

Assessing Human Contribution to the Summer Extreme Precipitation in Korea

Division of Environmental Science and Engineering, POSTECH
Climate Change Research Lab.
Prof. Seung-Ki Min

Cho, Dong-Hee

School of Earth and Environmental Science, Seoul National University

Abstract

한국의 여름철 극한 강수 현상에 대한 인위적 영향을 파악해보았다. 모델 자료는 CPDN의 W@H 동아시아 데이터 중 월 평균 강수량 및 일 강수량 값을 이용하였고, 관측 자료는 같은 값에 대해서 기상청 데이터를 이용하였다. 관측에서 나타난 극 값을 극한 강수의 기준으로 삼아 인위적 강제력이 있을 때와 없을 때에 대하여 그 기준을 넘어가는 빈도 수를 비교하였다. 그 결과 여름철 한국의 월 평균 강수량이나 월 최대 일 강수량의 극한 현상에 대한 인위적 영향을 유의하게 찾을 수 없었다. 여름철 평균 강수량 및 7월 최대 일 강수량에 한해 (다른 기간은 분석하지 않았음.) 극한 강수의 세기와 인위적 영향의 가능성에 대한 양의 상관관계를 발견할 수 있었다.

1. Introduction

2011년 7월, 한국에서는 집중 호우로 인해 수도권을 중심으로 막대한 피해를 입었다. 지하철역 일대가 물에 잠기고 우면산 산사태로 인해 주민들이 목숨을 잃는 등 생활적인 불편 뿐만 아니라 생명에도 위협을 받았다. 실제로 7월 최대 일 강수량에 대한 기상청 자료(Fig. 1)를 살펴보면 2011년 7월의 어떤 날에는 하루 동안 평년보다 많은 비가 내렸음을 확인할 수 있다. 이외에도 극 값을 나타내는 몇 개의 연도가 과거에 있었는데, 이는 과거에도 2011년과 같은 극한 강수 현상이 일어났었음을 보여주고 있다.

폭우를 비롯한 각종 극한현상들은 비단 한국에서만 일어나는 것이 아니다. 전 세계에서 폭염, 홍수 등의 현상이 일어나고 있으며, 연구자들은 이러한 극한 현상들이 지구온난화와 연관이 있는지 밝혀내기 위해 여러 가지 방법으로 연구를 진행하고 있다. 특히 호우 현상에 대한 인위적 영향

의 평가는 부족한 관측 자료 등으로 인해 아직까지 높은 신뢰도를 갖지 못하고 있다. 현재까지의 연구에 의하면, 관측 자료가 충분한 육지에 대해서 인위적 영향이 호우 현상의 강화에 기여했다는 설명은 중간 신뢰도를 갖는다(IPCC, 2013).

기준에 진행되었던 2013년 한국에서 발생한 폭염에 대한 인위적 영향의 평가 연구(Min et al, 2014)에서는 전 지구 기후 모델(GCM; Global

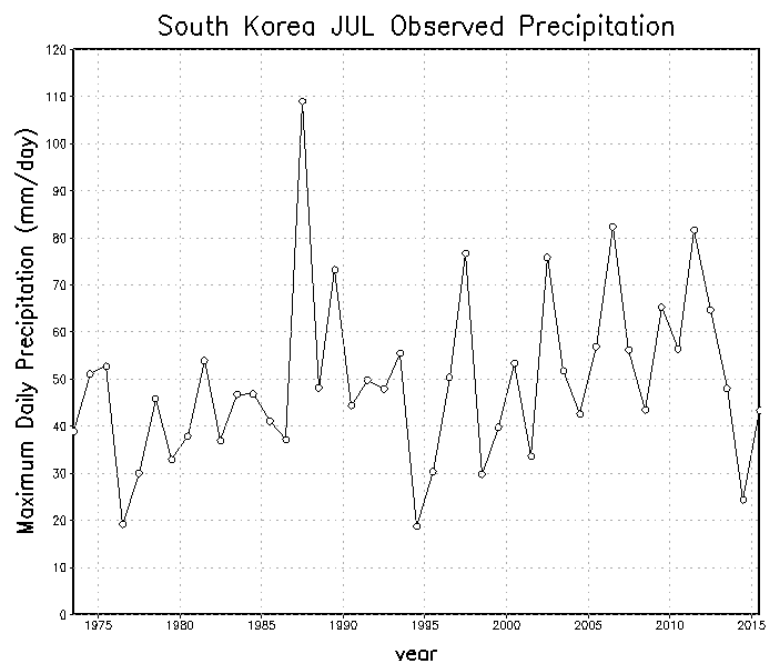


Fig. 1. 한국에서 7월에 관측된 월 최대 일 강수량의 시계열 자료 (1973-2015). 2011년, 2006년, 1987년 등에서 극 값이 나타난다.

Climate Model)을 이용해 한반도 주변의 해수면 온도(SST; Sea Surface Temperature)로부터 인위적 영향을 파악하였다. 이는 연구에서 사용된 모델 자료의 해상도가 낮아 한반도 내륙의 온도에 대한 신뢰성 있는 자료를 얻을 수 없었기 때문이다. 그러나 Climateprediction.net (CPDN)에서 진행하는 Weather@home (W@H) 프로젝트가 수행되면서 세계 각 지역에 대한 고해상도의 모델 자료를 이용할 수 있게 되었다. 따라서 본 연구에서는 W@H의 동아시아 데이터를 이용하여 기존의 GCM 기반이 아닌 지역 기후 모델(RCM; Regional Climate Model) 기반의 극한 강수 분석을 진행하였다.

2. Data and Methods

W@H 동아시아 프로젝트에서 사용된 모델은 RCM이면서 대기 모델(atmospheric-only model)인 HadRM3P이다. 모델 자료는 모든 강제력이 포함된 경우와 자연적인 강제력만이 있을 경우로 나누어 두 가지 조건에 대한 1년 기간 동안의 시뮬레이션 결과가 저장되어 있다. 이 모델은 대기 모델이기 때문에 SST 값을 따로 지정하여 입력해주게 되는데, 모든 강제력 실험(all forcing; 이하 ALL)에는 관측 SST를 넣고 자연 강제력 실험(natural forcing; 이하 NAT)에는 관측 SST에서 인위적인 SST의 증가를 뺀 결과를 넣었다. 인위적인 SST의 증가는 12개의 GCM과 이들의 평균으로부터 계산되었다. GCM에서의 ALL과 NAT에 대해 계산된 SST 시계열 자료에서 1996 - 2005년 간의 평균 SST를 구한 뒤, ALL에서의 평균 SST와 NAT에서의 평균 SST의 차이(Δ SST)를 인위적인 SST의 증가로 보고 이를 HadRM3P에서의 NAT에 반영하였다. 따라서 Δ SST는 공간적인 자료로서 모델 시뮬레이션에 입력되었다.

본 연구에서는 극한 강수에 대한 인위적인

영향을 파악하기 위해 인위적인 강제력이 관측된 극한 현상이 발생할 확률을 어떻게 변화시켰는지 확인하였다. 이는 fraction of attributable risk(FAR; Stott et al, 2004)를 이용해 정량적으로 분석할 수 있다. FAR을 계산하는 방법은 다음과 같다. 어떤 극한 현상의 기준이 되는 값에 대해 그 값을 넘어갈 확률을 ALL과 NAT에 대해 계산한다(각각 P_A , P_N). 그리고 다음 식에 의해 FAR이 계산된다.

$$FAR = 1 - (P_N / P_A)$$

분석을 위한 자료로는 월 강수량 및 일 강수량 데이터를 이용하였다. 6, 7, 8월의 평균 강수량과 이로부터 계산된 여름철 평균 강수량을 사용했고, 일 강수량으로부터 6, 7, 8월의 월 최대 일 강수량을 구하여 사용했다. 관측 자료는 기상청에서 제공되는 자료를 이용하여 모델과 동일한 변수에 대한 데이터를 사용하였다. 기상청 관측 자료는 한국 내륙에 있는 관측소에서 측정된 데이터이므로 모델 자료도 한국 내륙에 해당하는 데이터만 사용해야 한다. 따라서 모델 자료 중 경도 124°-130°E, 위도 34°-38°N 사이에 있는 육지 자료만을 추출해 분석에 이용했다.

관측과 모델 모의 간의 차이가 존재할 가능성을 배제할 수 없기 때문에 절대적인 강수량 값이 아닌 편차(anomaly)를 구하여 비교하였다. 기준 기간을 1987 - 2006년으로 설정하여 이 기간의 평균치인 기후값(climatology)에 대한 강수량의 변화를 비교의 기준으로 삼았다. 실제로 관측과 모델에서의 기후값을 비교해본 결과(Table. 1), 모델에서 실제 관측보다 좀 더 건조한 환경을 모의하는 것으로 나타났다.

HadRM3P에서 이용한 Δ SST는 인위적인 강제력을 반영하는 중요한 경계값이므로 이 값에 의해 FAR의 계산 결과가 달라질 수 있다. 따라서 Δ SST와 그에 따른 FAR 사이에 어떤 관계가 있는지 확인해보았다. Δ SST를 구할 때는

Table. 1. 한국의 여름 월 평균 강수량 및 월 최대 일 강수량에 대한 관측과 모델 자료의 기후 값(climatology). 기준 기간은 1987 - 2006년이며, 월 평균 강수량의 경우 6, 7, 8월의 자료를 평균하여 여름철 평균 강수량에 대한 기후값을 따로 산출하였다. 모든 값에 대해 모델이 관측보다 건조하게 모의하는 것을 볼 수 있다.

Climatology (mm day ⁻¹)		JUN	JUL	AUG	JJA
Mean	Observation	5.89322	9.89809	9.45476	8.44277
	Model	5.33552	4.94734	4.50936	4.93074
Max	Observation	54.6269	53.5003	58.3067	-
	Model	47.7500	43.9436	46.9590	-

한반도의 온도에 영향을 많이 주는 동해 지역인 경도 120°-140°E, 위도 30°-45°N 상에서 (Min et al, 2014) 평균하여 사용하였다. 마지막으로 기준이 되는 관측 값을 임의로 변화시켜 주면서 FAR을 계산하여 극한 강수의 세기에 따라 인위적인 기여의 정도가 어떻게 바뀌는지 확인해보았다. 이 또한 ΔSST에 따라 결과가 달라질 수 있기 때문에 각각의 ΔSST에 대해서 마찬가지로의 계산을 수행하면 FAR의 신뢰 구간을 정성적으로 추정해볼 수 있을 것이다.

3. Results

먼저 여름철 평균 강수량에 대한 모델 자료의 히스토그램을 그려본 결과(Fig. 2), ALL과 NAT에 대한 강수량의 분포 간 차이가 별로 없는 것으로 보여졌다. 여름철 평균 강수량의 관측 최대치(2011년)인 11.5549 mm day⁻¹를 기후 값에 대한 편차로 환산하여 P_A 와 P_N 를 구해본 결과, 각각 7.080%, 6.354%로 나타났다. FAR은 0.10258으로 얻어졌다. 이는 인위적 강제력이 2011년 여름철의 극한 평균 강수를 유발시킨 것으로 보기 어렵다는 의미이다.

6, 7, 8월에 대해서도 각각 월 평균 강수량 및 월 최대 일 강수량에 대해 기상청 자료 중 역대 최대인 극 값을 이용하여 그 값을 초과하

는 모델 데이터의 비율을 계산하였다. 7월 및 8월의 평균 강수량에 대해서는 계산된 비율이 1% 미만으로 너무 작아 유의하지 않다고 판단하여 각각의 두 번째 극 값을 극한 강수의 기준으로 재설정하였다. 각각에 대해 계산된 P_A , P_N 에 대하여 FAR을 구한 결과(Table. 2), 모든 자료에 대해 0.2보다 작은 값이 도출되었다. 이는 한국의 여름 월 평균 강수량 및 월 최대 일 강수량의 극한에 대한 인위적인 영향을 찾기 어렵다는 의미이다. 특히 월 평균 강수량의 경우 7월과 8월 자료에서 음수의 FAR이 나오는 등 인위적 강제력이 관측된 극한 강수를 잘 설명할 수 없는 것으로 나타났다.

월 평균 강수량의 경우 여름철에서 FAR이 가장 높게 나왔고(0.10258), 월 최대 일 강수량의 경우 7월의 FAR이 가장 높게 계산되었다(0.19675). 따라서 이 두 가지 경우에 한해서는 인위적인 영향이 조금이라도 있을 가능성이 있다고 보고 두 가지에 대해서만 추가적인 분석을 진행하였다.

모델의 NAT에 사용된 ΔSST는 총 13개이므로 하나의 자료에 대해 각각의 ΔSST별로 13개의 히스토그램과 13개의 FAR을 얻을 수 있었다. 얻어진 히스토그램(Fig. 3)으로부터 각각의 ΔSST마다 서로 다른 강수량의 분포를 보이는 것을 확인할 수 있다.

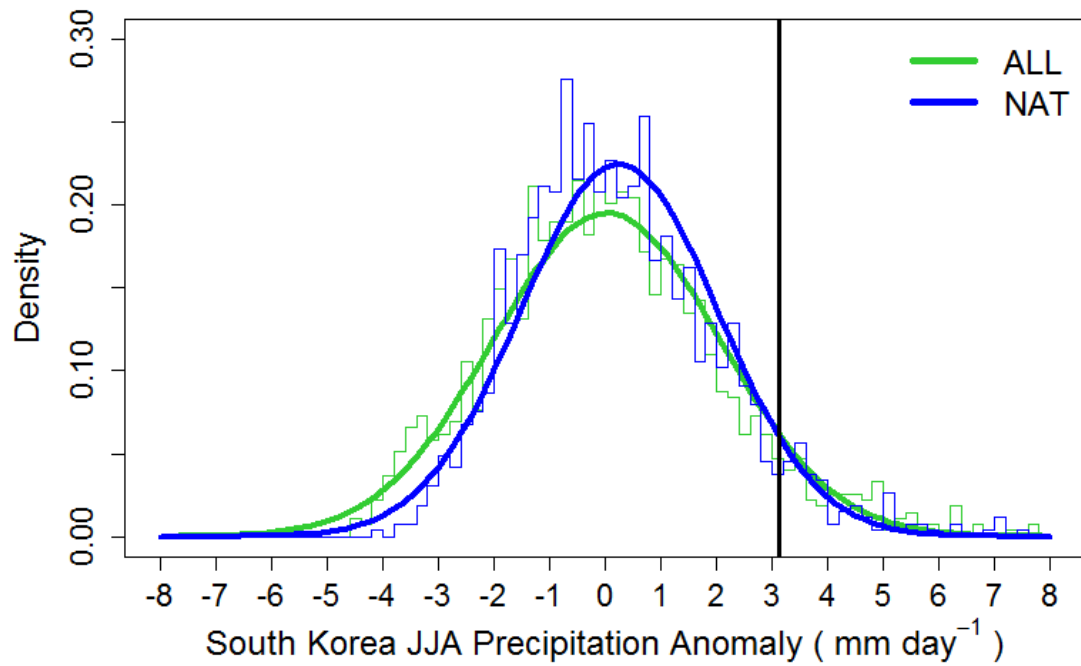


Fig. 2. 한국의 여름철 평균 강수량에 대한 모델 자료의 히스토그램. 세로 방향의 검은색 실선은 관측 최대치인 2011년 여름철 평균 강수량의 편차(anomaly)를 의미한다.

Table. 2. 한국의 여름 월 평균 강수량 및 월 최대 일 강수량에 대해 각각 관측 최대치(7, 8월 평균의 경우 두 번째 극 값)를 초과하는 비율을 계산하고, 이로부터 FAR을 구한 결과.

	Mean			Max		
	JUN	JUL	AUG	JUN	JUL	AUG
P _A	8.248%	3.577%	4.088%	22.59%	4.443%	2.410%
P _N	8.018%	4.614%	4.766%	21.57%	3.569%	2.327%
FAR	0.02789	-0.29010	-0.16585	0.04530	0.19675	0.03414

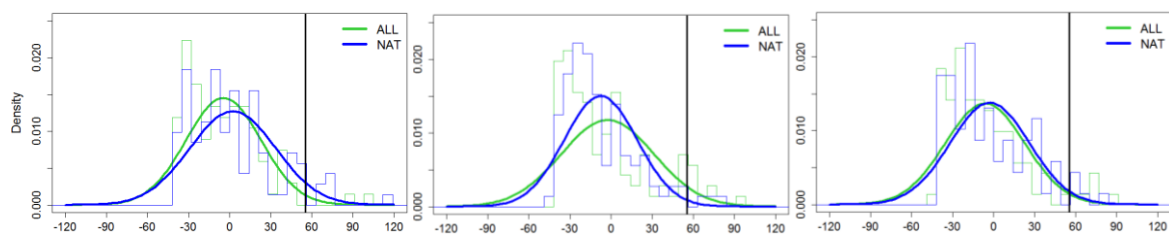


Fig. 3. 7월 최대 일 강수량 자료에 대해 서로 다른 GCM으로부터 얻어진 Δ SST에 따라 다르게 나타나는 13개의 히스토그램 중 3개의 결과를 나타낸 그림. 왼쪽부터 차례로 CNRM-CM5, GISS-E2-R, HadGEM2-ES에 해당.

다음으로는 Δ SST와 FAR 사이에 어떤 관계가 있는지 확인해보았다. Δ SST에 따른 FAR의 값을 그래프로 나타낸 뒤 결정계수를 구한 결과(Fig. 4), 여름철 평균 강수량과 7월 최대 일 강수량 모두 유의한 상관관계를 찾을 수 없었다. Δ SST는 인위적인 SST의 증가를 의미하므로 이러한 결과는 극한 강수에 대한 인위적인 기여가 약하다는 것을 다시 한 번 확인시켜 준다.

마지막으로 극한 강수의 기준치를 0에서부터 증가시키면서 FAR을 계산해본 결과(Fig. 5), 기준치와 FAR 사이에 유의한 비례 관계가 있음을 알 수 있었다. 이는 더 강한 호우 현상일

수록 인위적인 영향의 기여도가 크다는 것을 의미한다. 또한 전체 모델 자료를 Δ SST에 따라 13개의 그룹으로 분류하여 각각 같은 방식으로 기준치에 따른 FAR의 변화를 그려보았다(Fig. 6). 그래프로부터 Δ SST에 따라 FAR의 변화 양상이 달라지는 것을 알 수 있다. 각각의 Δ SST에 따른 FAR의 범위를 FAR의 신뢰구간으로 추정하는 데에 사용한다면, 기준치가 높아질수록 FAR이 될 수 있는 값의 범위가 넓어진다는 결론을 내릴 수 있게 된다. 즉, 극한 강수의 세기가 강할수록 인위적 기여가 불확실해진다는 의미이다.

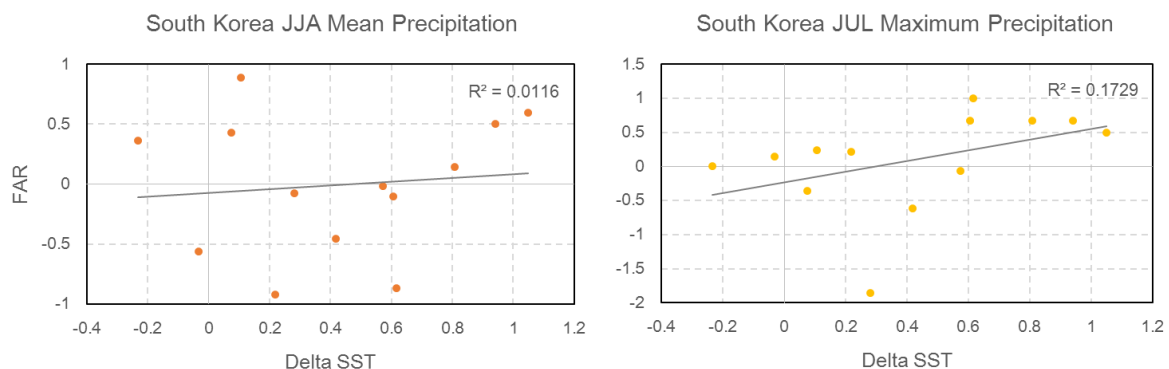


Fig. 4. 여름철 평균 강수량과 7월 최대 일 강수량에 대해 Δ SST와 FAR 사이의 관계를 나타낸 그림. 결정계수(R^2)의 값이 매우 작아 유의한 상관관계를 발견하기가 어렵다.

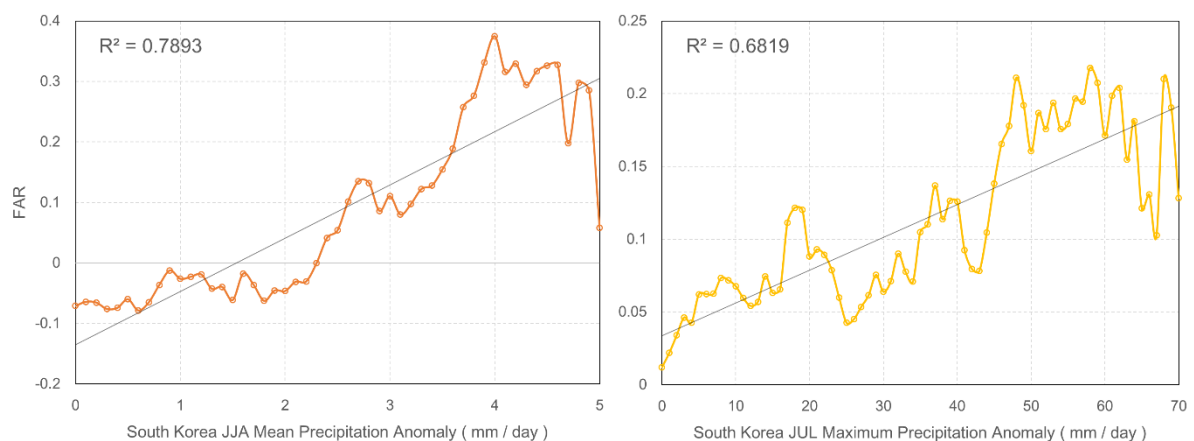


Fig. 5. 극한 강수의 기준치에 따른 여름철 평균 강수량 및 7월 최대 일 강수량에 대한 FAR의 변화. 결정계수(R^2)의 값으로 보아 유의한 양의 상관관계가 있음을 알 수 있다.

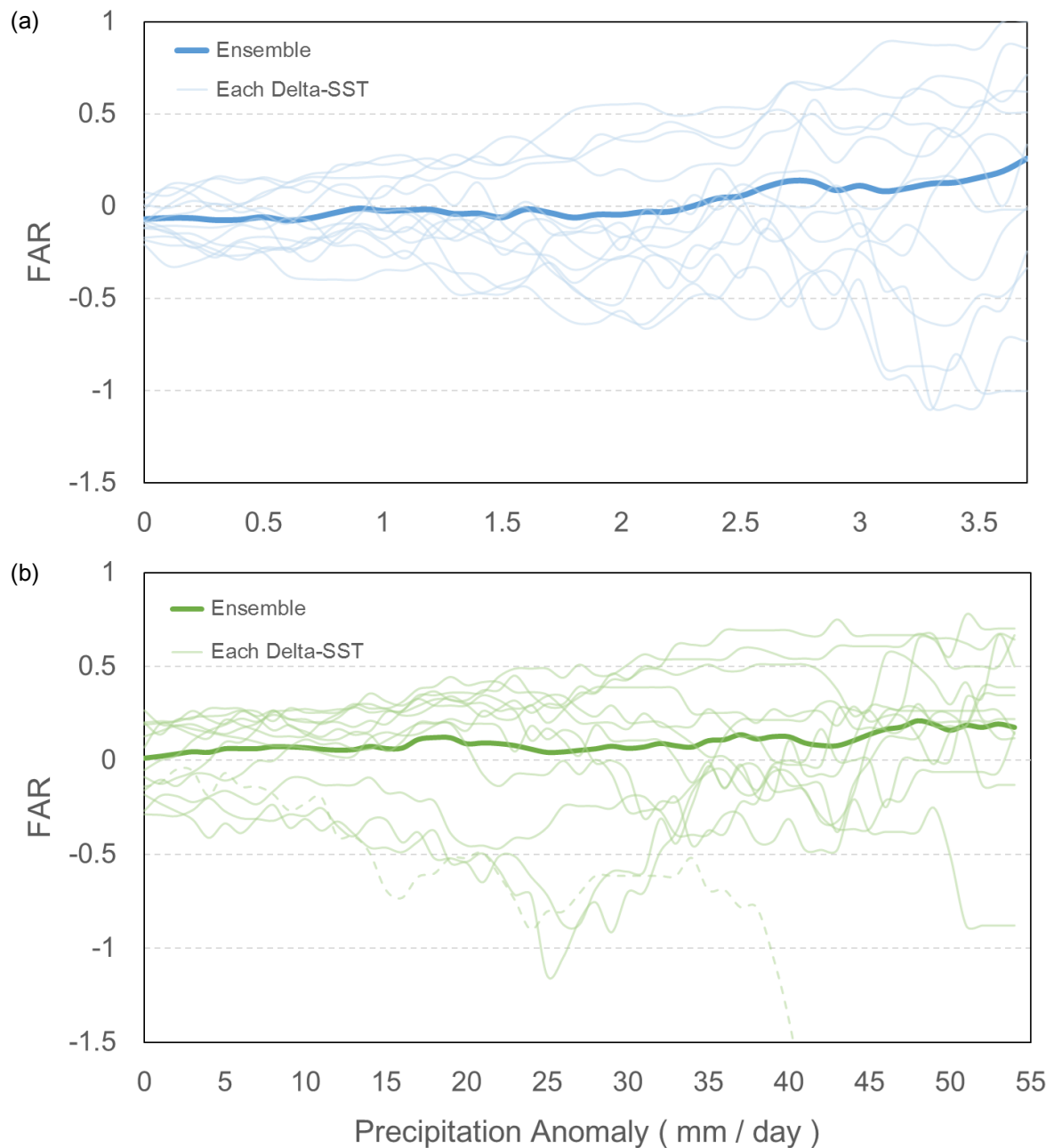


Fig. 4. Δ SST에 의해 분류된 13개의 그룹에 대해 Fig. 5와 마찬가지로 극한 강수의 기준치에 따른 FAR의 변화를 그린 결과. 굵은 실선은 Fig. 5에서의 결과와 동일한 전체 모델 자료에 대한 FAR의 변화이고, 가는 실선은 각각의 Δ SST에 대해 계산된 FAR의 변화이다. (a) 여름철 평균 강수량에 대한 그림. (b) 7월 최대 일 강수량에 대한 그림. 점선은 다른 결과들에 비해 FAR의 값이 크게 떨어지는 그룹으로 CNRM-CM5에서 계산된 Δ SST를 사용한 모델 자료에 해당.

4. Conclusions

2011년 7월에 한국에서 발생한 호우 현상을 비롯하여 세계 곳곳에서 관측되었던 극한 강수 현상이 지구온난화와 관계가 있는지 명확하지 않았다. 따라서 본 연구에서는 고해상도의 지역 모델 자료인 W@H 동아시아 데이터를 이용해 인위적인 강제력이 한국의 여름철 극한 강수의 발생 빈도에 어떤 영향을 주었는지 분석해보았다.

월 평균 강수량 및 월 최대 일 강수량의 관점으로 보았을 때 한국에서의 여름 호우 현상은 인위적인 영향을 거의 받지 않은 것으로 나타났다. 특정 달에는 오히려 온실기체나 에어로졸 등의 인위적 강제력이 극한 강수의 빈도를 약간 줄였을 수도 있다. 따라서 한국의 여름철 호우 현상은 인위적인 영향보다는 자연적인 내부 변동성에 영향을 받는 것으로 추정된다. 인위적인 영향을 가장 많이 받은 기간은 월 평균 강수량에서는 여름철(6 - 8월), 월 최대 일 강수량에서는 7월이다. 인위적인 강제력으로 인해 여름철 월 평균 강수량의 극한 현상은 1.1배, 7월 최대 일 강수량의 극한 현상은 1.25배 정도 더 일어날 가능성이 커졌다.

극한 강수의 기준을 변화시켜가면서 여름철 평균 강수량과 7월 최대 일 강수량에 대해 분석한 결과, 극한 강수의 세기가 클수록 인위적 강제력이 기여했을 가능성이 높다. 이는 호우 현상을 이해하는 데에 있어서 인위적인 영향을 배제할 수 없음을 시사하고 있다. 그러나 해양 조건에 따라 인위적인 영향의 기여도가 다르며, 특히 강한 호우일수록 그 정도가 크기 때문에 여전히 불확실성이 남아있다.

본 연구에서는 월 평균 강수량과 월 최대 일 강수량을 극한 강수의 분석에 사용하였지만, 5일 간 강수량의 연 최대치 등 극한 강수를 표현할 수 있는 변수가 다양하게 존재한다. 따라

서 다른 변수들에 대해서도 호우 현상에 대한 인위적인 영향을 찾을 수 있는지 확인해야 할 것이다. 분석 과정에서 모델의 건조한 모의(dry-bias)를 고려하여 편차(anomaly)를 이용한 분석을 수행하였는데, 관측과 모델의 기후값(climatology) 차이뿐만 아니라 시계열 자료의 표준 편차도 고려하여 표준화(standardization)된 데이터를 이용할 수도 있다. 또한 주어진 모델 자료에서 임의적인 추출(random sampling)을 통해 데이터를 반복 분석하는 Bootstrapping 방법을 이용해 본 연구에서 쓰인 방법보다 정량적으로 인위적인 기여도의 신뢰 구간을 밝힐 수 있을 것이다.

Reference

- IPCC, 2013: Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Min, S.-K., Y.-H. Kim, M.-K. Kim, and C. Park, 2014: Assessing Human contribution to the summer 2013 Korean heat wave [In "Explaining extreme events of 2013 from a climate perspective"]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 95 (9), S48-S51.
- Stott, P. A., D. A. Stone, & M. R. Allen, 2004: Human contribution to the European heatwave of 2003. *Nature*, 432 (7017), 610-614.