기후변화 얼마나 알고 계십니까?

Understanding climate change in the right direction

백희정, 이종화*

Baek, Hee-Jung; Lee, Jong-hwa*

국립기상연구소, 한국보건산업진흥원*

National Institute of Meteorological Research,

Korea Health Industry Development Institute Department of Food Industry*

1. 기후변화 이해하기

수년 전부터 기후변화와 기상이변이 일상적으로 일반인들의 대화에 오르내리고 있으며 마치 모든 이상 현상들이 기후변화와 연관되어 보도되는 것처럼 느껴지기도 한다. 또한 기후변화에 대응하기위해 크고 작은 많은 정책들이 연일 쏟아지고 있다. 그런데 이처럼 날씨이야기 하듯 쉽게 화제에 오르는 기후변화를 우리는 얼마나 알고 있을까? 너무나 많은 정보 속에 무감각해져 너무 가볍게 넘기거나 공포로 받아들이고 있지는 않을까? 우리세대 내에서 일어나게 될 기후변화에 대한 과학적 이해를 명확히 함으로써 기후변화를 막연한 위협이 아닌 과학적 근거에 기반 하는 미래로 받아들일 수 있도록 지구온난화에 따른 기후변화에 대해 정리해보고자 한다.

2007년 전 세계 기후변화과학자들의 의견을 모은 IPCC 제 4차 평가보고서의 결론은 '지구 온난화는 논란의 여지가 없을 정도로 명백하며(unequivocal), 인간 활동으로 인한 온실가스 증가가 20세기 중반 이후의 온난화를 일으켰을 가능성이 매우 높다' (IPCC, 2007) 라고도 할 수 있다. 물론 현재 겪고 있는 지구 온난화 현상 중에 일부는 지질학적인 연대의 개념으로 보면 자연 변동성내에 속하는 변동의 일부일 수 있으나 많은 부분이 인류가 만들어낸 인위적인 충격에 대한 자연의 반응임도 간과할 수 없는 사실이다(그림1). 그렇다면 여기서 언급된 지구온난화(Global Warming)란 기후변화(Climate Change)와 같은 말일까? 지구의 기온이 명백히 상승하고 있다는 결론은 지난 20세기 동안 과학자들이 무수한 연구를 통해 검증해 낸 사실이다. 그런데 기온은 대표적인 기상요소이므로 기온이 상승했다는 것은 유기적인 시스템인 기후시스템(Climate system) 전체에 어떤 충격, 즉 강제력(Forcing)이 가해지는 것이거나 또는 어떤 강제력에 대한 시스템의 반응의 결과라고 생각할 수 있다. 따라서 지구가 온난화화 된다면 기온이 단순히 수치적으로 상승하는

Corresponding author: Baek, Hee-Jung
Climate Research Lab., National Institute of Meteorological Research 460-18, Shindaebang-dong, Dongjak-gu, Seoul, 156-720 Korea
Tel: +82-2-6712-0201
Fax: +82-2-849-0668
Email: heejbaek@korea.kr

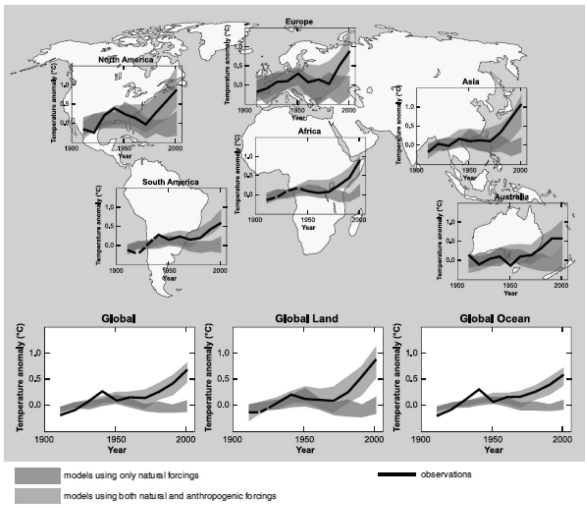

그림 1. 대륙 및 지구 규모의 지표온도 변화: 관측 값과 기후모델 모의결과 비교. 검은 실선은 관측결과, 파란색 띠는 태양활동과 화산에 의한 자연 강제력만을 사용한 기후모델 결과, 분홍색 띠는 인간 활동을 포함한 모든 강제력을 사용한 기후모델 결과(IPCC, 2007)

데 그치지 않고 기후시스템 전체와 더 나아가서는 기후시스템과 상호작용하는 전지구 시스템의 변화를 초래하게 되는 것이다.

기후란 장기간 평균된 대기의 상태이므로 기후적 관점에서 1℃가 상승했다는 것은 어제보다 오늘 1℃ 올랐다는 의미와는 다른 의미가 된다. 주전자의 물 온도를 1℃ 높이는 것과는 다르게 기후는 지구시스템의 일부로 상호작용을 통해 평형상태를 유지하는 유기적 시스템이기 때문이다. 따라서 기후시스템에 주어진 충격 즉, 강제력(Forcing)에 대한 반응으로 나타나는 평균 기온 1℃상승이라는 결과는 기상현상들의 빈도와 강도를 통째로 변화시킬 수 있을 뿐 아니라 기후시스템이 새로운 평형을 찾는 과정에서 양 극단의 현상을 증가시켜 변동성을 증대 시킬 수 있다. 과학자들이 우려하고 경고하는 것이 바로 이와 같은 기후 시스템의 총체적인 변화이다. 그림2은 기후변화에 따른 평균의 변화(a)와 분산의 변화(b) 그리고 평균과 분산의 복합적인 변화(c)를 잘 보여준다. 앞에서 설명한 것과 같이 평균이 변화하면(그림2.(a)) 그에 따라 한쪽 극단의 기후현상이 급격하게 증가하고 다른 극단의 기후현상은 거의 사라지는 현상을 경험하게 된다. 이와 같이 극한기후사상(Extreme events)은 평균값의 변화에 비선형적으로 반응하므로 평균값의 작은 변화도 극한기후사상의 출현빈도에 큰 변화를 가져올 수 있다. 비선형적인 반응이란 기온이 10% 상승했을 때 양극단의 극한기후사상이 같은 비율로 증가하지 않고 전혀 다른 비율로 반응하거나 양극단의 현상이 비대칭적으로 반응하는 것을 말한다. 그림2(a)를 일 최저기온의 확률밀도 함수(Probability Density Function)이라고 가정한다면 오른쪽 극단의 값은 열대야를 의미하게 될 것이다. 이 경우 그림에서와 같이 약간의 평균값의 변화로 확률밀도 함수가 오른쪽으로 조금 이동하게 되면 비록 평균값의 변화는 크지 않을지라도 오른쪽 극단의 열대야 현상은 급격히 증가하는 반응이 나타날 것이다. 평균의 변화뿐만 아니라 시스템 내에 강제력이 주어지면 그 반응으로 변동성 역시 변화하게 되는데 이 역시 극한 기후사상에 큰 변화를 초래한다. 변동성의 변화는 그림 2(b)와 같이 확률밀도 함수의 모양의 변화를 의미함으로 극한사상에 있어서는 평균변화보다 더 큰 의미를 갖게 된다. 그림2(b)는 평균의 변화 없이 분산만 변화한 것으로, 확률밀도함수의 모양이 변화함에 따라 극한기후사상이 변화하면서 양쪽 극단의 기후사상이 모두 증가함을 볼 수 있다. 평균과 분산의 변화에 따른 극한 기후사상에 대한 Katz and Brown(1992)의 연구에 따르면 변동성이 증가했을 때는 극한 기후사상의 출현빈도가 더 크게 증가하고 평균이 변했을 때는 그 강도가 강해진다고 한다.

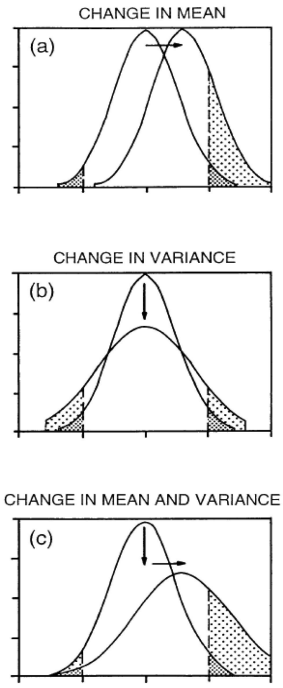

그림 2 평균과 분산의 변화에 따른 극한 기후사상의 영향 모식도 (Meehl et. al. 2000)

현재 우리는 기후시스템의 평균값의 변화와 변동성의 변화 그리고 양극단 현상의 대칭성의 변화 등 모든 변화를 동시에 경험하고 있다(그림 2(c)). 즉 Katz and Brown(1992)의 결과에 따르면 극한기후사상의 강도와 빈도에서 모두 큰 증가를 경험하고 있는 것이다. 이를 뒷받침하는 현상으로 총 강수량의 변화와 비례관계를 보이지 않거나 심지어 반비례하는 극한 강수현상의 증가를 생각할 수 있다(Easterling et. al.). 살펴본 바와 같이 기온 증가현상을 기후시스템이 받는 충격이라는 관점에서 접근해 보면 과학자들이 제시하는 평균값과 변동성 증가의 의미가 실생활이나 산업 활동에 있어서는 극한기후사상의 극단적인 변화를 의미함을 알 수 있다.

2. 기후변화 시나리오 바로보기

IPCC의 2007년 제 4차 평가보고서에는 21세기말을 기준으로 전 지구 평균기온이 1.8℃에서 4℃ 상승할 것이라고 제시되어 있다. IPCC가 제시한 평균기온이 넓은 범위를 가지는 것은 온실가스 배출과 기후변화를 유발할 수 있는 사회경제적 요소(인구통계, 경제성장, 에너지 사용효율, 과학기술 등)를 이용하여 여러 가지 사회 경제적 구조에 따른 배출 시나리오를 작성한 뒤, 시나리오별로 입력 자료를 생산하여 전 지구 기후변화예측모델에 적용하여 미래의 기온, 강수량 등의 수치를 예측하기 때문이다. 여기서 언급된 온실가스 배출과 여러 부문별 성장 기준에 따른 대표적인 기후변화 시나리오가 표 1에 제시되어 있다.

가장 극단적인 기온 상승을 예측한 A1F1시나리오는 현재와 같이 화석연료의 의존도가 높은 산업구조가 지속되는 경우 충분히 발생가능한 미래이다. 사실상 경제활동이 증가하고 있으므로 온실가스 저감과 같은 지구 온난화 완화를 위한 노력을 기울이지 않는다면 A1F1 시나리오보다 더 급격한 기온 상승이 발생한 가능성이 얼마든지 존재한다. 현재와 같은 수준에서 우리가 감수해야할 미래의 기후충격은 A1F1 시나리오 수준의 강한 충격이지만 화석연료의 의존도를 낮추고 온실가스를 저감하는 등 지구 온난화에 대처하는 노력을 충분히 기울임으로서 A2, A1B, B1시나리오와 같은 수준으로 기후 충격을 완화 시킬 수 있다. 따라서 미래 기후 시나리오를 언급할 때 자주 사용되는 B1(저배출), A1B(중배출), A2(고배출)의 시나리오는 인류가 지구온난화를 위해 노력을 기울일 것을 예상하고 사회구조가 변화됨을 가정한 시나리오이다. IPCC에 제출된 시나리오 중 기후충격이 최소화된 B1 시나리오는 저배출 시나리오로서 서비스와 정보에 관련된 경제구조와 자원효율적인 기술발달을 꾀하고 급격하지 않은 경제성장률을 보이며 인구는 2050년을 정점으로 감소하는 사회를 가정한 시나리오이다. A1B 시나리오는 B1보다 빠른 경제성장률을 보이는 사회로 B1 시나리오보다는 가파른 기온상승이 전망되지만 모든 자원의 균형적인 사용을 꾀하는 사회구조를 가정하므로 A2보다는 지구온난화가 경감된 예측결과를 보인다. A2 시나리오는 세계 경제가 지역적으로 편향되고 늦은 기술발달과 점진적인 인구 증가를 보이는 사회구조를 고려한 시나리오로 3가지 시나리오 중 가장 가파른 기온 상승이 전망된다. 언급한 바와 같이 현재의 수준에서는 A1B1 시나리오 이상의 기후충격이 예상되므로 온실가스 저감과 같은 적극적인 노력을 통해 사회구조를 재편

표 1. IPCC 시나리오별 특징과 예측결과(국립기상연구소, 2009a)

시나리오	특 징		21C말 예측	
	CO2 농도	사회경제적요인	기온(℃)	해수면(m)
B1	550ppm	자연친화적	1.8(1.1~2.9)	0.18~0.38
A1T	540ppm	비화석에너지원	2.4(1.4~3.8)	0.20~0.45
B2	600ppm	자연친화적(지역적 수준)	2.4(1.4~3.8)	0.20~0.43
A1B	720ppm	균형적발전	2.8(1.7~4.4)	0.21~0.48
A2	830ppm	발전지향적	3.4(2.0~5.4)	0.23~0.51
A1F1	970ppm	화석연료에 집중	4.0(2.4~6.4)	0.26~0.59

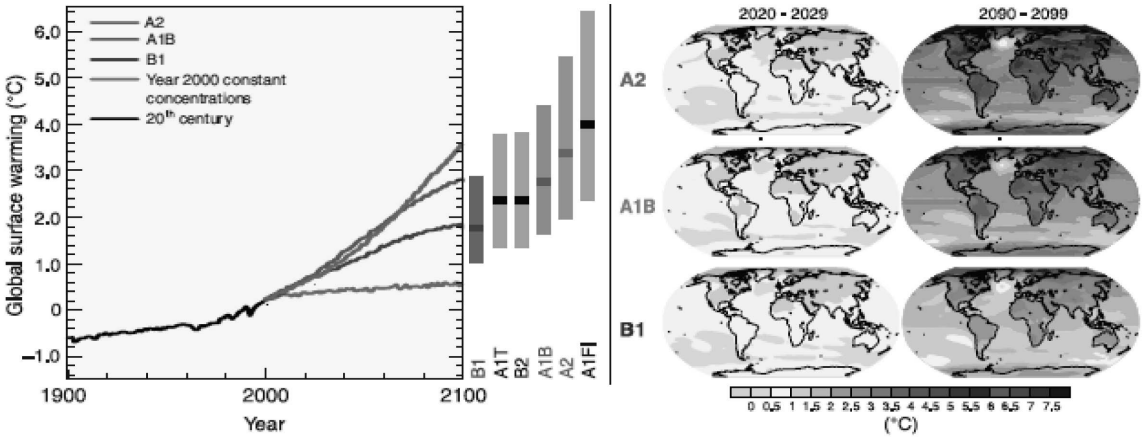

그림 3. 왼쪽: 관측 및 시나리오별 전지구 지표기온 상승 모의 결과와 신뢰구간, 오른쪽: 각 시나리오별 전지구 지표기온 상승 패턴(IPCC, 2007).

함으로서 A2, A1B, 그리고 나아가서는 B1 시나리오가 가능한 사회구조로 옮겨감으로서 기후충격을 최소화할 필요가 있다.

IPCC 4차 평가 보고서에 제출된 시나리오들에서 정도의 차이가 있지만 대부분 유사하게 북반구 고위도와 육지에서 기온 상승이 가장 높게 나타나고 남대서양과 북대서양에서 낮게 나타날 것으로 예측되었고(그림 3) 열파의 출현이 잦아지고 서리일 수는 중위도와 고위도의 거의 모든 지역에서 감소할 것으로 전망했다. 강수는 전지구 수문순환이 강화됨에 따라 열대지역의 최대 강수량과 고위도 지역의 강수량이 증가하고 아열대 지역에서는 감소하여 중위도 대륙지역의 건조화 경향이 심화될 것으로 예측되었다. 또한 지구 온난화에 따라 북극과 남극 지역에서 적설과 해양빙하가 감소하며 이에 따른 해수면 상승이 예측되었다.

동일한 기온상승에 대해서도 지형 분포 및 식생등과 산업활동 등에 따라 지역별로 기후에 미치는 영향이 매우 다양하게 나타남은 물론 전지구 기후예측 모델의 공간 해상도가 낮아 한반도의 경우 단 2개의 포인트로 표현되므로 활용을 위해서는 지역규모 시나리오가 필요하다. 따라서 각 지역별, 국가별 필요에 따라 전지구 예측 모델 결과에 역학적 규모축소기법을 이용하여 지역기후 예측자료를 생산하여 국가 정책 및 대응 전략 수립을 사용하고 있다.

3. 한반도의 21세기 기후 전망

한반도의 기후변화 전망은 국립 기상 연구소에서 산출하고 있는 시나리오 자료로 통일되어 사용되고 있으며 기후변화 영향평가에 활용될 수 있도록 지형적 특성을 반영하는 역학적 상세화를 활용하여 27km로 기후변화 정보를 생산하여 분석하고 있다(기상연구소, 2009b)

이에 따르면 21세기 말, 한반도 전 지역에서 평균 약 4℃의 기온상승이 예측되었고 남한 내륙지역에서는 3.8℃가 예측되었다. 전지구 평균기온이 1.8℃~4℃ 상승할 것으로 예측된 것을 고려할 때 한반도의 기온 상승이 매우 급격할 것으로 예측된 것을 알 수 있다. 특히 기온 상승경향은 한반도 내에서도 고위도에서 더욱 뚜렷할 것으로 전망되었다(그림 4). 앞서 평균과 분산의 변화에 따른 극한 사상의 극적인 변화에 대해 언급한 것과 같이, 한반도에서도 기온 상승으로 평균이 고온 쪽으로 이동함에 따라 음의 극한기후사상의 감소가 나타날 것으로 예측되었다. 이런 현상은 일 최저기온의 뚜렷한 상승을 초래하여 21세기 말 기온의 연교차가 1.7℃ 가량 감소할 것으로 전망되었다.

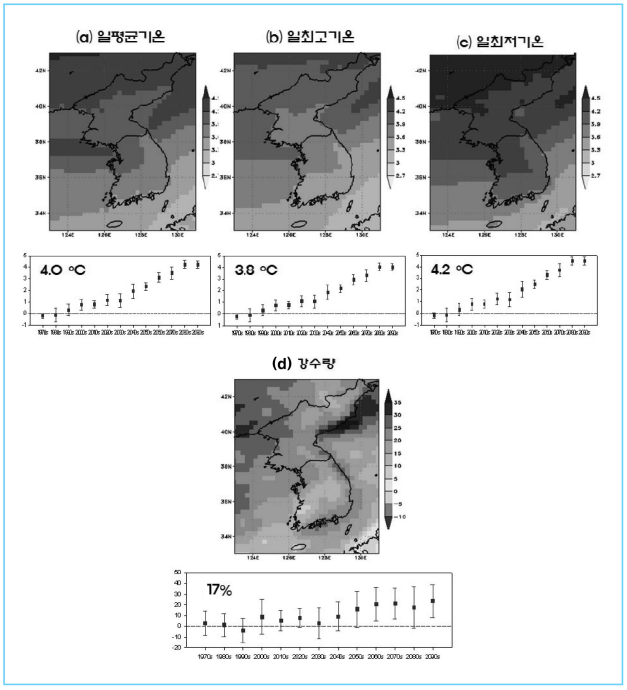

그림 4. 역학적 규모축소 기법을 이용한 21세기 한반도 기온 변화 예측 결과(국립기상연구소, 2009b)

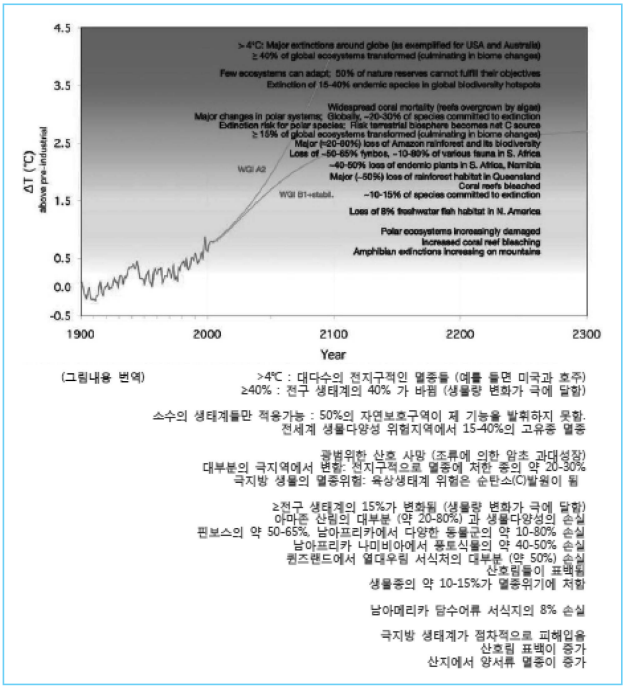

그림 5. 지구 온난화에 따른 생태계에 대한 기후변화 영향으로 인한 위험 전망(국립기상연구소, 2009a)

강수는 대체로 기온 상승이 큰 지역과 비례하여 증가하는 경향을 보이며 한반도 전 지역에서 17% 증가할 것으로 예측되었고 평균 강수량의 증가보다는 변동성의 증가가 더욱 클 것으로 전망되었다(그림 5). 변동성 증가의 영향으로 20세기 호우에 의한 강수량이 4% 내외의 발생빈도를 가진 것에 비해 21세기 말에는 호우로 인한 강수비율이 30%를 초과할 것으로 전망되었다. 이와 같은 기온과 강수의 변화는 계절의 전이를 발생시키고 빈번한 계절의 전이현상은 기후구의 변화를 가져와 한반도의 생물환경과 산업 환경에 지대한 영향을 미치게 될 것으로 전망하고 있다(국립기상연구소, 2009b, 2009c).

4. 결언

20세기후반부터 전 세계적으로 이슈가 되어 온 기후변화가 IPCC 제 4차 평가보고서를 통해 그 영향과 불확실성에 대한 과학적 근거를 확실시함에 따라 이제는 과학 분야의 문제를 넘어서 세계 경제-정치적 분야에서도 임박한 미래로 인식하고 있으며 선진국을 중심으로 대응을 위해 사회구조가 빠르게 재편되고 있는 상황이다. 더불어 1997년 체결된 교토 협약을 이을 새로운 기후협약을 위해 2009년 12월 코펜하겐에서 제 15차 기후변화 정상회의가 개최될 예정이어서 기후변화에 따른 영향에 대해 사회적 관심이 어느 때보다도 지대하다. 하지만 기후변화에 대한 정보의 홍수 속에서 기후변화라는 용어에만 익숙한 채, 제시되는 수치들의 의미를 종종 간과하고 있다. 지난 100년간 전지구 평균기온이 0.76℃ 상승했다는 사실은 수치적으로 그 의미가 커 보이지 않지만 특정 지역에서는 질병이나 식품의 부패 발생에 임계값을 초과할 수 있으므로, 지역에 따라서는 과거에 경험하지 못했던 변화가 이미 나타나고 있는 곳도 있다. 따라서 IPCC가 예측한 21세기 동안의 1.8℃~4.0℃ 기온증가는 자연계뿐만 아니라 사회 경제적인 부문에서도 지대한 영향을 줄 것이 명백하다(그림5). 이미 과거 인간 활동에 의해 기후시스템에 주어진 충격을 제거할 수는 없지만 지금부터라도 적극적으

로 인위적인 강제력을 감소시켜 감으로서 급격한 기후시나리오로부터 보다 완만한 기후 시나리오로 인류의 운명이 옮겨갈 수 있도록 온 힘을 기울여야한다.

참고 문헌

1. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Core Writing Team, Pachauri, R.K. and Reisinger, A. (Eds.), IPCC, Geneva, Switzerland, 2007
2. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC WG I), Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2007
3. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC WG II), M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson, (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2007
4. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC WG III), B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, L.A. Meyer (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2007
5. Easterling, D.R., J.L.Evans, P.Ya. Groisman, T.R.Karl, K.E. Kunkel, and P. Ambenje, 2000: Observed variability and trends in extreme climate events: A brief review. Bulletin of the American Meteorological Society, 81, 417-425.
6. Katz, R.W., and B.G. Brown, 1992: Extreme events in a changing climate: Variability is more important than averages. Climateic Change, 21, 289-302.
7. Mearns, L.O., R.W.katz, and S.H.Schneider, 1984: Extreme high temperature events: Changes in their probabilities with changes in mean temperature. Journal of climate Applied Meteorology, 23, 1601-1613.
8. Meehl, G.A., Karl, T., Easterling D.R., Changnon S., Pielke Jr. R., Changnon D., Evans J., Groisman P.Y., Knutson T.R., Kunkel K.E., Mearns L.O., Parmesan C., Pulwarth R., Root T., Sylves R.T., Whetton P., and F., Zwiers, 2000: An Introduction to Trends in Extreme Weather and Climate Events: Observations, Socioeconomic Impacts, Terrestrial Ecological Impacts, and Model Projections, Bulletin of the American Meteorological Society, 81, 413-416.
9. 기후변화 이해하기-IPCC 4차 평가 보고서 실무그룹 I, II, III 기술요약보고서 표와 그림을 중심으로, 국립기상연구소, 2009a
10. 기후변화 이해하기 II-한반도 기후변화: 현재와 미래(국립기상연구소 연구 성과), 국립기상연구소, 2009b
11. 기후변화 이해하기 II-서울의 기후변화, 국립기상연구소, 2009c