

기후변화 영향평가의 불확실성 저감연구

Reducing Uncertainties in Climate Change Assessment

이재경* / 김영오**
Lee, Jae-Kyoung / Kim, Young-Oh

요 지

미래의 기후변화 영향평가에 있어 전지구모형(General Circulation Model)은 가장 중요한 자료 중 하나이다. 즉, 온실가스 방출(emission) 시나리오에 기초한 전지구모형의 모의결과를 이용하면 미래 수자원에 대한 정보를 얻을 수 있다. 하지만 미래 수자원은 방출 시나리오, 상세화(downscaling) 기법, 강우-유출모형, 전지구모형의 종류에 따라 크게 달라질 수 있어 매우 큰 불확실성(uncertainty)을 포함하고 있다. 이러한 불확실성을 줄이는 방법 중 하나로 전지구모형의 모의능력에 따라 가중치(weight)를 부여하고 결합(combining)하는 multi-model 앙상블(ensemble) 기법이 선진국을 중심으로 활발히 연구되고 있다.

본 연구에서는 우선 기후변화 영향평가를 위하여 국내에서 사용가능한 전지구모형을 조사하고 그 중 CCSM3, CSRIO, ECHAM4, GFDL, MIRCO를 선택하였다. 한강 충주댐 유역에 대하여 과거(1980~1999년)와 미래(2030~2049년) 기간에 대하여 전지구모형의 기후정보를 간단한 선형보간법을 이용하여 상세화하였다.

다음으로 multi-model 앙상블 기법을 조사하였다. 본 연구에서는 Giorgi et al.(2002)이 제안한 Reliability Ensemble Average(REA) 기법을 적용하여 선형보간법으로 상세화한 전지구모형의 모의결과에 가중치를 주어 불확실성을 줄이는 연구를 수행하였다. 특히 REA를 구성하는 식 중 모형의 편차(bias) 뿐만 아니라 분산(variance)까지 고려함으로써 이를 개선하는 Modified-REA를 제안하였다. 제안한 방안을 이용하여 결합한 전지구모형의 모의결과가 기존 REA의 결과보다 기후정보의 불확실성을 더 줄일 수 있는 것으로 나타났다.

핵심용어 : 전지구모형, 가중치, Multi-model 앙상블 기법, Reliability Ensemble Average, 불확실성

1. 서론

2007년에 발표된 Intergovernmental Panel on Climate Change 제4차 보고서에 따르면 다양한 온실가스 시나리오와 기후모형을 이용한 결과, 지구의 평균온도가 향후 100년 동안 1.1-6.8°C 상승할 것으로 보고하였다. 1995년 제2차 보고서에는 0.8-3.5°C, 2001년 제3차 보고서에서는 최고 5.8°C 상승할 것으로 전망하였으며, 기온상승의 폭이 해마다 점점 더 커져 현재 상태로 온실가스 등의 오염물질을 생산할 경우 더 심각한 기후변화를 겪을 수 있음을 우려하지 않을 수 없다. 이러한 기후변화의 영향은 20세기 후반부터 강수량뿐만 아니라 집중호우의 증가의 원인이 되고 있다(권원태, 2005). 기후변화는 비단 강수량 등 기상패턴뿐만 아니라 육상에서의 물수지(water balance)에도 영향을 미치며 이는 바로 인간과 생태계 전반에 걸쳐 직접적인 영향을 준다. 또한 이와 관련된 토양수분, 증발산 등에도 영향을 미치게 되어 결국 육상에서의 물수지 변화를 초래하게 된다(유철상과 이동률, 2000; 김선영 등, 2003; 임은순 등, 2006).

* 정회원.서울대학교 건설환경공학부 박사과정-E-mail: myroom1@snu.ac.kr
** 정회원.서울대학교 건설환경공학부 부교수-E-mail: yokim05@snu.ac.kr

선진국 등 국외에서는 벌써 기후변화에 따른 영향평가에 대한 연구가 매우 활발하게 진행 중에 있다. 더욱이 기후변화에 따른 미래 수자원 영향평가(Hamlet et al., 1999; Wood et al., 2002; Hamlet et al., 2007)에 그치지 않고, 물수지 모형을 이용한 미래 수자원에 대한 댐 운영모의(Hamlet et al., 1999; Wood et al., 2002; Payne et al. 2004), 유역별 물수지 분석(Prodanovic et al. 2006) 등 적응전략에 관한 연구가 수행되었다.

국내에서도 기후변화 관련 수자원 분야 연구가 진행되고 있으나 지난 10여 년간의 대부분 국내에서 시행된 연구들은 해외 이론을 답습하는데 그치고 있으며 과학적 접근이 대부분으로 유출량 변화 전망과 일부 영향평가(서용원 등, 2000; Kim et al., 2000; 김병식 등, 2004; 임은순 등, 2006)에 치우쳐져 있는 실정이다.

기후변화에 대한 영향평가를 위해서는 기후 시나리오, 전지구모형(General Circulation Model), 상세화(downscaling) 기법, 강우-유출모형의 순으로 매우 많은 과정을 거쳐야 하며, 하나의 과정을 정하여 수행한다 하더라도 큰 불확실성(uncertainty)을 내포하고 있다. 하지만 국내에서는 연구마다 각기 다른 모형, 기법 그리고 과정을 통하여 수행하고 있으므로 그 불확실성은 매우 클 것이라고 사료되며, 기후변화에서의 불확실성을 인정할 수밖에 없다. 따라서 본 연구에서는 기후변화 영향평가의 입력자료가 되는 GCMs에 대하여 불확실성을 저감할 수 있는 방법을 제시하고자 한다.

2. 기후변화 시나리오

본 연구에서는 기후변화 영향평가를 위하여 국내에서 사용가능한 전지구모형으로 CCSM3, CSRIO, ECHAM4, GFDL, MIRCO를 선택하였으며, 방출 시나리오는 IPCC에서 제시한 4개의 시나리오 중 B1 시나리오를 따른다고 가정하였다. 과거모의(historical simulation) 기간은 1980년부터 1999년까지 20년간이며, 미래전망(future projection) 기간은 2030년부터 2049년까지 20년간이다.

위와 같이 취득된 전지구모형 모의결과를 적용지역에 사용하기 위해 간단한 통계학적 상세화 기법 중 하나인 곱선형보간법(bilinear interpolation method)을 이용하였다. 곱선형보간법은 전지구모형이 구성하고 있는 격자망 안의 임의의 한 점에 대한 값을 두 번의 선형보간을 이용하여 얻는 방법이며, 식(1)과 같다.

$$f(x,y) = \frac{(x_2 - x)(y_2 - y)}{(x_2 - x_1)(y_2 - y_1)} f(Q_{11}) + \frac{(x - x_1)(y_2 - y)}{(x_2 - x_1)(y_2 - y_1)} f(Q_{21}) + \frac{(x_2 - x)(y - y_1)}{(x_2 - x_1)(y_2 - y_1)} f(Q_{12}) + \frac{(x - x_1)(y - y_1)}{(x_2 - x_1)(y_2 - y_1)} f(Q_{22}) \quad (1)$$

여기서 x, y 는 임의의 한 점에 대한 위경도, $Q_{11}=(x_1, y_1)$, $Q_{12}=(x_1, y_2)$, $Q_{21}=(x_2, y_1)$, $Q_{22}=(x_2, y_2)$ 는 전지구모형 격자점의 위경도, $f(\cdot)$ 는 전지구모형 격자점의 모의값이다. 이와 같은 방법으로 적용지역의 위경도를 이용하여 전지구모형 모의자료를 내삽하였다.

3. 기후변화 불확실성 저감방안

3.1 적용지역

기후변화 불확실성 저감방안 검증을 위해 충주댐을 적용지역으로 선정하였다. 충주댐은 수자원을 최적으로 개발하여 수도권을 비롯한 댐 하류지역에 생활, 공업, 농업, 하천유지 용수를 공급함은 물론이고 발전 및 홍수조절을 목적으로 건설된 다목적 댐이다. 유역면적은 6.648 km², 연평균 강수량은 1,197.6 mm이다. 우기인 6월부터 9월까지의 강수량이 808.0 mm로서 전체 강수량의 69.1%이고, 유입량은 1403.3 CMS로서 전체 유입량의 72.8 %를 차지하고 있다(한국수자원공사, 2004).

3.2 Reliability Ensemble Average

최근 기후변화의 불확실성을 저감하는 방안으로 여러 모형의 결과를 조합하여 기후변화 전망을 제시하는 multi-model 앙상블 기법(Raisanen et al., 2001; Rajagopalan et al., 2002; Doblus-Reyes et al., 2005)이 대두되고 있다. Multi-model 앙상블 기법은 정확성이 높은 전지구모형에는 높은 가중치를 주고 정확성이 낮은 전지구모형에는 낮은 가중치를 주는 각 전지구모형의 모의능력에 따라 가중치를 부여하고 결합하는 방법이다. 또한 이러한 다양한 시나리오들로부터 기후변화 전망의 불확실성을 추정하는 연구(Allen et al., 2000; Giorgi et al., 2002; Murphy et al., 2004; Maurer et al., 2005; Wilby et al., 2006; Maurer, 2007)도 중요하게 다루어지고 있다. 이 중 몇 가지 연구를 살펴보면, Giorgi et al.(2002)은 Reliability Ensemble Average(REA)라는 기법을 이용하여 각 전지구모형에 가중치를 주었다. Raisanen et al.(2001)은 확정론적(deterministic)이 아닌 확률론적(probabilistic) 기후변화를 나타내는 전지구모형에 대하여 Brier Score를 이용하여 가중치를 부여하는 방법을 제시하였다. Yun et al.(2005)는 계절별 기후전망에 대하여 주성분회귀식(principal component regression)을 이용하는 DEMETER 전망기법을 적용하여 전지구모형에 가중치를 부여하는 multi-model super 앙상블 이론을 제시하였다.

본 연구에서는 Giorgi et al.(2002)이 제시한 Reliability Ensemble Average(REA)라는 기법을 이용하여 각 전지구모형에 가중치를 주었으며, REA의 식은 다음과 같다.

$$R_i = \frac{\left(\frac{\epsilon_T}{\Delta D T} \right)_m \left(\frac{\epsilon_T}{\Delta D T} \right)_n}{1 / (m \times n)} \quad (2)$$

여기서 R_i 는 i 번째 전지구모형의 가중치, T 는 온도, n 는 전지구모형의 개수, $B_{T,i}$ 는 과거모의 기간동안의 i 번째 전지구모형 모의 온도의 오차, ΔT 는 과거모의 기간동안의 전지구모형의 평균온도 과 미래 전망기간 동안의 전지구모형의 평균온도 차이, $D_{T,i}$ 는 ΔT 의 평균과 i 번째 전지구모형의 ΔT 의 차이, ϵ_T 는 과거 온도실측의 10년 기간 이동평균값 중 최고값과 최저값의 차이, m 과 n 은 각 항의 가중치이다.

식(2)에서 첫 번째 항은 전지구모형의 모의 정확성을 나타내며, 두 번째 항은 미래 전망에 있어 전지구모형들 간의 상이한 정도를 나타내는 항이다.

3.3 Reliability Ensemble Average의 적용 및 평가

우선 각 전지구모형의 과거와 미래전망에 대한 모의결과를 2절에서 언급한 겹선형보간법을 이용하여 상세화하였다. 충주댐을 포함하는 전지구모형의 4개 격자점의 위경도와 격자점의 모의결과를 식(1)에 적용하여 충주댐 유역에 대해 지역 모의자료를 산정하였다. 이를 검증하기 위해 한강유역 충

주관측소의 관측자료와 비교하였으며, 모형마다 정확성은 다르나 본 연구에서 사용가능한 것으로 판단하였다.

다음으로 상세화한 결과를 REA에 적용하여 각 전지구모형의 가중치를 산정하였다. 적용기간은 1980년부터 1999년까지이며, 검증에 위해 교차검증(cross-validation)을 실시하여 검정(calibration)은 15년 동안, 검증(verification)은 5년 동안 수행했다. 마지막으로 REA의 불확실성 저감효과를 살펴보기 위해, 상세화한 전지구모형 모의결과를 단순평균(simple average)한 결과와 REA를 적용한 결과를 비교하였다. 비교한 결과는 표 1과 같다.

표 1. 단순평균과 REA의 적용결과 비교

	단순평균	REA
Bias(°C)	-1.47 / -1.47 ¹	0.49 / -0.50
RMSE	1.54 / 1.53	0.67 / 0.69

*1: 검정기간 / 검증기간

REA를 적용하여 산정한 가중치를 이용하여 결합한 전지구모형 모의결과의 Bias와 RMSE가 검정과 검증기간 모두 전지구모형을 단순평균한 결과보다 우수한 결과를 나타내었다. 따라서 REA를 이용한다면 기후변화 불확실성을 저감할 수 있음을 확인하였다.

4. 기후변화 불확실성 저감방안의 개선

4.1 Modified-REA

본 연구에서 REA의 적용결과 다음과 같은 단점을 발견하였다. 첫 번째, 전지구모형 모의결과가 불편(unbiased)이라고 하면 식(2)의 REA에서 $B_{T,i}$ 는 0이 되므로 REA 식을 적용하기가 불가능해진다. 두 번째로 일반적으로 모형을 검증할 때 편차(bias)보다 편차와 분산(variance)를 모두 고려할 수 있는 Mean Square Error(MSE)가 더 대중적으로 사용된다는 점이다.

따라서 본 연구에서는 REA를 개선한 Modified-REA(M-REA)를 제안하였으며, M-REA는 식(3)과 같다.

$$w_i = \frac{\sigma_{T,i}^2}{\sum_{j=1}^m \sigma_{T,j}^2 + \sum_{k=1}^n \sigma_{T,k}^2} [1 / (m \times n)] = \frac{\sigma_{T,i}^2}{\sigma_{T,i}^2 + \sum_{j \neq i}^m \sigma_{T,j}^2 + \sum_{k=1}^n \sigma_{T,k}^2} [1 / (m \times n)] \quad (3)$$

여기서 $MSE(T)$ 는 i 번째 전지구모형의 모의온도에 대한 MSE이다.

4.2 Modified-REA의 적용 및 평가

M-REA 적용도 REA와 동일한 방법으로 적용하였다. 층주담에 대하여 전지구모형의 모의결과를 겹선형보간법을 이용하여 상세화하고, M-REA에 적용한 후 가중치를 산정하여 전지구모형 모의결과를 결합하였다. 마지막으로 교차검증을 실시하였으며, 적용결과는 표 2와 같다.

표 2에서 Bias만 고려하는 REA에서는 CCSM과 GFDL의 Bias가 거의 같으므로 가중치가 동일하게 산정되었다. 하지만 CCSM이 Bias와 Variance를 모두 고려하는 RMSE에서 GFDL보다 좋으므로, CCSM이 M-REA를 적용하여 산정한 가중치에서 GFDL보다 더 높게 산정되었다.

적용결과를 살펴보면, M-REA가 검정과 검증기간에서 Bias는 -0.43과 -0.44, RMSE는 0.50과 0.57을 나타내어 모든 전지구모형, 단순평균 그리고 REA보다 뛰어난 결과를 보였다. 따라서 제안된 M-REA를 이용하면 더 기후정보의 불확실성을 줄일 수 있음을 입증하였다.

표 2. 전지구모형, 단순평균, REA, M-REA의 적용결과 비교

	CCSM	CSIRO	GFDL	ECHAM	MIRCO	단순평균	REA	M-REA
REA 적용 가중치	0.39	0.11	0.39	0.02	0.01	-	-	-
M-REA 적용 가중치	0.70	0.05	0.20	0.02	0.01	-	-	-
Bias (°C)	-0.55	-1.59	0.56	-3.52	-2.24	-1.47 / -1.47 ¹	0.49 / -0.50	-0.43 / 0.44
RMSE	0.97	3.49	1.62	3.94	2.39	1.54 / 1.53	0.67 / 0.69	0.50 / 0.57

*1: 검정기간 / 검증기간

5. 결론 및 향후연구

본 연구에서는 우리나라에서 적용가능한 전지구모형을 조사하여 CCSM3, CSRIO, ECHAM4, GFDL, MIRCO를 선택하였으며, 적용지역인 대청댐에 대하여 간단한 통계적 상세화 기법인 겹선형보간법을 이용하여 전지구모형 모의결과를 상세화하였다.

본 연구에서는 기후변화 불확실성을 저감할 수 있는 multi-model 앙상블 방법을 조사하였고, 그 중 적용가능한 방법으로 Reliability Ensemble Average를 선택하였으며, 이를 한강유역의 충주댐에 적용하였다. REA의 가중치를 이용하여 전지구모형을 결합하였으며, 모의결과를 단순평균 결과와 비교하였다. 검정 및 검증기간 모두 REA를 이용한 모의결과의 Bias와 RMSE가 더 뛰어나, REA를 적용한 방법이 단순평균보다 불확실성을 저감할 수 있음을 확인하였다.

또한 REA를 구성하는 식 중 모형의 정확성을 판단하는 식에서 모형의 편차뿐만 아니라 분산까지 고려함으로써 이를 개선하는 Modified-REA를 제안하였다. M-REA를 이용하여 결합한 전지구모형의 모의결과가 검정과 검증기간 모두 Bias와 RMSE가 더 뛰어나 기존 REA의 결과보다 기후정보의 불확실성을 더 줄이는 것으로 나타났다.

본 연구에서는 multi-model 앙상블 기법으로 기후변화의 불확실성을 저감할 수 있음을 확인하였으며, 전지구모형 뿐만 아니라 상세화 기법, 강우-유출모형 등에도 불확실성 저감방안이 마련된다면 더 신뢰성이 높은 기후변화 전망이 가능할 것으로 기대된다. 또한 기후변화 불확실성 저감방안 뿐만 아니라 기후변화에 대비한 적응전략까지 앞으로 지속적으로 수행되어야 할 것이다.

감 사 의 글

본 연구는 서울대학교 안전하고 지속가능한 사회기반건설사업단 SIR BK21의 기획연구과제 지

원에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. 권원태(2005). 기후변화의 과학적 현황과 전망, 한국기상학회지, 제41권, pp. 325-336.
2. 김병식, 김형수, 서병하, 김남원(2004). 기후변화가 용담댐 유역의 유출에 미치는 영향, 한국수자원학회 논문집, 제37권 제2호, pp. 185-193.
3. 김선영, 김병식, 김형수, 서병하(2003). WGEN 모형과 2변수 물수지 모형을 이용한 기후변화 영향분석, 한국수자원학회 학술발표회 논문집, pp. 747-750.
4. 김영오, 서용원(2000). 선진국의 기후변화 연구동향(II)-수자원관리에 대한 영향을 중심으로-, 한국수자원학회지, 제33권 제3호, pp. 32-41.
5. 서용원, 김영오(2000). 선진국의 기후변화 연구동향(I)-유출에 대한 영향을 중심으로-, 한국수자원학회지, 제33권 제3호, pp. 22-31.
6. 유철상, 이동률(2000). 기후변화와 수자원: 국내외 연구동향, 한국수자원학회논문집, 제33권 제3호, pp. 42-47.
7. 임은순, 권원태, 배덕효(2006). 수자원 영향평가에 활용 가능한 지역기후변화 시나리오 연구, 한국수자원학회 학술발표회 논문집, pp. 637-642.
- 8 한국수자원공사(2004). 다목적댐 운영 실무편람, 한국수자원공사.
9. Alley, M. R., Stott, P. A., Mitchell, J. F. B., Schnur, R., and Delworth, T. L.(2000). Quantifying the uncertainty in forecasts of anthropogenic climate change, *Nature*, vol. 407, pp. 617-620.
10. Doblas-Reyes, F. J., Hagendorn, R., and Palmer, T. N.(2005). The rationale behind the success of multo-model ensembles in seasonal forecasting - II. Calibration and combination, *Tellus*, vol. 57A, pp. 234-252.
11. Giorgi, F. and Mearns, L. O.(2002). Calculation of average, uncertainty range, and reliability of regional climate changes from AOGCM simulations via the "Reliability Ensemble Averaging" (REA) method, *Journal of Climate*, vol. 15, pp. 1141-1158.
12. Hamlet, A. F. and Lettenmaier, D. P.(1999). Effects of climate change on hydrology and water resources in the Columbia river basin, *Journal of the American Water Resources Association*, vol. 35 no. 6, pp. 1597-1623.
13. Hamlet, A. F. and Lettenmaier, D. P.(2007). Effects of 20th century warming and climate variability on flood risk in the western U.S., *Water Resources Research*, vol. 43. W06427.
14. Intergovernmental Panel on Climate Change(2007). Climate Change 2007.
15. Maurer, E. P.(2007). Uncertainty in hydrologic impacts of climate change in the Sierra Nevada, California, under two emission scenarios, *Climatic Change*, vol. 82, pp. 309-325.
16. Maurer, E. P. and Duffy, P. B.(2005). Uncertainty in projections of streamflow changes due to climate change in California, *Geophysical Research Letters*, vol. 32, L03704.
17. Prodannovic, P. and Simonovic, S. P.(2006). Water resources research report: Inverse flood risk modeling to the upper Thames river basin, The university of Western Ontario.
18. Rajagopalan, B, Lall, U, and Zebiak, S. E.(2002). Categorical climate forecasts through regularization and optimal combination of multiple GCM ensembles, *Monthly Weather Review*,

vol. 130, pp. 1792-1811.

19. Wilby, R. L. and Harris, I.(2006). A framework for assessing uncertainties in climate change impacts: Low-flow scenarios for the River Thames, U.K., *Water Resources Research*, vol. 42, W02419.
20. Wood, A. W. and Maurer, E. P.(2002). Long-range experimental hydrologic forecasting for the eastern United States, *Journal of Geophysical Research*, vol. 107, doi:10.1029/201JD000659.