

# IPCC 시나리오와 평가보고서의 기후변화 예측에 대한 요약 및 비교분석



황 세 운  
경상대학교, 농업생명과학대학, 지역환경  
기반공학과, 조교수  
swhwang@gnu.ac.kr

## 1. 머리말

기후변화에 따른 기상이변 등의 재해 양상과 그 방재 대책은 최근 주목을 받고 있는 연구 분야이다. 기후변화 예측, 대응, 그리고 완화에 대한 광범위한 노력이 국제적으로 이루어지고 있는 가운데 (IPCC, 2007) 국내에서도 이미 기후변화에 대비한 법적 근거를 마련하고 이른바 '저탄소 그린 한반도' 구현을 위한 노력을 꾀하고 있다 (기상청, 2012).

국제적인 차원에서의 기후변화 관련 연구 및 보고는 세계기상기구 (WMO, World Meteorological Organization)와 유엔환경계획(UNEP, United Nations Environment Programme)이 공동으로 설립한 IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change)를 통해 이루어지고 있다. IPCC는 전 세계 3천여 명의 기상·해양과학자, 경제학자, 등의 관련전문가로 구성된 정부간 협의체로서 기후변화와 관련한 지구

환경적 문제와 해결방안에 대해 종합적인 연구결과를 발표하고 있다. 2007년에는 그 업적과 공로를 인정받아 지구온난화에 대해 관심을 가지고 활발한 활동을 해 온 앨 고어 전 미국 부통령과 함께 노벨평화상을 공동으로 수상한 바 있다. IPCC는 1990년에 발간된 제1차 평가보고서 (FAR, the First Assessment Report)를 시작으로 5~6년 간격으로 갱신하여 보고서들을 발간하고 있으며 올 해(2014년)에는 제5차 평가보고서(AR5, the Fifth Assessment Report)의 발간이 완료될 예정이다 (표 1). 평가보고서는 1) 기후변화의 과학적 근거, 2) 기후변화의 영향 및 취약성, 그리고 3) 기후변화 완화에 대한 관련전문가로 구성된 실무진 (WG, Working Group)이 별도보고서를 발표하고 종합보고서와 함께 총 4개의 보고서가 본회의 승인을 거쳐 발간된다. 이외에도 기상재해 등의 극우사상에 대한 위험도와 대응방안 또는 기후변화완화를 위한 재생에너지자원 등, 기후변화 대응에 화두가 되는 주제에 대해서는 비주기적 특

별보고서가 추가적으로 발간된다.

IPCC 평가보고서는 회를 거듭하면서 누적된 관측자료와 과학적 근거를 바탕으로 미래 기후변화 양상과 그 영향에 대한 분석의 불확실성을 최소화하고 정량화하는데 초점을 두고 내용을 갱신하고 있다. 최근 제5차 보고서에 이르기까지 인위적 영향에 의한 지구온난화 여부, 그리고 전지구 평균기온과 해수면 상승에 대한 예측의 신뢰도는 매우 높아졌으며, 이를 배경으로 한 다양한 지역단위 영향 평가들은 미래기후변화에 대한 대응의 필요성에 대해 설득력을 더해가고 있다.

기후변화 관련 연구에 있어, 2013년 초반까지는 제4차 보고서(AR4)에 적용된 시나리오와 기후모델 결과를 바탕으로 한 연구들이 주로 수행되고 있는 반면, 현재는 제5차 보고서에 발맞추어 최신 시나리오를 적용한 모델 결과들을 이용한 연구들이 증가하고 있으며 기후변화를 평가하거나 미래 정보를 산출하는 과정의 불확실성에 대한 연구가 증가하는 추세이다 (황 과 강, 2013). 본 고에서는 기존의 각 IPCC 평가보고서에서 적용한 1) 온실가스 배출 시나리오, 2) 전지구 기후모델, 그리고 3) 평균기온과 해수면 상승에 대한 주요 예측결과에 대한 변화흐름에 대해 개괄적으로 고찰해 보고자 한다. 이는 다수의 미래 예측결과가 누적되고 이에 기반을 둔 영향평가에 대한 유사연구가 다양하게 이루어지고 있는 현시점에서, 다른 미래 기후정보를 이용한 연구결과들을 비교하고 축적하는 방법을 제시하는 초석이 될 것으로 판단된다.

## 2. 온실가스 배출 시나리오의 변화

IPCC 최초보고서(FAR)에서부터 온실가스 배출량 증

가와 지구온난화의 상관성은 제기되어 왔지만, SAR에 이르기까지 이를 규명할 수 있는 자료는 제시되지 않아 높은 신뢰도를 가지는 정보라고는 할 수 없었다. 이는 대기와 해양, 그리고 육상의 수문기작간의 연계성이 고려된 당시의 결합기후모델링 기술수준이 높지 않았으며 관측자료가 불충분하였기 때문이라는 보고가 있다 (권 등, 2007). SAR에서는 수집된 관련 증거자료들을 토대로 인류 활동에 의한 지구복사강제력 변화에 추정하고 이에 따른 시나리오 분석을 통해 기후변화를 모의하였다. TAR에 이르러 지구온난화와 해수면 상승 등의 현상은 온실가스 배출량 증가에 기인한다는 가설에 무게를 실어 그간 누적된 연구들을 종합평가한 결과 AR4를 비롯하여 AR5 WG I보고서에서는 지구온난화의 주원인이 인위적 온실가스배출량 증가임을 매우 높은 신뢰도 수준에서 '거의 명백하다'고 규명하고 이에 따라 온실가스 배출 (emission) 및 대표농도경로 (representative concentration pathway) 시나리오를 개발·적용하여 미래 2100년, 길게는 2300년까지의 미래 기후를 모의예측하고 있다 (IPCC, 2013). 그림 1은 (a)SAR, (b)TAR, AR4 (c)AR5 평가보서에서 소개된 각 온실가스 배출 시나리오의 예를 비교하여 보여주고 있다. 각 온실가스 배출량 시나리오는 고려된 변수와 미래 사회, 경제, 환경에 대한 예측이 달라짐에 따라 차이를 보이지만 이상적인 기후변화 완화정책이 국제적으로 이루어지는 경우와 그 반대 경우의 극한 시나리오들과 현실적인 시나리오 2~3개로 구성되며, 현실적 시나리오들은 정도의 차이는 있을 수 있으나 향후 100년간은 온실가스 배출량이 증가한다는 예측을 공통적으로 하고 있음을 알 수 있다. 시나리오 별로 비교해 볼 때, 비교적 현실성이 높은 시나리오인 SAR IS92a 시나리오,

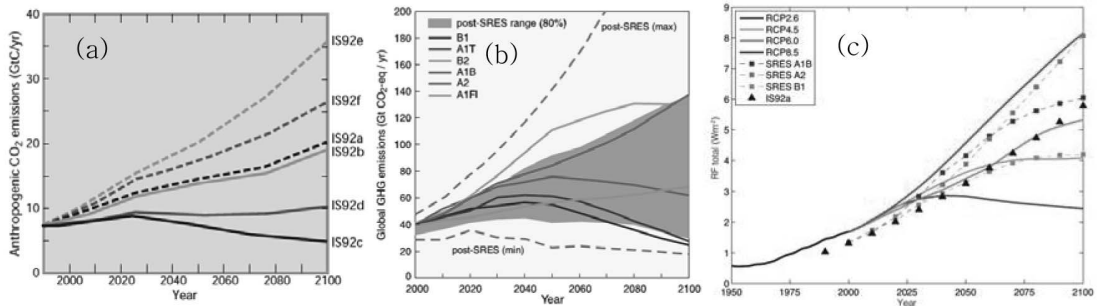


그림 1. (a)SAR (IS92a-e scenarios), (b)TAR, AR4 (SRES scenarios) (c) AR5 (RCP scenarios) 에서 소개된 온실가스 배출 시나리오 비교 예시

SRES A1B, 그리고 RCP6.0 시나리오는 2100년 복사강제력에 대한 예측이 근사함을 알 수 있다 (그림 1 (c)).

최초 온실가스 배출 시나리오 개발의 필요성은 FAR의 대비전략 실무진 (WG III)에 의해 제시되었고, 이에 이산화탄소 (CO<sub>2</sub>), 메탄 (CH<sub>4</sub>), 아산화질소 (N<sub>2</sub>O), 프레온가스 (CFCs), 일산화탄소 (CO) 등의 온실가스에 대한 2100년까지의 배출 시나리오 개발하게 되었다. FAR에서는 다양한 원료 사용계획에 대한 에너지 공급형태의 변화에 따른 4개의 시나리오(표 1, 시나리오 A, B, C, D)가 고안되었으며 그 중 시나리오 A (Business-as-Usual)는 일반적으로 온실가스 배출에 대한 규제가 없는 미래사회에 대한 시나리오이다 (IPCC, 1990). FAR 시나리오들은 이후 보고서에서 적용된 시나리오들과 달리, 세계 경제성장과 인구 증가율이 동일하게 적용되었다는 한계점을 가지고 있다(예, OECD 국가에 대해 연간 2-3%, 동유럽 국가에 대해서는 3-5% 등의 지역별 인구증가율을 적용). SAR에서 소개된 IS92 시나리오는 2100년에 대한 인구 및 경제성장, 에너지 활용 기술변화 등을 시나리오별로 가정하여 온실가스 배출 농도에 대한 모의 결과를 적용하기 시작하였다 (IPCC, 1994).

표 1. IPCC 평가 보고서 발간 이력 및 적용 시나리오

구분	영문 (약어)	발간 연도	GHG 시나리오 <sup>1</sup>
제1차 평가보고서	First Assessment Report (FAR)	1990	A, B, C, D
제2차 평가 보고서	Second Assessment Report (SAR)	1995	IS92 a~e
제3차 평가 보고서	Third Assessment Report (TAR)	2001	SRES (A2, A1, B2, B1)
제4차 평가 보고서	Fourth Assessment Report (AR4)	2007	
제5차 평가 보고서	Fifth Assessment Report (AR5)	2013 <sup>2</sup>	RCP 2.6, 4.5, 6.0, 8.5

1. 온실가스(Green House Gas) 배출 시나리오  
 2. WG I 보고서만 2013년 9월 발간되었으며, 나머지 보고서 (WG II, WG III, 종합보고서)는 2014년 말까지 발간 완료 예정임

TAR에서는 누적된 정보와 보다 현실성 있는 가설을 토대로 재정비된 SRES (Special Report on Emissions Scenarios)에서 발표한 시나리오를 적용하였으며 이 시나리오는 AR4에서도 동일 적용되었다. SRES 시나리오는 미래 사회구조에 따른 온실가스 배출량 차이와 온실가스와 에어로솔의 영향에 대한 복사강제력이 시나리오 구성에 주요소로 고려하고 있다. 한편 최신 보고서인 AR5에서는 기후변화에 대한 미래의 국제적 대응정책과

연계하여, 인위적 토지이용변화와 사막화 등의 토지 피복 변화 등의 환경 변화를 미래 온실가스 배출 모의에 동적으로 고려하여 예측정확도가 높다는 평가를 받고 있다. AR5는 4개의 대표농도경로 시나리오(RCP, Representative Concentration Scenario)를 적용하고 있으며 각각의 시나리오, RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0, RCP8.5는 온실가스의 저감정책 수행에 따라 달라질 수 있는 인류활동에 기인한 대기 복사에너지(W/m<sup>2</sup>)의 변화량 수치를 명칭에 포함하고 있다.

### 3. 전지구 기후모델의 이용

일반적인 기후변화 관련연구는 과거기간과 미래기간에 대한 전지구 기후모델 (GCM, Global Circulation Model/ Global Climate Model) 산출물을 활용한다. GCM은 전지구에 대한 대기 현상을 모의하는 모델로서 미래사회의 전반적인 산업 활동과 인류사회적 요소를 고려하는 미래 온실가스 배출 시나리오를 적용하여 향후 기상 정보 (최신 시나리오 적용시 2300년까지 모의)를 제공하는 기술이다. 관측 기록을 양·질적으로 갱신하는 최근의 기상 이변 현상은 과거 관측 자료의 통계적 추의 분석을 통한 미래 예측에 한계가 있음을 반증하며 이러한 역학적 물리 모델의 적용 필요성을 시사한다 (Milly et al., 2008).

현재까지 다수의 기후모델이 개발되고 개선되어 왔으며, 각 보고서 별로 활용된 모델의 종류, 성능뿐만 아니라 적용된 온실가스 배출 시나리오가 상이하므로 모의 결과에 차이가 있는 것은 당연하다. 이에, 보다 많은 모델을 고려하고 다양한 실험을 통하여 기후모델의 불확실성을 평가하고자 하는 노력은 AR4에 이르러 전 세계

의 기후모델링 전문가 그룹과 관련 연구센터의 협력에 의해 체계적으로 이루어지기 시작하였다. CMIP(Coupled Model Intercomparison Project)는 다양한 GCM결과를 비교·평가하는 세계 기후 연구 프로그램 (WCRP, World Climate Research Programme)의 일환으로 전 세계 20여개의 기후모델링 그룹이 참여하여(CMIP phase5에서는 28개 그룹 참여) GCM 모델링의 장기미래기후 예측에 대한 성능과 불확실성을 평가하는데 목적을 둔 프로젝트이다. AR4에서 SRES 시나리오에 대해 활용된 모델 결과들은 CMIP3에서 비교·평가하고 있으며, 다양한 분야의 학자들에게 모델 결과물을 제공하는 역할을 해 왔다. CMIP5에서 다루는 AR5의 RCP 시나리오를 적용한 모델들은 대부분 CMIP3 GCM을 모태로 하지만 기후모델 추가, 모의실험의 다양성, 기술적 개선 등을 통하여 최신 미래기후 예측결과를 모의기간과 기상변수 별로 제공하고 있다. 특히 자료형태, 모의기간, 변수명 등에 대한 프로토타입을 제시함으로써 전세계 기후모델링 그룹으로부터 개발된 모델 자료간 일관성을 개선하고 그 활용성을 높이는 데 많은 노력을 기울이고 있다. 데이터베이스 서버를 통해 제공되는 CMIP5 GCM 산출물은 다양한 미래기후정보를 제공하며 2013년에 WG I 보고서 발간을 시작으로 2014년에 나머지 보고서의 발간이 완료될 AR5는 그간 향상된 GCM 기술을 이용한 결과로부터 기후변화의 과학적 근거, 영향평가 등에 대한 최신 연구 결과들을 종합한다.

CMIP5 GCM들은 새롭게 고안되고 검증된 모델 컴포넌트가 적용되었으며, 기존 모델과 비교할 때 향상된 컴퓨터성을 바탕으로 높은 모델 해상도를 가진다. 또한 안정적인 대기모의를 위한 개선된 모수화

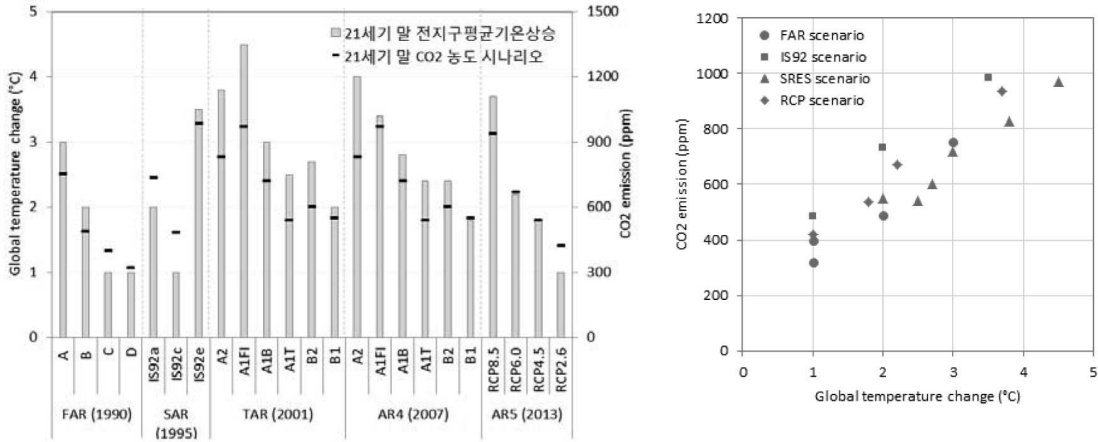


그림 2. 주요 IPCC 시나리오 별 21세기말 CO<sub>2</sub> 배출 농도와 예측된 전지구 평균기온 변화 비교

(parameterization)가 적용되었으며 지표-대기간 온실 가스 순환을 고려하기 위한 지표식생과 토지이용변화를 적용한 점과 대기-해양-지표 모의의 안정성과 상호연계성이 향상되었다. 무엇보다 ENSO 변동성과 같은 주기적 대기저동변화를 보다 현실적으로 모의할 수 있도록 개선된 모델들을 포함하고 있다는 개선점을 가지고 있다. 하지만 CMIP5 GCM은 기존의 기후모델을 배경으로 개선된 기작들을 적용함으로써 모델을 상세화하긴 했으나 일반적 모의 성능 측면에서 기존 CMIP3 GCM에 비해 주목할 만한 향상을 보이지 못하고 있다 (IPCC, 2013). 특히 FAR에서부터 지적되어 온 강수량 모의 예측에 대한 모델의 한계점과 불확실성은 AR5에서도 모델결과 활용시 유의해야할 점으로 지적되고 있다. 평균적인 기후의 변화뿐만 아니라 기상 이변 등의 변동성 증가에 대한 관심이 고조되면서, 극한 기후 현상과 지구온난화의 상관성과 이에 대한 대책이 TAR에서 논의되기 시작한 이래 그 중요성이 강조되고 있다 (국립기상연구

소, 2011). 하지만 오늘날에도 일단위 또는 시간단위 강수량의 장기예측 결과를 연구에 직접적으로 활용하기에는 모델간 예측결과의 정확성과 일관성이 부족하여 폭우사상이나 태풍의 빈도 및 강도의 변화에 대한 연구는 강수량 외의 기상변수를 활용하는 등, 추가적인 대체 기법개발과 관련 연구가 필요할 것이다.

#### 4. 전지구 평균기온변화와 해수면 상승 예측결과 비교

관측자료와 과학적 근거를 통해서 밝혀진 인위적 요인에 의한 지구온난화는 현재 진행 중인 현상이며 각 평가보고에 대한 시나리오 별로 그 양적 차이는 있으나 현실적으로 불가능한 수준의 규제 (예, 시나리오 RCP2.6)를 통해서도 2100년경에는 어느 정도의 지구 평균기온 상승과 해수면 상승 현상은 대응이 불가피한 과제라는 결론을 내릴 수 있다. 그림 2는 IPCC 보고서

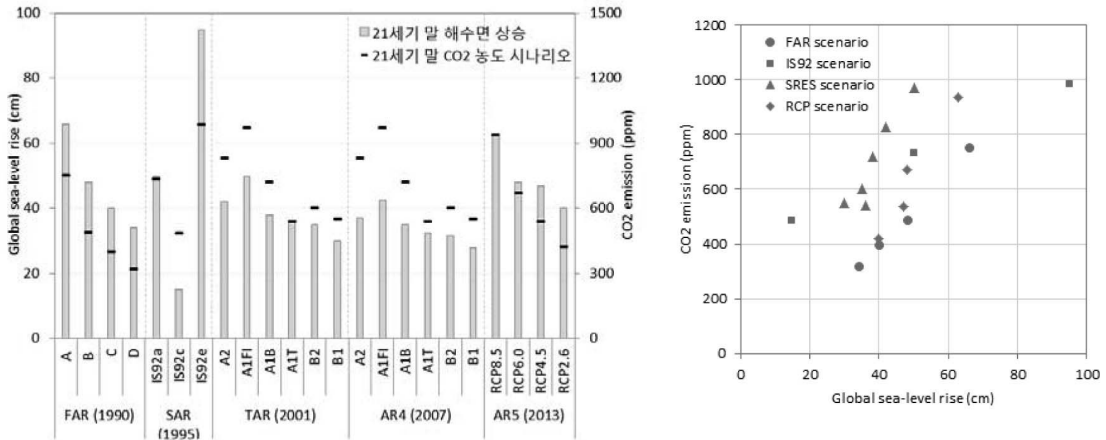


그림 3. 주요 IPCC 시나리오 별 21세기말 CO<sub>2</sub> 배출 농도와 해수면 상승 예측결과 비교

들 (IPCC, 1990; 1995; 2001; 2007; 2013)의 주요 시나리오 별 21세기말 (2100년) CO<sub>2</sub> 배출량 예측과 전지구 평균기온 변화를 비교한 것이다. 보고서 별로 전 시나리오의 CO<sub>2</sub> 배출량의 범위의 차이는 5% 미만으로 크지는 않으나 최신 시나리오에서 평균적으로 가장 낮은 구간의 CO<sub>2</sub> 배출량을 적용하고 있다. 이와 유사한 패턴으로 시나리오에 따른 평균기온변화 예측범위도 RCP 시나리오의 경우 1°C~3.7°C로 SRES 시나리오에 비해 낮은 범위를 보여주고 있다. CO<sub>2</sub> 배출량과 기온변화의 상관성은 뚜렷하게 나타나고 있으나 그 민감도에 있어서는 보고서 별로 차이가 있음을 알 수 있다. 또한 SRES 시나리오에는 온실가스 배출량 외의 다양한 변수들이 적용되면서 모델 기온예측 결과가 시나리오 별로 CO<sub>2</sub> 양상과 다르게 나타나는 경우도 있다는 점도 확인할 수 있다. 한편 최신 시나리오인 RCP 시나리오에서는 기후변화와 이에 따른 환경적 변화를 고려하고 동적으로 연계하면서도 인위적 온실가스 배출량 증가 패

턴이 지배적인 평균기온변화 요인으로 고려되고 있음을 알 수 있다.

그림 3은 기존 IPCC 보고서(IPCC, 1990; 1995; 2001; 2007; 2013)의 시나리오 별 2100년 평균해수면 변화에 대한 예측 결과를 비교한 것이다. 해수면 상승 예측결과는 평균기온 상승에 따른 극지방 및 고지대 해빙현상과 직접적인 상관성을 가지는 만큼 기온변화 양상과 유사한 형태로 나타난다. RCP 시나리오에서는 CO<sub>2</sub> 배출량 차이에 따른 해수면 상승의 민감도가 다소 낮은 경향을 보이는 한편, 전체적인 해수면 상승 폭은 평균 50% 가량 크게 나타났다는 점에 주목할 필요가 있다. 이는 해수면 상승이 지구온난화에 따른 평균기온상승 및 기상변화와 함께 연속적이지만 2차적으로 나타나는 현상임을 짐작할 때, 해수면 상승에 대한 예측결과는 모델과 시나리오의 불확실성을 감안하고도 그 신뢰도가 상대적으로 높다고 판단할 수 있다.

#### 4. 마치면서

본 고에서는, 개선된 시나리오를 개발·적용하고 진보된 과학을 접목해 주기적으로 갱신되고 있는 IPCC 보고서에서 고려하고 있는 온실가스 배출 시나리오의 변천 과정과 기후 모델의 개선, 그리고 전지구 평균기온과 해수면 상승에 대한 개략적 예측 결과를 시나리오 별로 비교해 보고 고찰하였다. 최근 보고서에 이르면서 적용 시나리오의 실현 가능성을 높이는 노력과 최신기술을 적용한 기후모델을 활용함으로써 불확실성을 정량화하고 예측 정보를 전달하는데 직접적으로 활용하는 노력을 기울이고 있다. 보다 현실적인 시나리오 적용과 함께 모델의 종류와 성능이 개선되고 있는 만큼 예측된 미래 기후정보의 성격도 다소 차이를 보여 왔다. 하지만 지구 온난화는 더 이상 가설이 아닌 현상이며, 그 주요원인이 인간활동에 의한 온실가스 배출량 증가인 것은 명백한 듯하다. 나아가 미래 기후변화는 기후다양성 증가, 급속한 해빙 등을 유도해 농업, 기아위협도, 수자원부족에 영향을 미칠 것이며 해수면과 수온 상승에 따른 해양, 해안 생태계 변화에 대한 예측과 경고는 20세기 후반부터 이어져온 연구의 공통적인 결론이며 무엇보다 현재 신뢰도는 매우 높아 보인다. 이에, 지금은 지구온난화의 심각성에 대한 인식을 넘어 현재 발생하고 있는 기후변화 현상과 미래의 변화양상에 대한 실질적 대응과 완화방안에 대해 고민해야 할 때라고 판단된다. 이를 위해서는 최근 기상이변에 대한 관측 자료를 토대로 한 사회 전반적인 방재 시스템과 설계에 대한 재정비가 필요하며 미래 정보의 불확실성에 대한 충분한 이해를 통해 장기적인 기후변화 영향평가연구의 실효성을 향상시키는 노력이 필요할 것이다.

#### 참고문헌

1. 국립기상연구소, 2011, IPCC 5차평가보고서 대응을 위한 기후변화 시나리오 보고서 2011.
2. 권원태, 구교숙, 부경은, 2007, IPCC WGI 평가보고서 주요 내용 비교를 통한 기후변화에 관한 과학적 진보, 한국기상학회, 대기, 17(4), 483-492.
3. 기상청, 2012, 2012년 이상기후 보고서
4. 황세운, 강문성, 2013, 기후변화 영향평가 방법론과 과정의 불확실성, 한국농공학회지, 55(1), 30-39.
5. IPCC, 1990, Climate Change: The IPCC Scientific Assessment, J. T. Houghton, G. J. Jenkins and J. J. Ephraums (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, UK.
6. IPCC, 1994, Climate Change 1994: Radiative Forcing of Climate Change and an Evaluation of the IPCC IS92 Emission Scenarios, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
7. IPCC, 1995, Climate Change 1995: The Science of Climate Change. Contribution of Working Group I to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
8. IPCC, 2001, Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contributions of working group I to the third assessment report of the governmental panel on climate change, Cambridge University Press, Cambridge,
9. IPCC, 2007, Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Working group I contribution to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change, Summary for Policymakers, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
10. IPCC, 2013, Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Working group I contribution to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
11. Milly, P.C. D.J. Betancourt, M. Falkenmark, R.M. Hirsch, Z.W. Kundzewicz, D.P. Lettenmaier, R.J. Stouffer, 2008, Stationarity Is Dead - Whither Water Management? Science, 319, 573-574.