

기후변동성과 기후변화



권 현 한 |
한국건설기술연구원 선임연구원
hkwon@kict.re.kr

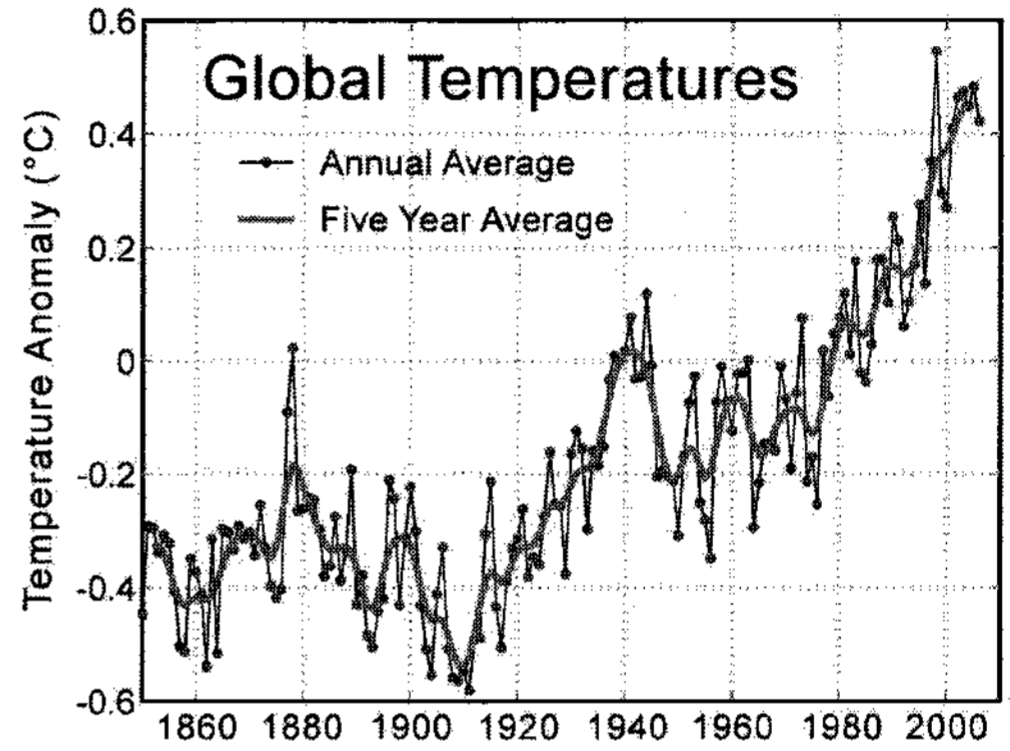


문 영 일 |
서울시립대학교 교수
ymoon@uos.ac.kr

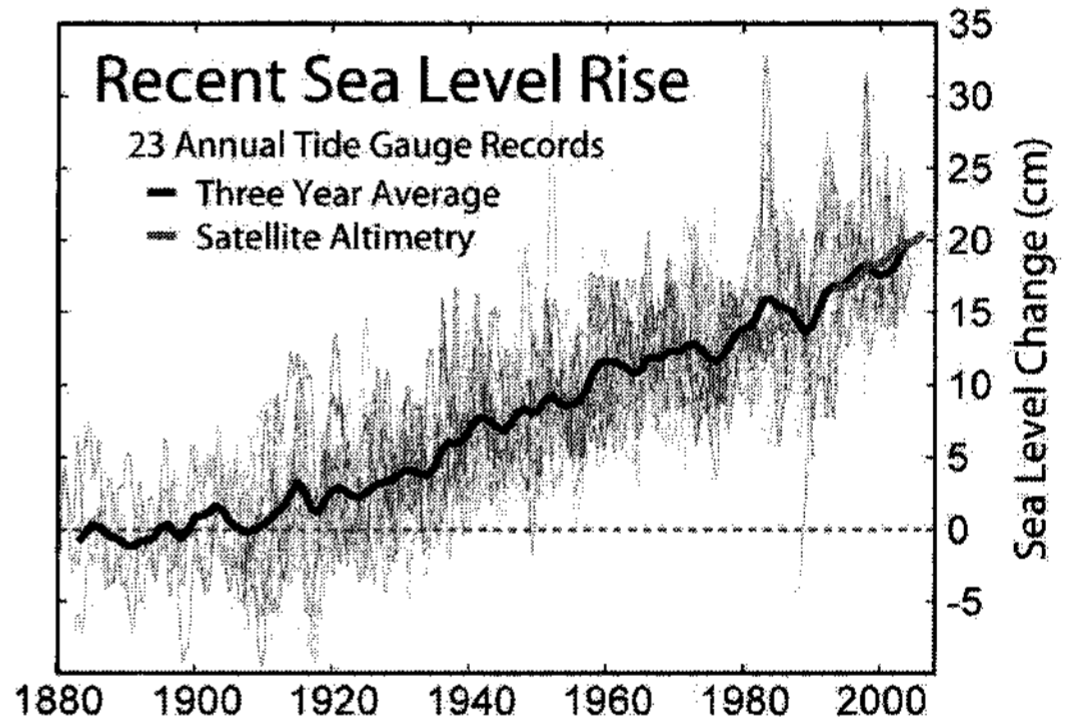
1. 서론

기후변동성(climate variability)과 기후변화(climate change)는 사회적 자연적 환경에 상당한 영향을 주고 있다. 기후변동성과 기후변화를 동일한 의미로 혼동하는 경우가 있는데 기후변동성은 ENSO(El Niño-Southern Oscillation), AMO(Atlantic Multidecadal Oscillation)와 같이 특정 주기를 가지며 자연적으로 발생하는 수문기상학적 변동성을 의미하는 반면 기후변화는 이러한 자연적인 변동성과는 별도로 지구온난화 등으로 기인하는 인위적인 변동성을 말한다(그림 1과 그림 2). 그림 1에서는 기후변화 영향으로 고려될 수 있는 이상적인 온도의 증가현상과 해수면상승을 나타내며 그림 2는 수문기상학적으로 매우 중요한 ENSO사상과 AMO사상의 구조적인 주기특성을 보여주고 있다.

예를 들어, 연주기(seasonal cycle)에서 경년 기후변동(interannual variability)은 흉년 및 풍년,



(a) 전지구적 평균온도와 5년 이동평균



(b) 최근 전지구적 평균 해수면 온도 상승

그림 1

수자원 확보, 에너지 요구량 등에 직접적으로 연관되어 있으며 반면 장기 기후변동(long-term climate variability)은 농업생산성, 생태시스템 및 이와 연관된 동식물 자원 구조에 영향을 줄 수 있다. 수자원분야에서 시간에 따라 발생강도는 다르지만 준주기(quasi periodic)적 특성을 가지고 지속적으로 반복되는 홍수 및 가뭄은 기후변동성에 영향을 받는 대표적인 예라 할 수 있다. 최근 준주기적 특성을 갖는 수문사상과 기후변화와의 변조(modula-

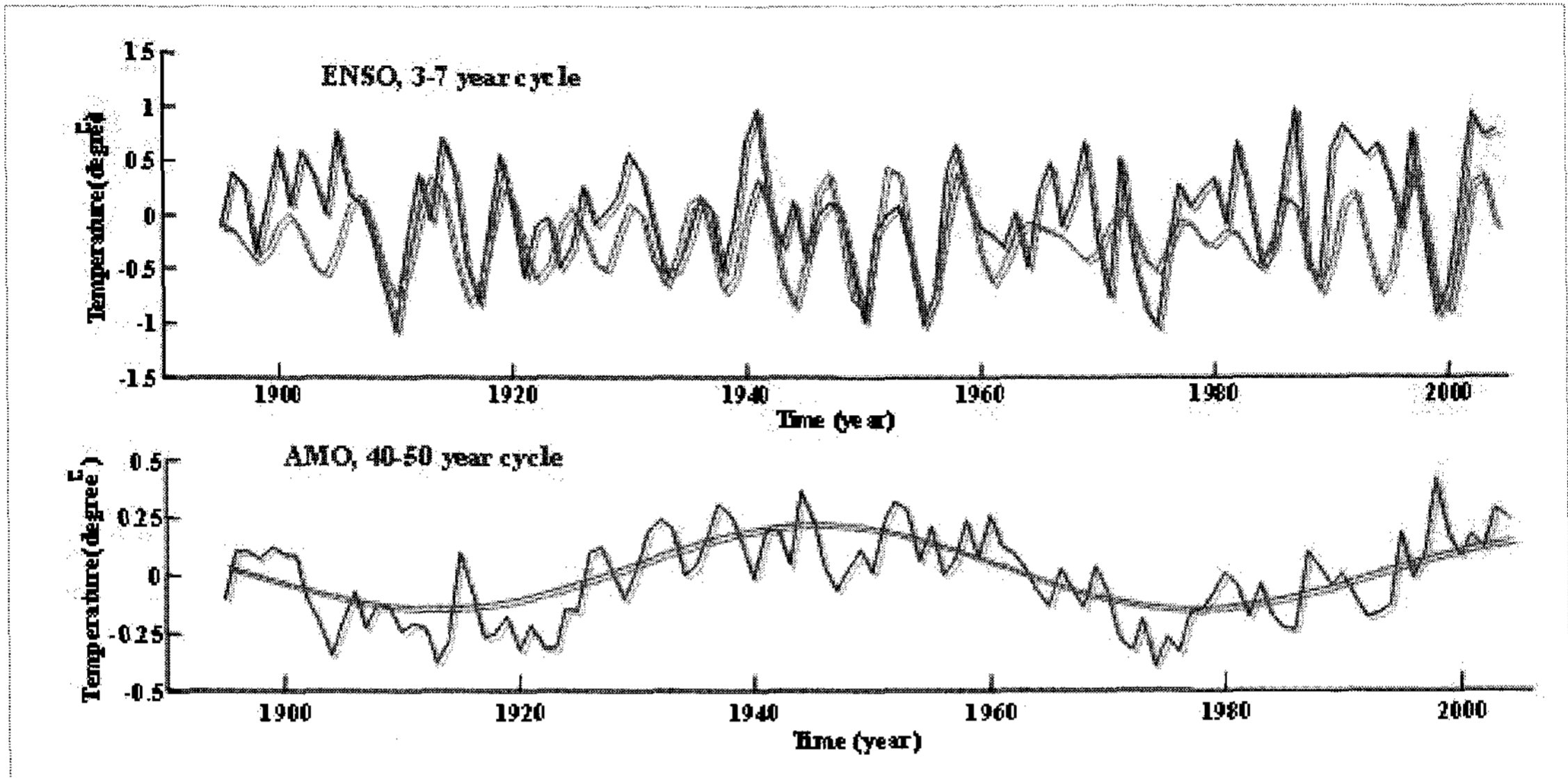


그림 2. 전형적인 기후변동성 예로서 3-7년 주기를 갖는 ENSO와 AMO 시계열. 여기서 파란색은 실제 시계열을 나타내며 빨간색은 Wavelet Transform으로부터 추정된 대표 주기를 나타낸다.

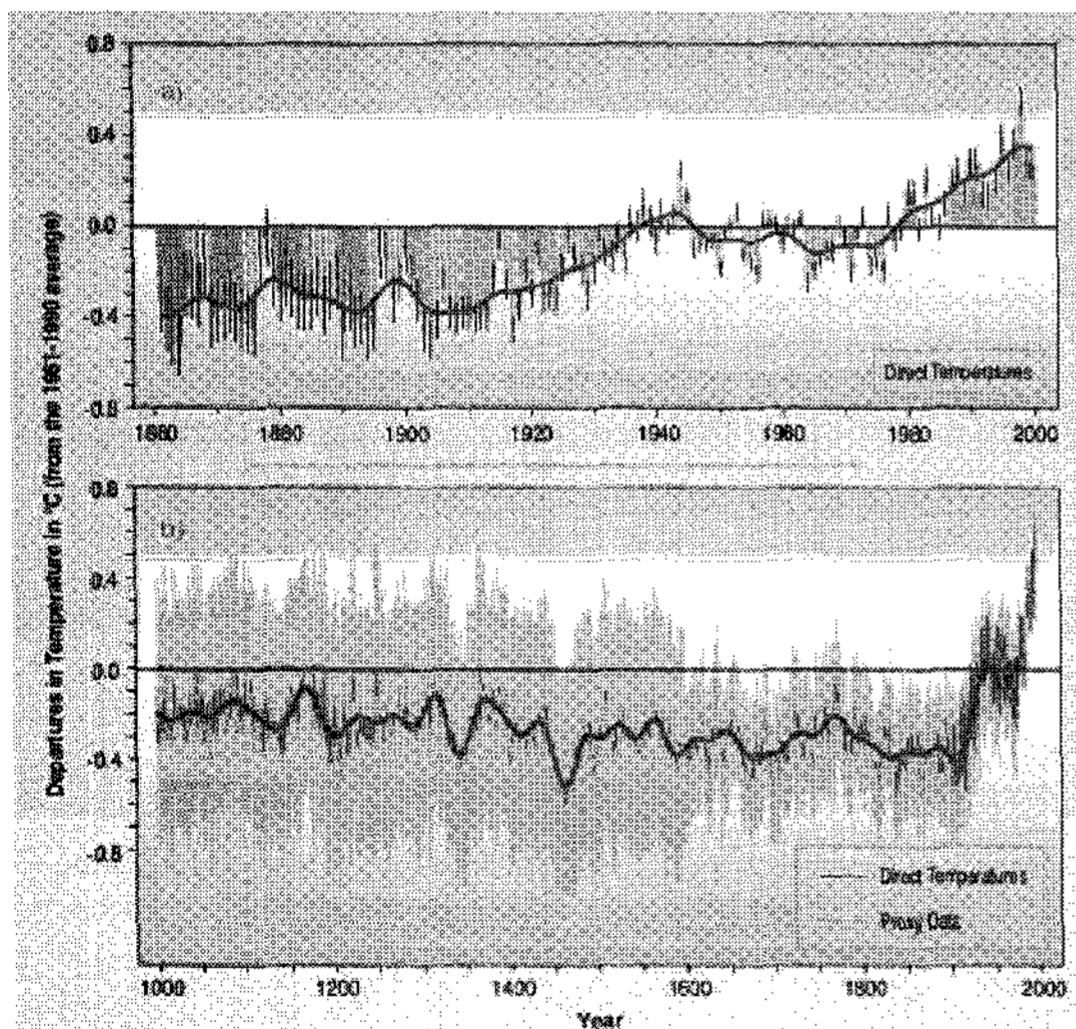


그림 3. 상위그림: 관측기상자료로부터 추정된 전지구 온도(1860-2000)의 변화 양상. 적색으로 나타난 막대그래프가 전지구적 평균온도를 나타내며 적색으로 나타난 실선은 10년 이동평균값을 나타낸다. 하위그림: 파란색으로 나타난 부분은 나이테, 산호, 빙하와 같은 고기후자료로부터 추정된 Proxy 자료를 나타내며 적색은 1860년 이후로 추정된 관측치를 비교한 그림이다.

tion)과정을 고려하여 극치사상의 발생빈도와 강도를 예측 하는 연구가 수문기상학 분야에서 매우 중요한 연구 주제로 자리잡고 있다. 다른 한편으로는

이러한 두 가지 변동성을 물리적 통계적 관점에서 효과적으로 분리하는 연구 또한 매우 중요하며, 이렇게 함으로서 두 가지 변동성에 대한 변조과정을 포함한 종합적인 메커니즘을 이해할 수 있다. 이러한 관점에서 기후변동성과 기후변화의 상관성을 검토하고 현재까지의 과학적인 한계 및 문제점을 살펴보는 것 또한 매우 중요한 과정이라 할 수 있겠다.

2. 기후변동성과 기후변화

많은 수문기상 연구들에서 지적하고 있듯이 기상 관측이 시작된 1860년대 이래로, 1990년대는 가장 더웠던 10년으로 기록되었다. 그림 3에서 보듯이 20세기 동안 북반구에 온도 증가는 지난 1000년 동안의 자연적인 변동성을 초과하는 대규모의 기후변화들로 나타나고 있으며, 이러한 경향은 앞으로 계속 진행될 것으로 예측되고 있다(IPCC, 2001abc). 더욱이, 자연적인 변동성과 인간의 활동으로 인한 영향들을 고려한 GCM(generalized circulation model) 모형 결과들과 최근 관측된 사상들을 중심

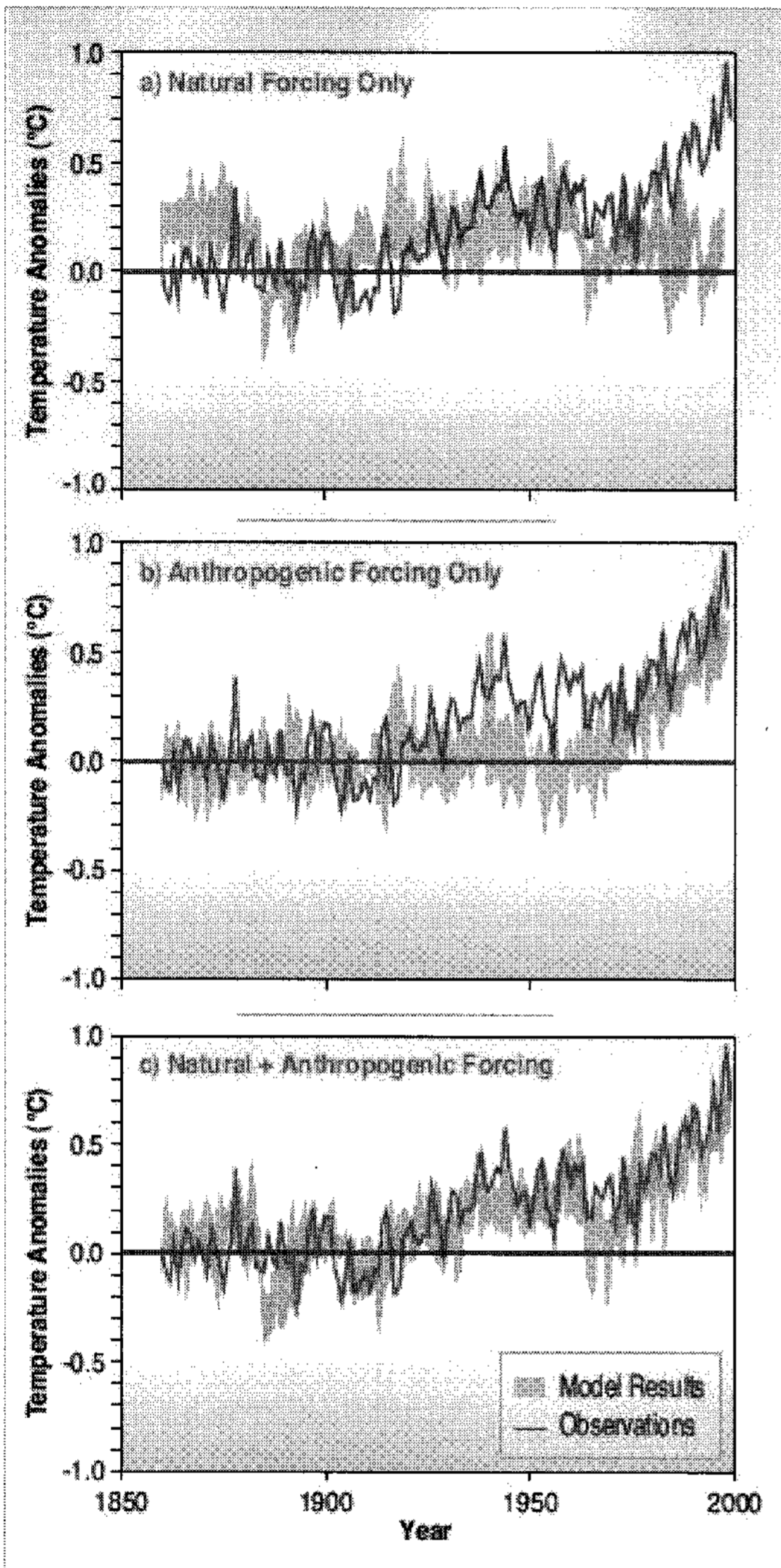


그림 4. 모형으로부터 추정된 전지구적 온도 변동성과 관측치 비교. (a) Solar 변동성과 화산활동을 고려한 모형 결과; (b) 온실효과와 같은 인간의 활동을 인한 영향을 고려한 변동성; (c) 자연적인 변동성과 인위적인 변동성을 동시에 고려한 변동성. 이러한 다양한 영향을 고려한 모형결과들은 지금까지 관측된 변동성을 설명하기에 충분한 타당성을 부여하고 있지만, 다른 영향인자의 존재여부를 전적으로 배제하지는 못하고 있다 (IPCC 2001d).

으로 판단해 보면, 인간의 활동이 가장 큰 영향인자로 작용하고 있음을 짐작할 수 있다. 그러나 다른 한편으로는 우리가 인지하지 못하는 자연적인 변동성이 기후변화에 중요한 역할을 하고 있음을 많은 연

구에서 지적하고 있다(그림 4)(NRC, 2001a).

물론 예측된 결과들이 모형 및 배출시나리오에 따라 상당한 불확실성을 내포하는 것을 인정하더라도 IPCC 분석에서 사용된 대부분의 GCM 모형들은 한결같이 21세기에 전지구적 평균온도가 증가한다는 점과 해수면 상승과 같이 여러 환경변화를 동반할 것으로 예측되고 있는 사실들은 간과하기 어려운 문제로 과학자들은 받아들이고 있다. 이와 더불어 최근 시공간적 기상변동성의 과학적인 이해를 바탕으로 실질적으로 상당한 모형의 발전이 이루어지고 있다. 특히 열대태평양(tropical Pacific)의 변화 양상을 실질적으로 이해할 수 있는 등의 괄목할만한 성과를 나타내고 있다.

단적인 예로 해양으로부터 얻은 상당량의 과학적인 계측자료들은 ENSO 사상의 발달 및 전개 과정에 따른 “조기경보(early warning)” 시스템을 구축할 수 있는 기반을 제공하였다. 결국 이러한 일련의 과정들은 상당한 기간의 신뢰성 있는 기상예측을 가능하게 하고 있으며, 최종적으로 ENSO 영향에 대한 취약성을 줄여주고 직접적으로 사회 경제적인 관점에서 이득을 제공하고 있다.

3. 현재까지의 연구 동향 및 한계

IPCC를 포함한 세계 여러 기관들의 연구는 이러한 과학적인 진일보를 위한 기초를 제공하였고, 한편으로 기후변동성 및 기후변화의 잠재적인 영향에 대한 보다 정확한 예측을 통해 사회에 불안감을 해소해 나가고 있다. 그러나 인상적인 진보에도 불구하고 대규모의 사회적, 환경적 영향관계를 포함하는 전반적인 기상시스템에 대한 역학적 구조를 규명하는데 어려움을 겪고 있다. 예를 들어, 대부분의 기상학자들이 공감하는 사실로서, “우리는 단지 국지적 지역적으로 기후변동성이 극치사상의 발생에 어떤 방식으로 영향을 주고 있는지를 이해하기 시작했다”라고 언급할 정도이다. 세계 많은 지역에서, 과거로

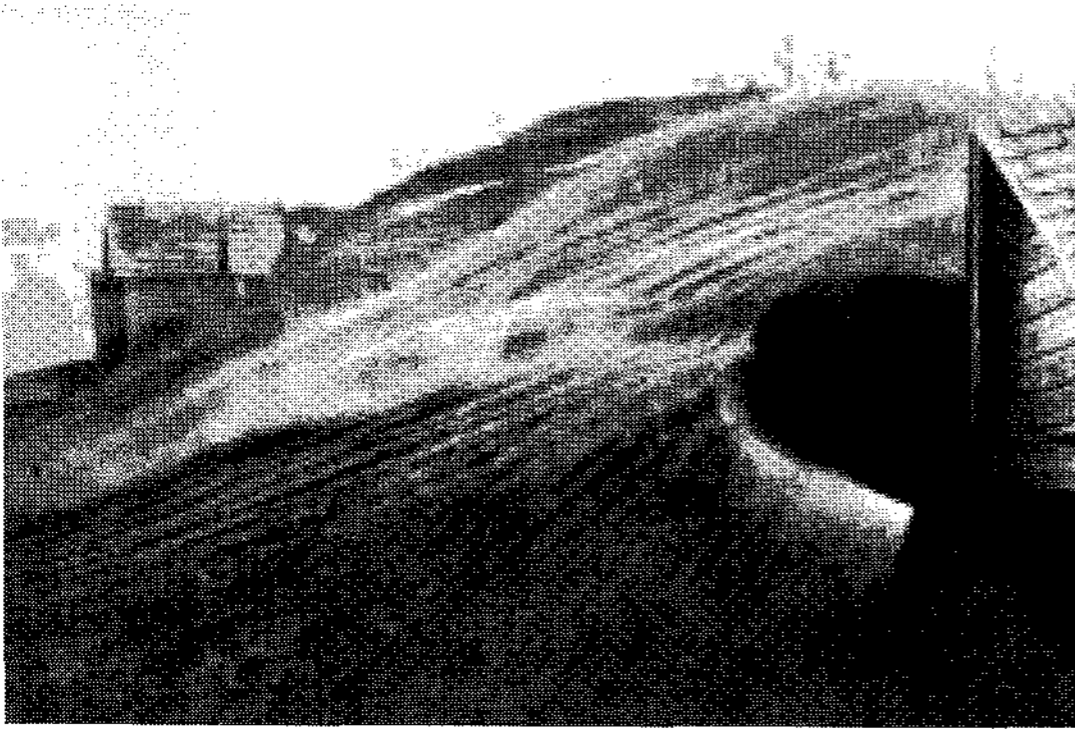


그림 5. 1930년대에 발생한 황사로 야기된 재해로 수많은 인명피해와 가옥파괴가 발생(Monthly weather review, June/1936)

부터 우리가 겪었던 이상변화들이 ENSO 변동성과 연관이 있으며, 작은 ENSO 변동성이 상대적으로 큰 기상학적 변화를 가져오기도 했다는 점을 인지하고 있다. 따라서, 최근에는 ENSO 사상에 대한 거동을 보다 잘 이해하는 연구가 절대적으로 필요하다는 공감대가 형성되어 있다.

ENSO 이외에 AMO(Atlantic multi-decadal oscillation), PDO(pacific decadal oscillation) 등과 같이 여러 구조적인 기상 변동성을 발견하고 있지만 얼마나 이러한 현상들을 예측할 수 있느냐는 여전히 난제로 남아있다. 물론 현재 국지적, 지역적인 스케일에서 특정지역 특정사상에 대한 예측능력은 존재하지만 대부분의 경우 예측 정도는 매우 낮다. 그러나 어떠한 방식으로든 우리는 이러한 갑작스러운 기상 전이 가능성에 대한 신뢰성 있는 추정치를 가져야 한다(NRC, 2001b). 기후변화 연구에서 직면하고 있는 가장 근본적인 문제는 기상학적 변동성이 인간의 활동으로 기인한 영향들에 의해서 어떻게 변화할 지 현재까지 정확한 이해를 가지고 있지 않다는 점이다. 특히 지역적 국지적 관점에서 이러한 기상학적 변동성에 대한 정보가 수자원의 취약성 및 지속성(sustainability) 평가를 위해서 어떻게 효과적으로 이용되어야 하는지에 대한 연구 또한 미진하다(그림 5).

4. 기후변동성과 기후변화에 연구 방향

최근에 수문기상연구 결과로부터 수자원 및 환경 분야에 상당한 발전이 이루어졌지만, 이에 대한 신뢰성 확보는 여전히 많은 선결과제를 가지고 있다. 기후영향 및 기후변화를 이해하기 위해서는 기본적으로 기후, 자연시스템, 사회전반의 상호작용을 아주 철저하게 이해하는 것으로부터 시작된다 할 수 있다. 이러한 기상학적 변동성 및 기후변화에 대한 과학적인 진보로부터 최대한의 이익을 추구하기 위해서, 기후변화와 관련된 여러 그룹간의 새로운 관계정립이 절실히 필요하다. 미래에 지속적인 발전을 위해서, 기상변동성 및 기후변화는 다음 2가지 질문들에 대한 답을 얻는데 초점을 맞추어야 할 것이다.

- Q1. 자연적인 변동성과 인간의 활동으로 기인하는 기상학적 변동이 수자원을 포함하는 자연 시스템에서 어떤 방식으로 얼마만큼의 중요성을 가지고 영향을 미칠 수 있는지를 규명할 수 있는가?
- Q2. 기상변동성 및 기후변화에 대한 새로운 과학적 발견들이 사회적인 필요를 충족시킬 수 있기 위해서 얼마나 더 발전되고 효과적으로 실행될 수 있는가?

이러한 질문들에 대한 답을 얻기 위해서는 다음과 같은 몇 가지 전제사항이 필요하다. 첫째, 기후연구와 평가를 위한 지속적이며 장기적인 계측시스템; 둘째, 관측사상들을 분석하고 통합하기 위한 높은 수준의 수문기상학적 모델링 기술 개발; 셋째, 수자원, 기상, 사회과학, 민관의 상위 결정론자들간의 다재간 공동 연구 기반 체제 구축; 넷째, 다재간 연구를 수행하기 위한 연구 관리 체계 구축.

이러한 연구계획을 발전시키는데 있어서, 기후변동성과 기후변화가 본질적으로 어떻게 연결되어 있는지를 인지하는 하는 것이 첫 번째 과정이 될 수 있다. 예를 들어, 기후변화의 지역적인 영향은 직접적

으로 전지구적 기후변동성에 의존하게 될 것이며, 더욱이 ENSO 빈도와 같은 미래 기후변동성은 또한 전지구적인 기후변동성에 부분적으로 의존하게 될 것이다. 따라서, 기후변동성과 기후변화를 따로 분리해서 생각할 수 없으며 상호관계의 연관성을 이해하는 것이 가장 근본적인 연구 과제가 된다고 할 수 있다. 이러한 관계를 규명하기 위해서 고기후자료(Paleoclimatic data) 연구를 통해 보다 장기적인 변동성에 대한 신뢰성 있는 평가를 위한 기본자료를 구축하는 것 또한 매우 중요한 연구 분야가 될 수 있다(NRC, 2001b).

5. 기상학적 변동성을 고려한 수자원 관리

기상학적 변동성에 의해 전지구적, 지역적 온도 증가, 평균강수량과 증발의 증가, 강수, 용설 등의 지역적 경향변화, 극치사상의 강도 및 주기 변화, 지형학적 효과의 증가 등이 일반적으로 수자원에 예상되는 영향이라 할 수 있다. 이러한 변화들은 또한 수자원의 여러 가지 부수적인 2차 영향을 야기시키며, 수자원 수요 및 공급의 패턴을 변화시킬 수 있을 것으로 예상되고 있다.

지금까지 수자원 계획 및 관리는 전적으로 미래에 기상조건이 과거와 동일하다고 가정하는 정상성(stationarity)에 근거하고 있으며, 모든 수자원 공급 시스템들은 이러한 가정에 근거하여 설계되었다. 댐과 같은 대형수공구조물 역시 기존 유입량 자료를 근간으로 설계가 이루어졌다. 그러나 최근 연구에 의하면 기상 및 토지 이용 등의 외부적 요인이 수문학적 빈도를 변화시킨다고 알려지고 있다(Kwon et al, 2008; Jain and Lall, 2000, 2001; Pizaro and Lall, 2002; Milly et al., 2002; Franks and Kuczera, 2002). 즉, 수문기상학에서 자주 언급되는 ENSO와 같은 경년변화(2~8년) 및 10년 이상의 저빈도(low frequency), 준주기(quasi periodic)의 현상들이 수문학적 빈도를 변화시킬 수 있다는 것이

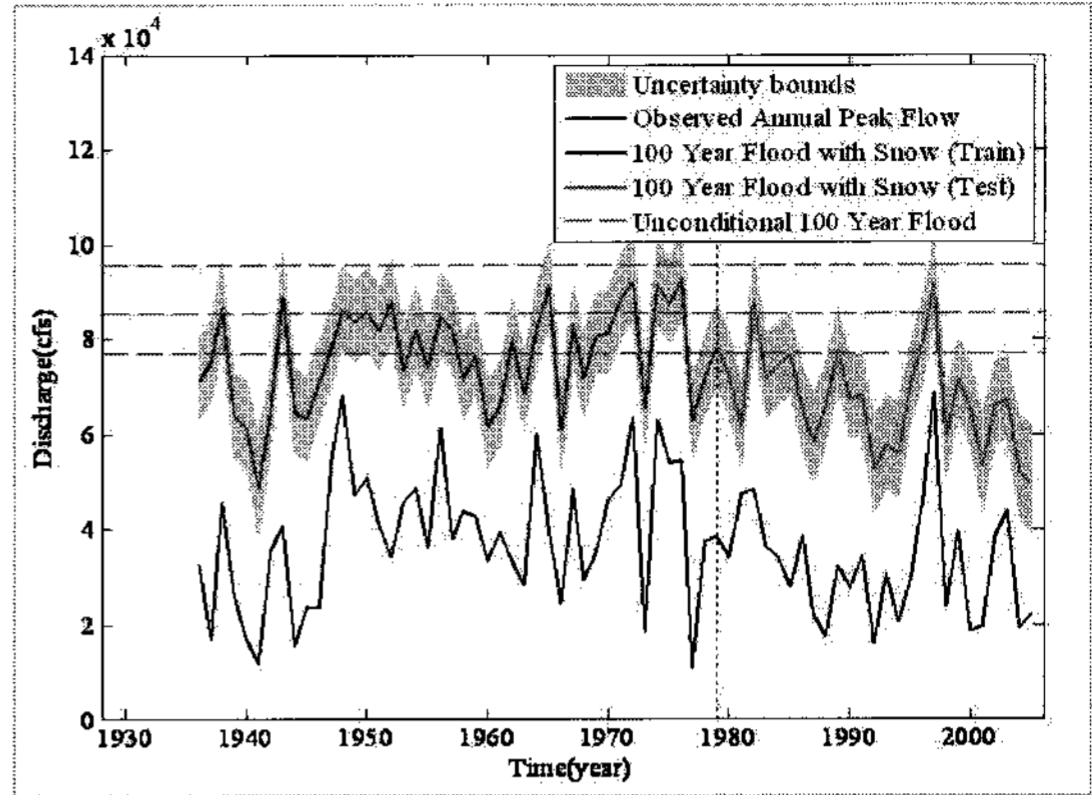


그림 6a. 미국 Montana 지역의 비정상성 빈도해석 결과

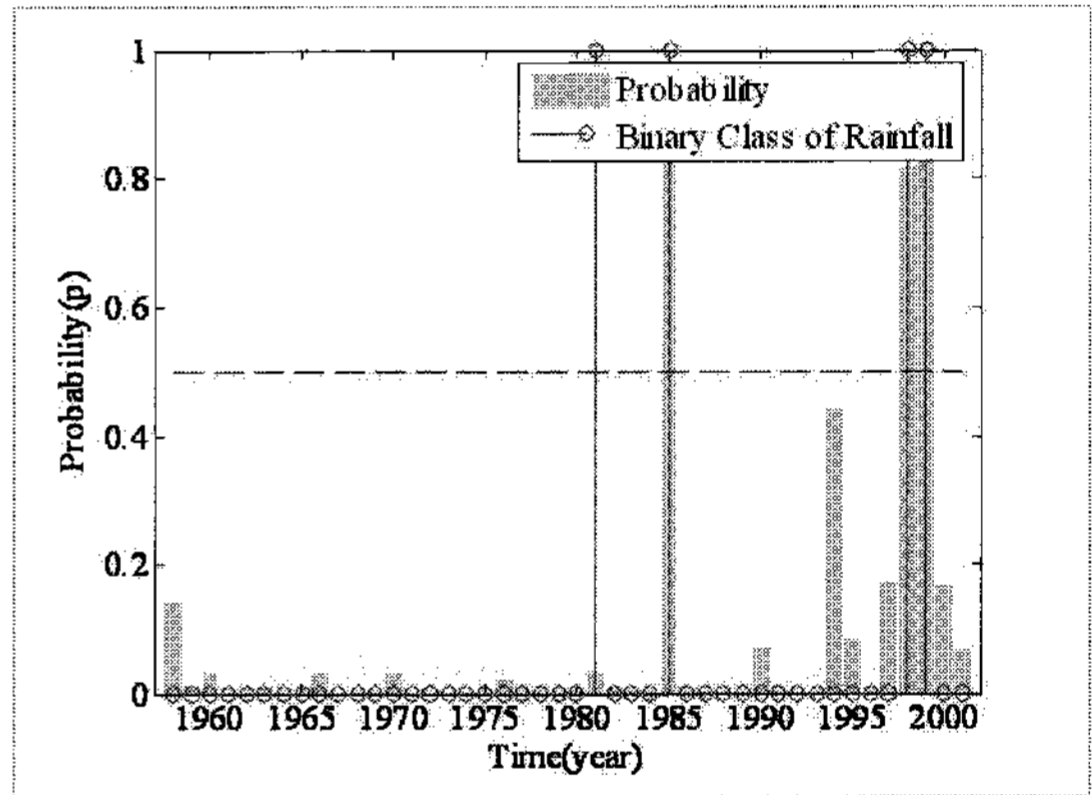


그림 6b. 서울지방의 10년 빈도 강수량의 발생확률 예측 결과

다. 또한 장기간의 기상자료를 검토한 연구에서 홍수 빈도의 시간에 따른 변화를 지적한 바 있다(Knox, 1993; Porparto and Ridolfi, 1998). 이러한 관점에서 기상정보와 같은 외부인자를 고려하여 확률론적으로 수문량을 추정할 수 있는 모형의 개발과 적극적인 대응이 매우 중요하게 인식되고 있다.

그림 6a는 미국 Montana 지역의 홍수량을 Bayesian 비정상성(nonstationary) 빈도해석 기법을 이용하여 100년 빈도 홍수량을 매년 추정한 결과를 나타낸다(Kwon et al, 2008). 그림에서 적색 점선은 일반적인 정상성 빈도해석을 통해 추정된 100년 빈도해석 결과를 5%와 95% 신뢰구간과 동시에 나타낸 그림을 의미한다. 그림에서 보듯이 매년 시간에 따라 추정된 100년 빈도 홍수량은 정상성 빈

도해석의 신뢰구간을 빈번이 벗어나고 있으며 이는 홍수량 자료계열의 비정상성이 내재해 있음을 의미한다. 그림 6b는 Bayesian Logistic 회귀분석기법을 이용한 서울지방의 10년 빈도 여름강수량의 발생확률을 나타낸다(권현한과 문영일, 2007). 여기서 10년 빈도 강수량을 예측하기 위한 기상인자로 해수면 온도, 태풍자료, GCM 예측 자료 등이 이용되었다. 그림에서 적색으로 나타낸 부분이 10년 빈도 강수량이 발생한 사상을 의미하며 회색의 막대그래프는 각 10년 빈도 홍수 사상의 발생확률을 예측한 결과를 나타낸다.

현재 많은 연구와 투자로 수자원 관리 시스템은 상당히 유연성을 가지고 발전해오고 있으나, 지금까지 접하지 못한 기후변화와 같은 수문기상학적 조건 변화에 적응하기 위한 연구는 여전히 미진한 실정이다. 이러한 상황에서 수자원 관리 주체들은 공학적인 관점에서 설계요소, 운영계획, 시스템 최적화, 기존 또는 계획 중인 수자원 관리 시스템에 대해서 기상변동성에 따라 발생할 수 있는 위험인자에 대해서 포괄적인 검토가 필요하다. 이와 더불어 수자원 관리 주체들은 미래 기후변동성 및 기후변화에 따른 수자원 시스템의 취약성을 정량적으로 검토하고 이에 적응(adaptation)할 수 있는 구조적 비구조적 대책을 마련하는데 노력을 기울여 할 것이다. 또한 모든 단계에서 정부는 발생 가능한 기후변동성을 고려하여 능동적으로 수자원 계획에 반영하기 위한 법적, 기술적, 경제적 방법론 개선에 역점을 두어야 할 것이다.

참고문헌

- 권현한, 문영일, 2007, 기상정보 및 태풍특성을 고려한 계절 강수량의 확률론적 모형 구축, 대한토목학회 논문집, Vol.27 No.1B, pp. 45-52.
- IPCC, 2001. Intergovernmental Panel on Climate Change, Climate Change 2001. Third Assessment Report of the IPCC. (Cambridge, United Kingdom, and New York: Cambridge University Press). Includes:
- IPCC, 2001a. The Scientific Basis, a contribution of Working Group I.
- IPCC, 2001b. Impacts, Adaptation, and Vulnerability, a contribution of Working Group II.
- IPCC, 2001c. Mitigation, a contribution of Working Group III.
- IPCC, 2001d. Synthesis Report. A Contribution of Working Groups I, II, and III
- NRC, 2001a. National Research Council, Committee on the Science of Climate Change, Climate Change Science: An Analysis of Some Key Questions (Washington, DC: National Academy Press).
- NRC, 2001b. Panel on Improving the Effectiveness of U.S. Climate Modeling, Board on Atmospheric Sciences and Climate, National Research Council, Improving the Effectiveness of U.S. Climate Modeling (Washington, DC: National Academy Press).
- Kwon, H.-H., C. Brown and U. Lall (2008), Climate informed flood frequency analysis and prediction in Montana using hierarchical Bayesian modeling, Geophys. Res. Lett., 35, doi:10.1029/2007GL032220.
- Franks, S. W., and G. Kuczera, Flood frequency analysis: Evidence and implications of secular climate variability, New South Wales, Water Resour. Res., 38(5), 1062, 2002.
- Jain, S., and U. Lall, Magnitude and timing of annual maximum floods: Trends and

- large-scale climatic associations for the Blacksmith Fork River, Utah, *Water Resour. Res.*, 36(12), 3641-3651, 2000.
- Knox, J., Large increase in flood magnitude in response to modest changes in climate, *Nature*, 361, 430-432, 1993.
- Milly, P. C. D., R. T. Wetherald, K. A. Dunne, and T. L. Delworth, Increasing risk of great floods in a changing climate, *Nature*, 415(6871), 514-517, 2002.
- Pizaro, G., and U. Lall, El Niño and Floods in the US West: What can we expect?, *Eos Trans. AGU*, 83(32), 349-352, 2002.
- Porparto, A., and L. Ridolfi, Influence of weak trends on exceedance probability, *Stochastic Hydrol. Hydraul.*, 12(1), 1-15, 1998. ☞