RCP 기후변화 시나리오 기반의 미래 극한강수의 비정상성 빈도해석

Non-stationary Frequency Analysis for Extreme Precipitation based on Representative Concentration Pathways (RCP) Climate Change Scenarios

성장현* · 김병식** · 강현석*** · 조천호***

Sung, Jang Hyun · Kim, ByungSik · Kang, Hyun-Suk · Cho, ChunHo

Abstract

Due to the Climate Change and Climate Variability in the world, the temperature, precipitation, evaporation etc, hydrologic cycle components are changing rapidly compared with the past. Previous researches have presented many results of extreme hydrological events and frequency increases. In Korea, during latest 10years (1999~2008), the frequency of localized heavy rain above 100 mm in a day occurred totally 385 times, compared 1970~80s when the frequency was 222 times, it increased 1.7 times. For 2011, from early July to mid-August, due to the rainy season and localized heavy precipitation, the accumulated precipitation reached 1285.3 mm. In Seoul and metropolitan areas, the localized heavy precipitation over design precipitation of 100year frequency happened, causing widely flooded area and causing property damage and human casualties in the downtown area. According to the latest extreme flood moved to upper tail of existing probability density function, it is expected that future flood damage frequency and intensity will increase comparing present situation. In this paper, in order to project the future influence of extreme flood of the Korean peninsula, comparing the IPCC 5 Report (AR5), according to the Representative Concentration Pathways (RCP), newly promoted and simulated regional climate model was applied to summary precipitation and considering to the exterior factors, the non-stationary frequency analysis was performed. This result range across the South Korea areas, and the whole increase of extreme precipitation was checked. Especially, following to RCP 4.5 and 8.5 parts, the future 20year frequency average would be reduced to 12.5years, 11.9years separately in the place, so it is expected that the flood safety will be reduced.

Key words : Extreme precipitation, RCP, Non-stationary

요 지

전 세계적으로 기후변화와 변동으로 인해 기온, 강수 등의 수문순환 요소들이 과거와는 다르게 빠른 속도로 변화하고 있으며 많은 선행 연구들은 극한 수문사상의 규모 및 빈도가 증가한다는 결과를 보여 주었다. 우리나라의 경우 최근 10년간 (1999~2008년) 1일 100 mm 이상 집중호우의 발생빈도는 총 385회로, 70~80년대 222회에 비해 무려 1.7배나 증가했으며 2011년의 경우 7월 초부터 8월 중순까지 지속적인 장마와 집중호우로 인해 1285.3 mm의 누적강수량이 발생하였으며, 서울 및 수도권 지역에서 100년 빈도 설계강수량을 초과하는 집중호우 발생으로 서울의 도심지역 곳곳이 침수되어 많은 재산피해와 인명피해를 입었다. 최근 발생하는 극한강수는 기존 확률밀도함수의 상위 꼬리부분 쪽으로 이동함으로써 미래에 발생하게 될 물 관련 재해의 빈도 및 강도가 현재에 비하여 증가할 것으로 전망되고 있다. 본 연구에서는 기후변화가 한반도의 미래 극한강수의 발생에 미치는 영향을 전망하기 위해 IPCC 5차 보고서(AR5)에 대비하여 새롭게 권장되는 대표농도경로(Representative Concentration Pathways, RCP)에 따라 모의된 지역기후모형의 여름철 강수량을 외부인자로 고려한 비정상성 빈도해석을 실시하였다. 그 결과, 남한지역에 걸쳐서 극한강수의 전반적인 증가를 확인하였으며 특히, RCP4.5와 8.5를 따르는 미래에는 20년 빈도가 지점평균 각각 12.5년, 11.9년으로 줄어들어 치수안전도가 저하되는 것으로 전망되었다.

핵심용어 : 극한강수, 대표농도경로, 비정상성

1. 서 론

기후변화와 변동으로 인해 기온, 강수 등의 수문순환 요소들이 과거와는 다르게 빠른 속도로 변화하고 있다. 이에 따

라 기후변화가 수문학적 극한사상에 미치는 잠재적 영향은 지난 수십 년간 수자원공학 관련 분야에 많은 관심을 이끌어 왔으며 많은 선행 연구들은 극한 수문사상의 규모 및 빈도가 증가한다는 결과를 보여 주었다(Kite, 1993; Boorman and

*정회원 · 국립기상연구소 기후연구과 연구원(E-mail : jhsung1@korea.kr)

**정회원 · 국립강원대학교 방재전문대학원 도시환경방재학과 교수(교신저자)

***국립기상연구소 기후연구과 연구관

Sefton, 1997; Panagoulia and Dimou, 1997; Gellens and Roulin, 1998; Mirza et al., 1998). 우리나라의 경우에도 2001년 7월 15일 서울과 경기지역에 발생한 집중호우는 시간당 최대 99.5 mm로 당시 관측 이래 시간당 최대 강수량 3위를 기록하였고, 일 강수량은 273 mm로 일 최대 강수 5위를 기록하였다. 2010년 9월 21일에는 수도권과 강원지역을 중심으로 시간당 100 mm가 넘는 집중호우가 발생하였고, 2011년 7월 27일 서울에 발생한 호우는 지속시간 2시간 100mm 빈도 강수량을 초과하였다. 이와 같이 최근 들어서 설계규모를 넘어서는 극한 강수사상의 발생은 다양한 수공구조물들과 물 관련 방재체계를 파괴하는 원인이 되고 있기 때문에 극한 강수사상에 대한 현재의 시공간적 특성을 파악하는 것과 미래의 기후변화 하에서 극한사상이 어떻게 변화하고 수공구조물의 수명기간 동안 극한강수의 확률분포형이 어떻게 변화할지를 분석하는 것이 매우 중요하다. 하지만 현재 수공구조물 설계에 쓰이는 확률강수량은 기후변화나 장기적 변동에 영향을 받지 않는 정상성(stationary)을 가정하고 있어, 앞으로 다가올 미래에 지금까지의 치수안전도 기준이 유효한가에 대한 재고가 필요한 시점이다.

미래 극한 강수사상의 초과확률을 추정하기 위해서는 미래 기후변화 시나리오가 필요하며 이때 수문학적 활용을 위한 지역규모의 고해상도의 시나리오 자료를 생산하기 위해서는 역학적(dynamic) 혹은 통계적 상세화(statistical downscaling)가 필요하다. 통계적 상세화는 저해상도 자료와 그 격자에 포함되는 관측지점의 관측자료와의 일대일 관계 분석을 통하여 주요한 시공간적 상관성을 정량화하는 방법이다. 즉, 과거와 현재의 시공간적 변화가 미래에도 유지되리라 가정한다. 역학적 상세화로 생산된 전망자료는 기후변화 강제력을 고려하는 지역기후모형을 이용하여 기후시스템의 역학 및 물리과정, 기후시스템간의 상호작용, 기후변화의 변동성 등을 고려할 수 있고, 변수간의 시공간적 상관성을 지구시스템의 물리·역학적 과정으로 해석할 수 있다는 장점이 있다.

따라서, 본 논문에서는 통계 기법인 조건부 Generalized Extreme Value (GEV) 극치분포를 이용하여 역학적 상세화 기법으로 생성된 RCP 기반의 고해상도 기후변화 시나리오 자료의 여름철 강수를 외부인자로 고려한 비정상성 빈도해석을 실시하여 미래 발생 가능한 극한 강수사상을 추정하였다. 즉, 정상성을 고려한 현재 기후의 GEV 분포에 온실가스 효과로 인한 지구온난화가 고려된 강수정보를 고려하여 미래의 새로운 극한강수 분포를 추정하였다. 본 논문의 구성은 2장에서는 비정상성 빈도해석의 최신 연구동향을 3장에서는 관측자료, 지역기후변화 시나리오 자료와 분석 방법을 간단히 소개하였고, 4장에서는 정상성 및 비정상성을 가정한 현 시점에서의 빈도 강수량과 비정상성을 고려한 미래 빈도 강수량을 비교하였고, 5장에서는 요약 및 결론을 제시하였다.

2. 최신 연구동향

지금까지의 전통적 빈도해석은 극한사상을 기후변화나 변동 등의 영향을 받지 않는 정상성이라고 가정하고 있다

(Olsen et al., 1999). 그러나 최근 선행연구에 따르면 정상성의 가정이 유효한가에 대한 점검과 비정상성을 고려한 빈도해석의 필요성을 절감하게 하고 있으며(Jain and Lall, 2000; 2001; Franks and Kuczera, 2002; Milly et al., 2002; Pizaro and Lall, 2002; Sankarasubramanian and Lall, 2003), 기후변화 및 변동에 의한 외부변화 요인을 반영하기에는 한계가 있음을 지적하고 있다. 이러한 비정상성을 통계학적 또는 지구시스템의 역학적 과정으로 해석하여 미래 극한사상의 변화를 전망하는 연구가 최근에 활발히 진행되고 있다.

비정상성 빈도해석 연구는 크게 관측자료에 내재된 경향성을 고려하기 위하여 확률분포형의 매개변수를 시간의존 함수로 해석하는 연구와 기후변화와 변동성을 외부상관 기상변수로 고려하는 연구로 구분할 수 있다. Stedinger and Crainiceanu (2001)는 비정상성을 고려한 연최대 홍수량의 초과확률 추정을 위해 평균의 선형추세를 고려한 이변수 대수정규분포(two-parameter log-normal distribution)모형과 대수정규 ARMA 모형을 개발하였다. Strupczewski et al. (2001)은 연최대 홍수량을 추정하기 위한 Pearson Type-III (PT-III) 분포의 매개변수를 시간에 따라 변하는 변수로 정의하고, 매개변수 추정방법으로는 최우도법을 제안하였다. Nogaj et al. (2005)은 규모(scale) 매개변수를 시간에 따른 변수로 취급하는 Generalized Pareto (GPA) 분포를 이용하여 비정상성을 고려한 홍수빈도해석을 제안하였다. El Adlouni et al. (2005)과 Renard et al. (2005) 역시 GEV분포의 매개변수를 시간에 따른 변수로 가정하고 선형회귀식으로 추정함으로써 비정상성을 고려한 빈도해석을 시도하였다. He et al. (2006)은 Gumbel 분포와 Log Pearson type-III (LP-III) 분포를 이용하여 각각 분포의 매개변수를 시간과 회귀분석하여, 미래의 빈도 홍수량을 계산하였다. Leclerc and Ouarda (2007)은 홍수빈도해석을 위한 GEV 분포의 매개변수들을 시간의존 함수로 표현한 비정상성 모형을 제안하였다.

외부상관 기상변수를 고려한 연구도 전 세계적으로 진행되고 있으며, 주로 원격상관분석 등을 이용하여 지역의 극한사상 변동과 전지구적인 기후인자 변동간의 상관성을 반영하고 있다. 오재호와 홍성길(1995)은 전지구 모델의 광역적 강수변동 자료를 이용하여 대기 중 CO₂ 농도의 배증에 따른 한반도 강수량 변화를 예측하였다. 윤용남 등(1999)은 지구온난화에 따른 홍수 및 가뭄의 빈도변화의 검토를 위하여 현 상태가 지구온난화 과정의 한 시점이라는 가정 아래 현재까지 관측된 일 강수량 자료를 이용하여, 과거 연강수량의 증가가 미래 일 강수의 분포에 미치는 영향을 분석하였다. 김병식 등(2003)은 통계학적 축소기법을 이용하여 국지규모의 기후변화의 영향을 평가할 수 있는 방법을 제시하였으며, 통계학적 회귀방법인 전이함수와 추계학적 일기발생 모형을 이용하여 전국 규모의 기후변화 시나리오를 작성하였다. 기후변화가 장기간에 걸쳐 지속적으로 서서히 변화하는 특성을 가지는 반면 기후변동은 기후변화에 비하여 짧은 주기를 가지며 반복적으로 발생한다. 대표적인 사례는 바로 El Nino와 La Nina로 대표되는 ENSO (El Nino Southern Oscillation), PDO (Pacific Decadal Oscillation)와 NAO (Northern Atlantic

Oscillation)이다. Porparto and Ridolfi (1998)는 최근 비정상성 시계열에서 뚜렷한 변동성이 재현될 수 있음을 설명하였고, Olsen et al. (1999)은 홍수위험도의 변화를 초래하는 요인으로 PDO와 NAO를 지목하고, 선형회귀식을 이용하여 연최대 홍수량이 두 기후요인과 관계가 있는 시간의 변수임을 제시하였다. Coles (2001)는 GEV 분포의 위치(location) 매개변수를 시간의 변수로 가정하고 El Nino에 영향을 받는 연최대 파고(wave height)를 추정하는데 사용하였다. Wang and Yang (2005)는 북인도양 해수면 온도와 몽골지역의 평균 강수량을 활용하여 예측 모형을 구축하고 지역 강수예측을 수행하였다.

비정상성을 다룬 국내 사례로 권영문 등(2009)은 기상청 산하 56개 관측강수를 분석하여 증가 경향성을 가지는 관측 지점에 대하여 그 경향성을 반영함으로써 설계 목표년도의 확률강수량을 산정하는 방법을 제안하였다. 권현한과 김병식(2009)은 Markov Chain 모형의 매개변수인 천이확률과 확률 분포형의 매개변수 등을 연결함수(link function)를 통해 외부인자와 연동하도록 하였으며, 정준상관분석(canonical correlation analysis)을 통해 매개변수를 추정하였다. 이창환 등(2010)은 Gumbel 분포의 평균에 경향성을 반영하여 확률강수량을 평가하였다. 최근에는 극한사상의 경향성, 주기성을 고려할 수 있는 비정상성 극한치 이론(Non-Stationary Extreme Value theory; NSEV)에 대한 연구가 진행되어 오고 있다(Smith, 1989; Groisman et al., 1999).

이상의 선행연구들의 공통점은 전통적 빈도해석은 기후변화 및 변동에 의한 외부변화 요인을 반영하기에는 한계가 있으며 외부인자를 고려한 비정상성 빈도해석의 필요성을 강조하고 있다.

3. 분석자료 및 방법론

3.1 관측 및 지역기후모형자료

기상청은 기후변화 대응을 위한 국가전략 수립 지원을 위하

여 정부간협의체(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)에서 5차 평가보고서 작성을 위하여 새롭게 권장하는 대표농도경로(Representative Concentration Pathways, RCP) (Moss et al., 2008)의 온실기체 배출시나리오에 따른 전지구 및 지역기후변화 시나리오를 산출하고 있다(국립기상연구소, 2011). 본 논문에서 사용된 기후변화 전망자료는 기상청이 영국 기상청의 지역기후모델(HadGEM3-RA, Walters et al., 2011)을 도입하여 생산한 한반도 지역기후변화 시나리오 자료이며, 영역은 우리나라를 중심으로 중국 및 일본의 일부 지역을 포함한다(Fig. 1a). 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 전망 자료가 사용되었다. 전지구 기후변화 전망자료 역시 기상청이 영국기상청으로부터 도입한 대기-해양-해빙 결합모형(HadGEM2-AO, Collin et al., 2008)을 이용하여 산출하였으며 수평 격자 거리는 약 135 km(동서방향 1.875°, 남북방향 1.25°)이다. HadGEM3-RA의 역학 체계 및 물리과정은 전지구 모형의 대기모형과 유사하다. 비정수 역학계이며 밀도를 제외한 모든 예단변수에 대하여 준-라그랑지안 이류를 적용한다. 특정 관심 지역을 모델 영역으로 설정함에 있어, 지구의 극점을 수직적으로 이동시켜 모형 영역의 중심이 적도 지역에 위치하게 하는 적도 위경도 격자체계(equatorial latitude-longitude grid system)을 가진다. 이와 같은 좌표계의 특성은 지도 투영법을 적용한 직각 좌표계를 사용하는 일반적인 지역기후모형과 구분되는 것으로, 모델 영역이 넓을 때 지도인자로 인한 왜곡현상이 발생하지 않으며 따라서 모형 영역의 확장이 비교적 용이하다는 장점이 있다. HadGEM3-RA는 과거기후모의(1950-2005)와 2중 시나리오(RCP8.5/4.5)에 기초한 미래 기후전망(2006-2099)에 대한 자료로 구성된다. 우리나라가 위치한 동아시아 지역은 지리적 특성이 매우 복잡하고 기후 변동성이

Fig. 1. 한반도 모델 영역, RCM 격자와 관측지점의 위치 정보

Table 1. 관측지점 기본 정보(ID: identification number)

ID	Name	Lat (N)	Lon (E)	Elev. (m)	ID	Name	Lat (N)	Lon (E)	Elev. (m)
90	Sokcho	128.5647	38.2509	17.8	202	Yangpyeong	127.4945	37.4886	47.0
100	Daegwallyeong	128.7587	37.6869	842.5	203	Icheon	127.4842	37.2640	77.8
101	Chuncheon	127.7357	37.9026	76.8	211	Inje	128.1671	38.0599	198.6
105	Gangneung	128.8910	37.7515	25.9	212	Hongcheon	127.8804	37.6836	140.6
108	Seoul	126.9658	37.5714	86.0	221	Jecheon	128.1943	37.1593	263.2
112	Incheon	126.6244	37.4776	68.9	226	Boeun	127.7341	36.4876	174.1
114	Wonju	127.9466	37.3376	149.8	232	Cheonan	127.1213	36.7796	24.9
119	Suwon	126.9853	37.2723	33.6	235	Boryeong	126.5574	36.3272	15.3
127	Chungju	127.9527	36.9704	114.1	236	Buyeo	126.9208	36.2724	11.3
129	Seosan	126.4939	36.7766	25.9	238	Geumsan	127.4818	36.1056	171.3
130	Ulsan	129.4128	36.9918	49.4	243	Buan	126.7166	35.7295	10.7
131	Cheongju	127.4407	36.6392	57.4	244	Imsil	127.2856	35.6123	246.9
133	Daejeon	127.3721	36.3720	68.3	245	Jeongeup	126.8661	35.5632	44.1
135	Chupungnyeong	127.9946	36.2202	242.5	247	Namwon	127.3330	35.4054	89.7
138	Pohang	129.3796	36.0326	1.9	256	Suncheon	127.2391	35.0750	74.4
140	Gunsan	126.7614	36.0053	25.6	260	Jangheung	126.9195	34.6888	45.2
143	Daegu	128.6190	35.8852	57.6	261	Haenam	126.5690	34.5536	13.7
146	Jeonju	127.1550	35.8215	53.5	262	Goheung	127.2757	34.6182	53.3
152	Ulsan	129.3203	35.5601	34.7	272	Yeongju	128.5170	36.8719	210.2
156	Gwangju	126.8916	35.1729	70.5	273	Mungyeong	128.1488	36.6273	170.4
159	Busan	129.0320	35.1047	69.2	277	Yeongdeok	129.4094	36.5333	41.2
162	Tongyeong	128.4356	34.8455	31.7	278	Uiseong	128.6886	36.3561	81.1
165	Mokpo	126.3812	34.8169	37.9	279	Gumi	128.3205	36.1306	47.9
168	Yeosu	127.7406	34.7393	66.1	281	Yeongcheon	128.9514	35.9774	94.1
170	Wando	126.7018	34.3959	35.2	284	Geochang	127.9110	35.6712	220.9
184	Jeju	126.5297	33.5141	19.9	285	Hapcheon	128.1699	35.5650	32.7
188	Seongsan	126.8802	33.3868	17.7	288	Miryang	128.7441	35.4915	12.6
189	Seogwipo	126.5653	33.2461	50.4	289	Sancheong	127.8791	35.4130	138.6
192	Jinju	128.1191	35.2084	21.3	294	Geoje	128.6045	34.8882	45.3
201	Ganghwa	126.4463	37.7074	45.7					

크기 때문에 극한기후 현상을 전망하기 위하여 수평 해상도 수십~수 km이상의 상세한 지역기후변화 시나리오 자료가 요구된다(Boo et al., 2004, 2006; Im and Kwon, 2007, Koo et al., 2009). 따라서, 본 논문에서는 우리나라의 미래 극한 강수 전망을 위하여 12.5 km 분해능 HadGEM3-RA에서 생산한 RCP4.5와 RCP8.5의 지역기후변화 시나리오 자료를 기상청 지상 관측지점으로 이중선형내삽(bi-linear interpolation)하여 사용하였다. RCP4.5는 온실가스 저감정책이 어느 정도 실현되었음을 가정하는 배출시나리오로서 IPCC 4차 평가보고서의 SRES(Special Report on Emissions Scenarios) 배출 시나리오 중 B1과 유사하며, 8.5는 온실가스 저감정책이 전혀 시행되지 않음을 가정하는 시나리오로서 SRES의 A2~A1F1에 상응하는 배출 시나리오이다. 관측자료의 분석지점은 총 59개이며, 38년(1973~2010)의 자료가 이용되었다(Fig. 1b, Table 1).

3.2 Generalized Extreme Value (GEV) 분포

극한사상은 강수 또는 기온 등 기상변수에 극치해석

(extreme analysis)을 적용하여 얻은 확률분포함수에서 10백분위 이하 또는 90백분위 이상의 확률로 발생할 수 있는 현상으로 정의한다(Ganguly, 2007). 일반적으로 연최대 또는 연초과 자료의 시계열을 대상으로 하고 연최대 자료는 GEV, 연초과 자료는 GPA 분포를 적용한다. 연 초과값 자료의 시계열은 자료의 무작위성(randomness)과 적정 임계값(optimum threshold)을 결정하는데 어려움이 있는 반면(Um et al., 2010), 연 최대값 자료의 시계열은 무작위성 확보와 임계값 결정이 자유로운 장점이 있다. 현재 보편적으로 사용되고 있는 극치해석 방법은 연최대 자료를 추출하여 이를 GEV 분포에 적합(fitting)함으로써 특정 크기에 대한 초과확률과 비초과확률(1-초과확률)을 계산하는 과정을 일컫는다(Hosking et al., 1985).

일반적으로 어떤 강수사상의 크기(강수량)가 평균 T 년 동안에 한번 이상 발생하면 재현기간(return period) T 를 가진다고 한다. 재현기간(T)의 역수는 어떤 해에 그 사상보다 같거나 큰 현상이 발생할 초과확률(exceedance probability)에 해당하며, 비 초과확률($P = 1 - \text{초과확률}$)과 재현기간과의 관계는

식 (1)과 같다.

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

극한사상의 비 초과확률을 구하는데 사용하는 일반적인 확률분포형은 GEV분포이며, 그 이유는 GEV분포 상위 꼬리부분의 면적이 커서 극한사상을 표현하기에 적합하기 때문이다. GEV 분포의 비 초과확률을 계산하는 누가분포함수(cumulative distribution function)는 식 (2)로 표현되며, 그 해(x ; 이 논문의 경우 강수량)는 식 (3)으로 구할 수 있다(Stedinger et al., 1993).

$$F(x) = \begin{cases} \exp\left[-\left(1-\kappa\frac{x-\xi}{\alpha}\right)^{1/\kappa}\right], & \kappa \neq 0 \\ \exp\left[-\exp\left(-\frac{x-\xi}{\alpha}\right)\right], & \kappa = 0 \end{cases} \quad (2)$$

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

여기서 ξ, α, κ 는 각각 위치, 규모, 그리고 형상(shape)에 관련된 매개변수이다. GEV분포는 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. 식 (2)에서 변수 x 의 범위 역시 κ 에 따라 달라지는데, $\kappa < 0$ 일 때는 $\xi + \alpha/\kappa \leq x < \infty$, $\kappa = 0$ 일 때는 $-\infty < x < \infty$, $\kappa > 0$ 일 때는 $\infty < x \leq \xi + \alpha/\kappa$ 가 된다(Stedinger et al., 1993). GEV 분포는 형상 매개변수에 크기에 따라 상위 꼬리부분의 두텁기가 달라진다(Fig. 2). 즉, 형상 매개변수가 작아질수록 꼬리부분이 두터워지는 것을 알 수 있으며, 이는 큰 값이 발생할 확률이 커지는 것을 의미한다. 또한 차이는 있지만 대부분의 연최대 일강수는 형상 매개변수가 음수인 구간에 표현된다(Martin and Stedinger, 2000).

정상성을 가정한 빈도해석은 위에서 보인 바와 같이 매개

Fig. 2. 형상 매개변수에 따른 GEV 분포 확률밀도함수의 상위 꼬리부분 변화

변수는 시간의 함수가 아니다. 반면 비정상성은 확률분포형의 1차 모멘트, 2차 모멘트 등이 모두 시간에 따라 변하는 경우로 단순화하여 표현되어, 식 (2)의 누가분포함수는 식 (4)로 바뀌고, 시간에 종속된 매개변수는 식 (5)와 같다. 선형회귀식을 이용하여 외부설명 변수와 경향성을 반영하고 시간에 종속된 위치 매개변수와 시간에 종속된 규모 매개변수를 표현하면 식 (6)과 같다.

$$F(x) = \begin{cases} \exp\left[-\left(1-\kappa(t)\frac{x-\xi(t)}{\alpha(t)}\right)^{1/\kappa(t)}\right], & \kappa \neq 0 \\ \exp\left[-\exp\left(-\frac{x-\xi(t)}{\alpha(t)}\right)\right], & \kappa = 0 \end{cases} \quad (4)$$

$$\xi(t) = \xi_0 + \xi_1(t) \quad (5a)$$

$$\log \alpha(t) = \alpha_0 + \alpha_1(t) \quad (5b)$$

$$\kappa(t) = \kappa \quad (5c)$$

$$\xi(t) = \xi_0 + \xi_1 x(t) \quad (6a)$$

$$\log \alpha(t) = \alpha_0 + \alpha_1 x(t) \quad (6b)$$

$$\kappa(t) = \kappa \quad (6c)$$

Fig. 3. 관측강수 자료로부터 구한 L-왜도와 L-첨도

본 논문에서는 연최대 일강수를 대상으로 하였고, 각 지점별 극한강수 자료가 GEV (Generalized Extreme Value) 확률분포형을 따른다고 가정하고 빈도해석을 실시하였다. 아직까지 실무에서는 Gumbel 확률분포형을 사용하고 있으나 최근의 극한강수 사상을 표현하는 데 있어서는 두꺼운 꼬리 (heavy tail)를 가지고 있는 GEV 확률분포형이 널리 이용되고 있기 때문에 본 논문에서 이용하였다. 또한, GEV 확률분포가 각 관측별 극한강수를 표현하기에 적합한 지를 평가하기 L-모멘트의 비도(ratio diagram) 분석을 실시하였다. L-모멘트의 비도는 일반적으로 L-왜도(skewness)와 L-첨도(kurtosis)를 비교하는 것으로 적정 확률분포형을 찾는 역할을 한다. 다양한 확률분포형의 L-왜도와 L-첨도를 도식하고 관측자료의 L-왜도, L-첨도값을 함께 도식하면 그 일치 정도에 따라 관측자료의 적정 확률분포형을 추론할 수 있다. 관측강수 자료로부터 구한 L-왜도와 L-첨도를 PT-III, Log-Normal (LN2), Gumbel, GEV, GPA, 정규분포(normal distribution)와 Generalized LOGistic (GLO) 분포의 L-모멘트비와 함께 도식하였다(Fig. 3). 관측자료가 GEV 분포(적색실선)에 잘 일치함을 확인하였으며 이를 통해 GEV 확률분포형이 적용가능함을 확인하였다.

4. 적 용

4.1 RCP 기반 기후변화 시나리오에 따른 극한강수전망

지역기후변화 시나리오 자료를 이용하여 현재 기후(1973~2005)와 21세기 말(2070~2099) 기간에 대하여 20년 빈도 강수량을 비교하였다(Fig. 4). 현재 기후에서의 20년 빈도 강수량은 남한지역 평균 약 144 mm/day이지만 RCP4.5에 따른 21세기 말에는 187 mm/day로 43 mm/day 증가할 것으로 전망되었으며 RCP8.5에 따른 21세기 말에는 66 mm/day가 증가된 210 mm/day로 전망되었다. 서울, 강원 동해안 지역과 남해안 지역에서 크고, 경북내륙 지역에서 적은(Fig. 4a) 현재 기후의 공간분포는 21세기 말에도 유지되었다(Fig. 4b, c). 특히, RCP8.5에 따른 21세기 말에 제주도 지역은 다른 지역에

Table 2. 미래 20년 빈도 강수량의 남한지역 평균 증가비율, 지점 최대 및 지점 최소 증가비율(%)과 발생지점

	Increasing ratio[%]	
	At the end of 21st century	
RCP	RCP4.5	RCP8.5
spatial mean	30.1	45.5
maximum	163.4 Seongsan(188)	545.1 Seogwipo(189)
minimum	-35.1 Uiseong(278)	-43.9 Uiseong(278)

비하여 2배 이상 많은 20년 빈도 강수량이 발생하리라 전망되었다(Fig. 4c).

Table 2는 미래 20년 빈도 강수량의 남한지역 평균 증가비율, 지점 최대 및 지점 최소 증가비율과 발생지점을 보여주고 있다. 21세기 말에는 RCP4.5와 8.5에서 남한지역 평균 각각 30.1%, 45.5% 증가되고, 최대 증가비율은 RCP4.5를 따를 때는 성산(id: 188), RCP8.5를 따를 때는 서귀포(id: 189)에서 나타났다. 반면에 최소 증가비율은 두 시나리오 모두 의성(id: 278)에서 나타났다.

극한강수의 현재 기후와 21세기 말 기간에 따른 확률밀도함수의 변화를 Fig. 5에 보였다. 확률밀도함수를 비교해보면 RCP4.5에 따른 21세기 말에는 평균을 의미하는 GEV 분포의 위치 매개변수가 78.1 mm/day에서 95.2 mm/day, 변동성을 의미하는 규모 매개변수가 24.9 mm/day에서 43.6 mm/day로 현재에 비하여 증가할 것으로 전망되었다. RCP8.5에 따른 21세기 말에는 위치 매개변수가 현재에 비해 16.7 mm/day증가되어 95.2 mm/day, 규모 매개변수는 19.2 mm/day증가되어 43.6 mm/day로 전망되었다. RCP8.5에 따른 21세기 말에는 위치 매개변수가 104.4 mm/day, 규모 매개변수가 49.3 mm/day로 전망되었고, 현재에 대비한 증가량은 RCP8.5가 RCP4.5보다 많았다. 이는 극한값의 평균과 변동성의 변화가 복사 강제력에 의하여 더 가속화됨을 의미한다. 또한 미래일수록 GEV 분포의 꼬리가 지금보다 두터워져 큰 강수의 발생확률이 증가하리라 예상되었다.

Fig. 4. 현재와 RCP4.5와 8.5에 따른 21세기 말의 20년 빈도 강수량(mm/day)

Fig. 5. 현재와 RCP4.5와 8.5에 따른 21세기 말의 확률밀도함수

4.2 현재 기후에서 극한강수 빈도해석

현재 기후에서의 20년 빈도 강수량을 정상성과 비정상성을 고려하여 산정하였다. Fig. 6a는 관측자료의 정상성을 고려하여 계산된 결과를 나타낸 것이며, Fig. 6b는 지역기후변화

Table 3. 현재 정상성 대비 비정상성 빈도해석 결과의 남한지역 평균 증가비율, 지점 최대 및 지점 최소 증가비율(%)과 발생지점

	Increasing ratio [%]
	Current climate (non-stationarity – stationarity / stationarity)
spatial mean	28.7
maximum	111.8 (105)
minimum	-32.2 (184)

시나리오 자료의 여름철(6~8월: JJA)강수를 외부인자로 고려한 비정상성 빈도해석 결과이다. Fig. 6을 통해 알 수 있듯이 현재 기후에서 정상성 빈도 강수량과 비정상성 빈도 강수량의 공간분포를 비교해 보면 공통적으로 서울을 포함한 중부지방, 강원 동해안 지역과 남해안 지역에서 빈도 강수량이 증가하며 경북내륙 지역에서 감소하는 것으로 분석되었다. 정상성과 비정상성 빈도해석을 통해 산정된 20년 빈도 강수량의 남한지역 평균은 각각 202 mm/day, 243 mm/day, 최대값은 각각 392 mm/day와 423 mm/day, 최소값은 각각 141 mm/day와 158 mm/day로 비정상성을 고려한 경우가 더 많이 산정되었다(Fig. 6).

Table 3은 정상성 빈도해석 대비 비정상성 빈도해석 결과의 남한지역 평균 증가비율, 지점 최대 및 지점 최소 증가비율과 발생지점을 수록한 것이다. 비정상성을 고려한 경우에 남한지역 평균 28.7% 증가되고, 최대 증가비율은 111.8% 증가를 보인 강릉(id: 105)에서 최소 증가비율은 32.2% 감소를 보인 제주(id: 184)에서 나타났다. Table 4는 각 지점별 정상성 및 비정상성 빈도해석 결과를 수록한 것이며 Fig. 7은 빈도 강수량의 상대적 변화량(%)을 나타낸 것이다. 여기서 적색 삼각점은 증가로 삼각형의 크기는 증가율에 비례하고,

Fig. 6. 현재 정상성과 비정상성을 고려한 20년 빈도 강수량(mm/day)

Table 4. 각 지점별 정상성 및 비정상성 빈도해석 결과

ID	Stationary [mm/day]	Non-stationary [mm/day]	Increasing ratio [%]	ID	Stationary [mm/day]	Non-stationary [mm/day]	Increasing ratio [%]
90	216.7	284.2	31.2	202	226.7	294.4	29.9
100	233.9	381.9	63.3	203	199.1	296.6	49.0
101	211.3	248.5	17.6	211	208.9	228.2	9.2
105	186.9	395.8	111.8	212	241.4	244.8	1.4
108	224.1	306.4	36.7	221	205.0	233.1	13.7
112	197.2	315.1	59.8	226	158.7	251.0	58.2
114	177.2	256.9	45.0	232	195.5	204.4	4.6
119	244.0	286.4	17.4	235	214.4	254.0	18.5
127	173.9	213.7	22.9	236	154.7	302.3	95.5
129	242.0	209.9	-13.2	238	219.7	181.4	-17.4
130	160.2	197.6	23.3	243	214.5	194.5	-9.3
131	148.6	212.9	43.3	244	164.3	210.3	28.0
133	212.7	259.4	21.9	245	135.4	178.9	32.2
135	171.1	200.6	17.2	247	206.8	183.0	-11.5
138	142.6	263.2	84.6	256	273.7	243.5	-11.0
140	160.9	223.4	38.9	260	190.8	301.2	57.8
143	171.8	190.7	11.0	261	171.8	288.1	67.8
146	216.1	202.4	-6.4	262	197.4	324.5	64.4
152	178.7	268.6	50.3	272	174.7	216.6	24.0
156	189.6	248.8	31.2	273	214.7	157.8	-26.5
159	224.8	295.2	31.3	277	153.6	234.5	52.7
162	191.9	240.2	25.2	278	160.7	160.9	0.1
165	145.4	208.1	43.1	279	133.4	176.6	32.4
168	230.8	248.1	7.5	281	199.6	156.9	-21.4
170	275.1	345.8	25.7	284	188.9	210.2	11.3
184	436.7	296.0	-32.2	285	212.5	251.4	18.3
188	245.0	263.2	7.4	288	218.1	221.7	1.7
189	238.4	309.3	29.7	289	278.6	306.9	10.2
192	257.8	246.1	-4.5	294	241.1	348.4	44.5
201	232.6	300.1	29.0				

청색 역삼각점은 감소로 삼각형의 크기는 감소율에 비례한다. 서울을 포함한 중부지방과, 강원 동해안 지역과 남해안 지역에서 비정상성을 고려한 경우에 빈도 강수량이 증가하였으며, 경북내륙 지역은 감소 또는 증가가 작음을 확인하였다(Fig. 7).

Fig. 7을 통해 알 수 있듯이 비정상성을 고려하면 극한 강수량의 평균이 커지고 극한강수의 공간적 편차가 증가하였다. Fig. 8은 앞에서 산정된 빈도 강수량을 재현빈도로 나타낸 것이다. 극한강수의 증가가 확인된 49개 지점에서 20년 빈도 강수량이 비정상성을 고려하면 재현기간이 줄어들어 지점평균 9.4년, 감소가 확인된 10개 지점은 재현기간이 늘어 지점평균 43.2년으로 확인하였다.

타 지점에 비하여 증가가 가장 큰 강릉과 서울 지점에서 정상성과 비정상성으로 구한 20년, 50년과 100년 빈도 강수량을 Fig. 9에 나타내었다. Fig. 9에서 흑색 점은 연도별 연 최대 강수량을, 흑색 선은 아래에서부터 각각 20년, 50년,

100년의 정상성 기반의 빈도 강수량을, 적색 선은 아래에서부터 20년, 50년, 100년의 비정상성 기반의 빈도 강수량을 나타낸다. 기존의 정상성 기반의 빈도해석의 결과는 빈도 강수량이 상수로서 일정한 반면 비정상성 기반의 빈도해석의 빈도 강수량은 시간에 따라 증가 또는 감소함을 알 수 있다. 강릉 지점과 서울 지점 모두 정상성 기반으로 추정된 빈도별 강수량이 비정상성에 기반을 둔 빈도별 강수량에 비해 과소 추정되었으며 점차적으로 빈도별 강수량이 증가되고 있었다. 이는 점차적으로 현재 시점의 빈도별 강수량이 미래 특정 시점에서는 건설 당시의 설계빈도 이하로 낮아지고 있음을 의미하는 것이다.

4.3 RCP 기후변화 시나리오 기반의 21세기 말의 극한강수 빈도해석

기후변화가 한반도의 극한강수 발생에 미치는 영향을 전망하기 위해 본 논문에서는 두 종류(RCP4.5, RCP8.5)의 대표

Fig. 7. 현재 정상성 대비 비정상성을 고려한 20년 빈도 강수량의 증가비율(%)

Fig. 8. 현재 정상성 대비 비정상성을 고려한 20년 재현기간의 변화(yr)

농도경로(RCP)따라 생산된 지역기후모형의 여름철 강수를 외부인자로 고려한 비정상성 빈도해석을 적용하였다. 비정상성 빈도해석으로 구한 21세기 말(2099년)의 20년 빈도 강수량

(a) Gangneung

(b) Seoul

Fig. 9. 현재 정상성과 비정상성을 고려한 강릉과 서울의 20년, 50년 및 100년 빈도 강수량(mm/day)

(Fig. 10a, 10b)과 정상성을 가정하여 구한 현재 기후(Fig. 6a)는 공간분포가 유사하였다. 21세기 말에는 서울, 중부내륙, 강원 동해안 지역과 남해안 지역이 타 지역에 비하여 많고 특히, RCP8.5에 따르면 제주도와 강릉 지역은 다른 지역에 비하여 2배 이상 많은 20년 빈도 강수량이 발생하리라 전망되었다(Fig. 10b). 현재 기후에서의 20년 빈도 강수량은 남한평균 약 202 mm/day이지만 RCP4.5에 따른 21세기 말에는 250 mm/day로 38 mm/day증가할 것으로 전망되었으며 RCP8.5에 따른 21세기 말에는 54 mm/day가 증가된 256 mm/day로 전망되었다. Table 5는 현재 기후 대비 각각 RCP에 따른 21세기 말의 남한지역 평균 증가비율, 지점 최대 및 지점 최소 증가비율과 발생지점을 보였다. RCP4.5에 따른 21세기 말에는 남한지역 평균 29.0% 증가되고, 최대 증가비율은 131.6% 증가를 보인 부여(id: 236)에서 최소 증가비율은 31.6% 감소를 보인 제주(id: 184)에서 나타났다. RCP8.5에 따른 21세기 말에는 남한지역 평균 30.1% 증가되고, 최대 증가비율은 108.6% 증가를 보인 강릉(id: 108)에서 최소 증가비율은 33.0% 감소를 보인 제주에서 나타났다. 증감의 공간분포를 보면 서울, 중부내륙지역, 강원 동해안 지역과 남해안 지역에서 증가하고, 경북내륙 지역에서 감소하는 것으로 분석되었다(Fig. 11a, b). 재현빈도 측면에서 살펴보면 극한강

(a) RCP4.5 (2099)

(b) RCP8.5 (2099)

Fig. 10. 21세기 말 비정상성을 고려한 20년 빈도 강수량(mm/day)

Table 5. 현재 정상성 대비 RCP4.5와 8.5에 따른 21세기 말 20년 빈도 강수량의 남한지역 평균 증가비율, 지점 최대 및 지점 최소 증가비율(%)과 발생지점

RCP	Increasing ratio[%]	
	2099yr	
spatial mean	RCP4.5 29.0	RCP8.5 30.1
maximum	131.6 Buyeo(125)	108.6 Gangneung(105)
minimum	31.6 Jeju(184)	33.0 Jeju(184)

수의 증가가 확인된 49개 지점에서 20년에 한번 꼴로 발생하는 강수는 RCP4.5와 8.5를 따르는 미래에는 재현기간이 줄어들어 지점평균 각각 9.0년, 7.7년, 감소가 확인된 10개 지점은 재현기간이 늘어 지점평균 각각 29.5년, 28.7년에 한번씩 발생됨을 확인하였다(Fig. 12a, b).

5. 요약 및 결론

전통적 빈도해석은 정상성을 전제로 하고 있기 때문에 기후변화 및 변동에 의한 외부변화 요인을 반영하기에는 한계가 있음이 지적되어 왔다. 통계학적 의미에서 정상성이란 평균과 분산과 같은 매개변수가 시간 불변이라는 것으로 시간의 변화에 상관없는 상수로써 표현된다는 것을 의미한다. 그러나 실제 극한강수는 여러 가지 요인으로 인하여 확률분포형의 매개변수나 분포 자체가 시간에 따라 점차적으로 변화하기 때문에 기존의 정상성 가정에 근거한 빈도해석과는 다르게 비정상성을 고려할 수 있는 새로운 빈도해석 방법이 요구된다. 따라서, 본 논문에서는 대표농도경로의 온실기체 배

출시나리오(RCP4.5, RCP8.5)에 따른 지역기후변화 시나리오인 HadGEM3-RA 모형의 여름철 강수와 관측강수의 경향성을 고려하여 남한지역의 미래 극한강수 변화를 전망하였다.

비정상성 빈도해석으로 산정된 현재 기후의 20년 빈도 강수량은 정상성 빈도해석으로 산정된 현재 기후의 빈도 강수량보다 전반적으로 증가되었다. 재현빈도 측면에서 살펴보면, 59개 지점 평균 20년 빈도 강수는 RCP4.5와 RCP8.5를 따르는 미래에는 재현기간이 줄어들어 지점 평균 각각 12.5년, 11.9년이 됨을 확인하였다. 이는 현재 기후에서 정상성 기반의 빈도별 강수량이 미래 특정지점에서는 건설 당시의 설계빈도 이하로 낮아지고 있음을 의미하는 것이다(Fig. 13). 특히, 중부내륙 지역과 남해안 지역의 경우 극한강수의 설계빈도가 낮아진 원인은 태풍에 기인한 것으로 추측된다. Boo et al. (2006)은 RegCM3의 A1B시나리오 자료를 이용하여 21세기말에 50 mm/day이상 강수 발생 빈도수가 현재에 비하여 57% 증가되리라 전망하였고, 그 원인을 태풍에서 찾았다. Park et al. (2010)의 선행연구에 따르면 관측자료와 비정상성을 고려한 GEV 분석에서 미래 강수 확률밀도 함수가 기존에 비하여 상위 꼬리쪽으로 이동하고 있음을 밝혔고, 이를 태풍 등의 영향으로 설명하였다. 선행 연구들에서도 미래 기후변화나 변동으로 인한 극한강수 증가의 주요원인으로 태풍을 지목하고 있으며 우리나라의 경우 태풍이 극한강수에 미치는 영향이 크기 때문에 한반도의 태풍 변화를 전망해 보았다(국립기상연구소, 2011). 기후변화 시나리오에서는 직접적인 태풍발생의 위치나 강도에 대한 결과가 산출되지 않기 때문에 연관된 기상요소(Emanuel and Nolan, 2004; Bister and Emanuel, 1998)를 이용하여 HadGEM2-AO가 갖는 현재와 미래 기후에서 태풍의 잠재적 강도(Potential Intensity, PI)를 산정하였다. 우리나라 남해안을 중심으로 한 여름철 태풍의

(a) RCP4.5 (2099)

(b) RCP8.5 (2099)

Fig. 11. 현재 정상성 대비 21세기 말의 비정상성을 고려한 20년 빈도 강수량의 증가비율(%)

(a) RCP4.5 (2099)

(b) RCP8.5 (2099)

Fig. 12. 현재 정상성 대비 21세기 말의 비정상성을 고려한 20년 재현기간의 변화(yr)

잠재 강도 변화는 시간에 따라 증가하여, 시나리오에 따라 21세기 말(2070-2099) 27.9% (RCP4.5)에서 42.1% (RCP8.5) 증가할 것으로 전망되었다(Fig. 14).

본 연구에서는 관측자료 기반으로 한 통계적인 방법과 더불어, 기후변화의 예상되는 증거를 물리적인 인과관계를 갖춘 지역기후모델과 함께 찾았다는 데에 기존 연구와의 차이와

Fig. 13. 현재 20년 재현기간의 21세기 말 변화(yr)

Fig. 14. 현재 및 미래 기후에서 태풍의 잠재적 강도

의의가 있다. 하지만 지역기후모형이 200년 선회(spin-up)시간 만을 사용하였고, 온실가스(greenhouse gas), 에어러졸(aerosol)을 고려하지 않은 자료였다는 점에서 한계가 존재한다. 향후에는 다양한 선회시간을 사용하고, 대기의 온실가스와 에어러졸이 고려된 새로운 지역기후변화(RCP2.6/6.0) 시나리오 자료를 생산할 예정이다. 이에 따라 다양한 시나리오에 대한 비교분석이 가능할 것으로 판단된다. 본 연구에서 적용한 기후변화를 고려한 비정상성 빈도해석은 지구시스템의 물리·역학적 과정을 고려하였기 때문에 관측에서 나타나는 경향성을 유무를 떠나서 미래 기후변화로 예상되는 수공구조물 계획 및 설계의 이론적 근거가 되리라 확신한다.

감사의 글

이 논문은 국토해양부가 주관하고 한국건설교통기술평가원이 시행하는 건설기술혁신사업(과제번호:09CCTI-B054362)과 2011년도 정부[교육과학기술부]의 재원으로 한국연구재단의 지원 (과제번호:20110028914)을 받아 수행된 연구임.

참고문헌

국립기상연구소 (2011) IPCC 5차 평가보고서 대응을 위한 기후

- 변화 시나리오 보고서 2011, pp. 2.
- 권영문, 박진원, 김태웅 (2009) 강우의 증가 경향성을 고려한 목표연도 확률강우량 산정, **대한토목학회 논문집**, 대한토목학회, 29(2B), pp. 131-139.
- 권현한, 김병식 (2009) 비정상성 Markov Chain Model을 이용한 통계학적 Downscaling 기법 개발, **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제42권, 제3호, pp. 213-225.
- 김병식, 서병하, 김남원 (2003) 전이함수모형과 일기발생모형을 이용한 유역규모 기후변화시나리오의 작성, **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제36권, 제3호, pp. 345-363.
- 신진호, 이호신, 권원태 (2010) 역학적 상세화 기법을 활용한 우리나라 극한 강수사상 전망: 일최대강수량 변화 분석, **한국수자원학회 학술발표회 초록집**, 한국수자원학회, pp. 350.
- 오재호, 홍성길 (1995) 대기중 CO₂ 증가에 따른 한반도 강수량 변화, **한국수자원학회지**, 한국수자원학회, 제28권, 제3호, pp. 143-157.
- 오택석, 문영일, 오근택 (2008) 군집분석과 변동해밀도함수를 이용한 지역빈도해석의 확률강우량 산정, **대한토목학회 논문집**, 대한토목학회, 28(2B), pp. 169-278.
- 윤용남, 유철상, 이재수, 안재현 (1999) 지구온난화에 따른 홍수 및 가뭄 발생빈도의 변화와 관련하여: 1. 연/월 강수량의 변화에 따른 일강수량 분포의 변화분석, **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제32권, 제6호, pp. 617-625.
- 이정주, 권현한, 황규남 (2010) 극치수문자료의 계절성 분석 개념 및 비정상성 빈도해석을 이용한 확률강수량 해석, **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제43권, 제8호, pp. 733-745.
- 이창환, 안재현, 김태웅 (2010) 비정상성 강우빈도해석법에 의한 확률강우량의 평가, **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제43권, 제2호, pp. 187-199.
- 정대일, 제리 스테던저, 성장현, 김영오 (2008) 기후변화를 고려한 홍수 위험도 평가, **대한토목학회 논문집**, 대한토목학회, 28(1B), pp. 55-64.
- 허준행, 이영석, 신흥준, 김경덕 (2007) 우리나라 강우자료의 지역빈도해석 적용성, **대한토목학회 논문집**, 대한토목학회, 27(2B), pp. 101-111.
- Beniston, M. and Coauthors (2007) Future extreme events in European climate: An exploration of regional climate model projections. *Climatic Change*, 81, pp. 71-95.
- Bister, M. and Emanuel, K.A. (1998) Dissipative Heating and Hurricane Intensity. *Meteorol. Atmos. Phys.* 65, pp. 233-240.
- Boo, K.-O., Kwon, W.-T., Oh, J.-H. and Baek, H.-J. (2004) Response of global warming on regional climate change over Korea: an experiment with the MM5 model. *Geophysical Research Letters*, 31, L21206, DOI: 10.1029/2004 GL021171.
- Kwon, W.-T. and Baek, H.-J. (2006) Change of extreme events of temperature and precipitation over Korea using regional projection of future climate change. *Geophysical Research Letters*, 33, L01701, doi: 10.1029/2005GL023378.
- Boorman, D.B. and Sefton, C.E.M. (1997) Recognizing the uncertainty in the quantification of the effect of climate on hydrological response. *Climate Change*, 35, pp. 415-434.
- Chang, H. and Kwon, W.-T. (2007) Spatial variation of summer precipitation trends in South Korea, 1973-2005. *Environ. Res. Lett.*, doi: 10.1088/1748-9326/2/4/045012.
- Collins, W.J., Bellouin, N., Doutriaux-Boucher, M., Gedney, N., Hinton, T., Jones, C.D., Liddicoat, S., Martin, G., O'Connor, F., Rae, J., Senior, C., Totterdell, I., Woodward, S., Reichler, T., and Kim, J. (2008) Evaluation of HadGEM2 model, *Hadley Centre Technical Note*, 74, pp. 44.
- Douglas, E.M., Vogel, R.M. and Kroll, C.N. (2001) Trends in floods and low flows in the United States: impact of spatial correlation. *Journal of Hydrology*, 240(1-2), pp. 90-105.
- El Adlouni, S., Ouarda, T.B.M. J., Zhang, X., Roy, R. and Bobee, B.

- (2005) Estimation of non-stationary GEV model parameters. *In Proceedings, 4th Conference on Extreme Value Analysis*, Gothenburg, August 15-19, 2005.
- Emanuel, K.A. and D.S. Nolan (2004) Tropical cyclone activity and global climate. *26th Conf. on Hurricanes and Tropical Meteorology*, Miami, FL, Amer. Meteor. Soc., pp. 240-241.
- Franks, S.W. and Kuczera, G. (2002) Flood frequency analysis: Evidence and implications of secular climate variability New South Wales. *Water Resources Research*, Vol. 38, No. 2, pp. 432-439.
- Ganguly, A.R. (2007) Climate extremes hydro-meteorological extremes and impacts, *fall creek Falls 2007 Workshop* (www.ccs.ornl.gov)
- Gellens, D. and Roulin, E. (1998) Streamflow response of Belgian catchment to IPCC climate change scenario. *Journal of Hydrology*, 210, pp. 242-258.
- Greenwood, J.A., Landwehr, J.M., Matalas, N.C. and Wallis, J.R. (1979) Probability weighted moments: definition and relation to parameters of several distributions expressible inverse form. *Water Resources Research*, 15, pp. 1049-1054.
- Groisman, P.Y., Karl, T.R., Easterling, D.R., Knight, R.W., Jamason, P.B., Hennessy, J.K., Suppiah, R., Page, C.M., Wibig, J., Fortuniak, K., Razuvaev, V.N., Douglas, A., Forland, E., Zhai, P.M. (1999) Changes in the probability of heavy precipitation: important indicators of climatic changes. *Climatic Change*, Vol. 42, No. 1, pp. 243-283.
- He, Y., Brdossy, A. and Brommundt, J. (2006) Non-stationary flood frequency analysis in southern Germany, *The 7th International Conference on HydroScience and Engineering*, Philadelphia.
- Hosking, J.R., Wallis, J.R. and Wood, E.F. (1985) Estimation of the GEV distribution by the method of probability-weighted moment. *Technometrics*, Vol. 27, No. 3, pp. 251-261.
- Im, E.-S. and Kwon, W.-T. (2007) Characteristics of extreme climate sequences over Korea using a regional climate change scenario. *SOLA*, 3, pp. 17-20.
- Jain, S. and Lall, U. (2000) Magnitude and timing of annual maximum floods: Trends and large-scale climatic associations for the Blacksmith Fork River, *Water Resources Research*, Vol. 36, No. 12, pp. 3641-3651.
- Jain, S. and Lall, U. (2001) Floods in a changing climate: Does the past represent the future?. *Water Resources Research*, Vol. 37, No. 12, pp. 3193-3205.
- Kalra, T., Piechota, T.C., Davies, R. and Tootle, G.A. (2006) Is climate change evident in U.S. streamflow?. *Proceedings World Environmental and Water Resources Congress*, ASCE, Omaha, Nebraska, U.S.A.
- Kite, G.W. (1993) Application of a land class hydrological model to climate change. *Water Resources Research*, 29, pp. 2377-2384.
- Koo, G.-S., Boo, K.-O. and Kwon, W.-T. (2009) Projection of temperature over Korea using an MM5 regional climate simulation. *Climate Research*, 40, 241-248.
- Leclerc, M. and Ouarda, T.B.M.J. (2007) Non-stationary regional flood frequency analysis at ungauged site. *Journal of Hydrology*, 343(3-4), pp. 254-265.
- Lins, H.F. and Slack, J.R. (1999) Streamflow trends in the United States. *Geophysical Research Letters*, 26, pp. 227-230.
- Lu, L. and Stedinger, J.R. (1992) Variance of 2- and 3-parameter GEV/PWM quantile estimators: formulas, confidence intervals and a comparison, *Journal of Hydrology*, 138, pp. 247-268.
- McCabe, G.J. and Wolock, D.M. (2002) A step increase in streamflow in the conterminous United States. *Geophysical Research Letters*, 29(24), 2185, doi: 10.1029/2002GL015999.
- Martin, E.S. and Stedinger, J.R. (2000) Generalized maximum likelihood GEV quantile estimator for hydrologic data. *Water Resources Research*, 28(11), 3001-3010.
- May, W. (2008) Potential future changes in the characteristics of daily precipitation in Europe simulated by the HIRHAM regional climate model. *Climate Dyn.*, 30, pp. 581-603.
- Milly, P.C.D., Wetherald, R.T., Dunne, K.A. and Delworth, T.L., (2002) Increasing risk of great floods in a changing climate. *Nature*, 415(6871), pp. 514-517.
- Mirza, M.Q., Warrick, R.A., Erickson, N.J. and Kenny, K. J. (1998) Trend and persistence in precipitation in the Ganges, Brahmaputra and Meghna basin in the south Asia. *Hydrol. Sci. J.*, Vol. 439, No. 6, pp. 845-858.
- Moss, R., M. Babiker, S. Brinkman, E. Calvo, T. Carter, J. Edmonds, I. Elgizouli, S. Emori, L. Erda, K. Hibbard, R. Jones, M. Kainuma, J. Kelleher, J. F. Lamarque, M. Manning, B. Matthews, J. Meehl, L. Meyer, J. Mitchell, N. Nakicenovic, B. O'Neill, R. Pichs, Keywan Riahi, Steven Rose, Paul Runci, Ron Stouffer, Detlef van Vuuren, John Weyant, Tom Wilbanks, J. P. van Ypersele, and M. Zurek, 2008: *Towards New Scenarios for Analysis of Emissions, Climate Change, Impacts, and Response Strategies*. Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva, pp. 132.
- Nogaj, M., Dacunha-Castelle, D., and Yiou, P. (2005) Analysis of climate extreme events under non-stationary conditions. *In Proceedings, 4th Conference on Extreme Value Analysis*, Gothenburg, August 15-19, 2005.
- Olsen, J.R., Stedinger, J.R., Matalas, N.C. and Stakhiv, E.Z. (1999) Climate variability and flood frequency estimation for the upper Mississippi and lower Missouri Rivers, *Journal of the American Water Resource Association*, 35, pp. 1509-1524.
- Panagoulia, D. and Dimou, G. (1997) Sensitivity of flood events to global climate change, *Journal of Hydrology*, 191, pp. 208-222.
- Pagano, T. and Garen, D. (2005) A recent increase in western U.S. streamflow variability and persistence. *Journal of Hydrometeorology*, 6, pp. 173-179.
- Park, J.-S., Kang, H.-S., Lee, Y. S. and Kim, M.-K. (2010) Changes in the extreme daily rainfall in South Korea. *International Journal of Climatology*, DOI: 10.1002/joc.2236.
- Pizaro, G. and Lall, U. (2002) El Nino and Floods in the US West: What can we expect?. *Eos Trans. AGU*, Vol. 83, No. 32, pp. 349-352.
- Porparto, A. and Ridolfi, L. (1998) Influence of weak trends on exceedance probability. *Stochastic Hydrol. Hydraul.*, Vol. 12, No. 1, pp. 1-15.
- Renard, B., Garreta, V., Lang, M. and Bois, P. (2005) Bayesian analysis of extremes in hydrology: A powerful tool for knowledge integration and uncertainties assessment. *In Proceedings, 4th Conference on Extreme Value Analysis*, Gothenburg, August 15-19, 2005.
- Sankarasubramanian, A. and Lall, U. (2003) Flood quantiles in a changing climate: Seasonal forecasts and causal relations. *Water Resources Research*, Vol. 39, No. 5, pp. 1134.
- Smith, R.L. (1989) Extreme value analysis of environmental time series: an application to trend detection in ground-level ozone. *Statistical Science*, 4, pp. 367-393.
- Stedinger, J.R., Vogel, R.M. and Foufoula-Georgiou, E. (1993) Chapter 18, Frequency analysis of extreme events, *Handbook of Hydrology*, edited by Maidment, D. R., McGraw-Hill.
- Stedinger, J.R. and Crainiceanu, C.M. (2001) Climate variability and flood-risk management, risk-based decision making in water resources IX. *Proceedings of the Ninth Conference, United Engineering Foundation*, Santa Barbara, CA, Oct. 15-20, 2000, pp. 77-86, American Society of Civil Engineers, Reston, 2001.
- Strupczewski, W.G., Singh, V.P. and Feluch, W. (2001) Non-stationary

- ary approach to at-site flood frequency modeling I. Maximum likelihood estimation. *Journal of Hydrology*, 248, pp. 123-142.
- Um, M.-J., Cho, W. and Heo, J.-H. (2010) A comparative study of the adaptive choice of thresholds in extreme hydrologic events. *Stoch. Environ. Res. Risk Assess.*, 24, pp. 611-623.
- Walters, D.N., Best, M.J., Bushell, A.C., Copsey, D., Edwards, J.M., Falloon, P.D., Harris, C.M., Lock, A.P., Manners, J.C., Morcrette, C.J., Roberts, M.J., Stratton, R.A., Webster, S., Wilkinson, J.M., Willett, M.R., Boutle, I.A., Earnshaw, P.D., Hill, P.G., MacLachlan, C., Martin, G.M., Moufouma-Okia, W., Palmer, M.D., Petch, J.C., Rooney, G.G., Scaife, A.A. and Williams, K. D. (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, pp. 1213-1271.
- Wang, J. and Yang, P. (2005) A compound reconstructed prediction model for nonstationary climate processes, *Journal of Climatology*, 25, pp. 1265-1277.

◎ 논문접수일 : 12년 04월 03일
 ◎ 심사의뢰일 : 12년 04월 12일
 ◎ 심사완료일 : 12년 04월 16일