm 10\%$, runoff variety range is -18.2~+12.4% in Han River, -21.6~+14.6% in Nakdong River, -17.5~+11.5% in Gum River, -18.4~+10.6% in Sumjin River, -19.9~+12.7% Youngsan River basin.

keywords : Climate change impact assessment, Water resources, A2 scenario, PRMS

요 지

본 연구에서는 SRES A2 시나리오의 GCM 결과를 역학적으로 다운스케일한 해상도 27km×27km 자료를 이용하여 국내 139개 유역에 대해 기후변화에 따른 수자원의 시공간 변화를 평가하고 결과를 제시하였다. 유출량의 변화는 유역에 따라 그리고 분석기간에 따라 변화율에서 차이가 나타났다. 기간별로 차이는 있으나 한강과 한강동해안에 위치한 유역에서는 연평균유출량이 증가하고 나머지 유역에서는 감소할 것으로 분석되었다. 계절별 분석에서는 가을과 겨울철 유출량의 증가와 봄과 여름철의 유출량이 감소하는 것으로 나타났다. 유역별 유출고를 저수($Q \leq 5\text{mm}$), 평수($5\text{mm} < Q < 100\text{mm}$), 고수량($Q \geq 100\text{mm}$)으로 구분하여 변화를 분석한 결과, 대부분의 유역에서 2031-2060년과

* 세종대학교 물자원연구소 · 토목환경공학과 부교수
Associate Prof., Dept. of Civil and Environmental Engrg., Sejong Univ, Seoul 143-747, Korea
(e-mail: dhbae@sejong.ac.kr)

** 세종대학교 토목환경공학과 박사과정
Ph.D. Candidate, Dept. of Civil and Environmental Engrg., Sejong Univ, Seoul 143-747, Korea
(e-mail: bobilwon@paran.com)

*** 세종대학교 토목환경공학과 박사과정
Ph.D. Candidate, Dept. of Civil and Environmental Engrg., Sejong Univ, Seoul 143-747, Korea
(e-mail: bjlee0704@paran.com)

2061-2090년 기간에서 저수량이 증가하는 것으로 나타났다. 고수량의 경우 기간별로 -100~500%의 빈도변화를 보여 저수량에 비해 변화율이 큰 것으로 나타났다. 또한 평균유출량의 증감에 관계없이 최대유출량은 시간에 따라 더 커질 것으로 분석되었다. 유역별 연평균 기온, 강수 그리고 유출변화율을 이용하여 추정된 회귀분석 결과 기온이 1°C 변화함에 따라 권역별로 실제증발산이 3.4~5.3% 정도 변화되는 것으로 나타났다. 이 상황에서 강수량이 ±10% 변화될 경우 유출량이 권역별로 -18.2~+12.4%(한강), -21.6~+14.6%(낙동강), -17.5~+11.5%(금강), -18.4~+10.6%(섬진강), -19.9~+12.7%(영산강)의 변화를 보일 것으로 분석되었다.

핵심용어 : 기후변화 영향평가, 수자원, A2 시나리오, PRMS

1. 서론

지금까지 수자원 계획은 미래의 수문조건이 과거와 유사할 것이라는 가정에서 이루어져 왔다. 그러나 산업혁명 이후 급격한 온실가스의 증가로 인한 기후변화는 기온의 증가, 강수량 패턴의 변화, 증발산량의 증가 및 유출의 계절적 변동 등을 초래하여 미래의 수문순환과정이 과거와 다른 패턴으로 변화할 수 있다고 알려져 있다(IPCC, 2001). Dagnachew et al.(2003)은 토지피복과 기후변화에 대한 수문학적 영향을 분석하였는데, 강수량의 10% 증가에 대해 유출량은 30% 증가, 기온 1.5°C 증가에 대해서는 유출량이 약 15% 감소한다고 제시하였다. 또한, Gellens and Roulin(1998), Meehl and Tebaldi (2004), Cunderlik and Simonovic(2005) 등의 연구들에는 홍수 및 가뭄의 강도와 빈도 증가로 인해 홍수피해 증가와 하천의 건천화 등의 문제들이 발생할 가능성이 높다고 제시하고 있다.

기상연구소(2004)에서는 우리나라의 강수량이 최근 50년간 전국적으로 강수일수는 감소했지만 일강수량이 80mm 이상인 호우발생 빈도가 증가되었다고 발표하였다. 또한 남부지방에서는 연강수량(7%) 증가와 연강수일수(14%)의 감소로 과거에 비해 강수강도가 18% 증가했고, 극한 강우사상의 발생빈도도 증가되었다고 발표하였다(Choi, 2002). 이러한 강수일수의 감소와 강우강도의 증가는 홍수와 가뭄 발생 가능성이 동시에 증가되는 것으로 이해할 수 있다. 실제 1994년과 1995년의 가뭄과 1995, 1996, 1998, 1999년의 홍수(한국건설기술연구원, 2000) 그리고 2002년 태풍 루사, 2003년 태풍 매미, 2006년 집중호우 등 근래 들어 이러한 재해로 인해 큰 피해가 발생하였다. 따라서 앞으로 더욱 가속화될 것으로 전망되고 있는 기후변화에 적절히 대응하기 위해서는 국내 수자원의 변동성을 평가하고 취약성을 파악하여 적절한 적응방안을 모색하는 것이 절실히 요구된다.

수자원측면의 기후변화 영향에 관한 주요 국내 연구

는 다음과 같다. 지역별로 신사철(2000)은 안동댐유역에서, 안재현 등(2001a, 2001b), 김병식 등(2004), 김웅태 등(2004), 이동률 등(2004)은 대청댐과 용담댐유역에서의 유출량의 변화를 분석하였다. 신사철(2000)은 기온과 강수량의 변화에 대한 유출량의 민감도를 분석하였으며, 안재현 등(2001a, 2001b)은 국지기후모델인 IRSHAM96 모형과 물수지모형을 이용하여 지역적인 기후특성을 반영하여 분석하였다. 이동률 등(2004)은 Palmer 가뭄심도지수(PDSI)를 이용하여 가뭄과 홍수의 변화를 분석한 결과 극심한 가뭄과 홍수의 발생빈도가 증가할 것으로 제시하였다. 김병식 등(2004)은 YONU GCM (General Circulation Model)을 이용하여 통계적 방법으로 상세화를 시도하였다. 그러나 이러한 국내 연구들은 분석유역이 특정유역에 국한되어 있으며, 사회경제적 변화를 고려한 기후변화 시나리오를 이용하지 않고 단지 CO₂ 상황에서의 변동성을 평가하였다는 점에서 한계가 있다.

본 연구에서는 5대강수계를 대상으로 기후변화로 인해 발생할 수 있는 수자원의 시공간적 변화를 분석하였다. 이를 위해 배덕효 등(2007)과 정일원 등(2007)이 5대강수계 139개 소유역에 대해 생산한 기후 및 유출 시나리오를 활용하였다. 이들은 기상연구소(2004)에서 “기후변화협약대응 지역기후 시나리오 산출기술개발”(2002~2004) 사업의 일환으로 생산한 고해상도(27×27km)의 한반도 미래 기후자료를 이용하여 유역별 시나리오를 구축하였다. 각 유역별 시나리오는 기준기간(reference period) 30년(1970~2000년)과 미래기간(future period) 90년(2001~2090년)으로 구성되어 있다. 본 연구에서는 수자원 변동성을 평가하기 위한 분석기간으로는 30년을 설정하였으며, 유역별 기후 및 유출 시나리오를 다양한 측면에서 분석하였다.

2. 방법론

2.1 기후 및 유출 시나리오

배덕효 등(2007)과 정일원 등(2007)은 좁고 복잡한

지형 특성을 가진 국내 유역에서 신뢰성 있는 수자원 영향평가를 위해 고해상도의 지역기후모델 결과를 이용하여 소유역에서의 기후 및 유출 시나리오를 생산하는 방법론을 제시하였다. 배덕효 등(2007)은 기상연구소(2004)에서 생산한 고해상도 지역기후모델 결과와 일기상발생기인 LARS-WG(Semenov and Barrow, 2002)를 이용하여 보다 현실적인 기후특성을 반영한 유역별 기후시나리오를 생산할 수 있는 방법론을 제시하였으며, 정일원 등(2007)은 물리적 기반의 준분포형 모형인 PRMS(Leavesley et al., 1983)를 이용하여 국내 139개 유역(Fig. 1)에서 유역별 유출시나리오를 생산하는 방법

론을 제시하였다. 이들 연구에서는 IPCC SRES A2 온실가스 배출 시나리오를 이용하였는데, 이것은 CO₂ 농도가 2100년경 820ppm까지 증가하고, 전구평균기온이 현재보다 4.6°C 정도 증가할 것으로 전망한 시나리오이다. Fig. 2는 A2 시나리오 상황에서의 국내 기온과 강수의 변화량을 과거 30년(1971~2000년)의 평균에 대해 10년 단위로 도시한 것이다. 강수는 증가감소를 반복하다가 2030년대 이후부터 2100년경까지 꾸준히 증가하고, 기온은 꾸준히 증가될 것으로 전망되었다. Fig. 3은 본 연구에서 적용한 국내 수자원 영향평가 방법의 개념도를 나타낸 것이다.

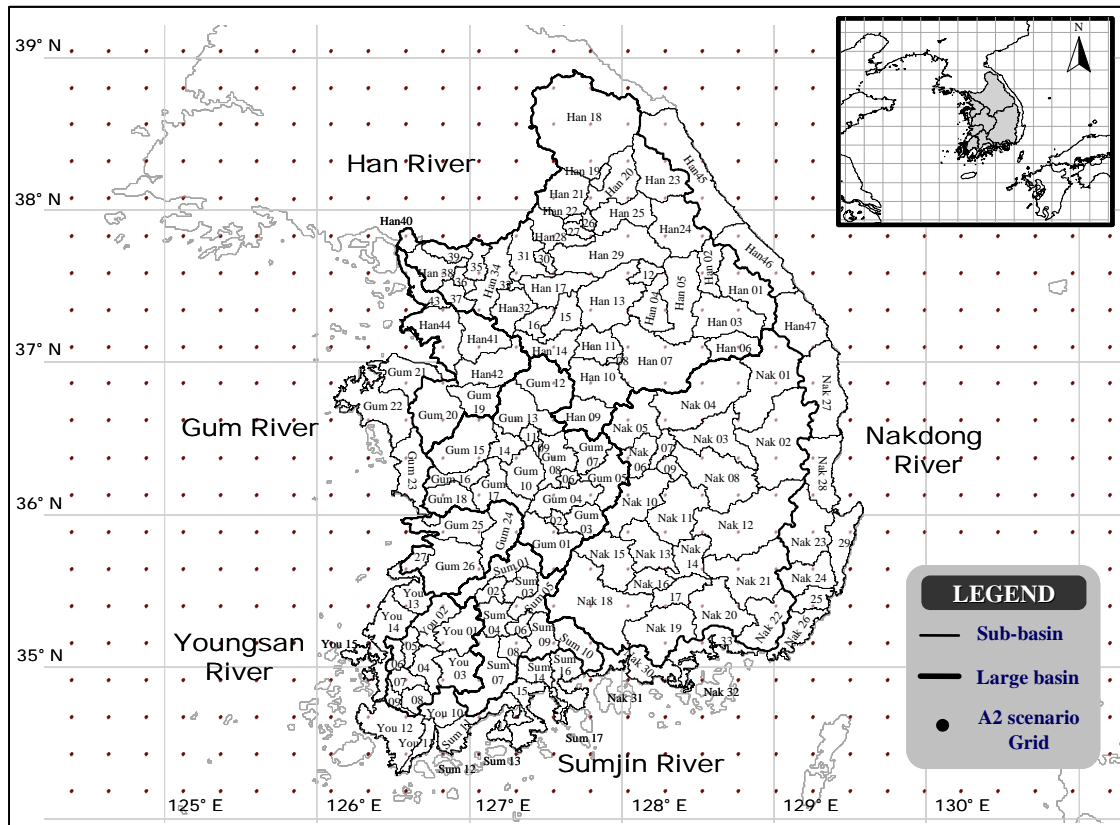


Fig. 1. Study areas (5 large basins and 139 sub-basins)

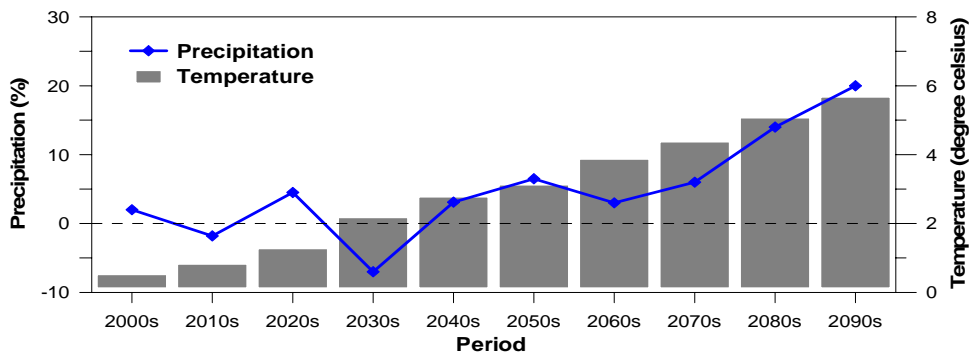


Fig. 2. Change rate of precipitation and temperature during 2000~2090 relative to the 1971~2000 under A2 scenario

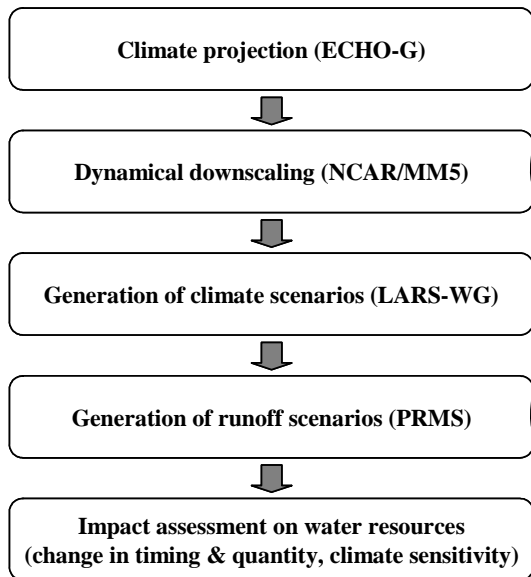


Fig. 3. Methodology for assessment of climate change impacts on water resources

2.2 기후변화 영향 분석

본 연구에서는 유역별 기후 및 유출시나리오의 전체 모의기간(120년)중 30년(1971~2000년) 동안을 기준기간으로, 미래 90년 동안을 3개의 분석기간 2015s(2001~2030년), 2045s(2031~2060년), 2075s(2061~2090년)로 구분하여 기준기간에 대한 미래 각 분석기간에서의 유출량의 평균적인 변화를 분석하기 위해 연, 월, 계절별 변화량을 평가하였다. 이와 더불어 기후변화에 따른 유출의 극치값의 변화를 분석하기 위해 유출고의 크기에 따른 빈도변화에 대해서도 평가하였다.

기온과 강수의 변화에 따라 유출량의 변화가 심한 유역은 그렇지 않은 유역에 비해 기후변화에 민감 혹은 취약하다고 할 수 있을 것이다. 본 연구에서는 어느 유역이 기후변화에 더 민감한지를 평가하기 위해, 유역별 시나리오를 이용하여 기온과 강수의 변화에 대한 유출량 변화의 관계를 평가할 수 있는 간단한 회귀식을 추정하였다. 이를 이용하여 권역별 유출량 변화의 민감도를 평가하였다.

2.3 기후변화 민감도 평가를 위한 회귀분석

증발산과 강수량의 변화는 유출량의 변화를 야기하므로, 강수량과 증발산량의 변화를 독립변수로 유출량의 변화를 종속변수로 하는 회귀식을 추정할 수 있다. 본 연구에서는 기온 변화에 따른 증발산량의 변화에 관한 회귀식과 증발산량과 강수량의 변화에 따른 유출량의 변화를 추정할 수 있는 회귀식을 추정하였다. 회귀식의 적합도를 평가하기 위한 기준으로는 결정계수

와 수정결정계수를 이용하였다. 결정계수는 회귀식 자료의 변동성을 얼마나 잘 표현하는 지를 나타내는 유용한 통계값이지만, 다중회귀분석에서는 독립변수의 수가 추가될 때 마다 값이 증가하는 경향이 있기 때문에 독립변수의 개수에 따른 영향도 고려할 수 있는 수정결정계수도 평가되어야 한다(Srivastava et al., 1995). 본 연구에서는 추정된 두 회귀식을 이용하여 기온과 강수의 변화에 따른 유출량의 변화를 추정하고 동일한 기온과 강수변화 조건에서 권역별 유출량의 민감도를 평가하였다.

3. A2 시나리오에 따른 국내 수자원 변동성 분석

3.1 유역별 연평균 및 월평균 유출량의 변화

유역별 연평균유출량의 시간간격적인 변화를 분석하기 위해 기준기간에 대한 변화율을 Fig. 4에 도시하였다. 2015s 기간에서 -12~14%, 2045s 기간에는 -23~16%, 2075s 기간은 -14~20%의 변화범위를 나타내었다. 2015s 기간에는 한강과 동해안, 낙동강하류 그리고 금강 북쪽에 위치한 유역에서 연평균유출량이 증가하고 나머지 유역에서는 감소할 것으로 분석되었다. 이 기간에서의 주요 증감 원인은 강수량의 증감에 따른 것으로 분석되었다. 2045s 기간에서는 한강하류와 한강동해안 일부유역을 제외한 대부분의 유역에서 연평균유출량이 감소하였다. 낙동강 중상류유역과 섬진강 및 영산강유역에서는 감소율이 -23~-16%로 큰 감소를 보였는데, 이는 연평균강수량의 감소와 더불어 연평균기온이 증가함에 따른 증발산량의 증가에 따른 영향으로 분석되었다. 2075s 기간에서는 한강중하류와 한강동해안 그리고 낙동강하류 일부 유역을 제외한 나머지 유역에서는 평균유출량이 최대 -14%까지 감소하였다. 배덕효 등(2007)에 의하면 2075s 기간에서는 연평균강수량이 전체 유역에서 증가할 것으로 전망되었다. 그러나 연평균기온이 평균 4.0℃ 이상 증가함으로써 인한 증발산량의 증가로 많은 유역들에서 연평균유출량이 오히려 감소할 것으로 전망되었다.

Table 1은 월평균유출량의 변화율을 5단계로 구분하여 각 범위에 따른 유역의 수를 나타낸 것이다. 여기서 굵게 표시된 것은 각 범위 중에서 소유역의 수가 가장 많은 것을 나타낸 것이다. 유역별 변화율의 크기는 유역과 기간별로 차이를 보이는 것으로 나타났다. 또한 대부분의 유역에서 변화율이 ±50% 이내의 변화를 보였으나 2045s와 2075s 기간에서는 ±50% 이상의 변화를 보이는 유역의 수가 증가하였다. 이것은 미래로 갈수록 월별유출량의 변동성이 커지는 것을 나타낸다.

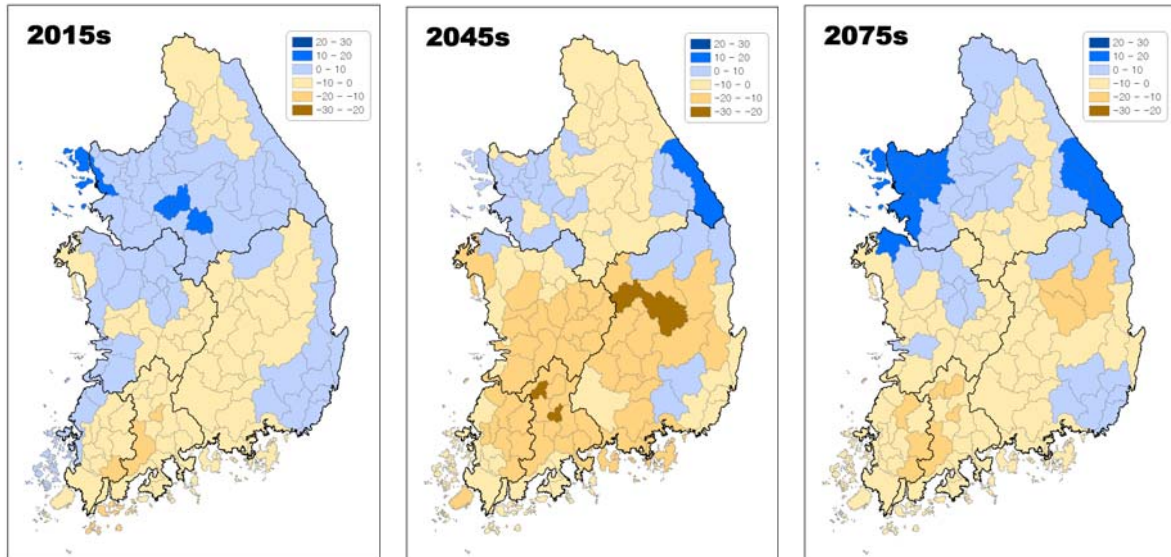


Fig. 4. Relative changes (%) of runoff under the A2 scenario in Korean sub-basins

Table 1. Number of sub-basins according to the change rate of mean monthly runoff during 2015s, 2045s and 2075s relative to the baseline period

Period	2015s(2001-2030)					2045s(2031-2060)					2075s(2061-2090)					
	Change Rate	-50% 이하	-50~-10%	-10~10%	10~50%	50% 이상	-50% 이하	-50~-10%	-10~10%	10~50%	50% 이상	-50% 이하	-50~-10%	-10~10%	10~50%	50% 이상
Jan	No.	·	·	30	104	5	·	·	11	77	51	·	·	21	56	62
	%	0.0	0.0	21.6	74.8	3.6	0.0	0.0	7.9	55.4	36.7	0.0	0.0	15.1	40.3	44.6
Feb	No.	·	·	13	111	15	·	·	3	63	73	·	·	18	55	66
	%	0.0	0.0	9.4	79.9	10.8	0.0	0.0	2.2	45.3	52.5	0.0	0.0	12.9	39.6	47.5
Mar	No.	·	3	62	66	8	·	39	58	21	21	·	88	24	7	20
	%	0.0	2.2	44.6	47.5	5.8	0.0	28.1	41.7	15.1	15.1	0.0	63.3	17.3	5.0	14.4
Apr	No.	·	39	84	16	·	1	97	35	5	1	7	90	37	4	1
	%	0.0	28.1	60.4	11.5	0.0	0.7	69.8	25.2	3.6	0.7	5.0	64.7	26.6	2.9	0.7
May	No.	·	81	57	1	·	·	115	23	1	·	20	111	7	1	·
	%	0.0	58.3	41.0	0.7	0.0	0.0	82.7	16.5	0.7	0.0	14.4	79.9	5.0	0.7	0.0
Jun	No.	·	23	93	23	·	·	8	74	56	1	·	82	42	14	1
	%	0.0	16.5	66.9	16.5	0.0	0.0	5.8	53.2	40.3	0.7	0.0	59.0	30.2	10.1	0.7
Jul	No.	·	104	33	2	·	38	100	1	·	·	·	79	48	12	·
	%	0.0	74.8	23.7	1.4	0.0	27.3	71.9	0.7	0.0	0.0	0.0	56.8	34.5	8.6	0.0
Aug	No.	·	13	87	39	·	3	107	28	1	·	·	26	93	20	·
	%	0.0	9.4	62.6	28.1	0.0	2.2	77.0	20.1	0.7	0.0	0.0	18.7	66.9	14.4	0.0
Sep	No.	·	6	66	66	1	·	·	7	109	23	·	·	5	122	12
	%	0.0	4.3	47.5	47.5	0.7	0.0	0.0	5.0	78.4	16.5	0.0	0.0	3.6	87.8	8.6
Oct	No.	·	5	77	57	·	·	14	91	34	·	·	1	48	87	3
	%	0.0	3.6	55.4	41.0	0.0	0.0	10.1	65.5	24.5	0.0	0.0	0.7	34.5	62.6	2.2
Nov	No.	·	56	78	5	·	·	104	34	1	·	·	35	79	25	·
	%	0.0	40.3	56.1	3.6	0.0	0.0	74.8	24.5	0.7	0.0	0.0	25.2	56.8	18.0	0.0
Dec	No.	·	28	83	28	·	·	1	20	93	25	·	7	68	49	15
	%	0.0	20.1	59.7	20.1	0.0	0.0	0.7	14.4	66.9	18.0	0.0	5.0	48.9	35.3	10.8

3.2 유출량의 계절적 변화

봄(3월~5월)과 가을철(9월~11월) 그리고 여름(6월~8월)과 겨울(12월~2월)철 평균유출량의 변화를 기간별로 분석하였다. Fig. 5는 각 기간별 유역별 기준기간에 대한 계절별 유출량의 평균변화를 도시한 것이다. 특징적인 결과로는 대부분의 유역에서 가을과 겨울철 유출량의 증가와 봄과 여름철의 감소 경향이다. 또 하나의 특징으로는 유역별 변화율이 2015s 기간에 비해

2045s와 2075s 기간에서 커지며, 유역별 분산도 증가한다는 것이다. 대부분의 유역에서 여름철 평균유출량은 2045s 기간에서 가장 크게 감소하였다. 봄의 평균유출량은 미래로 갈수록 감소량이 더욱 커지는 것으로 나타났다. 이것은 겨울철 기온 증가에 따른 봄철 용설량 감소와 봄철 강수량의 감소로 인한 것으로 분석되었다. 계절별 평균유출량의 변화율의 범위는 겨울철이 -2.69~+176.3%로 폭이 가장 큰 것으로 나타났다. 계절별 분석에서도 연평균 및 월평균 유출량 분석결과에서와

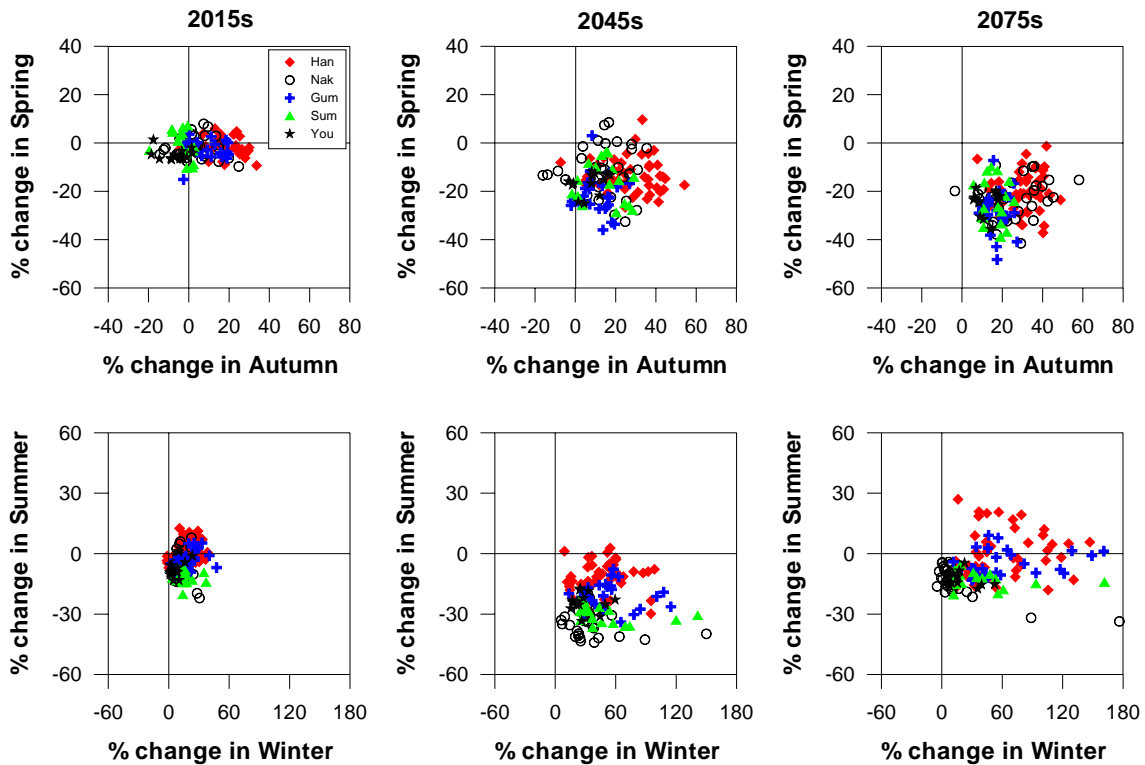


Fig. 5. Seasonal runoff variations in sub-basins under A2 scenarios.

같이 변화율의 크기는 유역에 따라 차이를 보였다.

권역별 특징으로는 한강권역의 경우 여름철 변화에서 소유역별로 상반된 결과를 보였다. 낙동강권역에서는 2045s 기간에서 여름철 유출량의 변화가 최대 -44.1%로 가장 크게 감소하는 것으로 분석되었다. 한강과 금강권역 그리고 낙동강과 섬영권역에서 유사한 계절적 변화 경향을 보였다. 낙동강과 영산강권역 내의 유역들에서는 2015s와 2075s 기간에서 겨울철에 20% 증가, 여름철 20% 감소로 유사한 결과를 보였는데, 이 두 기간에서의 강수 및 기온의 변화가 다르지만 강수와 기온의 변화가 복합적으로 작용하여 이와 같은 결과를 보인 것으로 판단된다.

3.3 유출량의 크기에 따른 발생빈도 변화

Fig. 6은 각 권역에서 상중하류에 위치한 유역의 유출고 크기에 따른 발생빈도를 도시한 것이다. 여기서 Y축은 각 유출고에 대한 각 분석기간 동안의 발생수를 나타낸다. 동일 권역에 위치해 있는 유역에서도 상이한 변화를 보이는 것을 볼 수 있다. 이것은 같은 권역내에서도 유역별로 강수와 온도의 변화가 다르기 때문에 나타나는 것으로 판단된다. 대부분의 유역에서 평균유출량의 증감에 상관없이 최대유출량이 미래로 갈수록 증가하는 것으로 나타났다. 이것은 홍수의 규모가 증대될 가능성을 나타낸다.

본 논문상에서 결과를 제시하지는 않았으나 유역별 유출고를 저수($Q \leq 5\text{mm}$), 평수($5\text{mm} < Q < 100\text{mm}$), 고수량($Q \geq 100\text{mm}$)으로 구분하여 발생빈도 변화를 분석한 결과, 저수량의 경우 2015s 기간에서 -14.0~+16.5%, 2045s에서는 -30.4~+16.9%, 2075s에서는 -20.6~+14.7%의 빈도변화를 보였다. 전체 139개 유역 중에서 각 기간별로 80개(58%), 124개(89%), 107개(77%) 유역에서 증가하는 것으로 나타났다. 이것은 대부분의 유역에서 2045s와 2075s 기간에서 저수량이 증가된다는 것을 나타내는 것으로, 겨울철 유출량의 증가로 인한 영향으로 분석된다. 고수량의 경우 2015s 기간에서 -100.0~+400%, 2045s에서는 -100.0~+500%, 2075s에서는 -33.3~+400%의 빈도변화를 보여 저수량에 비해 변화율이 큰 것으로 나타났다. 전체 139개 유역 중에서 각 기간별로 70개(50%), 73개(53%), 106개(76%) 유역에서 증가하는 것으로 나타났다. 특히 2075s 기간에서 고수량의 발생빈도가 크게 증가하는 것으로 분석되었다. 평수량의 변화는 유역의 연평균유출량의 변화와 동일한 경향을 보였다. 유출량에 따른 발생빈도의 변화를 분석한 결과 저수 및 고수량의 변화가 유역에 따라 상이한 결과를 나타내었다. 이것은 기후변화로 인해 모든 유역에서 가뭄이나 홍수빈도가 동일하게 증가되는 것이 아니라 지역적으로 다른 결과를 보여줄 수 있다는 것을 나타낸다.

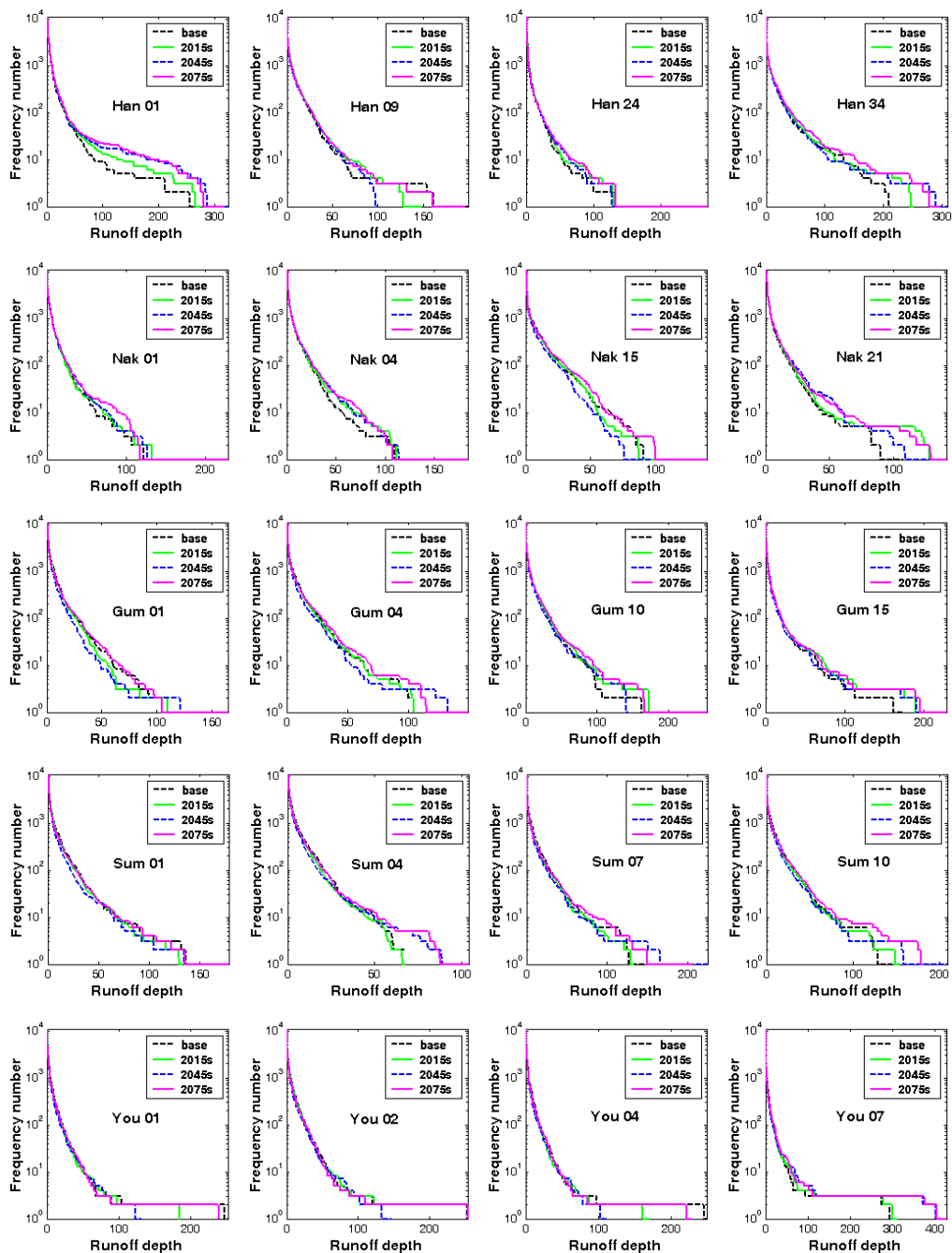


Fig. 6. Variations of occurrence frequency for the daily runoff depth (mm/day) at 5 major river basins

4. 기후변화에 따른 유역 유출량의 민감도 분석

본 연구에서는 기온과 강수의 변화에 따른 유출량의 변화를 정량화하여 기후변화에 따른 유역의 민감도를 평가하고자 하였다. Table 2는 각 전체유역과 권역별 연평균기온변화량(T)과 실제증발산량의 변화량(AET)에 대한 회귀식을 추정한 것이다. 이 회귀식을 추정하기 위해 소유역별 각 기간별 연평균기온변화량과 PRMS 모형에서 산정된 실제증발산량의 변화량이 이용되었다. PRMS 모형에서는 Hamon 방법(1961)을 이용

하여 잠재증발산량을 산정하고 토양수분 상태에 따라 실제증발산량을 모의한다. PRMS 모형에서의 증발산량 및 유출량 산정에 관한 알고리즘은 정일원과 배덕효(2005)에 자세히 기술되어 있다. 회귀식은 결정계수(R-sq)가 84% 이상의 값을 보여, 자료에 대한 높은 적합도를 보였다. 특히 각 권역별 분석에서는 결정계수가 증가하였다. 이 회귀식들은 A2 시나리오 상황하에서 그리고 연평균기온변화 범위가 0.8~5.0°C에서 추정된 결과이다.

Table 2. Regression equations between the actual evapotranspiration(AET) rate and temperature variation under A2 scenario

Basin	Regression Eq.	R-Sq	Adjust R-Sq
Han River	$AET = -0.4850 + 5.751 \times T$	88.0%	87.9%
Nakdong River	$AET = -0.7901 + 4.676 \times T$	93.6%	93.6%
Gum River	$AET = -1.1280 + 5.477 \times T$	86.2%	86.0%
Sumjin River	$AET = -0.9435 + 5.393 \times T$	90.6%	90.4%
Youngsan River	$AET = -0.4766 + 3.887 \times T$	84.3%	83.9%
Total	$AET = -0.9723 + 5.297 \times T$	84.3%	84.3%

연평균 실제증발산과 강수량의 변화율에 따른 유출량의 변화율을 분석하기 위해 각각에 대한 상관성을 분석하였다. 연평균실제증발산과 연평균유출량의 변화율 사이에서는 Fig. 7과 같이 뚜렷한 상관성을 보이지는 않았다. 그러나 연평균강수량의 변화율과 연평균유출량의 변화율(R)과의 관계에서는 결정계수가 66% 정도의 상관성을 보였다. 이것은 강수의 변화가 유출량에 미치는 영향이 증발산량에 비해 상대적으로 크다는 것을 나타낸다. 본 연구에서는 실제증발산의 변화(AET)와 강수량의 변화(P)가 유출량의 변화(R)에 미치는 영향을 평가하기 위해 다중회귀분석(Multiple Regression

analysis)을 적용하였다. AET의 경우 Table 2에서 제시된 회귀식을 이용하였다. 이 경우 선형회귀식의 불확실성이 다중회귀분석 결과에도 영향을 미칠 수 있을 것이다. 적용결과 다중회귀식은 결정계수가 전체적으로 79% 이상으로 적합성을 보였으며, 수정결정계수(Adjust R-Sq)도 78.2% 이상으로 나타나 높은 상관성을 보였다. 특히 한강과 금강유역에서 결정계수가 92% 이상으로 회귀식에 대한 자료의 적합성이 매우 높게 나타났다. 따라서 추정된 다중회귀식은 자료의 변동성을 신뢰성 있게 설명할 수 있을 것으로 판단되었다.

Table 3. Regression equations between the variation rate of annual mean actual evapotranspiration (AET), precipitation(P), runoff(R) under A2 scenario

Basin	Regression Eq.	R-Sq	Adjust R-Sq
Han River	$R = -0.178 - 0.524 \times AET + 1.53 \times P$	92.1%	92.0%
Nakdong River	$R = -0.264 - 0.795 \times AET + 1.80 \times P$	88.2%	87.9%
Gum River	$R = -0.818 - 0.507 \times AET + 1.45 \times P$	92.9%	92.7%
Sumjin River	$R = -1.710 - 0.500 \times AET + 1.45 \times P$	79.0%	78.2%
Youngsan River	$R = -1.380 - 0.662 \times AET + 1.62 \times P$	89.9%	89.4%
Total	$R = -1.150 - 0.568 \times AET + 1.63 \times P$	90.9%	90.9%

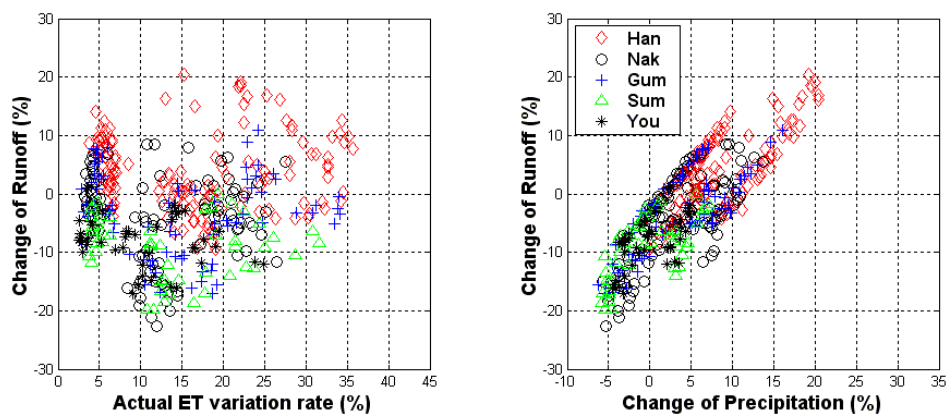


Fig. 7. Relation of between rate of change in Actual ET and runoff and between rate of change in mean annual precipitation and runoff

회귀식을 이용한 분석결과 A2 시나리오 상황하에서 기온이 1℃ 변화함에 따라 권역별로 실제증발산이 3.4(섬진강)~5.3(한강)% 변화되는 것으로 나타났으며, 이에 대해 강수량이 ±10% 변화될 경우 유출량이 권역별로 -18.2~12.4%(한강), -21.6~+14.6%(낙동강), -17.5~+11.5%(금강), -18.4~+10.6%(섬진강), -19.9~+12.7%(영산강) 변화될 것으로 분석되었다. 낙동강유역이 기온과 강수변화에 대해 변동성이 가장 크게 나타났으며, 그 다음이 영산강유역으로 나타났다. 이것은 이들 유역이 기후변화에 민감하다는 것으로 그 만큼 취약성이 커다는 것으로 이해될 수 있다. 유역의 취약성은 기후변화로 인한 수문기상인자의 시공간적 변화뿐 아니라 유역의 사회경제적 환경에 따라 크게 영향을 받는다(IPCC, 2007). 따라서 유역내의 사회환경요소와 기후변화를 동시에 고려하여 취약한 부분을 분석하고, 적절한 적응 및 대응책을 수립하는 것이 필요할 것으로 사료된다.

본 연구에서는 SRES A2 시나리오만을 이용하여 수자원의 변동성을 평가하였다. 그러나 미래의 기후를 예측하는 것은 매우 어렵고, 하나의 시나리오로 미래를 예측하는 것은 불확실성이 매우 크므로, 가능성 있는 다양한 시나리오를 통해 변화를 전망하고, 불확실성을 제시하는 것이 필요할 것이다. 이와 더불어 기후변화 영향평가에서 발생하는 불확실성을 최소화하는 노력도 병행되어야 할 것이다.

5. 결론 및 향후과제

본 연구는 SRES A2 시나리오의 상세화(27×27km)된 결과를 이용하여 기후변화로 인해 발생할 수 있는 국내 수자원의 변동성을 전망한 것으로, 향후 기후변화에 대한 수자원측면의 적응 정책 마련을 위한 참고자료로 활용될 수 있을 것이다. 기후변화에 의한 국내 수자원의 변동성을 평가하기 위해 본 연구에서는 국내 139개 유역에 구축된 기후 및 유출시나리오를 다각적으로 분석하였다. 유역별 유출량의 변동특성을 평가하기 위해 시공간적 변화, 유출량의 크기에 따른 변화, 물수지에 따른 변화를 분석하였다. 또한 기후변화에 따른 권역별 유출량의 민감도도 분석하였다. 본 연구에서 제시된 주요결과는 다음과 같다.

- 1) A2 온실가스 배출 시나리오 상황에서 국내 연평균유출량은 한강과 동해안 그리고 금강 북쪽에 위치한 유역들에서는 다소 증가하고, 남쪽에 위치한 낙동강, 섬진강, 영산강 유역들에서는 감소할 것으로 전망되었다.

- 2) 계절별 변동성 평가 결과 대부분의 유역에서 가을과 겨울철 유출량의 증가와 봄과 여름철의 평균유출량이 감소할 것으로 전망되었다. 또한 유역별 변화율과 분산이 2015s 기간에 비해 2045s와 2075s 기간에서 증가하였다.

- 3) 유역별 유출고의 변화를 분석한 결과, 평균유출량의 증감에 관계없이 최대유출량이 분석기간이 미래로 갈수록 증대될 것으로 전망되었다.

- 4) 유역별 연평균 기온, 강수 그리고 유출변화율을 이용하여 추정된 회귀분석 결과 낙동강과 영산강 유역이 기후변화에 따른 유출량의 변동성이 큰 것으로 나타났다.

향후 다양한 기후변화 시나리오에 따른 영향평가를 통해 기후변화에 따른 수자원 변동성범위를 정량화하기 위한 연구와 더불어 수자원 영향평가의 불확실성을 평가하고 최소화하기 위한 연구들이 지속되어야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원(1-9-3)에 의해 수행되었습니다.

참고 문헌

- 기상연구소 (2004). **기후변화협약대응 지역기후시나리오 산출기술개발 (III)**.
- 김병식, 김형수, 서병하, 김남원 (2004). “기후변화가 용담댐 유역의 유출에 미치는 영향.” **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제37권, 제2호, pp. 185-193.
- 김웅태, 이동률, 유철상 (2004). “기후변화에 따른 대청댐 유역의 유출 영향 분석.” **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제37권, 제4호, pp. 305-314.
- 배덕효, 정일원, 권원태 (2007). “수자원에 대한 기후변화 영향평가를 위한 고해상도 시나리오 생산(I): 유역별 기후시나리오 구축.” **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제40권, 제3호, pp. 191-204.
- 신사철 (2000). “기후변화 시나리오에 의한 하천 유황의 해석.” **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제33권, 제5호, pp. 623-634.
- 안재현, 윤용남, 유철상 (2001a). “지구온난화에 따른 수문환경의 변화와 관련하여 : 2. 물수지모형을 이용

- 한 대청댐 상류 유역 수문환경의 변화 분석.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제34권, 제5호, pp. 511-519.
- 안재현, 윤용남, 이재수 (2001b). “지구온난화에 따른 수문환경의 변화와 관련하여 : 1. 국지규모 모형을 이용한 한반도 기온의 변화 분석.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제34권, 제4호, pp. 347-356.
- 이동률, 김용태, 유철상 (2004). “기후변화가 기상학적 가뭄과 홍수에 미치는 영향.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제37권, 제4호, pp. 315-328.
- 정일원, 배덕호 (2005). “국내유역에서의 PRMS 모형의 적용성에 관한 연구.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제38권, 제9호, pp. 713-725.
- 정일원, 배덕호, 임은순 (2007). “수자원에 대한 기후변화 영향평가를 위한 고해상도 시나리오 생산(II): 유역별 유출시나리오 구축.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제40권, 제3호, pp. 205-214.
- 한국건설기술연구원 (2000). **수자원계획의 최적화 연구(IV) : 기후변화에 따른 수자원 계획의 영향평가**, 건설교통부, 한국수자원공사.
- Choi, Y. (2002). “Changes on Frequency and Magnitude of Heavy Rainfall Events in Korea.” *Journal of the Korean Data Analysis Society*, Vol. 4, No. 3, pp. 269-282.
- Cunderlik, J.M. and Simonovic, S.P. (2005). “Hydrological extremes in a southwestern Ontario river basin under future climate conditions.” *Hydrological Sciences Journal*, Vol. 50, No. 4, pp. 631-654.
- Dagnachew, L., Christine, V.C., Françoise, G. (2003). “Hydrological Response of a Catchment to Climate and Land Use Changes in Tropical Africa : Case Study South Central Ethiopia.” *Journal of Hydrology*, Vol. 275, pp. 67-85.
- Gellens, D. and Roulin, E. (1998). “Streamflow response of Belgian catchments to IPCC climate change scenarios.” *Journal of Hydrology*, Vol. 210, pp. 242-258.
- Hamon, W.R. (1961). “Estimating potential evapotranspiration, Proceedings of the American Society of Civil Engineers.” *Journal of the Hydraulic Division*, Vol. 87, No. HY3, pp. 107-120.
- IPCC (2001). *Climate change 2001: Impacts, Adaptation, and Vulnerability Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press.
- IPCC (2007). *Climate change 2007: Impacts, Adaptation, and Vulnerability Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press.
- Leavesley, G.H., Lichty, R.W., Troutman, B.M., and Saindon, L.G. (1983). *Precipitation-Runoff Modeling System, User's manual*, Water-Resources Investigations, pp. 83-4238.
- Meehl, G.A. and Tebaldi, C. (2004). “More intense, more frequent, and longer lasting heat waves in the 21st century.” *Science*, Vol. 305, pp. 994-997.
- Semenov, M.A. and Barrow, E.M. (2002). *A Stochastic Weather Generator for Use in Climate Impact Studies : User Manual*.
- Srivastava, A.K., Srivastava, V.K., Ullah, A. (1995). “The coefficient of determination and its adjusted version in linear regression models.” *Econometric Reviews*, Vol. 14, Issue 2, pp. 229-240.

(논문번호:07-71/접수:2007.07.24/심사완료:2007.11.08)