

기후변화가 한반도 가뭄에 미치는 영향평가

Assessment of Climate Change Effect on Drought in Korea

경민수* · 김병식** · 김형수***

Min Soo Kyoung, Byung Sik Kim, Hung Soo Kim

요 지

기후변화로 인한 강수의 양과 패턴의 변화는 가뭄이나 홍수와 같은 극한사상의 발생가능성을 점차 증가시키고 있다. 이러한 극한사상의 발생에 대비하고자 기후변화가 가뭄이나 홍수에 미치는 영향 평가에 대한 연구가 전 세계적으로 활발히 진행 중이다. 이에 본 연구에서는 월 단위로 IPCC를 통해서 제공되는 Global Climate Model(GCM)중 하나인 BCM2 모형(A2 시나리오 선택)을 기반으로 기후변화가 한반도 가뭄에 미치는 영향평가 방안을 제시하고자 한다. 우선 전구단위 기후모형인 BCM2 모형을 격자단위 관측자료인 NCEP(National Centers for Environmental Prediction)자료를 이용하여 서울기상관측소 지점으로 축소하였다. 또한 축소된 강우자료의 편의를 보정하기 위하여 Quantile mapping 기법을 적용하였으며, 최종적으로 제시된 서울지점의 월 강우를 대상으로 표준강수지수(SPI)를 산정하여 기후변화가 서울지점의 가뭄에 미치는 영향을 평가하였다. 분석결과 기후변화를 고려할 경우, 전반적인 가뭄의 심도는 크게 깊어지지 않았으나 가뭄의 지속기간이 길어져 가뭄으로 인한 피해가 더욱 증가할 것으로 예상되었다.

핵심용어 : 기후변화, 가뭄, K-NN, Quantile mapping, 표준강수지수

1. 서 론

산업혁명 이후, 화석연료의 사용증가와 도시화 등으로 인한 기후변화 때문에 극한홍수나 극한가뭄의 발생빈도가 증가하고 있는 것으로 보고되고 있다. 이러한 극한사상을 평가하고 예측하기 위해서 수자원 분야에서는 다양한 노력을 기울이고 있다. 특히, 기후를 변화시키는 주된 원인이 인간의 활동임을 IPCC 4차보고서를 통해서 확인되면서 기후변화에 대비하기 위한 다양한 노력이 전 세계적으로 이루어지고 있다. 이러한 활동은 크게 이산화탄소 저감기술과 기후변화에 적응하기 위한 적응 기술로 나누어져 있으나 현재까지는 주로 이산화탄소 저감 기술에 초점이 맞춰져 있다. 그러나 최근 들어 기후변화의 영향에 대한 적응방안과 관련된 연구에 대한 관심이 지속적으로 증가하고 있으며 특히, 수자원 분야에서는 GCM(General Circulation Model)이나 RCM(Regional Climate Model)으로부터 얻어진 기상자료를 유역내의 수문 관측 지점으로 축소하여 기후변화가 수자원에 미치는 영향을 평가하고자 하고 있다. 본 연구에서는 경험적 축소기법인 최근린법을 이용하여 IPCC 4차보고서(AR4, Fourth Assessment Report)에서 제시한 SRES(Special Report on Emissions Scenarios) A2 시나리오를 국내지점으로 축소하기 위한 방안을 제시하고자 한다. AR4-보고서에서는 총 23개의 기후모형과 8개의 시나리오를 통해서 온도, 총강우량, 절대습도 등 총 9개의 기상자료를 제시하고 있다. 이 중에서 노르웨이 BCCR(Bjerknes Centre for Climate Research)의 BCM2(Bergen Climate Model Version)의 A2 시나리오를 사용하였다. 최종적으로

* 정회원 · 인하대학교 사회기반시스템공학부 토목공학과 박사과정 E-mail : gigatg@inha.ac.kr - 발표자

** 정회원 · 한국건설기술연구원 수자원연구실 선임연구원 공학박사 E-mail: hydrokbs@kictre.kr

*** 정회원 · 인하대학교 사회기반시스템공학부 토목공학과 부교수 공학박사 E-mail: sookim@inha.ac.kr

BCM2로부터 지점으로 축소된 월 강수 자료를 이용하여 표준강수지수(SPI, Standardized Precipitation Index)를 산정함으로써 기후변화가 가뭄에 미치는 영향을 평가하였다.

2. 자료현황

2.1 BCM2

IPCC는 기후변화에 대한 정부간 협의체로 1992년 11월 조직을 개편하여 3개 그룹분과(WG; Working Group(실무분과))로 구성된 후 현재까지 운영되고 있다. IPCC는 세계 각국의 정책 결정에 중요한 자료가 되는 기후변화와 관련된 과학적, 기술적 사실에 대한 평가 보고서를 1990년, 1995년, 2001년, 2007년 4차례에 걸쳐 제공하였다. 현재 1,500여명의 과학자가 참여하여 연구를 진행하고 있으며, 지구의 기후변화를 예측할 수 있는 기술을 가지고 있다고 설명하고 있다. IPCC는 기후변화모형의 결과를 전 세계 연구자들에게 제공하기 위해서 DDC(Data Distribution Centre)를 운영하고 있으며, IPCC 4차년도 보고서와 함께 제시된 AR4 시나리오 기반의 모형들을 포함해서 2, 3차년도 보고서에서 제시된 시나리오들을 PCMDI(Program for Climate Model Diagnosis and Intercomparison)로부터 지원을 받아 월 단위로 제공하고 있다. 실제로 IPCC 4차년도 보고서에서는 AR4 시나리오를 사용하지는 않았으며, 제시된 AR4 시나리오는 향후에 작성될 보고서에 사용되는 것이 일반적이다. 본 연구에서는 IPCC AR4 시나리오 중 A2 시나리오를 포함하고 있는 노르웨이 BCCR(Bjerknes Centre for Climate Research)의 BCM2(Bergen Climate Model Version) 모형을 이용하였으며, BCM2 모형의 공간적 해상도는 2.8°이다.

2.2 NCEP

미국 국립해양대기청인 NOAA(National Oceanic and Atmosphere Administration) 산하 해양대기 연구부(OAR; The Office of Oceanic and Atmospheric Research)에서는 ESRL(지구시스템)을 비롯한 7개의 연구소를 운영하고 있다. ESRL은 현재 총 4개의 과(GMD, PSD, CSD, GSD)로 나뉘어져 있다. 이중 미국의 해양 대기청 물리학과(NOAA ESRL-PSD, Physical Sciences Division)에서는 날씨와 기후시스템의 진단을 수행하는 기구로서 기후, 날씨, 수자원과 연관된 장단기 예보를 수정 보완하는 역할을 하고 있다. 이를 위해서 전구단위 관측자료를 수집 및 관리하고 있으며 PSD의 홈페이지를 통해서 NCEP Reanalysis 자료를 포함해서 총29개의 전구단위 관측데이터 제공하고 있다. 본 연구에서 축소기법에 사용한 NCEP/NCAR Reanalysis 자료는 NOAA의 National Center for Environment Prediction 으로부터 제공받아 PSD에서 관리하고 있는 자료이다. 실제로 기후모형의 결과를 유역단위 관측소로 축소하는 과정은 기후모형의 결과로 제시되는 기상변수와 지상관측소의 수문변수들 사이의 상관관계를 맺는 과정으로 간단히 요약될 수 있다. 그러나 기후모형의 경우, 수치해석에 의해서 모의된 결과이므로 지상관측소의 관측값과 직접적으로 상관관계를 맺기가 불가능하다. 따라서 전 지구를 대상으로 격자단위로 제공되는 NCEP/NCAR Reanalysis 자료가 필요로 하게 된다.

즉, NCEP/NCAR Reanalysis자료와 지상관측소자료를 이용해서 상관관계를 맺은 다음 이러한 설정된 상관관계를 기후모형에서 제시된 기상변수에 적용함으로써 기후모형의 결과를 유역단위 관측소로 축소가 가능하게 되는 것이다. 또한 NCEP/NCAR Reanalysis자료의 경우, 기후모형의 결과에서 제시하는 기상변수와 동일한 기상변수의 관측치를 제공한다는 이점이 있다. 현재까지 수자원분야에서는 다양한 축소기법이 개발되어

2.3 지상관측자료

기상청에서는 전국 약 77개 관측소를 대상으로 1961년부터 현재까지 일 단위 기상자료를 제공하고 있으며(관측소별로 관측개시일은 상이함), 필요한 경우 시 단위 자료를 구입할 수 있도록 되어 있다. 강우의 경우, 여름철에는 1시간 단위로 관측을 하고 겨울철의 경우 3시간 단위로 관측된 자료를 제공하고 있다. 기상청을 통해서 제공받을 수 있는 기상요소는 9개이다(일 평균기온, 일 최대기온, 일 최저기온, 신적설, 평균풍속, 상대습도, 일조시간, 운량, 날씨). 본 연구에서 최근린법을 이용하여 축소기법의 적용성을 검토한 서울기상관측소는 1961년에 관측을 시작하여 현재에 이르고 있으며, 서울특별시 종로구 송월동에 위치하고 있다.

3. 축소기법의 적용

최근린법인 K-NN(K-Nearest Neighbor)은 Casdagli(1992)와 Casdagli and Weigend(1994)에 의해서 제안되었다. 최근린법은 일반적으로 단일변수의 시계열자료를 지체시간(τ)과 위상공간차원(m)을 고려하여 벡터화 한 후, 과거에 발생한 시계열 패턴이 미래에도 발생한다는 가정하에 예측(김형수 등 1998; 권현환과 문영일 2005)또는 분해기법(Sivakumar et al., 2007; 경민수 등, 2008)등에 적용되고 있다. 그러나 본 연구에서는 일반적으로 사용되는 최근린법과는 달리 지체시간과 위상공간차원은 고려하지 않았다. 다만, 과거의 패턴이 미래에도 발생한다는 기본 개념을 바탕으로 축소기법으로 활용하기 위한 방안을 제시하였다. 현재 강우에 영향을 미치는 온도, 비습도, 풍속, 가강수 수분량이 미래에도 같은 영향을 미치게 된다고 가정하여, 미래에 같은 온도, 비습도, 풍속, 가강수 수분량을 가질 경우에 같은 강우가 발생할 것으로 예상하였다. 이를 위하여 관측 자료 중에서 축소하고자 하는 강수에 영향을 주는 관측 기상변수인 온도, 비습도, 풍속, 가강수 수분량 등을 대상으로 다음과 같은 벡터를 구성하여야 한다($Y_t = (a_t, b_t, c_t, \dots, n_t)$). 여기서 n 은 축소하고자 하는 변수에 영향을 주는 기상변수의 개수 이고 t 는 변수들이 시계열자료임을 보여주며 t 개의 Y_t 벡터가 존재함을 의미한다. 또한 최적의 최근린 개수(K)를 계산하기 위하여 관측 자료로부터 제시된 Y_t 벡터를 Training set 인 Y_{ttra} 와 Prediction set 인 Y_{tpre} 로 나누었다. Y_{tpre} 와 Y_{ttra} 의 유사성을 알아보기 위하여 두 벡터 사이의 거리 즉, $\|Y_{tpre} - Y_{ttra}\|$ 를 모두 계산하였다. 이를 통해서 Y_{tpre} 과 가장 유사한 Y_{ttra} 이 결정되면, Y_{ttra} 인 상황에서 발생한 강우가 Y_{tpre} 에서도 발생한다고 보는 것이다. 이때 Y_{tpre} 와 유사한 Y_{ttra} 의 개수를 가장 유사한 순서에 따라서 변화시켜 가면서 최적의 결과를 주는 Y_{ttra} 의 개수가 최근린 개수가 된다. 최근린 개수가 결정이 되면, 기후모형의 결과로부터 제시된 Y_t' 과 가장 유사한 값을 가지는 Y_t 를 최근린 개수 만큼 찾아서 각각의 Y_t 에서의 강우량 값을 산술평균함으로써 Y_t' 에서의 강우량을 구하게 된다.

4. Quantile mapping

기후변화모형으로부터 축소된 결과들은 실제 관측값과 일정정도 편의를 보이게 된다. 이러한 편의를 보정하기 위하여 가장 일반적으로 사용되는 방법이 Panofsy and Brice(1963)에서 제시한 Quantile mapping이다. Quantile mapping 방법은 유출량을 보정하는 방법으로 주로 사용되었으며(Wood et al, 2004; Hamlet et al, 2003), 기후변화 분야와 관련해서는 Durman et al.(2001), Palmer et al(2004), Fowler et all(2007) 등에서 GCM자료의 보정을 위해서 적용되었다. 국내에서도 김병식 등(2008)에서 유역단위로 축소된 일 단위 기상자료의 편의를 보정한 사례가 있다.

5. 기후변화가 가뭄에 미치는 영향 평가

BCM2를 K-NN에 의해서 서울지점으로 축소한 결과를 그림 1에 나타내었다. 겨울철인 12월부터 봄철인 5월까지의 강수량이 감소하고 7월, 8월은 전반적으로 강수량이 증가하고 있음을 알 수 있다. 특히 과거에는 7월의 평균 강수량이 가장 컸으나 BCM2모형에 의하면 8월의 평균 강수량이 가장 크게 나타났다. 연평균 강수량은 과거 관측자료에 의하면 1,401mm로 산정되었고 BCM2모형에 의한 미래의 연 평균 강수량은 1,498mm로 산정되어 다소 증가하는 것으로 나타났다. 또한 7월에는 과거에는 발생하지 않았던 1,000mm가 넘는 강우가 미래에는 발생할 수 있으며, 8월에도 상대적으로 큰 강우가 발생할 가능성이 현재에 비해서 증가함을 알 수 있다.

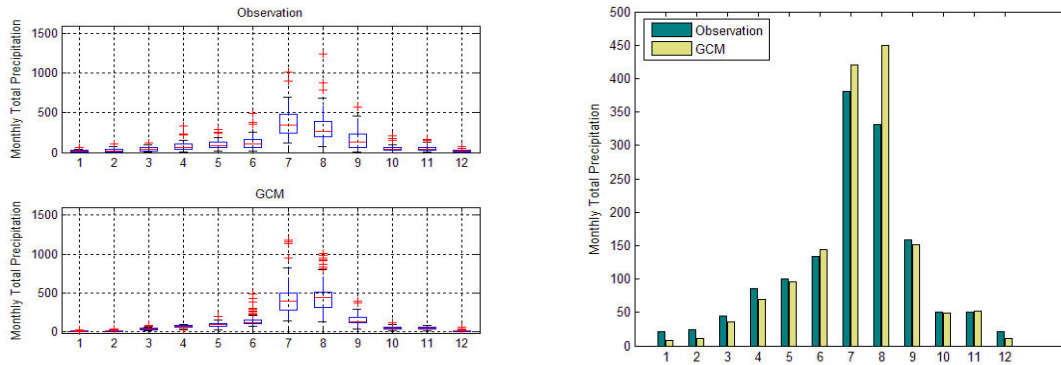


Fig. 1 Seoul station temperature by K-NN(Precipitaitaion)

기후변화가 가뭄에 미치는 영향평가를 위해서 서울지점으로 축소된 강수량을 대상으로 표준강수지수를 산정하였으며, 표준강수지수를 대상으로 가뭄지속기간(drought spell)을 산정하였다. 가뭄지속기간은 가뭄지수로부터 산정될 수 있으며, 표준강수지수를 이용할 경우, 표준강수지수가 지속적으로 0보다 작고 최소값이 -1보다 작은 경우를 의미한다. 본 연구에서는 서울지점의 1961년부터 2008년까지의 표준강수지수와 BCM2로부터 산정된 2000년에서 2009년까지의 표준강수지수로부터 구한 가뭄지속기간에 따른 분석결과를 이용하여 가뭄의 기간, 누가강도, 평균강도, 최대강도를 산정함으로써 기후변화를 고려할 경우, 가뭄의 변화를 평가하였다(표 1).

표. 1 Index of drought spell(each drought duration) : SPI(12)

Drought Duration (Month)	# of drought		Accumulate intensity		Average intensity		Maximum intensity	
	Observation (1961~2008)	BCM2 (2000~2009)	Observation (1961~2008)	BCM2 (2000~2009)	Observation (1961~2008)	BCM2 (2000~2009)	Observation (1961~2008)	BCM2 (2000~2009)
1	9(41%)	19(45.2)	-1.17	-1.10	-1.17	-1.10	-1.17	-1.10
2	5(22.8%)	3(7.1%)	-2.64	-2.25	-1.32	-1.12	-1.38	-1.16
3	-	2(4.8%)	-	-3.09	-	-1.03	-	-1.06
4	1(4.5%)	2(4.8%)	-5.58	-4.42	-1.39	-1.10	-1.70	-1.16
6	1(4.5%)	1(2.4%)	-6.77	-12.38	-1.13	-2.06	-1.45	-2.27
7	1(4.5%)	1(2.4%)	-12.4	-8.16	-1.77	-1.17	-2.02	-1.27
8	1(4.5%)	2(4.7%)	-10.58	-9.03	-1.32	-1.13	-1.52	-1.23
10	-	1(2.4%)	-	-11.74	-	-1.17	-	-1.26
11	-	4(9.5%)	-	-17.59	-	-1.60	-	-2.02
12	4(18.2%)	4(9.5%)	-23.79	-17.55	-1.72	-1.46	-2.50	-1.78
13	-	2(4.8%)	-	-18.90	-	-1.45	-	-1.68
17	-	1(2.4%)	-	-23.36	-	-1.37	-	-1.72

가뭄을 지속시간에 따라서 분류한 후, 지속시간에 따라 분류된 가뭄의 평균 누가강도, 평균 강도, 평균 최대강도를 표 1과 같이 산정하였다. 지속시간 12개월의 표준강수지수(12)를 고려할 경우 가뭄기간 중에 발생하는 가뭄의 심도는 현재에 비해서 미래에 다소 줄어드나 지속기간이 긴 가뭄의

발생가능성의 증가함에 따라 향후에는 가뭄이 더욱더 심각해 질 것이라고 예측할 수 있다.

감 사 의 글

본 연구는 건설교통부 한국건설교통기술평가원의 이상기후대비시설기준강화 연구단에 의해 수행되는 2005 건설기술기반구축사업(05-기반구축-D03-01)에 의해 지원되었습니다.

참 고 문 헌

- 1.경민수, 벨리시바쿠마르, 김형수, 김병식(2008) 카오스를 이용한 일 강우자료의 시간적 분해. 한국수자원학회논문집, 한국수자원학회, 제41권, 제9호, pp. 959-967.
- 2.권현한, 문영일(2005) 상태-공간 모형과 Nearest Neighbor 방법을 통한 수문시계열 예측에 관한 연구. 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제25권, 제4B호, pp. 275-283.
- 3.김병식, 김보경, 경민수, 김형수(2008) 기후변화가 극한강우와 I-D-F 분석에 미치는 영향 평가. 한국수자원학회논문집, 한국수자원학회, 제41권 제4호, pp. 379-394.
- 4.김형수, 최시중, 김중훈(1998) DVS 알고리즘을 이용한 일 유량자료의 예측, 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제18권, 제II-6호, pp. 563-570.
- 5.Casdagli, M. (1992) Chaos and deterministic versus stochastic nonlinear modeling, Journal of the Royal Statistical society, Statistics in society, Series B 54, pp. 303-324.
- 6.Casdagli, M. and Weigend, A. (1994) Exploring the Continuum Between Deterministic and Stochastic Modelling, Forecasting the Future and Understanding the Past, Eds. A. S. Weigend and N. A. Gershenfeld, SFI Studies in the Sciences of Complexity, Proc. Vol. XV, Addison-Wesley, 993
- 7.Durman, C.F., Gregory, J.M., Hassell, D.C., Jones, R.G. and Murphy, J.M. (2001) A comparison of extreme European daily precipitation simulated by a global and a regional climate model for present and future climates. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, Royal Meteorological Society, Vol. 127, No. 573, pp. 1005-1015.
- 8.Fowler, H.J., Kilsby, C.G. and Stunell, J. (2007) Modeling the impacts of projected future climate change on water resources in north-west England. Hydrologic & Earth System Sciences, EGU, Vol. 11, No. 3, pp. 1115-1126.
- 9.Hamlet, A.F., Lettenmaier, D.P. and Snover, A. (2003) Climate change streamflow scenarios for critical period water planning studies : A technical methodology. Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE, in review
- 10.Palmer, R., Wiley, M and Kameenui, A. (2004) Will Climate Change Impact Water Supply and Demand In the Puget Sound?, Department of Civil and Environmental Engineering University of Washington, Seattle WA.
- 11.Panofsy, H.A., and Brice, G.W. (1963) Some application of Statistics to Meteorology, Pennsylvania State University, University Park, Pennsylvania, pp. 224.
- 12.Sivakumar, B., Sorooshian, S., Gupta, H. V., and Gao, X. (2001) A chaotic approach to rainfall disaggregation. Water Resources Research, AGU, Vol. 37, No. 1, pp. 61-72.
- 13.Wood, A.W., Leung, L.R., Sridhar, V. and Lettenmaier, D.P. (2004) Hydrologic implications of dynamical and statistical approaches to downscaling climate model outputs. Climatic Change, Vol. 62, Issue 1-3, pp. 189-216.