

대표농도경로를 이용한 영산강·섬진강 유역의 극한기후 변화전망 Impact Assessment of Climate Change on Extreme Weather in Yeongsan·Seomjin River Basins based on the Representative Concentration Pathways

Byung Sik Kim*, In Gi Jang**, Sun Hong Min***, Jang Hyeun Sung****

Department of Urban & Environmental Disaster Prevention, Kangwon National University, 346,
Joongang-Ro, Samcheok-Si, Gangwon-Do, Korea

Abstract

This study forecasts extreme precipitation events and changes in drought using the projected precipitation and temperature data simulated under(RCPs) scenarios in the IPCC Fifth Report to estimate the impacts of future climate changes on extreme precipitation events and droughts in the Yeongsan and Seomjin River basins. The results obtained by using the generalized extreme-value(GEV) distribution showed that, for extreme precipitation, the variability is increasing between extreme precipitation events in intensity and amount over time and the upper tail of the PDF also grew thicker, suggesting that the occurrence of such events would also increase. For droughts, the SPEI results showed that the severity of droughts would increase more intense toward the end of the 21st century, as would the occurrence of droughts with a drought index of-1 or below.

Key words: representative concentration pathways, extreme precipitation, drought, GEV, SPEI

국문초록

본 논문은 미래의 기후변화가 영산강과 섬진강 유역(이하 영·섬 유역)의 극한강수와 가뭄발생에 미치는 영향을 평가하기 위해 IPCC 5차보고서의 대표농도경로 기후변화 시나리오로부터 모의된 미래 강수 및 기온자료를 이용하여 극한강수와 가뭄변화를 전망하였다. GEV 분포를 이용한 극한강수 전망결과, 미래로 갈수록 극한강수의 평

* Tel. +82-10-8886-3666. Fax. +82-61-462-2510. E-mail. hydrokbs@kangwon.ac.kr

** Tel. +82-10-6664-6636. Fax. +82-61-462-2510. E-mail. nabojima@naver.com

*** Corresponding author. Tel. +82-19-696-0154. E-mail. sunmin@kangwon.ac.kr

**** Tel. +82-10-9172-9056. E-mail. jhsung1@korea.kr

Submission & Publication Process

Received: Nov. 27, 2013 / Revised: Dec. 27, 2013 / Accepted: Feb. 14, 2014

균과 극한강수 간의 변동성이 커짐을 확인하였고, 분포 곡선 상위 꼬리가 두터워져 큰 극한강수의 발생빈도가 잦아지리라 전망되었다. SPEI를 이용한 가뭄 전망결과, 21세기 말 가뭄의 심도가 깊어지고, 가뭄지수 '-1'이하의 발생 빈도수도 잦아지리라 전망되었다.

주제어: 대표농도경로, 극한강수, 가뭄, GEV, SPEI

1. 서론

최근에 지구온난화 등의 이유로 발생하고 있는 극한기후의 특징은 극한강수와 극한가뭄과 같은 극과 극의 이상기후가 동시에 발생하고 있다는 점이다. 예를 들어, 2012년 8월 말에 발생한 제15호 태풍 '볼라벤'은 2000년 이후 서해상을 따라 북상한 태풍들 가운데 가장 강한 태풍이었다. 제14호 태풍 '덴빈'은 제15호 태풍 '볼라벤'이 옹진반도 부근에 상륙한 후 43시간 이내 연이어 남해안으로 상륙하여 우리나라에 직접적인 영향을 준 최초의 태풍이었다. 태풍이 상륙하여 육상을 지나는 동안 태풍 진행방향의 왼쪽 반원에 속하는 충청도와 전라도에서는 북서쪽에서 내려온 차고 건조한 공기와 덴빈이 몰고 온 다량의 따뜻한 수증기가 충돌해 최고 200mm 이상의 많은 비가 내렸다. 특히 한 해 동안 4개의 태풍이 한반도에 상륙한 것은 지난 1962년 이후 50년 만이었다[1]. 금년 가뭄기간의 평균 강수량은 71.2mm로 평년의 28.7%에 불과한 수준의 강수가 내렸으며, 1973년 이래 강원영서, 서울·경기, 충청, 전라지역 등에 위치한 38개 기상관측소에서 가장 적은 강수량을 기록했다. 5월 이후의 최소 강수량을 빈도 분석한 결과, 강원영서, 서울·경기, 충남과 전남지역의 누가 강수량은 재현기간 200년 빈도 이상이었고, 충북, 경남과 전북지역은 100년 빈도 이상이였다. 또한, 가뭄지수를 이용하여 이번 가뭄의 심도를 평가한 결과 전라도가 극한가뭄 상황으로 평가되었다[2].

[3]는 관측자료로부터 호남지역의 기후변화를 분석하였는데 이 연구에서 호남지방에서 나타난 가장 뚜렷한 기후변화의 증거로 기온의 상승을 제시하였다. 연구 결과를 구체적으로 보면 지난 67년 동안 호남지방의 연평균 평균기온, 연평균 최고기온과 연평균 최저기온은 각각 14.0°C, 18.4°C와 9.7°C이며, 모두 0.2°C/10yr의 변화율로 상승하였다. 특히 계절별로는 겨울철의 기온 상승 경향(0.3°C/10yr)이 가장 뚜렷하였다[3]. 또한 강수량 증가와 강수일수의 감소로 인한 강수강도의 증가도 확인하였다. 평균 연 강수량은 21.5mm/10yr의 변화율로 증가하고 있지만 연 강수일수는 -1.1day/10yr의 변화율로 감소하고 있어, 이에 따라 강수강도는 10년에 0.3 mm/day 증가하고 있음을 확인하였다[3].

[4]에 따르면 우리나라를 포함한 동아시아 지역은 미래에 기후변화로 인한 강수량 증가가 예상되지만 동시에 강수강도의 증가 및 연 강수일수의 감소로 인해 강도 높은 우기 사이의 건기가 길어지고 기온 상승으로 인한 대기 중 수분요구량 증가로 증발산량이 증가할 것으로 전망하고 있다(기상청, 2011). 앞서 언급한 2012년도 사례와 선행 연구들로부터 호남지역은 기온상승으로 인하여 증발산량이 발생하여 가뭄의 위험성에, 또한 연 강수일수의 감소로 강수강도가 커지고 있어서 극한강수에 대한 위험성에도 노출되어 있음을 알 수 있었다.

이 연구에서는 미래의 기후변화가 영산강과 섬진강 유역(이하 영·섬 유역)의 극한강수와 가뭄

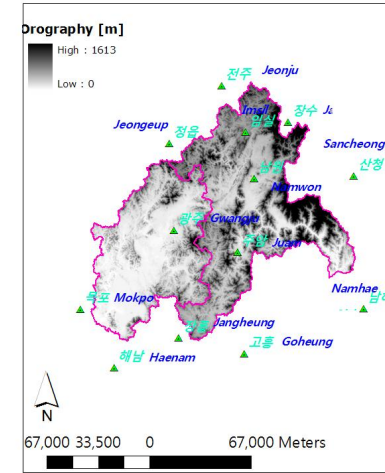
발생에 미치는 영향을 평가하기 위해 IPCC 5차보고서[5]의 대표농도경로(Representative Concentration Pathways, 이하 RCP) 기후변화 시나리오로부터 모의된 미래 강수 및 기온자료(2011년~2099년)를 이용하여 극한강수와 가뭄변화를 전망하였다. 극한강수 분석에는 다양한 장점을 갖고 있어서 최근들어 빈도분석(frequency analysis)시에 널리 이용되고 있는 GEV(Generalized Extreme Value) 분포를, 가뭄 분석에는 기온 상승으로 인한 증발산량(evapotranspiration)을 고려할 수 있는 가뭄지수인 SPEI[6]를 이용하였다. 이 논문에서는 자연재난으로부터의 위협이 증대되고 있는 현 시점에서 미래에 기후변화로 우리가 느끼게 될 극한기후의 확률론적 하중을 전망하였다. 전망한 극한기후는 미래의 이수 및 치수안전도 결정하는데 있어 비정상성을 고려할 수 있는 근거로 사용될 수 있겠다. 또한 기후변화를 대비한 안전시스템에서 직접적으로 본 연구에서 계산한 확률론적 하중을 이용할 수 있겠다.

II. 자료 및 방법

1. 자료

이 논문에 사용된 기후변화 전망자료는 기상청(Korea Meteorological Administration, KMA)이 영국기상청의 지역기후모델(HadGEM3-RA)[7]을 도입하여 생산한 한반도 지역기후변화 시나리오 자료이며, 자세한 설명은 [8]의 논문을 인용하였음을 미리 밝힌다. 영역은 우리나라를 중심으로 중국 및 일본의 일부 지역을 포함한다. HadGEM3-RA의 수평 분해능은 격자 거리 12.5 km로 동서 및 남북 방향으로 각각 200×180개의 격자로 구성되었고, 연직 분해능은 지상에서 40 km 고도까지 38개 층으로 구성되었다. 대규모 강제력 정보가 제공되는 측면경계 완충격자는 모형 최외곽 8개 격자점이 사용되었다. 측면경계 강제력은 6시간 간격의 전지구 기후변화 전망자료가 사용되었다. 전지구 기후변화 전망자료 역시 기상청이 영국기상청으로부터 도입한 대기-해양-해빙 결합모형(HadGEM2-AO)[9]을 이용하여 산출하였으며 수평 격자 거리는 약 135 km(동서방향 1.875°, 남북방향 1.25°)이다. HadGEM3-RA는 과거기후모의(1950~2005년)와 RCP(Representative Concentration Pathways) 시나리오에 기초한 미래 기후전망(2011~2099년)에 대한 자료로 구성된다[8]. 우리나라가 위치한 동아시아 지역은 지리적 특성이 매우 복잡하고 기후 변동성이 크기 때문에 극한기후 현상을 전망하기 위하여 수평 해상도 수십~수km 이상의 상세한 지역기후변화 시나리오 자료가 요구된다[8][10][11][12][13]. 따라서 이 논문에서는 우리나라의 미래 극한사상 전망을 위하여 12.5km 분해능 HadGEM3-RA에서 생산한 RCP8.5의 지역기후변화 시나리오 자료를 기상청 지상 관측지점으로 이중선형내삽(bi-linear interpolation)하여 사용하였다(<Fig 1>).

현재 기후(1980~2005년)에 대비한 미래 변화를 알아보기 위하여 미래를 3개의 기간(future1: 2011~2040년, future2: 2041~2070년, future3: 2071~2100년)으로 구분한 RCP8.5 전망 자료를 이용하였는데, RCP8.5는 온실가스 저감정책이 전혀 시행되지 않음을 가정하는 시나리오로서 SRES(Special Report on Emission Scenarios)의 A2~A1FI에 상응하는 배출 시나리오이다.



<Fig 1> Locations of Rainfall Station

2. 방법

1) GEV 분포

극한강수의 빈도분석에서 있어서 주로 쓰이는 분포형은 3변수 확률분포형이다. 3변수 확률분포형은 형상 매개변수를 포함하고 있어 꼬리부분의 거동을 표현하는데 용이하기 때문이다. 그 중에서 GEV 분포는 국내 적용사례가 풍부하고 분포형이 단색이 있어 역함수를 쉽게 구할 수 있다는 장점이 있다. 또한 [14]은 GEV 분포를 국내 적합한 확률분포형으로 추천한 바 있어 연구에 이용하였다. L-모멘트법은 확률가중모멘트법의 선형조합으로 작은 값에는 작은 가중치를 큰 값에는 큰 가중치를 부여하여 추정하기 때문에 표본자료의 크기가 작거나 왜곡된 자료일 경우에도 비교적 안정적인 결과를 얻을 수 있다는 장점이 있어[15] 연구에 이용하였다.

일반적으로 어떤 강수사상의 크기(강수량)가 평균 T 년 동안에 한번 이상 발생하면 재현기간(return period), T 를 가진다고 말한다. 재현기간 T 의 역수는 어떤 해에 그 사상보다 같거나 큰 것이 발생할 확률이고, 이는 곧 초과확률(exceedance probability)을 의미한다. 식 (1)은 비초과확률(1-초과확률)과 재현기간의 관계이다[8].

$$T = \frac{1}{1 - P} \quad (1)$$

여기서 P 는 비초과확률(nonexceedance probability)이다. 극한사상의 비초과확률을 구하는데 이용되는 일반적인 확률분포형은 GEV 분포형이며 그 이유는 GEV 분포가 상위 꼬리부분이 두터워 극한사상을 표현하기에 적합하기 때문이다. GEV 분포의 비초과확률을 계산하는 누가분

포함수(cumulative distribution function)는 식 (2)로 표현된다. 따라서 식 (2)의 해(x ; 여기서는 강수량)는 식 (3)과 같이 구할 수 있다[16]. 여기서 ξ , α , κ 는 각각 위치(location), 규모(scale), 형상(shape)에 관련된 매개변수이다[8].

$$F(x) = \exp[-(1 - \kappa \frac{x - \xi}{\alpha})^{1/\kappa}], \quad \kappa \neq 0$$

$$= \exp[-\exp(-\frac{x - \xi}{\alpha})], \quad \kappa = 0 \quad (2)$$

$$x = \xi - \alpha \log[-\log(P)], \quad \kappa = 0$$

$$= \xi + \frac{\alpha}{\kappa} \{1 - [-\log(P)]^\kappa\}, \quad \kappa \neq 0 \quad (3)$$

GEV 분포는 3개의 극치분포가 결합된 것으로 형상 매개변수인 κ 에 따라 극치 Type I ($\kappa = 0$), Type II ($\kappa < 0$), Type III ($\kappa > 0$) 분포로 나눌 수 있으며, Type I은 Gumbel, Type III는 Weibull 분포로 불리기도 한다. 이 연구에서는 위의 3개 매개변수를 추정하는데 L-모멘트법을 이용하였다.

2) SPEI

가뭄은 특정 지역에서 어느 정도 긴 기간 동안의 강수와 증발산 사이의 물수지(water budget)에 대한 평균 조건, 즉 정상상태와 비교하여 고려되어야 한다. 하지만 SPI의 계산 과정에서 강수 이외의 기온과 관련된 변수를 고려하지 않기 때문에 이에 대한 우려도 커지고 있다[17][18]. 위와 같은 이유로 최근에 SPI와 유사하지만 기온의 변동성이 포함된 새로운 개념의 가뭄지수인 SPEI[6]가 개발되어 이 연구에 이용하였다.

SPEI는 주로 월(month) 단위로 계산되며 SPI[19]와는 달리 강수량과 잠재증발산량(Potential EvapoTranspiration: PET)의 차이를 나타낸다. 잠재증발산량 계산에는 주로 Thornthwaite[20][21] 모형(식 (4))을 이용되는데 이는 계산이 간단하고, 무엇보다도 월평균 기온 자료를 쉽게 구할 수 있기 때문이다.

$$PET = 16K \left[\frac{10T}{I} \right]^m \quad (4)$$

여기서 T 는 월평균 기온으로 단위는 $^{\circ}C$, I 는 열지수(heat index)로 매월의 월(monthly) 열지수를 합하여 구한 연(yearly) 열지수를 의미한다. SPEI는 임의의 월 i 에서 강수와 위에서 구한 PET의 차이로 식 (5)과 같다(Vicente-Serrano et al., 2010).

$$D_i = P_i - PET_i \quad (5)$$

D 는 식 (6)과 같이 각 시간규모에서 합성된다(Vicente-Serrano et al., 2010).

$$D_n^k = \sum_{i=0}^{k-1} P_{n-i} - PET_{n-i} \quad (6)$$

여기서 k 는 합성의 시간 규모, n 은 계산에 이용된 달(month)이다. 계산된 SPEI 값으로 가뭄을 구분하게 되는데 이는 <Table 1>과 같다.

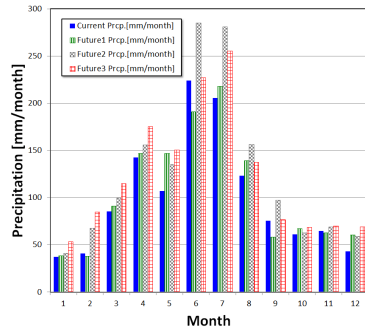
<Table 1> Classify of SPEI Range

가뭄지수의 범위	수분상태
2 이상	extremely wet
1.5~1.99	very wet
1~1.49	moderately wet
-0.99~0.99	near normal
-1~-1.49	moderately dry
-1.5~-1.99	severely dry
-2 이하	extremely dry

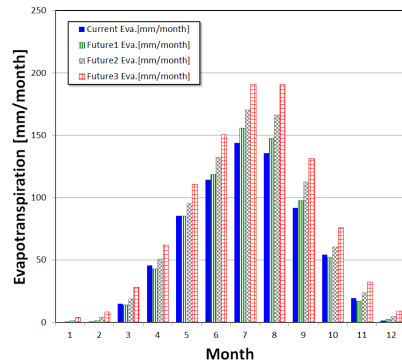
III. 결과

1. 영·섬 지역의 미래 수문변화 전망

<Fig 2>와 <Fig 3>은 현재 대비 미래 기후에서의 영·섬 지역의 평균된 강수(Fig. 2)와 증발산량<Fig 3>의 월(monthly) 변동성을 보여주고 있다. 그림을 보면 미래로 갈수록 강수와 증발산량이 증가하고 있다. 강수 모의 자체가 가지고 있는 불확실성으로 인하여 기온보다는 두드러지는 않지만 전반적으로 미래로 갈수록 증가하리라 전망되었다. 하지만 여름철(JJA)과 9월 강수량은 21세기 중반이 21세기 말보다 많게 전망되는데 이는 지역기후모델의 기온 상승률이 2040년대 이후에 전지구후모델에 비해 약화되고 이와 같은 특성은 RCP4.5 시나리오 보다는 RCP8.5 시나리오에서 뚜렷하기 때문이다. 특히, 21세기 말에는 2월과 12월의 평균기온이 영상으로 이로 인하여 겨울철(DJF)에도 증발산량의 발생하고 있으며, 증가 또한 확인할 수 있었다.

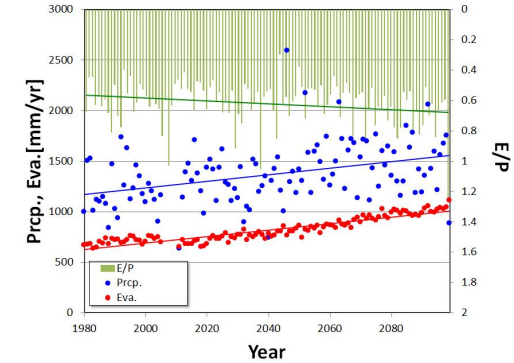


<Fig 2> Comparison of Monthly Rainfall



<Fig 3> Comparison of Monthly Evapotranspiration

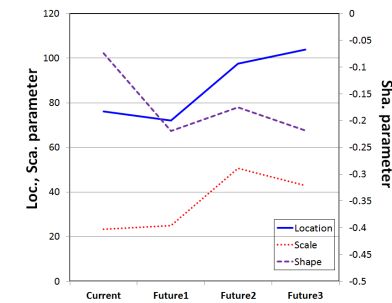
<Fig 4>는 미래 기후변화 자료의 연(yearly) 변동성을 보여주고 있다. 미래로 갈수록 강수량과 증발산량 모두 증가하고 있는 경향이 보이며, 이는 곧 비정상성(nonstationary)을 의미한다. 비정상성의 증거는 기온에서 더욱 확연하게 드러나는데 이는 기후모델이 기온에 대한 모의 정확도와 숙련도가 높기 때문이다. 강수량과 증발산량의 증가 비율은 비슷한 편이지만 강수량에 대한 증발산량의 비율은 미래로 갈수록 커지고, 21세기 말에는 70%이상이었다. 이수기의 증발산 증가는 가뭄 발생의 가능성이 커짐을 시사하고 있다.



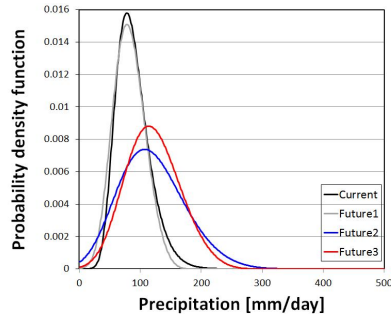
<Fig 4> Annual Variability of Precipitation and Evapotranspiration

2. 미래 극한강수 변화 전망

상술한 바와 같이 극한강수의 전망을 위하여 GEV 분포를 이용하였다. Fig. 5는 현재 기후 및 미래 기후에서 GEV 분포의 매개변수를 보여주고 있다. 그림을 보면 위치와 규모 매개변수는 미래로 갈수록 증가하는 경향을, 형상 매개변수는 감소하는 경향을 보이고 있다. 위치 및 규모 매개변수의 증가는 극한강수의 평균적 크기와 변동성이 커짐을, 형상 매개변수의 감소는 GEV 분포의 상위 꼬리부분이 두터워져 큰 극한강수의 발생빈도가 잦아짐을 의미한다. Fig. 6은 현재 기후 및 미래 기후에서의 극한강수 변화를 GEV 분포의 확률밀도함수(probability density function) 측면에서 보여주고 있다. 현재와 21세기 초의 확률밀도함수들에서 큰 차이가 발견되지는 않았지만 21세기 중반부터는 미래로 갈수록 우측으로 이동하고 있었으며, 분포의 퍼짐 정도도 커지고 있었다. 또한 형상 매개변수 감소로 상위 꼬리(upper tail)부분의 두텁기도 두꺼워지고 있음을 확인하였다.

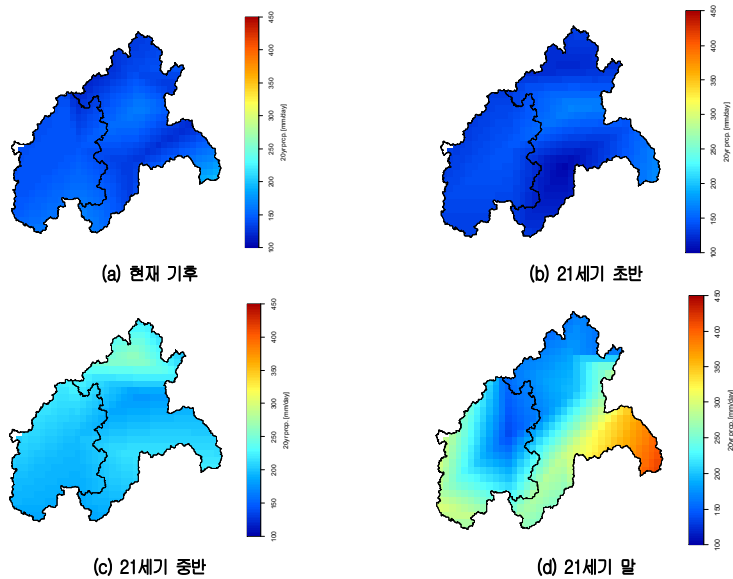


<Fig 5> Change of GEV Parameters



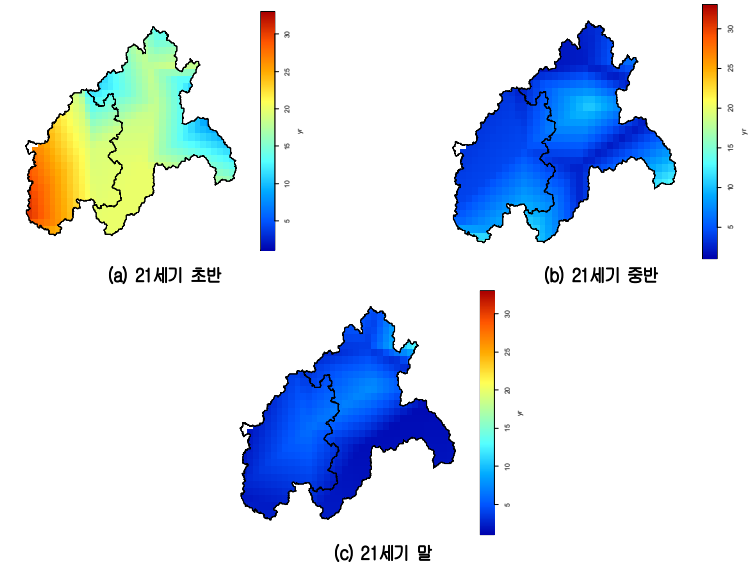
<Fig 6> Change of Probability Density Function

지점별 비교를 위하여 20년 빈도 강수량의 공간분포를 도시하였다(Fig. 7). 유역내 지점 이외에 군산, 전주, 경읍, 목포, 금산, 해남, 고흥, 장흥, 거창, 산청과 남해 자료를 추가로 더 이용하였다. 21세기 초반의 공간분포는 현재 기후와 비교적 유사하였지만 2041년부터 시작되는 21세기 중반부터 21세기 말까지는 극한강수의 비정상성이 확인되었다. 21세기 말에는 섬진강과 영산강 하류부, 즉 해안에 인접한 지역에 강수량이 많았으며, 섬진강의 진주암 지점이 다른 지점에 비하여 비교적 많은 강수량이 전망되었다.



<Fig 7> Spatial Distribution of Probability Precipitation(20 Year Return Period)

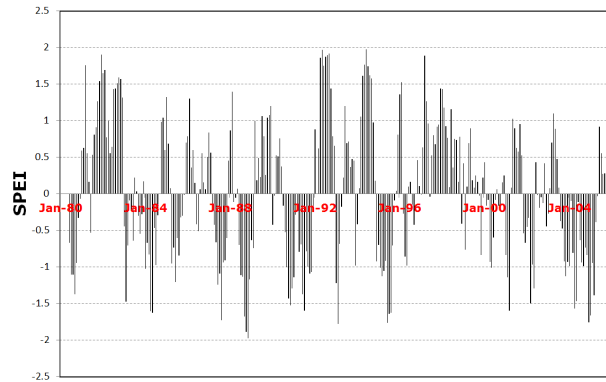
현재 기후에서 20년에 한번 꼴로 발생하는 강수가 미래에 얼마만큼의 재현기간을 갖는지 알아보았다(<Fig 8>). 그림을 보면 현재 기후의 20년 빈도는 21세기 초반에는 섬진강하류를 제외하고는 20년 또는 그 이상으로 큰 변화는 없었으나 21세기 중반부터 미래로 갈수록 유역 전반에 걸쳐서 재현기간이 점차 줄어들고 있었다.



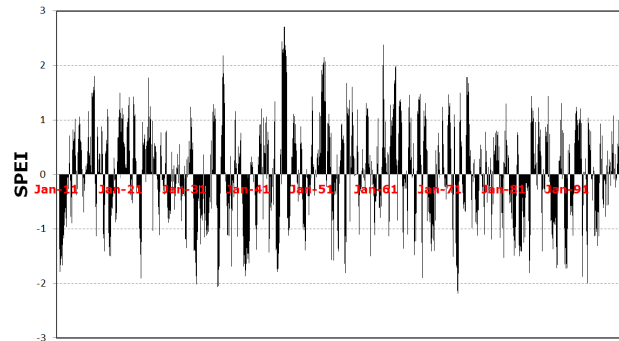
<Fig 8> Projection of Chance of 20 Year Return Period

3. 미래 가뭄 변화 전망

지속기간 6개월의 영·섬 유역의 현재(<Fig 9>) 및 미래 기후(<Fig 10>)에서의 SPEI를 계산하였다. 현재 기후에서는 약 4년 내외의 주기를 가지고 극한가뭄이 발생되고 있으나 미래로 갈수록 심도가 깊은 가뭄 발생의 빈도가 잦아지리라 전망되었다. 특히, 21세기 중반보다는 21세기 말에 심도가 큰 가뭄의 위험도가 더 증가하리라 전망되었는데 이는 21세기의 말의 기온 상승으로 인한 증발산량이 많아지기 때문이다.

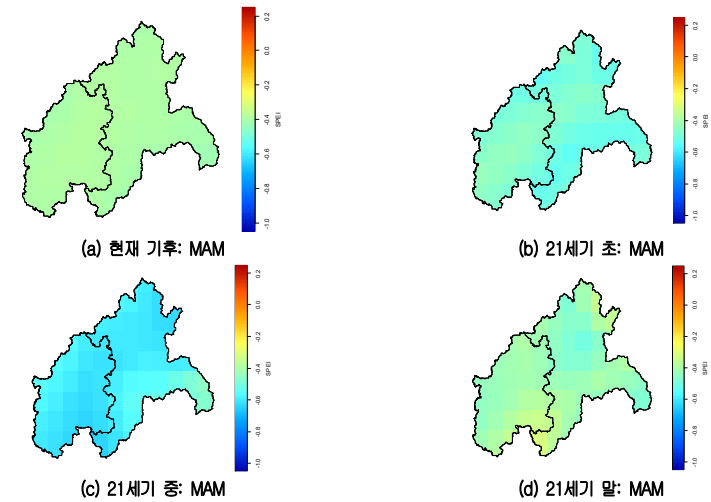


<Fig 9> Time Series of SPEI(Current)

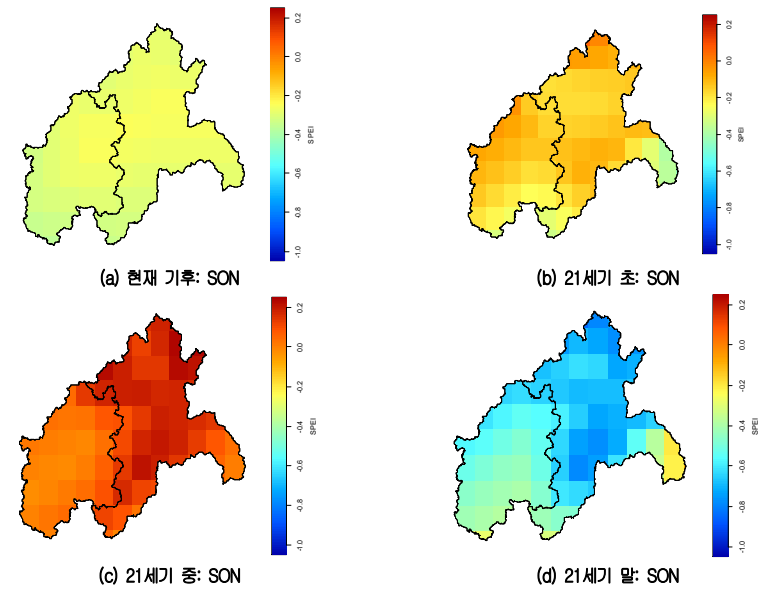


<Fig 10> Time Series of SPEI Under Climate Change

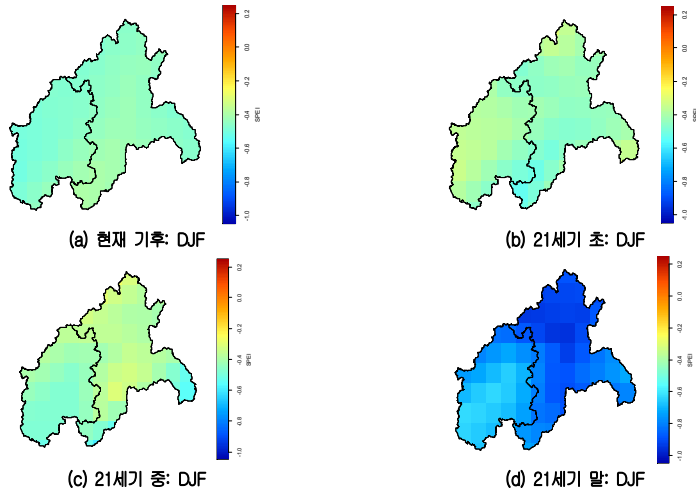
가뭄의 크기를 정량적으로 살펴보기 위하여 여름철을 제외한 봄철(MAM), 가을철(SON)과 겨울철(DJF)의 SPEI 공간분포를 그렸다(<Fig 11>, <Fig 12>, <Fig 13>). 미래로 갈수록 전반적으로 가뭄의 심도가 깊어지고 있으며, 특히 그 정도는 21세기 말의 겨울철과 가을철이 큰 편이었다. 이는 21세기 말의 12월부터 2월까지 겨울철 기온이 영상으로 겨울철에도 증발산량이 발생하기 때문이다(<Fig 3>). 계절별로 구체적으로 살펴보면, 봄철은 21세기 중반의 가뭄심도가, 가을철은 21세기 말의 심도가 깊었으며 그 중에서도 섬진강댐 유역의 가뭄의 심도가 깊게 전망되었다. 반면에 21세기 중반의 심도는 오히려 현재 기후와 21세기 초반에 비하여 깊지 않았는데, 이는 지속기간 6개월의 SPEI 계산 시 6월부터 11월까지의 강수량이 이용되고, 이때의 강수량은 현재 및 21세기 초반과 말보다 많기 때문이다. 겨울철도 21세기 말의 심도가 깊었는데 가을철과 마찬가지로 섬진강댐 유역을 비롯하여, 영산강 유역 전체가 이에 해당되었다.



<Fig 11> Spatial Distribution of SPEI(MAM)

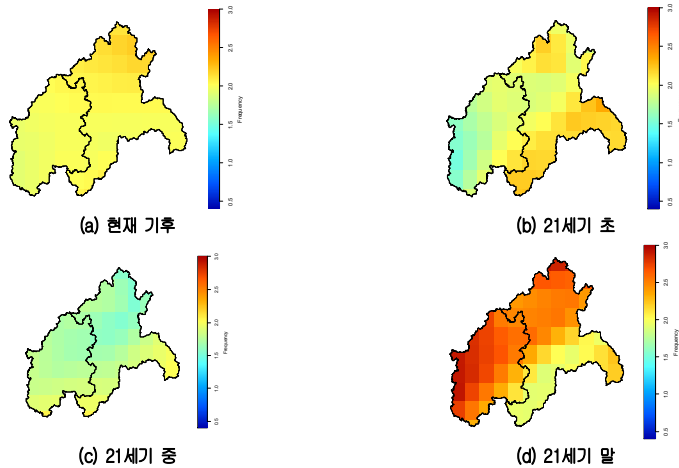


<Fig 12> Spatial Distribution of SPEI(SON)



<Fig 13> Spatial Distribution of SPEI(DJF)

가뭄 발생에 대한 빈도수 변화전망을 위하여 각 미래 기간에 대하여 SPEI 값 '-1'이하의 빈도수를 계산하였다. 21세기 초반에는 현재 기후와 비교하여 섬진강 하류 지역에서는 증가를 영산강의 해안 인접지역에서는 감소를 보였다. 또한 21세기 중반에는 오히려 현재 기후보다 감소되었는데, 이는 21세기 중반의 강수량이 많기 때문이다. 21세기 말에는 영산강유역 전체와 섬진강델타 유역의 발생빈도가 타 지역에 비하여 높은 편이었다.



<Fig 14> The Number of SPEI Below -1 Occurrence

IV. 결론

극한기후 사상의 원인으로 여겨지고 있는 기후변화의 증거를 찾기 위하여 관측자료 또는 기후모델을 토대로 한 연구가 최근 들어 많이 진행되고 있다. 우리나라도 예외는 아니어서 관측자료와 기후모델로부터 기후의 비정상성을 확인하기 위하여 많은 노력을 기울이고 있다. 관측자료를 이용한 호남지역 기후변화 연구에서 겨울철의 기온 상승 경향(0.3°C/10yr)이 가장 뚜렷한 기후변화의 증거로 제시되었고, 강수량 증가와 강수일수의 감소로 인한 강수강도의 증가도 확인되었다[3]. 과거 관측자료는 기후변화를 진단하는데에는 효과적이거나, 미래 기후를 전망하는데에는 어려움이 따른다. 이는 과거와 현재까지 관계식이 미래까지 유효하리라 가정하기 때문에 기후변화를 연구하는데 약간의 모순을 포함하고 있기 때문이다. 이와 같은 이유로 국립기상연구소와 기상청에서는 IPCC 5차보고서의 온실가스 시나리오인 RCP 시나리오에 대한 국가 표준 기후변화 시나리오 자료를 생산하였다. 따라서 본 연구에서는 기후변화 모형의 전망자료를 이용하여 미래 극한강수나 가뭄과 같은 극한기후를 전망하였다.

가뭄은 특정 지역에서 어느 정도 긴 기간 동안의 강수와 증발산 사이의 물수지(water budget)에 대한 평균 조건과 비교하여 물이 이보다 상당히 낮게 지속될 경우를 의미한다. 평균보다 상당히 낮다는 개념은 강수(공급)과 증발산(수요)가 함께 고려되어야 한다. 호남지역의 관측자료를 이용한 연구에서 기온의 상승을 뚜렷한 기후변화의 증거로 제시되고 있어서 강수의 상당 부분이 증발산량 손실로 이어지리라 예상되어서 강수와 기온의 변동성을 함께 고려하여 가뭄을 분석하였다. [22]는 21세기 중반보다는 21세기 말의 가뭄의 심도가 강해지리라 전망하였는데, 본 연구의 결과도 21세기 말의 가뭄의 심도가 깊어지리라 전망하고 있어서 선행 연구와 잘 일치하고 있음을 확인하였다. 빈도측면에서도 SPEI 값 '-1'이하의 발생 빈도수가 미래로 갈수록 증가하고 있었다.

기후변화의 비정상성(non-stationary)이란 표본자료나 평균, 분산 등 자료 자체의 통계적 특성은 시간이 지남에 따라서 변화하는 것을 의미한다. 극한강수 전망결과, 미래로 갈수록 위치 및 규모 매개변수의 증가되고 있음을 확인하였는데 여기서 위치 매개변수는 극한강수의 평균적 크기를, 규모 매개변수는 분산을 의미한다. 또한 형상 매개변수는 미래로 갈수록 감소하고 있는데 이는 왜도계수와 관련된 변수이다. 이로부터 호남지역의 미래 극한강수의 비정상성을 확인하였다. 즉 호남지역의 극한강수는 미래로 갈수록 평균이 커지고 발생하는 극한강수 간의 변동성이 커짐을 확인하였다. 또한 분포 곡선 상위 꼬리가 두터워져 큰 극한강수의 발생빈도가 잦아져, 현재 기후의 20년 재현기간이 미래로 갈수록 점차 짧아지리라 전망하였다.

이 연구는 미래 극한강수와 가뭄변화 전망을 위하여 관측자료가 아닌 RCP 기후변화 시나리오를 이용하였다. 따라서 지구시스템의 물리적 인과관계가 효과적으로 반영되었다는 점에서 기존 관측자료를 기반으로 한 연구와 차이와 의의가 있다. 결론적으로 지역기후모델이 새로운 배출 시나리오인 RCP에 따라 기후변화로 인하여 예상되는 극한강수와 가뭄의 증가를 효과적으로 모의하고 있음을 확인하였다.

References

- [1] Green Growth Korea. *Korea Meteorological Agency*. 2013. Abnormal climate report 2012.
- [2] An, Jeong Hoon, Pil Seon Huang, and Sin Uk Kang. 2012. Conditions and Maneuver of Spring Drought 2013. *Korea Water Resources Association Journal*. 45(9): 84-91.
- [3] National Institute of Meteorological Research. 2011. *Understanding Climate Change IX: Climate Change of Honam*. National Institute of Meteorological Research.
- [4] National Institute of Meteorological Research. 2011. *Climate Change Scenario Report 2011*. National Institute of Meteorological Research.
- [5] IPCC. 2007. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment. Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change in Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor, and Miller, H.L. eds. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996.
- [6] Vicente-Serrano S. M. and Santiago Beguería, Juan I. López-Moreno. 2010. A Multiscalar Drought Index Sensitive to Global Warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index: SPEI *Journal of Climate*. 23: 1696-1718.
- [7] Walters, D. N., M. J. Best, A. C. Bushell, D. Copsey, J. M. Edwards, P. D. Falloon, C. M. Harris, A. P. Lock, J. C. Manners, C. J. Morcrette, M. J. Roberts, R. A. Stratton, S. Webster, J. M. Wilkinson, M. R. Willett, I. A. Boutle, P. D. Earnshaw, P. G. Hill, C. MacLachlan, G. M. Martin, W. Moufouma-Okia, M. D. Palmer, J. C. Petch, G. G. Rooney, A. A. Scaife, and K. D. Williams. 2011. The Met Office Unified Model Global Atmosphere 3.0/3.1 and JULES Global Land 3.0/3.1 Configurations, *Geosci. Model Dev. Discuss*. 4: 1213-1271.
- [8] Sung, Jang Hyun, Hyun Suk Kang, Su Hee Park, Chun Ho Cho, Deg Hyo Bae, Young Oh Kim. 2012. Projection of Extreme Precipitation at the End of 21st Century over South Korea Based on Representative Concentration Pathways(RCP). *Korean Meteorological Society Journal(atmosphere)*, *Korean Meteorological Society*. 22(2): 221-231.
- [9] Collins, W. J., N. Bellouin, M. Doutriaux-Boucher, N. Gedney, T. Hinton, C. D. Jones, S. Liddicoat, G. Martin, F. O'Connor, J. Rae, C. Senior, I. Totterdell, S. Woodward, T. Reichler, and J. Kim. 2008. *Evaluation of HadGEM2 Model*. Hadley Centre Technical Note.
- [10] Boo, K. O., W. T. Kwon, J. H. Oh, and H. J. Baek. 2004. Response of Global Warming on Regional Climate Change over Korea: An Experiment with the MM5 Model. *Geophys. Res. Lett.*, 31, L21206, DOI:10.1029/2004GL021171.
- [11] Boo, K. O., W. T. Kwon, and H. J. Baek. 2006. Change of Extreme Events of Temperature and Precipitation over Korea Using Regional Projection of Future Climate Change. *Geophys. Res. Lett.*, 33, L01701, doi:10.1029/2005GL023378.
- [12] Im, E. S. and W. T. Kwon. 2007. Characteristics of Extreme Climate Sequences over Korea Using a Regional Climate Change Scenario. *SOLA*. 3: 17-20.
- [13] Koo, G. S., K. O. Boo, and W. T. Kwon. 2009. Projection of Temperature over Korea Using an MM5 Regional Climate Simulation. *Climate Research*. 40: 241-248.
- [14] Kim, Young Oh and Jang Hyun Sung. 2008. Recommendations for Guidelines Enactment of Design Flood Volume. *Korea Water Resources Association Journal*. 41(4): 55-59.
- [15] Lee, Jae Su. 2005. *Hydrology*. Seoul: Goomibook.
- [16] Stedinger, J. R., R. M. Vogel, and E. Foufoula-Georgiou. 1993. *Chapter 18, Frequency Analysis of Extreme Events, Handbook of Hydrology*. in Maidment, D. R., McGraw-Hill.
- [17] Mavromatis, T. 2007. Drought Index Evaluation for Assessing Future Wheat Production in Greece. *International Journal of Climatology*. 27: 911-924.
- [18] Kempes, C. P., O. B. Myers, D. D. Breshears, and J. J. Ebersole. 2008. Comparing Response of Pinus Edulis Tree-ring Growth to Five Alternate Moisture Indices Using Historic Meteorological Data. *Journal of Arid Environments*. 72: 350-357.
- [19] McKee, T. B., N. J. Doeskin, and J. Kleist. 1993. *The Relationship of Drought Frequency and Duration to Time Scales*. Proc. 8th Conf. on Applied Climatology, January 17 - 22, 1993, American Meteorological Society, Boston, Massachusetts. 179 - 184.
- [20] Thornthwaite, C. W. 1948. An Approach Toward a Rational Classification of Climate. *Geographical Review*. 38: 55-94.
- [21] Thornthwaite, C. W. and J. R. Mather. 1955. The Water Balance. *Publications in Climatology*. 8(1): 1-104.
- [22] Loukas, A., L. Vasiliades, and J. Tzabiras. 2008. Climate Change Effects on Drought Severity. *Advances in Geosciences*. 17: 23-29.

참고문헌 (References in Non-roman Script)

- [1] 녹색성장위원회, 기상청. 2013. 이상기후보고서 2012 기상청.
- [2] 안정훈, 황필선, 강신욱. 2012. 2012년 봄 가뭄의 상황 및 대응. 한국수자원학회논문집. 45(9): 84-91.
- [3] 국립기상연구소. 2011. 기후변화 이해 IX: 호남의 기후변화. 국립기상연구소
- [4] 국립기상연구소. 2011. 기후변화시나리오보고서 2011. 국립기상연구소.
- [8] 성장현, 강현석, 박수희, 조천호, 배덕효, 김영오. 2012. 대표농도경로(RCP)에 따른 21세기 말 우리나라 극한강수 전망. 한국기상학회논문집. 22(2): 221-231.
- [14] 김영오, 성장현. 2008. 설계홍수량 가이드라인 제정을 위한 제언. 한국수자원학회논문집. 41(4): 55-59.
- [15] 이재수. 2005. 수문학. 서울: 구미서관.

김병식: 인하대학교에서 공학박사학위(논문제목: 기후변화에 따른 유역의 수문요소 및 수자원 영향평가)를 취득하였다. 또한 최근 “Evaluation of flash flood severity in Korea using the modified flash flood index(2013, SCI)” 논문을 등재, 현재 국립강원대학교 교수로 재직 중이며 주로 수문해석 및 기후변화 영향평가 분야를 연구하고 있다(hydrokbs@kangwon.ac.kr).

장인기: 국립기상연구소 기후연구과에 근무하였으며, 주된 업무분야는 지구시스템모델 구축지원 및 기후변화 시나리오 자료산출 지원 등이었다. 현재 국립강원대학교 대학원에 재학 중이다(nabojima@naver.com).

민선홍: 인하대학교에서 공학박사학위(논문제목: 조류 형광을 이용한 하천수의 급성 금속독성 평가)를 취득하였다. 또한 “집중 강우에 따른 토석류 유출의 수치계산”(2009.11. GIS학회) 논문을 등재, 현재 국립강원대학교 교수로 재직 중이며 주로 상하수도/토목환경시공/토목환경설계 분야를 연구하고 있다(sunmin@kangwon.ac.kr).

성장현: 현재 국토교통부 영산강홍수통제소 시설연구사로 재직 중이며, 주된 연구분야는 기후변화, 극한분석 및 확률통계로 최근 “대표농도경로(RCP)에 따른 21세기 말 우리나라 극한강수 전망” 논문을 한국기상학회지에 게재하였다(jhsung1@korea.kr).