다양한 기후변화 시나리오와 기후모델에 의한 남한지역 미래가뭄의 확률론적 전망

박범섭* · 이주현** · 김창주*** · 장호원****

Park, Beom-Seop*, Lee, Joo-Heon**, Kim, Chang-Joo***, Jang, Ho-Won****

Projection of Future Drought of Korea Based on Probabilistic Approach Using Multi-model and Multi Climate Change Scenarios

ABSTRACT

In this study, spatio-temporal distribution of future drought in South Korea was predicted by using the meteorological data generated from GCMs on which a variety of climate changing scenarios are applied. Drought phenomena was quantitatively analyzed using SPI(Standardized Precipitation Index). In addition, potential drought hazard maps for different drought duration and return period were made for the South Korea by drought frequency analysis after deriving SDF(Severity-Duration-Frequency) curves using the 54 weather stations throughout the country. From the potential drought hazard maps, drought is expected to be severer in Nakdong River basin and Seomjin River basin under A2 scenario. It was also predicted that drought would be severe in the Han River basin by RCP8.5 scenario. In the future, potential drought hazard area would be expanded until the Eastern part of Nakdong River basin as compared with that of past under A2 scenario condition. Research results indicated that future drought would be extensively occurred all areas of South Korea not limiting in the southern part of country.

Key words : Climate change, SPI, Drought, SDF curve, Potential drought hazard map

초 록

본 연구에서는 다양한 기후변화 시나리오를 적용한 GCM으로부터 생산된 기상자료를 이용하여 남한지역 미래가뭄의 시공간적인 분포를 전망하였다. 가뭄을 정량적으로 분석하기 위하여 SPI(Standardized Precipitation Index)를 가뭄지수로 이용하였으며 가뭄빈도해석을 통하여 54개 기상관측소별 SDF(Severity-Duration-Frequency) 곡선을 유도하여 남한지역의 지속기간별, 재현기간별 가뭄우심지역을 지도화하였다. 가뭄우심도에 의한 미래 가뭄전망 결과, 낙동강, 섬진강 유역이 과거와 동일하게 다른 유역에 비하여 가뭄이 심화될 것으로 전망되었으며 한강 유역 역시 가뭄이 심화될 것으로 나타났다. 미래의 경우 A2 시나리오에서는 과거에 비해 낙동강 동해 유역에도 가뭄이 심화되는 지역이 확장되는 것으로 나타났으며 RCP8.5 시나리오에서는 중부지역에 위치한 한강유역의 가뭄이 심화될 것으로 예측되었다. 연구결과를 통해 미래 가뭄은 과거와 같이 남부지방에 국한되지 않고 한반도 전역에 걸쳐 광범위하게 나타날 것으로 전망되었고 기후변화 시나리오별, 기후모델별로 다소의 전망 차이를 나타내었다.

검색어 : 기후변화, SPI, 가뭄, SDF 곡선, 가뭄우심도

* 중부대학교 대학원 토목공학과 박사과정 (ks467913@yahoo.co.kr)

** 정회원 · 교신저자 · 중부대학교 토목공학과 교수 (Corresponding Author · Joongbu University · leejh@joongbu.ac.kr)

*** 정회원 · 한국중합기술개발공사 수자원부 사원 (yubkipd@nate.com)

**** 중부대학교 대학원 토목공학과 석사과정 (hs980216@hotmail.com)

Received May 23, 2013/ revised July 3, 2013/ accepted July 10, 2013

1. 서론

가뭄은 최근 들어 인류에게 가장 큰 피해를 주고 있는 자연재해 중의 하나로서, 오랜 기간 동안의 강수 부족에 의한 기상학적 가뭄과 함께 가뭄에 적절히 대비하지 못하는 비효율적인 물 관리 등의 다양한 이유로 매년 한반도 곳곳에서 크고 작은 가뭄피해가 발생하고 있다. 가뭄의 경우 진행속도가 느리고 그 피해를 정량적으로 파악하기 힘든 어려움을 갖고 있음에도 불구하고 최근 지구 온난화 현상에 의한 지구의 연평균기온 상승과 맞물려 그 피해는 더욱 증가하고 있는 실정이다. 가뭄에 의한 피해를 최소화하기 위하여 가뭄과 관련된 연구가 최근 지속적으로 증가하고 있는 실정이며 가뭄피해의 심각성을 인식하고 다양한 분석기법을 활용하여 연구가 진행되고 있다(Lee et al. 2012a., Lee et al. 2012b).

가뭄과 관련된 연구분야 중에서 미래가뭄을 전망하기 위한 방법으로는 기후변화 시나리오를 적용한 GCM(General Circulation Model)을 통해 생산된 강수 및 기온, 유출량 등의 수문자료를 이용하는 시나리오 기반의 장기 가뭄전망이 주를 이루고 있다. 또는 강수 및 기온 등의 원시 기상자료를 가공하여 산정된 SPI(Standardized Precipitation Index) 및 PDSI(Palmer Drought Severity Index) 등의 가뭄지수를 이용하여 가뭄을 정량화하는 분석이 실시되고 있다.

가뭄지수를 이용하여 가뭄을 정량적으로 모니터링하는 연구의 경우, Kim and Lee(2011)는 한반도 전국 69개 기상관측소의 강수 및 기온 자료를 이용하여 산정한 기후변수와 각종 가뭄지수를 행정구역 별로 산정하였다. 또한, 관측자료와의 비교분석을 통하여, 산정된 가뭄지수가 실제 가뭄을 얼마나 잘 표현하는지를 평가하여 가뭄지수의 적용성을 검토하였고 다양한 지속기간을 갖고 있는 SPI의 효율성을 입증했다.

한편, 미래의 가뭄전망과 관련된 연구는 기후변화 시나리오에 기반으로 가뭄의 주기성 및 경향성, 발생빈도 등과 같은 가뭄의 통계학적 특성을 분석하는 시나리오 기반의 연구와 또한 확정론적 모형 및 중장기 기상예측 자료를 활용하여 미래 가뭄을 실시간으로 예측하는 비시나리오 기반의 연구분야로 구분할 수 있다.

Lee and Kim(2011)은 가뭄빈도해석을 통해 작성된 주요 기상 관측소별 가뭄심도-지속기간-생기빈도(Severity-Duration-Frequency, SDF) 곡선을 이용하여 한반도의 지역별 재현기간별 가뭄심도를 분석하였으며, 과거에 발생했던 주요 가뭄사상의 재현기간을 정량적으로 제시하였다. Kim et al(2013)은 SDF 곡선을 이용한 가뭄우심도를 작성하여 한반도 과거가뭄의 공간적 분포를 추정하였으며 A2 시나리오에 의해 나타날 가뭄우심지역의 변화를 전망하였다. 그 결과, 미래에는 과거 주요 가뭄우심지역으로 평가된 낙동강 유역에서 가뭄이 더욱 크게 심화되었으며 중부지방에 위치한 한강 유역으로도 가뭄이 확장될 것으로 전망되었다. Khadr and Schlenkhoff

(2012)는 독일 Ruhr강 유역을 대상으로 SPI를 이용한 가뭄예측을 통해 통계적 확률 모델의 정확성을 검증하였다.

시나리오 기반의 가뭄전망 연구로는, Blenkinsop and Fowler (2007)는 여러 기후 모델을 사용하여 기후변화의 불확실성에 대한 검증을 통해 영국의 미래 가뭄을 평가하였다. 또한 Jung and Chang(2011)은 미국 Willamette강 유역을 대상으로 A1B, B1 시나리오를 기반으로 하여 단기 가뭄의 주기성을 분석하였으며, 대상 유역에 대한 단기가뭄 취약 지역을 지도화(mapping) 하여 나타내었다. Lee et al.(2012b)은 SPI와 PDSI를 활용하여 한반도 가뭄의 경향성, 주기성 및 발생빈도 분석을 통해 가뭄을 통계학적으로 분석하였을 뿐만 아니라, 분석 결과를 기반으로 하여 한반도 지역내 극심한 가뭄에 대해 취약한 지역을 제시하였다.

Loukas et al.(2007)은 그리스 Thessaly 지역에 기후변화로 인한 가뭄심도의 변화를 평가하고자 대상유역에 위치한 50개 관측소의 강우 자료를 이용하여, SPI지수 산정하였다. 산정된 SPI지수를 이용하여, A2, B1시나리오에 대한 Thessaly지역의 미래 가뭄을 정량적으로 전망하였다.

최근에 진행된 기후변화 시나리오를 이용한 미래 가뭄의 전망과 관련된 대부분의 연구는 IPCC 4차 평가보고서에서 제시되었던 SRES (Special Report on Emission Scenario)의 A2, B1 및 A1B 등의 시나리오를 적용한 연구에 국한되어 있다. 따라서, 본 연구에서는 기존 4차 평가서에 제시된 A2 시나리오뿐만 아니라 IPCC 5차 평가보고서에 새롭게 제시된 RCP(Representative Concentration Pathways) 8.5 시나리오를 적용하였으며 남한 지역 전체에 대한 미래 가뭄의 확률론적 발생특성을 분석하여 미래에 가뭄이 취약한 지역을 재현기간별, 가뭄지속기간별로 추정된 가뭄우심도를 이용하여 평가하였다. 또한 두 가지의 서로 다른 배출시나리오에 의한 가뭄전망 결과가 공간적, 시간적으로 어떻게 다르게 나타나는지를 정량적으로 분석하여 보았다.

2. 기후변화 시나리오 및 GCMs

2.1 분석기간

본 연구에서는 가뭄을 정량적으로 평가하기 위한 방법으로 가뭄지수를 활용하였으며, 가뭄지수 산정을 위해 과거관측자료 및 미래

Table 1. Time Slices and Corresponding Period for Used Data

ID of time slice	Period	Used Data
S0 (Observed)	1976~2010	Historical Observed Data
S1	2011~2040	Projected Data based on A2 & RCP 8.5 Climate Change Scenario
S2	2041~2070	
S3	2071~2099	

기후변화 시나리오를 적용한 GCMs을 통해 생산된 강수자료를 이용하였다. 연구대상기간은 과거에서부터 미래까지 4단계로 구분 되었으며 과거의 경우 1976~2010년, 미래의 경우 2011~2099년으로 30년 단위의 3개 기간으로 나누어 분석하였다(Table 1)

2.2 기후변화 시나리오

2.2.1 SRES (Special Report on Emission Scenario)

본 연구에서 활용하는 첫 번째 기후변화 시나리오로는 IPCC 4차 평가보고서에서 제시된 SRES로서 온실가스 배출량에 따라 큰 틀에서 A1, A2, B1, B2 시나리오로 나누어진다. A1 시나리오(CO₂ : 675ppm)는 고 효율화 기술이 급속히 도입되는 고성장 사회 시나리오를 말하며 A2 시나리오(CO₂ : 830ppm)은 경제성장은 낮고 환경에 대한 관심이 적은 다원화 사회 시나리오를 말한다. B1 시나리오(CO₂ : 550ppm)는 지역간 격차가 적은 지속 발전형 사회시나리오를 B2 시나리오(CO₂ : 600ppm)는 B1과 A1보다 완만하지만 보다 광범위한 기술변화가 일어나는 지역 공존형 사회 시나리오를 말한다.

2.2.2 RCP (Representative Concentration Pathways)

본 연구에서 활용하는 두 번째 시나리오는 RCP 시나리오로서 SRES 시나리오(1990년대 말 구축) 자료의 노후화 및 해상도 문제를 보완하고 정확도 향상 및 다양한 부문에 이용할 수 있는 새로운 시나리오 도입의 필요성이 제기됨에 따라 개발 진행 되었다. IPCC 5차 평가보고서(AR5)를 통해 새롭게 선정된 4개 RCP시나리오는 Table 2와 같다. 본 연구에서 사용하고자 하는 RCP8.5 시나리오는 현재 추세로 온실가스가 배출되는 경우로서 SRES A2 시나리오에 대응한다.

2.3 GCMs

GCM은 각국의 기상관련 정부기구 및 연구기관에 따라 다양한 모델이 제시되고 있으며, 본 연구에서는 RCP8.5 시나리오의 경우 HadGEM3-RA 모델을 이용하였고, SRES A2 시나리오의 경우 CNRM:CM3, CSIRO:MK3, CONS:ECHOG, UKMO:HADCM 등 4개의 모델을 이용하였다(Table 3).

통계적 상세화는 예측변수의 GCM결과와 관측자료 사이의 통계적 관계를 이용하여 기후모델 결과의 편의를 보정하는 기법을 말한다. 본 연구의 A2 시나리오를 적용한 GCM의 경우 전이합수를 이용하여 공간적으로 상세화하고 일기상발생기를 이용하여 시간적으로 상세화 하는 조합기법을 선택하였다(Bae et al, 2011).

RCP8.5 시나리오를 적용한 GCM의 경우 전지구 기후변화 예측모델인 HadGEM2-AO에 강제입력 자료로서 RCP 시나리오를 도입하여 미래기후변화 시나리오를 모의하였으며 모의된 전지구 기후변화 시나리오를 지역기후모델인 HadGEM3-RA모델의 입력자료로 활용하여 역학적 상세화를 통해 전지구 모형이 표현할 수 없는 복잡한 지형의 효과를 잘 반영시켜주는 지역기후변화 시나리오인 RCM 자료를 산출하게 된다(So et al., 2012).

2.4 GCM에 의해 생산된 기상자료의 검증

기후변화에 따른 수문환경의 변화를 전망하기 위해서는 온실가스 배출시나리오를 선정하고, 선정된 시나리오를 기반으로 한 기후 모델을 이용하여 기온, 강수 등과 같은 기후자료를 전망하는데 이 과정에서 여러 가지 불확실성이 발생하게 된다(Maurer, 2007).

따라서, GCM을 통해 생산된 수문자료의 검증작업이 필요하며, 본 연구에서는 가뭄지수 선정에 사용되는 강수자료의 신뢰성 검증을 위해 한강, 낙동강, 금강, 영산강 유역의 대표관측소인 서울,

Table 2. Representative Concentration Pathways(RCP) in the year 2100

	Radiation Force	CO ₂ equivalent concentration(ppm)	Rate of change in radiative forcing	Comparison with SRES(ppm)
RCP8.5	8.5 W/m²	1350	Rising	A2(830) ~ A1FI(970)
RCP6	~6 W/m ²	850	Stabilizing	B2(600) ~ A1B(720)
RCP4.5	~4.5 W/m ²	650	Stabilizing	B1(550)
RCP2.6	~2.6 W/m ²	450	Declining	-

Table 3. Summary of Climate Models Used in this Study

Climate Change Scenario	GCM(Agency: Version)	Country	Resolution(km)	
			Atmosphere	Ocean
AR4	CNRM: CM3	France	128×64	180×170
	CSIRO: MK3	Australia	192×96	192×189
	CONS: ECHO-G	Germany/Korea	96×48	128×117
	UKMO: HADCM3	UK	96×73	288×144
AR5	HadGEM3-RA	UK

Fig. 1. Comparisons Between Observed(KMA) and Simulated(A2, RCP Scenario Based GCMs) Monthly Precipitation for the Baseline Period (1976 ~ 2010)

대구, 대전, 광주관측소를 대상으로 과거 관측자료가 존재하는 기준기간(1976~2010년, Baseline period)에 대해 관측자료와 GCM에 의한 모의자료를 월별로 비교하였다. Fig. 1은 기준기간(1976~2010년)을 대상으로 월 강수량을 비교한 결과로서, 관측자료와 모의자료의 연평균 강수량은 유사하게 나타났지만 여름철 강수량은 관측자료와 모의된 자료가 상당한 차이를 나타내고 있다.

서울관측소의 경우 RCP8.5 시나리오의 8월 강수량이 관측자료에 비해 87.75mm 높게 나타났다. 또한, 대구 관측소의 경우에도 RCP8.5 시나리오는 관측자료와 유사하게 나타났으며, A2 시나리오의 7~8월 모의자료도 각각 147.12mm, 120.62mm로서 관측자료에 비해 높게 나타났다. 대전과 광주관측소 역시 관측자료에 비해 7~8월 강수량이 높게 나타났다.

기준기간(baseline period)에 대한 관측자료와 GCM 모의자료를 검토한 결과, GCM에 의한 여름철(6월~8월) 강수량에 차이가 크게 발생하였으며 이는 태풍과 같은 이상치가 기후변화 시나리오

에 적절히 반영되지 못한 이유가 하나의 원인 일수도 있다.

하지만 가뭄이 주로 발생하는 겨울과 봄철의 강수량은 관측치와 모의치가 여름철에 비해서 상대적으로 잘 일치하는 것으로 나타났다. 따라서 GCM에 의해 생산된 기상자료는 홍수보다 가뭄연구에 활용하는데 더욱 유리한 것으로 평가되었다.

Figs. 2 and 3은 과거 대비 미래 연평균 강수량의 계절별 변화를 분석한 결과로서 과거 대비 미래 S1~S3기간의 계절별 강수량 변화량을 중권역 단위로 나타내었다. Table 4는 한강, 낙동강, 금강, 섬진강, 영산강 유역에 대한 계절별 강수량과 변화량을 나타내고 있다.

과거기간의 관측강수량을 분석한 결과, 계절별 강수량의 경우 봄철(3,4,5월) 약 240mm, 여름철(6,7,8월) 약 740mm, 가을철(9,10,11월) 약 250mm, 겨울철(12,1,2월) 약 100mm로 여름철 강수량이 타 계절에 비해 높게 나타났다. 유역별 강수량의 경우 중부지방에 위치한 한강, 낙동강, 금강유역에 비해 섬진강, 영산강

Fig. 2. Spatial Variation of Seasonal Precipitation Between Observed(1976-2010) and Projected (4 GCMs Averaged S1, S2, S3 Period) Data Based on A2 Scenario

Fig. 3. Spatial Variation of Seasonal Precipitation Between Observed(1976-2010) and HadGEM3-RA Projected (S1, S2, S3 Period) Data Based on RCP 8.5 Scenario

Table 4. Spatial Variation of Seasonal Precipitation Between Observed(1976-2010) and Projected(2011-2100, S1, S2, S3) Data Based on Different Scenario

Scenario	Season	Basin (River)	Observed Precipitation	Projected Precipitation						Ave. diff. (%)
			mm	S1		S2		S3		
				mm	Diff.(%)	mm	Diff.(%)	mm	Diff.(%)	
A2 (4 GCMs Averaged)	Spring	Han	219.22	229.64	4.76	221.87	1.21	228.38	4.18	3.38
		Nakdong	227.39	236.88	4.18	230.63	1.43	231.47	1.80	2.47
		Geum	215.90	228.60	5.88	220.80	2.27	223.42	3.48	3.88
		Sumjin	267.93	270.13	0.82	263.56	-1.63	263.91	-1.50	-0.77
		Yeongsan	263.59	261.36	-0.85	255.74	-2.98	256.41	-2.73	-2.18
	Summer	Han	776.43	836.71	7.76	879.37	13.26	851.75	9.70	10.24
		Nakdong	679.49	716.77	5.49	737.89	8.59	739.76	8.87	7.65
		Geum	720.85	793.31	10.05	829.10	15.02	812.93	12.77	12.61
		Sumjin	771.61	864.63	12.05	885.45	14.75	893.92	15.85	14.22
		Yeongsan	743.29	820.59	10.40	836.22	12.50	845.98	13.82	12.24
	Autumn	Han	267.89	232.93	-13.05	236.55	-11.70	261.59	-2.35	-9.03
		Nakdong	228.95	209.04	-8.69	212.55	-7.16	233.97	2.19	-4.55
		Geum	234.70	208.74	-11.06	210.92	-10.13	231.08	-1.54	-7.58
		Sumjin	257.75	227.79	-11.62	229.39	-11.00	252.47	-2.05	-8.23
		Yeongsan	247.56	228.41	-7.74	231.30	-6.57	252.84	2.13	-4.06
	Winter	Han	82.96	88.99	7.27	83.42	0.55	90.62	9.24	5.69
		Nakdong	78.31	90.89	16.07	84.79	8.28	91.13	16.37	13.57
		Geum	92.02	101.17	9.95	93.84	1.98	100.99	9.75	7.22
		Sumjin	109.51	119.27	8.91	109.73	0.20	116.70	6.57	5.23
		Yeongsan	114.87	126.47	10.09	117.46	2.25	124.26	8.17	6.84
RCP8.5	Spring	Han	219.22	256.22	16.88	258.18	17.77	299.02	36.41	23.69
		Nakdong	227.39	281.70	23.88	295.02	29.74	332.49	46.22	33.28
		Geum	215.90	266.02	23.21	299.26	38.61	320.17	48.29	36.70
		Sumjin	267.93	329.81	23.10	345.16	28.82	407.67	52.16	34.69
		Yeongsan	263.59	313.20	18.82	332.75	26.24	396.17	50.30	31.78
	Summer	Han	776.43	772.10	-0.56	960.50	23.71	806.35	3.85	9.00
		Nakdong	679.49	711.89	4.77	878.32	29.26	752.36	10.72	14.92
		Geum	720.85	797.07	10.57	915.43	26.99	780.04	8.21	15.26
		Sumjin	771.61	793.88	2.89	1065.95	38.15	957.71	24.12	21.72
		Yeongsan	743.29	758.16	2.00	1001.51	34.74	923.15	24.20	20.31
	Autumn	Han	267.89	259.25	-3.23	340.11	26.96	275.50	2.84	8.86
		Nakdong	228.95	216.42	-5.47	277.95	21.40	235.35	2.80	6.24
		Geum	234.70	223.90	-4.60	304.04	29.55	263.32	12.20	12.38
		Sumjin	257.75	253.48	-1.66	307.88	19.45	290.41	12.67	10.15
		Yeongsan	247.56	240.62	-2.80	286.04	15.55	288.50	16.54	9.76
	Winter	Han	82.96	94.27	13.64	128.44	54.82	174.26	110.06	59.51
		Nakdong	78.31	81.66	4.28	114.52	46.24	159.07	103.13	51.22
		Geum	92.02	93.77	1.90	134.95	46.65	184.13	100.10	49.55
		Sumjin	109.51	116.64	6.51	150.40	37.33	211.19	92.85	45.56
		Yeongsan	114.87	121.49	5.76	148.91	29.63	207.79	80.89	38.76

유역의 강수량이 높게 나타났다. 특히, 한강유역의 경우 여름과 가을철 강수량이 타 유역에 비해 높게 나타났다.

A2 시나리오를 이용한 분석결과, 봄, 여름, 겨울철 강수량은 증가하였지만 가을철 강수량은 감소하는 것으로 나타났다. 유역별로 살펴보면 과거에 비하여 한강 9.03%, 낙동강 4.55%, 금강

7.58%, 섬진강 8.23%, 영산강 유역은 4.06% 감소하는 것으로 나타났다.

RCP8.5 시나리오를 이용한 분석결과, 과거에 비하여 미래에는 모든 계절의 강수량이 증가하는 것으로 나타났으며, 봄철 강수량의 경우 약 32%, 겨울철 강수량의 경우 약 50% 과거에 비해 크게

증가하고 있으며 여름철 강수량의 경우 약 15%, 가을철 강수량의 경우 약 10% 과거에 비해 다소 증가하였다.

A2 및 RCP8.5 시나리오를 통해 생산된 강수량 자료를 검토한 결과, 지역별로 차이는 있지만 여름과 가을철 강수량은 과거에 비해 큰 증감추세를 나타내지 않았지만 봄과, 겨울철 강수량은 과거에 비해 크게 증가하는 것으로 전망되고 있다.

3. 가뭄지수 및 가뭄우심도 작성

3.1 SPI (Standardized Precipitation Index)

본 연구에서 가뭄을 정량적으로 분석하기 위하여 대표적인 가뭄 지수인 SPI를 이용하였다. SPI는 강수량만을 이용하여 가뭄의 심도를 추정할 수 있는 가뭄지수로서 지수산정을 위한 강수의 계산 시간단위를 1개월부터 3, 6, 12, 24개월 등과 같이 자유롭게

설정하고, 시간단위별로 강수 부족량을 산정하여 단기가뭄 및 장기 가뭄을 동시에 평가할 수 있는 장점이 있다. Mckee 등(1993)은 SPI로부터 얻어지는 가뭄심도를 정의하기 위해 Table 5와 같은 SPI 가뭄 분류를 제시하였다.

SPI를 산정하기 위하여 기상청 산하 54개 관측소의 과거 기상청 관측자료(1976~2010년) 및 GCM에 의한 미래전망자료(2011~2099년)를 이용하였고, 지속기간 6개월의 강수량자료를 활용하여 산정한 SPI(6)을 연구에 활용하였다.

3.2 가뭄우심도(Potential Drought Hazard Map) 작성

기후변화에 따른 가뭄우심지역(Potential Drought Hazard Area)의 공간분포를 추정하기 위해 가뭄빈도해석을 통한 가뭄우심도(Potential Drought Hazard Map)를 작성하였으며 Fig. 4와 같은 절차에 의해 수행되었다. 본 연구에서 개발하고자 하는 가뭄우심도란 가뭄이 발생할 수 있는 잠재위험도를 평가함에 있어 물공급 능력 및 수자원공급시설을 고려한 평가가 아닌, 일정기간 동안의 강수부족이 발생하여 물 부족을 유발할 가능성이 있는 기상학적 가뭄에 의한 잠재 피해가능 지역을 추정하는데 그 목적을 두고 있다. 즉, 가뭄의 반대 개념인 홍수의 관점에서 볼 때, 확률강우량도와 같은 개념을 생각할 수 있으며 수문학적 가뭄 또는 농업적 가뭄 피해지역이 아닌 강수부족에 의한 기상학적 가뭄이 빈번하게 발생하여 잠재 가뭄피해 가능성이 큰 지역을 의미하게 된다.(Lee

Table 5. Drought Severity Classification by SPI

SPI Range	Moisture Condition	SPI Range	Moisture Condition
More than 2.00	Extremely Wet	-1.00 ~ -1.49	Moderately Dry
1.50 ~ 1.99	Very Wet	-1.50 ~ -1.99	Severely Dry
1.00 ~ 1.49	Moderately Wet	Less than -2.00	Extremely Dry
-0.99 ~ 0.99	Near Normal

Fig. 4. Process for Derivation of SDF Curve and Potential Drought Hazard Map Using Drought Frequency Analysis

et al., 2012b)

남한의 가뭄우심지역을 추정하기 위하여 기상청 산하 54개 기상 관측소의 강수량자료를 이용하여 월단위 SPI(6)를 산정하고 산정된 SPI(6)를 지속기간 1~12개월까지 연속된 최대가뭄심도를 갖는 계열로 재구성한다. 미래의 경우 과거의 자료기록 연수와 비슷한 30년 단위로 구분하여 구성된 시계열을 바탕으로 별도의 빈도해석을 실시하였다. 이와 같은 과정으로 통하여 과거자료와의 객관적인 비교가 가능하도록 하였다.

두 번째로, 빈도해석을 위한 최적확률분포형을 선정하게 되며, Gamma, GEV(General Extreme Value), Gumbel, Log-Gumbel,

Lognormal, Log-Pearson type III, Normal, Pearson type III, Weibull, Wakeby 분포형 등의 확률분포형을 대상으로 적합도 검정을 실시하였고 Kolmogorov-Smirnov를 이용한 적합도 검정 (유의수준 5%)을 실시하였다. 그 결과 가장 높은 순위의 적합성을 나타낸 GEV(General Extreme Value) 분포형을 가뭄빈도해석을 위한 최적확률 분포형으로 선정하였다.

세 번째로 지속기간별 재현기간별 빈도해석을 통해 SDF(Severity-Duration-Frequency) 곡선을 유도한 후 54개 기상관측소별로 산정된 값을 역거리가중법(IDW, Inverse Distance Weight)을 이용하여 공간분포를 실시하였다.

마지막으로 남한지역 전체에 대해서 공간분포된 가뭄심도를

Fig. 5. Comparison of the Drought Severity Between the Observed(Black Dashed Line, KMA) and GCMs-projected(S1, S2, S3) SDF Relationship (200 years Return Period, 6 months Duration) at 4 Different Weather Stations

Table 6. Comparison of the Drought Severity Between the Observed (1976-2010) and GCM-projected(S1, S2, S3) SDF Relationship (200 years Return Period, 6 months Duration) at 4 Different Weather Stations

Gauge	Observed Severity	GCMs	S1		S2		S3		Ave. Diff. (%)
			Severity	Diff.(%)	Severity	Diff.(%)	Severity	Diff.(%)	
Seoul	-1.72	A2-4GCMs Averaged	-2.31	-34.13	-2.04	-18.60	-1.82	-5.68	-19.47
		RCP8.5-HadGEM3_RA	-2.24	-29.94	-2.27	-31.76	-1.50	12.61	-16.36
Daegu	-2.44	A2-4GCMs Averaged	-2.30	5.81	-2.35	3.93	-2.12	13.48	7.74
		RCP8.5-HadGEM3_RA	-3.31	-35.33	-1.65	32.52	-1.74	28.74	8.65
Daejeon	-2.42	A2-4GCMs Averaged	-2.29	5.35	-2.26	6.91	-2.28	5.77	6.01
		RCP8.5-HadGEM3_RA	-2.46	-1.36	-1.82	24.79	-3.46	-43.00	-6.53
Gwangju	-2.21	A2-4GCMs Averaged	-2.03	7.94	-2.28	-3.41	-1.92	12.99	5.84
		RCP8.5-HadGEM3_RA	-3.22	-45.79	-1.43	35.28	-1.89	14.59	1.36

* Observed Severity(1976~2010), S1(2011~2040), S2(2041~2070), S3(2071~2099)

** Difference(%) : Percentage change in drought severity between past(S0) and future period(S1, S2, S3)

중권역 단위로 표출하여 최종적으로 중권역별 가뭄우심도를 작성하였다.

3.3. SDF(Severity-Duration-Frequency) 곡선의 유도

Fig. 5는 관측자료와 A2 시나리오를 적용한 4개 GCM과 RCP8.5 시나리오를 적용한 HadGEM3-RA 모델을 통해 작성된 서울, 대구, 대전, 광주관측소의 SDF 곡선을 이용하여 재현기간 200년, 지속기간 6개월의 가뭄심도를 비교하였으며, Table 6과 같이 SDF곡선을 이용하여 재현기간 200년, 지속기간 6개월의 가뭄심도를 관측소별, 기간별로 비교하여 나타내었다.

서울 관측소의 경우 S1(2011~2040년) 기간에서는 A2(-2.31, 34.13%)와 RCP8.5(-2.24, 29.94%) 시나리오에서 과거(-1.72)에 비해 가뭄이 심화되는 것으로 나타났다. S2(2041~2070년) 기간에서는 A2(-2.04, 18.60%), RCP8.5(-2.27, 31.76%) 시나리오 모두 가뭄이 심화되었으며 S3(2071~2099년)기간에서는 RCP8.5(-1.50, 12.61%) 시나리오를 제외한 A2(-1.82, 5.68%) 시나리오가 가뭄이 심화되었다. 과거 대비 미래 S1~S3 기간의 평균가뭄심도의 증감량을 검토한 결과, 두 시나리오 모두 과거에 비해 각각 19.47%, 16.36% 가뭄이 심화되는 것으로 분석되었다.

대구 관측소의 경우 S1(2011~2040년) 기간에서는 RCP8.5(-3.31, 35.33%)를 제외한 A2(-2.30, 5.81%), 시나리오가 과거(-2.44)에 비해 가뭄이 완화되었고, S2(2041~2070년)기간에서는 모든 시나리오에서 가뭄이 완화되었으며, 마찬가지로 S3(2071~2099년)기간에서도 모든 시나리오에서 가뭄이 완화되었다. 평균가뭄심도의 증감량을 검토한 결과 두 시나리오 모두 과거에 비해 각각 7.74%, 8.65% 가뭄이 완화되는 것으로 전망되었다.

대전 관측소의 경우 S1(2011~2040년) 기간에서는 RCP8.5(-2.46, 1.36%)를 제외한 A2(-2.29, 5.35%) 시나리오가 과거(-2.42)에

비해 가뭄이 완화되었다. S2(2041~2070년)기간에서는 A2(-2.26, 6.91%), RCP8.5(-1.82, 24.79%) 모든 시나리오에서 심화되었으며, S3(2071~2099년)기간에서는 RCP8.5(-3.46, 43.00%)를 제외한 A2(-2.28, 5.77%) 에서 가뭄이 완화되었다. 평균가뭄심도의 증감량을 검토한 결과, RCP8.5 시나리오의 경우 6.53% 가뭄이 심화되었으며 A2시나리오에서는 6.01% 가뭄이 완화되었다.

광주 관측소의 경우 S1(2011~2040년) 기간에서 RCP8.5(-3.22, 45.73%)를 제외한 A2(-2.03, 7.94%) 과거(-2.21)에 비해 가뭄이 완화되었다. S2(2041~2070년)기간에서는 A2(-2.28, 3.41%)를 제외한 RCP8.5(-1.43, 35.28%) 가뭄이 완화되었다. S1~S3 기간의 평균가뭄심도의 증감량을 검토한 결과 두 시나리오 모두 과거에 비해 각각 5.84%, 1.36% 가뭄이 완화되는 것으로 전망되었다.

4. 가뭄의 공간적 분포 특성 변화

4.1 A2 시나리오 기반의 가뭄우심도

Fig. 6은 A2 시나리오를 적용한 4개 GCM을 통해 작성된 가뭄우심도를 나타내고 있다. 작성된 가뭄우심도는 재현기간 200년, 지속기간 6개월에 해당하며 과거와 미래(S1~S3)로 구분하여 나타내었다.

관측자료에 의한 가뭄우심도를 작성한 결과, 과거 한반도는 남부지방인 영산강 및 낙동강유역에서 심한가뭄과 극심한 가뭄이 자주 나타났던 것으로 분석되었다. 중부지방에 위치한 한강, 한강동해-서해, 삼척천 유역에서 가뭄심도가 (-2.0)이상인 심한가뭄으로 나타난 반면 낙동강, 낙동강동해, 영산강 유역에서는 가뭄심도가 (-2.0)이하의 극심한 가뭄을 나타내었다. 특히, 섬진강과 만경-동진강 유역에서는 (-2.4)이하로 매우 극심한 가뭄심도가 나타났다.

A2 시나리오를 적용한 4개 GCM을 통해 작성된 미래의 가뭄우심지역은 다음과 같이 나타났다.

Fig. 6. Projected Change in Potential Drought Hazard area Between Observed (1976-2010) and Projected Period (S1, S2, S3) by 4 GCMs (A2 Scenario, Return Period: 200 years, Duration: 6 months)

CNRM:CM3 모델을 이용한 가뭄우심도 작성결과, S1(2011~2040년)기간에서는 태화강(-2.09, 4.47%), 회야수영강(-2.15, 15.68%) 유역에서 과거에 비해 가뭄이 심화되었다. S2(2041~2070년)기간에서는 낙동강, 낙동강 동해, 금강, 만경·동진강, 섬진강 유역을 제외한 전 유역에서 가뭄이 심화되었는데 한강(-2.46, 36.55%), 안성천(-2.60, 43.06%), 한강서해(-2.51, 56.61%), 한강동해(-2.63, 36.59%), 회야수영강(-2.47, 32.90%), 삼교천(-2.49, 28.43%) 유역에서 가뭄이 크게 심화되었다. S3(2071~2099년)기간에서는 태화강(-2.22, 11.37%), 회야수영강(-2.31, 23.90%) 유역에서 가뭄이 심화되는 것으로 나타났다.

CSIRO:MK3 모델을 이용한 가뭄우심도 작성결과, S1(2011~2040년)기간에서는 섬진강 유역을 제외한 전 유역에서 과거에 비해 가뭄이 심화되었는데 한강(-2.59, 43.75%), 안성천(-2.62, 43.80%), 한강서해(-2.54, 58.79%), 태화강(-2.82, 41.20%), 회야수영강(-2.90, 55.72%) 유역에서 가뭄이 크게 심화되었다. S2(2041~2070년)기간에서는 태화강(-2.45, 22.63%), 회야수영강(-2.58, 38.70%), 낙동강남해(-2.82, 28.42%) 유역에서 가뭄이

크게 심화되었으며 S3(2071~2099년)기간에서는 회야수영강(-2.00, 7.18%) 유역을 제외한 전 유역에서 과거에 비해 가뭄이 완화되는 것으로 나타났다.

CONS:ECHOG 모델을 이용한 가뭄우심도 작성결과, S1(2011~2040년)기간에서는 한강(-2.32, 28.77%), 안성천(-2.33, 28.05%), 한강서해(-2.25, 49.90%), 회야수영강(-2.28, 22.48%) 유역에서 과거에 비해 가뭄이 심화되었다. S2(2041~2070년) 및 S3(2071~2099년)기간에서는 전 유역에서 과거에 비해 가뭄이 심화되는데 S2(2041~2070년)기간에서는 안성천(-2.76, 51.66%), 한강서해(-2.61, 63.27%), 태화강(-3.16, 57.96%), 회야수영강(-3.39, 81.93%), 낙동강 동해(-3.58, 63.12%), 삼교천(-2.94, 51.81%) 유역, S3(2071~2099년)기간에서는 한강(-2.59, 43.86%), 한강서해(-47.73, 47.73%), 한강동해(-2.69, 39.90%), 동강동해(-2.61, 39.95%) 유역에서 가뭄이 크게 심화되었다. CONS:ECHOG 모델을 이용한 가뭄우심도 작성결과 타 GCM에 비해 가뭄이 가장 극심하게 나타나는 것으로 분석되었다.

UKMO:HADCM 모델을 이용한 가뭄우심도 작성결과, S1(2011~2040년)기간에서는 태화강(-3.02, 51.21%), 회야수영강

Fig. 7. Projected Change in Potential Drought Hazard area Between Observed (1976-2010) and GCMs Derived Period (S1, S2, S3) Based on A2 and RCP8.5 Climate Change Scenario (Return Period: 200 years, Duration: 6 months)

(-3.10, 66.39%), 낙동강남해(-3.12, 41.81%) 유역에서 과거에 비해 가뭄이 크게 심화되었다. S2(2041~2070년)기간에서는 한강서해(-1.69, 5.89%), 회야수영강(-1.96, 5.04%) 유역을 제외한 전 유역에서 과거에 비해 가뭄이 완화되었다. S3(2071~2099

년)기간에서는 한강동해(-2.69, 39.72%), 형산강(-3.02, 33.26%), 태화강(-3.21, 60.76%), 회야수영강(-3.16, 69.89%), 낙동강동해(-3.09, 34.77%) 유역에서 가뭄이 크게 심화되는 것으로 전망되었다.

Table 7. Percentage Changes of Drought Severity for 20 Large Basins of Korea Between Observed and GCM Derived PDHM (A2 & RCP8.5 Scenario, Return Period: 200 years, Duration: 6 months)

Scenario	Basin name	Observed Severity	S1		S2		S3		Ave. Diff. (%)
			Severity	Diff.(%)	Severity	Diff.(%)	Severity	Diff.(%)	
A2	Han river	-1.80	-2.17	-20.74	-2.13	-18.35	-1.86	-3.49	-14.19
	Anseong stream	-1.82	-2.16	-18.70	-2.21	-21.52	-1.76	3.08	-12.38
	West of han river	-1.60	-2.09	-30.39	-2.15	-34.45	-1.88	-17.65	-27.50
	East of han river	-1.93	-1.98	-2.57	-2.23	-15.70	-2.08	-8.27	-8.85
	Nakdong river	-2.29	-2.27	0.59	-2.30	-0.77	-2.18	4.81	1.54
	Hyeongsan river	-2.27	-2.38	-5.06	-2.33	-2.81	-2.40	-5.65	-4.51
	Tachwa river	-2.00	-2.55	-27.52	-2.51	-25.70	-2.48	-24.02	-25.75
	Hoeya, Sooyeong	-1.86	-2.61	-40.07	-2.60	-39.64	-2.52	-35.23	-38.31
	East of nakdong river	-2.29	-2.28	0.69	-2.26	1.44	-2.39	-4.19	-0.69
	South of nakdong river	-2.20	-2.53	-15.04	-2.68	-21.80	-2.30	-4.80	-13.88
	Geum river	-2.19	-2.25	-2.71	-2.23	-1.95	-2.09	4.61	-0.02
	Sapgyo stream	-1.94	-2.21	-14.13	-2.27	-17.25	-1.80	7.01	-8.12
	West of geum river	-1.97	-2.22	-12.90	-2.28	-16.12	-1.77	10.10	-6.31
	Mangyeong, Dongjin	-2.37	-2.19	7.61	-2.24	5.13	-2.04	13.95	8.90
	Sumjin river	-2.43	-2.15	11.50	-2.35	3.25	-1.95	19.87	11.54
	South of sumjin river	-2.25	-2.20	2.32	-2.49	-10.78	-1.93	13.90	1.81
	Yeongsan river	-2.25	-2.12	6.02	-2.34	-3.78	-1.89	16.00	6.08
	Tamjin river	-2.28	-2.17	4.91	-2.41	-5.38	-1.81	20.99	6.84
	South of yeongsan river	-2.14	-2.14	-0.18	-2.39	-12.02	-1.81	15.24	1.01
	West of yeongsan river	-2.23	-2.14	4.01	-2.32	-4.18	-1.90	14.56	4.80
RCP 8.5	Han river	-1.80	-2.25	-25.09	-1.81	-0.46	-2.24	-24.35	-16.63
	Anseong stream	-1.82	-2.23	-22.54	-1.81	0.25	-2.10	-15.56	-12.62
	West of han river	-1.60	-2.45	-53.35	-2.14	-33.65	-1.89	-17.85	-34.95
	East of han river	-1.93	-2.28	-18.62	-1.74	9.74	-2.15	-11.88	-6.92
	Nakdong river	-2.29	-2.72	-18.80	-1.72	24.93	-1.81	20.97	9.03
	Hyeongsan river	-2.27	-3.35	-47.82	-1.77	21.90	-1.63	28.12	0.73
	Tachwa river	-2.00	-2.97	-48.80	-1.80	10.06	-1.70	15.03	-7.90
	Hoeya, Sooyeong	-1.86	-2.94	-57.73	-1.85	0.81	-1.80	3.26	-17.88
	East of nakdong river	-2.29	-2.77	-20.95	-1.60	30.19	-1.71	25.56	11.60
	South of nakdong river	-2.20	-2.82	-28.47	-1.83	16.82	-1.60	27.10	5.15
	Geum river	-2.19	-2.34	-6.99	-1.79	18.37	-2.43	-11.01	0.12
	Sapgyo stream	-1.94	-2.14	-10.43	-1.78	8.05	-2.26	-16.39	-6.26
	West of geum river	-1.97	-2.03	-3.45	-1.86	5.25	-2.08	-5.55	-1.25
	Mangyeong, Dongjin	-2.37	-2.63	-10.98	-1.96	17.15	-2.05	13.48	6.55
	Sumjin river	-2.43	-3.07	-26.51	-1.72	29.23	-1.89	22.17	8.30
	South of sumjin river	-2.25	-2.86	-27.06	-1.68	25.14	-1.75	21.91	6.66
	Yeongsan river	-2.25	-2.90	-28.82	-1.64	27.25	-1.80	20.22	6.22
	Tamjin river	-2.28	-2.62	-14.88	-1.47	35.65	-1.71	24.96	15.24
	South of yeongsan river	-2.14	-2.41	-12.65	-1.76	17.50	-1.38	35.48	13.44
	West of yeongsan river	-2.23	-2.64	-18.57	-1.81	18.75	-1.73	22.31	7.50

* Observed Severity(1976 ~ 2010), S1(2011 ~ 2040yr), S2(2041 ~ 2070yr), S3(2071 ~ 2099yr)

** Difference(%) : Percentage change in drought severity between past(S0) and future period(S1, S2, S3)

4.2 A2 및 RCP 8.5 시나리오 기반의 미래 가뭄우심지역 비교

Fig. 7은 A2와 RCP8.5 시나리오를 적용한 GCM을 통해 작성된 가뭄우심도로써, 동일한 지속기간(6개월)과 재현기간(200년)에 대한 과거 대비 미래 가뭄우심지역의 공간적 분포 및 가뭄심도의 증감량을 비교하고 있다. A2 시나리오의 경우 4개 GCM을 앙상블한 평균자료를 이용하여 과거와 비교하였다. 특히, 2013년 발간된 IPCC 5차 평가보고서와 관련한 새로운 국제 표준 온실가스 시나리오인 RCP8.5시나리오를 적용한 HadGEM3-RA 모델을 통해 전망된 미래의 가뭄우심지역과도 함께 비교하였다.

A2 시나리오에 의한 가뭄우심도의 경우, S1(2011~2040년)기간에서는 한강(-2.17, 20.71%), 안성천(-2.16, 18.70%), 한강서해(-2.09, 30.39%), 태화강(-2.55, 27.52%), 회야수영강(-2.61, 40.07%) 유역, S2(2041~2070년)기간에서는 안성천(-2.21, 21.52%), 한강서해(-2.15, 34.45%), 태화강(-2.51, 25.70%), 회야수영강(-2.60, 39.64%), 낙동강남해(-2.68, 21.80%) 유역, S3(2071~2099년)기간에서는 한강서해(-1.88, 17.65%), 태화강(-2.48, 24.02%), 회야수영강(-2.52, 35.23%) 유역에서 과거에 비해 가뭄이 크게 심화되었다.

RCP8.5 시나리오의 경우, S2(2041~2070년) 및 S3(2071~2099년)기간에 비해 S1(2011~2040년)기간의 가뭄심도가 매우 낮게 나타났는데 한강서해(-2.45, 53.35%), 형산강(-3.35, 47.82%), 태화강(-2.97, 48.80%), 회야수영강(-2.94, 57.73%) 유역에서는 과거에 비해 약 45% 이상 가뭄이 크게 심화되었다. 또한, 남부지방에 위치한 낙동강남해, 섬진강, 섬진강남해, 영산강 유역에서 가뭄이 크게 심화되었다. S2(2041~2070년)기간에서는 한강(-1.81, 0.43%), 한강서해(-2.14, 33.65%) 유역을 제외한 전 유역에서 과거에 비해 가뭄이 완화되었다. S3(2071~2099년)기간에서는 중부지방에 위치한 한강(-2.24, 24.35%), 안성천(-2.10, 15.56%), 한강서해(-1.89, 17.85%) 유역 및 삼교천(-2.26, 16.39%) 유역에서 과거에 비해 가뭄이 심화되었다.

A2 및 RCP 8.5 시나리오를 통해 작성된 미래의 가뭄우심도를 검토한 결과, 두 시나리오 모두 공통적으로 과거 가뭄우심지역으로 평가된 낙동강 유역은 물론 태화강, 회야수영강, 낙동강남해 유역에서 가뭄이 크게 심화되는 것으로 분석되었다. 특히, 중부지방에 위치한 한강, 안성천, 한강서해, 한강동해 유역 또한 가뭄이 크게 심화될 것으로 분석되고 있어 미래 가뭄이 한반도의 남부에서 중부지방으로 이동될 것으로 예측되었다.

5. 결론

본 연구에서는 남한지역을 대상으로 과거 관측자료와 기후변화

시나리오를 반영한 SPI를 이용하여 미래가뭄을 시공간적으로 전망하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) A2 및 RCP8.5 시나리오를 통해 생산된 강수량을 월별, 계절별로 검토한 결과, 월별 강수량의 경우 여름에 해당하는 7~8월 강수량이 과거에 비해 크게 증가하는 것으로 나타났다. 5대강 유역에 대한 계절별 강수량의 경우 여름과 가을철 강수량은 과거에 비해 큰 증감추세를 나타내지 않았지만 봄과 겨울철 강수량은 과거에 비해 증가하는 것으로 나타났다. 특히, RCP8.5 시나리오의 경우 봄철, 겨울철 강수량이 각각 32%, 50% 크게 증가하는 것으로 나타났다.
- (2) 과거 관측자료를 이용한 가뭄빈도해석을 통해 유도된 4개 기상관측소의 재현기간별, 지속기간별 가뭄심도를 추정한 결과, 서울관측소에 비해 대전, 대구 관측소의 가뭄심도가 낮게 나타났다. 반면, 미래 가뭄심도를 분석한 결과에서는 대구, 대전, 광주관측소는 약 10% 미만으로 가뭄 심도변화가 크게 나타나지 않았지만 서울관측소에서는 약 20% 정도로 미래에 가뭄이 심화될 것으로 나타났다. 분석결과를 통해 한강유역의 가뭄이 과거에 비해 크게 심화될 것으로 전망되었다.
- (3) 가뭄빈도해석을 통해 작성된 관측소별 SDF곡선을 이용하여 가뭄우심도를 추정한 결과, 과거의 경우 가뭄우심지역으로 평가된 낙동강, 섬진강, 영산강 유역의 가뭄심도가 (-2.0)이하로 극한가뭄에 해당하는 가뭄이 나타났다. 미래의 경우 A2 시나리오에서는 과거에 비해 낙동강 동해 유역에도 심한가뭄이 확장되는 것으로 나타났으며 RCP8.5 시나리오에서는 중부지역에 위치한 한강유역의 가뭄이 심화될 것으로 예측되었다.
- (4) A2 및 RCP8.5 기후변화 시나리오와 다양한 GCMs를 이용하여 전망된 미래 기후자료를 이용하여 미래 한반도의 가뭄을 전망한 결과, 기후변화 시나리오별로 가뭄의 시공간적 분포에 많은 차이를 보였으며, 동일한 기후변화 시나리오에서도 GCM 별로 다소의 차이를 나타내는 것으로 나타났다.

이상의 연구를 바탕으로 미래가뭄은 남부지방에 국한된 것이 아닌 한반도 전역에 걸쳐 위험성을 갖는 것으로 분석되었으며 연구결과를 통해 가뭄우심지역에 대한 평가 및 대책 수립이 필요한 것으로 판단되었다.

감사의글

본 연구는 기상청 기후변화 감시예측 및 국가정책 지원 강화 사업의 [한반도/동아시아 가뭄전망 대응기술 개발(CATER 2012-

3100)]과제의 지원 및 한국건설교통기술평가원 건설기술혁신사업의 [기후변화에 의한 수문영향분석과 전망(09-기술혁신C01)]과제의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

References

- Bae, D. H., Jung, I. W., Lee, B. J. and Lee, M. H. (2011). "Future korean water resources projection considering uncertainty of GCMs and hydrological models." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 44, No. 5, pp. 389-406 (in Korean).
- Blenkinsop, S. and Fowler, H. J. (2007). "Changes in drought frequency, severity and duration for the british isles projected by the PRUDENCE regional climate models." *Journal of Hydrology*, Vol. 342, pp. 50-71.
- Jung, I. W. and Chang, H. J. (2011). "Climate change impacts on spatial patterns in drought risk in the Willamette River Basin, Oregon, USA." *Theoretical and Applied Climatology*, Vol. 108, No. 3-4, pp. 355-371.
- Khadr, M. and Schlenkhoff, A. (2012). "Meteorological drought forecasting using stochastic models." *New York University Journal of International Law and Politics*, Vol. 44, No. 2, p. 686.
- Kim, C. J., Park, M. J. and Lee, J. H. (2013). "Analysis of climate change impacts on the spatial and frequency patterns of drought using a potential drought hazard mapping approach." *International Journal of Climatology*, Published in Online, DOI=10.1002/joc.3666
- Kim, G. S. and Lee, J. W. (2011). "Evaluation of drought Indices using the drought records." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 44, No. 8, pp. 689-652 (in Korean).
- Lee, J. H., Cho, K. J., Kim, C. J. and Park, M. J. (2012a). "Analysis on the spatio-temporal distribution of drought using potential drought hazard map." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 45, No. 10, pp. 983-995 (in Korean).
- Lee, J. H. and Kim, C. J. (2011). "Derivation of drought severity-duration-frequency curves using drought frequency analysis." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 44, No. 11, pp. 889-902 (in Korean).
- Lee, J. H., Seo, J. W. and Kim, C. J. (2012b). "Analysis on trends, periodicities and frequencies of korean drought using drought indices." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 45, No. 1, pp. 75-89 (in Korean).
- Loukas, A., Vasiliades, L. and Tzabiras, J. (2007). "Evaluation of climate change on drought impulses in thessaly, greece." *European Water*, Issue 17/18, pp. 17-28.
- Maurer, E. P. (2007). "Uncertainty in hydrologic impacts of climate change in the sierra nevada, california, under two emissions scenarios." *Climatic Change*, Vol. 82, No. 3-4, pp. 309-325.
- McKee, T. B., Doesken, N. J. and Kleist, J. (1993). "The relationship of drought frequency and duration of time scales." *8th Conference on Applied Climatology*, Jan., Anaheim, CA, pp. 179-184.
- So, B. J., Kim, M. J. and Kwon, H. H. (2012). "Evaluation and forecast of KMA's Next generation climate change scenario-focusing on KMA's RCP scenario." *Water for Future*, Vol. 45, No. 8, pp. 56-70 (in Korean).