

기후변화를 고려한 농촌용수 영향평가 방법 제시

윤 동 균

(ydkibm@ekr.or.kr)

농어촌연구원 수자원연구팀

■ 서 론

산업혁명 초기인 18세기 중엽부터 인간의 활동이 활발하게 이루어짐에 따라 지구의 기후에 점차 영향을 미치기 시작하였다. 1970년부터 2004년 사이에 온실가스 배출량은 70%나 증가하였으며, 그 중 이산화탄소(CO₂)가 전체 온실가스의 77%를 차지하고 있다. 온실효과(Greenhouse Effect)로 인하여 지구온난화의 지표인 지구표면 온도는 지난 100년 동안(1906~2005) $0.74 \pm 0.18^{\circ}\text{C}$ 상승하였다. 또한 지난 20년간은 20세기 동안 가장 더웠던 시기로 나타났다으며, 지난 100년간 가장 더웠던 12년은 모두 1983년 이후에 나타나고 있다. 이에 따라 국제사회는 선진국의 온실가스 배출안정화를 권고하는 기후 변화 협약과 선진국의 온실가스 감축목표를 설정한 교토의정서 등을 합의하여 온실가스 감축에 힘을 합치고 있다.

기후변화에 대한 정부간패널 IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)에서 발간한 4차 평가보고서에 의하면 온실가스 증가로 인해 21세기말 지구의

평균 기온이 최대 6.4°C 까지 더 상승할 것으로 전망하였다(IPCC, 2007). 전지구 평균기온이 3.0°C 상승할 경우 아시아지역에서 연간 700만명 이상이 홍수피해 위기에 직면할 것으로 예상되고 있다. 또한 우리나라의 경우 기온은 지난 100년 동안(1906~2005) 전지구 평균에 비해 2배 이상 높은 1.5°C 정도 상승하였으며, 최근 50년간의 강우일수는 감소한 반면 일 강수량이 80mm 이상인 강우일수의 발생빈도는 증가하고 있다(Choi, 2002). 이러한 기후변화는 앞으로 더 심각한 폭우와 해빙, 가뭄, 폭염 등이 발생할 것이라고 경고하고 있다. 기후변화로 인한 물 순환 과정의 변동은 곧 강우량, 증발량, 지표수 유출, 토양 함수량 등이 달라지는 것을 의미하는 것으로 하천유량, 수생태계, 농업, 수질 등 기후변화로 인한 부정적인 영향이 농업과 사회경제 전반에 심각한 영향을 미칠 것으로 예상된다. 따라서 우리나라의 경우 다른 국가에 비하여 이산화탄소 배출량이 높고 기온이 빠르게 증가하고 있으며, 담수자원의 의존도가 높은 상황에서 기후변화로 인한 기상 및 수자원의 예측하기 어려운

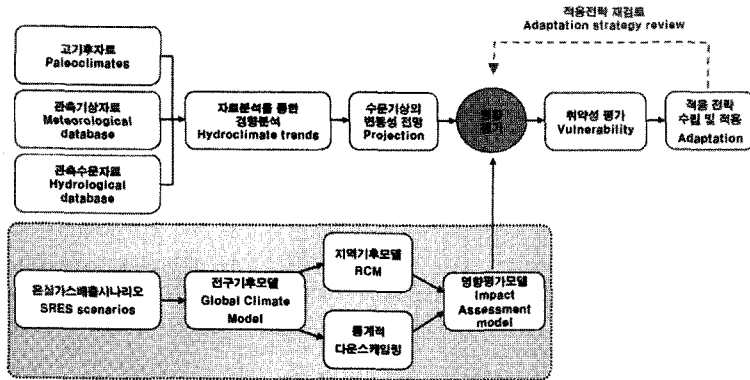


그림 1. 기후변화에 따른 농업수자원 영향평가 및 적응 전략 수립 (2010, 윤동균)

변화는 우리의 농업수자원에 심각한 문제를 발생시킬 가능성이 내포되어 있으므로 이에 대한 미래 농업수자원의 전망을 통한 대응 마련은 필수적인 사항이다 (윤동균, 2010).

■ 기후변화 영향평가 전략 수립

우리나라의 경우 다른 나라에 비해 온실가스 증가 뿐 아니라 기온상승이 빠르게 진행되고 있어 그로 인한 강수량 패턴의 변화, 증발산량의 증가 및 유출의 계절적 변동 등을 초래하여 미래의 수문순환과정이 과거와 다른 패턴으로 변화할 것으로 예견되고 있다. 따라서 지금보다 홍수와 가뭄이 극심해질 것이라는 연구결과도 나오고 있으며 (Rind, 1993), 수문학적 변화와 관련한 연구가 활발하게 이루어지고 있다. 현재까지 수자원 관리는 미래의 수문조건이 과거와 같다는 가정에서 이루어져 왔으나 본 연구에서는 그림 1과 같이 미래 온실가스 배출시나리오를 이용하여 영향평가를 실시하고 있다.

■ 온실가스 배출 시나리오

SRES (Special Report on Emissions Scenarios: IPCC, 2000)시나리오는 IPCC에 의해 준비된 배출시나리오일

뿐 아니라, 많은 과학적 혹은 정책적인 시사점을 주고 있다. 이 시나리오가 시사하는 것은 인류의 장래 발전 방향은 다양하고, 이러한 발전 방향에 의해 온난화의 정도나 온난화 대책의 의미는 크게 다르다는 것이다. 기후변화 시나리오는 인위적 온실가스 농도 증가 시나리오에 따른 기후시스템의 반응을 모의한 것이다. 최근 IPCC의 SRES에 기초한 시나리오 산출이 주를 이루는데, 모든 사회, 경제, 기술, 환경적 부분을 완벽하게 배출시나리오에 고려하는 것은 불가능하기 때문에 상당한 불확실성이 포함될 수밖에 없다. 따라서 이에 반응하는 미래 기후변화는 매우 불확실하지만, 현재로는 기후가 어떻게 변화할지를 가장 근접하게 보여줄 수 있는 유일한 선택이 시나리오이다 (배덕효 등, 2004).

그림 2는 SRES 특별보고서에서 제시한 여러가지

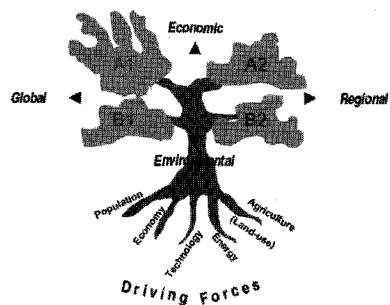


그림 2. SRES 시나리오의 기본 개념도 (IPCC, 2007)

시나리오를 나타내고 있다. SRES에는 인구, 사회, 경제, 기술, 환경 개발 등 미래 배출문제의 근원이 되는 요소들을 광범위하게 다루고 있다.

SRES는 크게 4개 그룹 (A1, A2, B1, B2)으로 온실가스 배출 시나리오를 제시한다. 시나리오 중 A축은 경제 (Economic)지향, B축은 환경 (Environmental) 지향, 1축은 지구적 (Global)지향, 2축은 지역주의 (Regional)지향형으로 구분되어 있으나 4가지의 시나리오 중 어느 특정 시나리오가 최적이라고 볼 수는 없다.

표 1의 온실가스 배출 시나리오 중 A1 시나리오는 에너지원에 따라서 C, G, B, T는 각각 석탄 주도형, 가스 주도형, 밸런스형, 고효율 에너지 기술 주도형을 뜻한다. A1 시나리오는 매우 급격한 경제 성장, 전지구 인구는 금세기 중반에 최정점에 이르렀다가 그 후 감소하는 추세, 새롭고 효율적인 기술의 급격한 도입 등으로 표현한다. 이에 비해 A2는

지속적인 인구성장과 지역적으로 편중된 경제성장 등을 표현한다. B1은 A1과 같이 세계 인구가 금세기 중반에 정점을 보이다가 감소하지만 서비스 및 정보 경제로 급격하게 경제구조가 변화하고, 청정 및 자원 효율적인 기술의 도입이 이루어지는 것을 가정하고 있다. B2는 A2보다 낮은 비율로 지속적으로 인구가 증가하고, 중간수준의 경제성장, B1 및 A2보다는 상대적으로 덜 급하고 다양한 기술변화를 가정하고 있다 (IPCC, 2001a). 본 연구에서는 우리나라가 지속적인 경제성장과 동시에 자연친화적으로 성장할 것으로 판단되어 A1B 시나리오를 이용하였다.

■ 전지구 기후모형(GCM)의 선정

기후변화의 요인은 인위적인 요인과 자연적인 요인으로 구분할 수 있다. 자연적인 요인은 기후시스템의

표 1. 온실가스 배출 시나리오 (IPCC, 2001a)

구 분	A1				A2	B1	B2
	A1C	A1G	A1B	A1T			
Population growth	Low	Low	Low	Low	High	High	Medium
GDP Growth	Very high	Very high	Very/high	Very high	Medium	High	Medium
Energy Use	Very high	Very high	Very/high	Very high	High	Low	Medium
Land Use Changes	Low-Medium	Low-Medium	Low	Low	Medium/High	High	Medium
Availability of Conventional and Unconventional Oil and Gas	Hight	Hight	Medium	Medium	Low	Low	Medium
Pace of Technological Change	Rapid	Rapid	Rapid	Rapid	Slow	Medium	Medium
Direction of Technological Change Favoring	Coal	Oil and Gas	Balanced	Non-fossils	regional	Efficiency and dematerialization	Dynamics as usual

5가지 주요 구성요소인 대기권, 수권, 빙권, 지권, 생물권 각 요소들이 각기 상호 작용하여 끊임없이 변화한다.

IPCC에서 제공하는 GCM (General Circulation Model) 자료는 표 2와 같이 23개가 있으며, 그 중 기상청 및 국내 연구에서 많이 사용하고 있는 모형은 일본에서 개발한 MIROC3.2와 독일에서 개발한 ECHAM5-OM, 영국에서 개발한 HadCM3 그리고 독일과 한국이

공동으로 개발한 ECHO-G이다. 4개 GCM에서 제공하는 각 시나리오별 기상자료에 대하여 실제 관측 값과 비교 분석하였다. 수자원 및 물수지 변화분석에서 가장 중요하게 다루는 부분은 강우와 기온이며, 그중 강우량에 대하여 수원관측소 관측자료 (1979~2008)와 GCM에서 제시한 과거 기상자료를 비교분석 하였다. ECHO-G의 경우 우리나라 기상연구소에서 제공하는 MM5의 기상자료를 이용하여 비교분석 하였다. 그

표 2. IPCC에서 제공하는 GCM자료

No	ID	Model (agency: version)	Country	Resolution	
				Atm	Ocn
1	a	BCC: CM1	China	128×96	128×96
2	b	BCCR: BCM2	Norway	128×64	360×180
3	c	CCCMA: CGCM3.1-T47	Canada	96×48	192×96
4	d	CCCMA: CGCM3.1-T63	Canada	128×64	256×192
5	e	CNRM: CM3	France	128×64	180×170
6	f	CSIRO: MK3	Australia	192×96	192×189
7	g	GFDL: CM2	USA	144×90	360×200
8	h	GFDL: CM2.1	USA	144×90	360×200
9	i	NASA: GISS-AOM	USA	90×60	90×60
10	j	NASA: GISS-EH	USA	72×46	360×180
11	k	NASA: GISS-ER	USA	72×46	72×46
12	l	LASG: GFOALS-G1.0	China	128×60	360×170
13	m	INM: CM3	Russia	72×45	144×84
14	n	IPSL: CM4	France	96×72	180×170
15	o	NIES: MIROC3.2_hires	Japan	320×160	320×320
16	p	NIES: MIROC3.2_medres	Japan	128×64	256×192
17	q	MPIM: ECHAM5	Germany	192×96	360×180
18	r	MRI: CGCM2.3.2	Japan	128×64	144×111
19	s	NCAR: CCSM3	USA	256×128	320×395
20	t	NCAR: PCM	USA	128×64	360×180
21	u	UKMO: HadCM3	UK	96×73	288×144
22	v	UKMO: HadGEM1	UK	192×144	360×216
23	w	METRI: ECHO-G	Germany/Korea	96×48	128×117

결과 GCM에서 생성된 기상자료와 기상청에서 관측된 기상자료는 GCM 및 시나리오별로 많은 차이를 보였다. 따라서 GCM은 전 세계의 미래 기상자료를 모의하긴 하지만 개발한 나라와 공간해상도에 따라서 그 값의 정확성 및 불확실성이 크다는 것을 알 수 있었다. 따라서 본 연구에서는 기상연구소에서 제공하는 MM5 자료와 실제 관측 값과 가장 유사한 MIROC3.2의 기상자료를 본 연구에 사용하였다.

■ 편이보정(bias-correction)

Wood et al. (2004)은 RCM (Regional Climate Model,) 이 GCM에 비해 상세한 지역기후 모의결과를 제공하지만 수문학적 활용성에서는 크게 향상된 결과를 제시하지 않는다고 하였고, RCM은 GCM의 자료를 경계 조건으로 사용함으로써 GCM의 오차가 RCM으로 전파되며, 이와 더불어 RCM의 지역 기후 모의에서도 한계가 있기 때문이라고 하였다. 따라서 현실성 있는 기후시나리오를 생산하기 위해서는 RCM 결과의 편차를 보정하는 과정이 필요하다 (Mason, 2004).

본 연구에서 이용된 MM5, MIROC3.2의 경우 한국가와 전 세계의 미래 기후를 모의하긴 하지만, 지역적으로 적용하기에 그 값의 정확성은 불확실하다. 따라서 본 연구에서는 Droogers와 Aerts (2005), Alcamo 등 (1997)이 사용했던 기법인 식(1), 식(2)와 같은 편이보정 (Bias-correction)법을 이용하여 기후변화에 가장 큰 영향을 미치는 강우와 기온을 보정하는 것은 필수적이라 할 수 있다.

$$T'_{GCM,fut} = T_{GCM} \times (\bar{T}_{meas,his} / \bar{T}_{GCM,his}) \quad (1)$$

여기서, $P'_{GCM,fut}$ 는 보정된 미래의 강우량이며, P_{GCM} 는 GCM의 모의된 미래의 강우량, $\bar{P}_{meas,his}$ 는 과거 30년 (1979~2008) 동안의 관측 연평균 강우량, $\bar{P}_{GCM,his}$ 는 과거 30년 (1979~2008) 동안의 모의된 GCM 연평균 강우량을 의미한다.

$$T'_{GCM,fut} = T_{GCM} \times (\bar{T}_{meas,his} / \bar{T}_{GCM,his}) \quad (2)$$

여기서, $T'_{GCM,fut}$ 는 보정된 미래의 기온이며, T_{GCM} 는 GCM의 모의된 미래의 기온, $\bar{T}_{meas,his}$ 는 과거 30년 동안의 관측 연평균 기온, $\bar{T}_{GCM,his}$ 는 과거 30년 동안의 모의된 GCM 연평균 기온을 의미한다.

■ 상세화

기후변화의 영향에 대한 정량적 평가를 위해서는 일반적으로 GCM에서 모의한 기후변화 시나리오별 결과를 사용하고 있다. 그러나 GCM모형은 종류가 다양할 뿐만 아니라 모형의 특성과 사용된 입력자료에 따라 모의결과가 상이하게 나올 수 있다. IPCC의 GCM모형 평가결과는 대체로 “현재의 기후모형들은 관측된 대규모 (전구 혹은 대륙규모) 기후의 여러 양상들을 비교적 정확히 예측할 수 있지만 지역규모 예측에서는 정확성이 떨어진다”고 지적하고 있다 (IPCC, 2001c). 따라서 GCM이 예측한 기상자료를 한반도에 적용하기 위해 역학적 방법을 이용하여 고해상도 지역기후모형을 구축하거나 또는 통계적 방법을 이용하여 상세화를 한다.

IPCC 4차보고서 (IPCC, 2007)에 따르면 1차보고서에서 적용된 GCM의 해상도는 약 500km 정도였으나 최근에는 약 110km까지 공간해상도가 향상되었다고 제시하였다. 그러나 아직까지 GCM 결과를 유역스케일의 수자원 영향평가에 직접 활용하기에는 공간해상도가 낮다는 점과 아격자 규모의 물리과정 묘사에 대한 알고리즘의 개선이 필요하다는 문제점이 남아 있는 실정이다.

▶ 역학적 상세화

역학적 상세화는 GCM 결과를 RCM의 경계 자료로 사용하여 고해상도 결과를 생산하는 방법 (Giorgi et

al., 1990)이며, 물리적으로 일관된 고해상도의 기후 모의 결과를 얻을 수 있고, 지역적인 기후특성을 모의할 수 있는 장점이 있는 반면 계산시간이 많이 걸리는 단점이 있다.

▶ 통계적 상세화

통계적 상세화는 GCM 결과와 특정 지점의 기후변수와의 경험적인 관계를 이용하는 방법 (Von Storch, 1999)이다. 통계적 상세화는 대규모의 대기 순환패턴이 지역기후의 대기 순환패턴과 관계가 있다는 것에 착안하여 GCM에서 모의한 값과 지역기후요소 사이의 통계적 관계를 찾아내어 상세화 하는 방법이다 (정일원, 2008). 통계적 상세화는 경제적이고 간편한 방법이나 GCM 결과와 지상 변수들과의 물리적 연관성이 없고 복잡한 지형조건을 가진 지역에서는 변수들 사이의 공간적 상관성을 찾기 어렵다는 단점이 있다. 대표적인 통계적 상세화 방법에는 전이함수 (Transfer Function)를 이용한 방법과 기상발생기 (Weather Generator)를 이용한 방법이 있다.

■ 결 론

세계적으로 기후변화가 다양한 분야에 미칠 영향에 대하여 많은 연구를 하고 있다. 또한 최근 물수지 해석과 관련하여 거시적인 관점에서 기온 및 강수량 증가에 따른 물순환 과정을 모의하고 농업용수, 댐건설, 도시화, 토지이용의 변화 등 인위적인 환경 변화 및 기후변화에 따른 유출량의 변화를 정량화하려는 연구들이 수행되고 있다. 우리나라는 수자원과 관련하여 일부 연구가 진행 된 바 있지만 선진국에 비하여 미진한 실정이며, 특히 농업용수와 관련한 연구는 시작 단계에 있다. 따라서 본 고에서 제시한 방법들을

이용하여 빠른 시일 내에 우리나라의 농촌수자원분야에 대한 연구가 진행되길 기대해 본다. 또한 우리나라에서도 기후변화에 대해 더욱 적극적으로 대처할 준비를 하여야 하며, 특히 농업수자원관리 분야에 대한 분석 및 대응전략이 수립되어야 할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 배덕효, 정일원, 2004. 기후변화와 수자원의 대응, 세종대학교, 연구논문.
2. 윤동균, 2010. 기후변화가 논 필요수량에 미치는 영향, 경북대학교, 박사학위논문.
3. Choi, Y. E., 2002. Trends in daily precipitation events and their extremes in the southern region of Korea, Korea Society of Environmental Impact Assessment 11(3), pp.189~203.66, Giorgi, F. and G. T. Bates, 1989. The climatological skill of a regional model over complex terrain, Mon. Wea. Res, 117, pp.2325~2347.
4. IPCC, 2000. Emission scenarios - Special report of the intergovernmental panel on climate change, Cambridge University Press, Cambridge.
5. IPCC, 2007. Climate Change 2007: The physical science basis, Contribution of working group I to the forth assessment report of the intergovernmental panel on climate change, Cambridge University Press, Cambridge and New York, USA.
6. Rind, D., 1993. Models see hard rain, drought if CO2 doubles, Climate Alert Newsletter 6(2).
7. Wood, A. W., E. P. Maurer, A. Kumer and D. P. Lettenmaier, 2002. Long range experimental hydrologic forecasting for the Eastern U.S., Journal of Geophysical Research 107(20), pp.4429~4430.