

기후변화 영향평가의 불확실성 저감기법 최신 연구동향



김 용 대 ▶▶▶
서울대학교 자연과학대학 통계학과 부교수
ydkim0903@gmail.com

1. 머릿글

Intergovernmental Panel on Climate Change(IPCC) 4차 보고서에 포함된 전지구 모형들은 한반도의 여름철 강수량을 모의하는데 있어 매우 부정확한데 특히, 여름철 집중 강수량을 전혀 따라가지 못하고 있다. 이는 전지구 모형의 불확실성뿐만 아니라 상세화 기법에도 불확실성이 있기 때문이다. 또한 과거 국내에서 진행된 금강유역의 연구 결과를 살펴보면 동일한 유역임에도 불구하고 거의 정반대의 전망들이 있다. 이러한 결과는 각 연구마다 방출 시나리오, 전지구 모형, 상세화 기법, 강우-유출모형을

다르게 사용하였고 각 단계마다 불확실성이 있기 때문이다. 따라서 본 연구의 특징은 기후변화를 고려한 수문 전망 각 단계별로 불확실성이 존재하며 전체의 불확실성이 매우 크다는 점이다.

기후변화를 고려한 수문 전망과정의 불확실성 정량화 기법은 아직 선진국에서도 시작 단계에 있어 관련 국내, 국외 문헌들이 없어 응용, 확장 가능한 문헌들의 연구 동향만을 살펴보았다. 불확실성 저감기법인 Multi Model Ensemble(MME) 기법의 연구는 2000년대에 이르러 선진국으로부터 시작되고 있다. 국내에서는 아직 많이 연구가 되어 있지 않아 국내 보다는 국외 위주로 문헌들의 연구 동향을 살펴보았다. 2002년부터 2010년까지 약 10년간의 문헌을 조사하여 분석하였다. 많은 저널과 보고서 중에 기존방법을 비교 분석한 것을 제외한 새로운 기법을 제안한 16편 가량의 저널을 검토한 바에 따르면 주로 미국, 캐나다의 북미대륙과 상대적으로 연구가 활발히 진행되고 있었다. AMS Online Journals, AGU, SpringerLink 등의 검색사이트를 통해 문헌을 조사

표 1. 문헌 조사 범위

Journal	연도	2002년 5월 ~ 2010년 6월
	총 편수	15편
	저널명 ¹⁾	MWR(3), CC(1), GRL(3), JC(4), Tellus(1), EES(1), JGR(1), JCGS(1)
Research Report	연도	2009년
	총 편수	1편
주요 내용		불확실성 저감기법, 불확실성 조합기법
키워드		Total Uncertainty Assessment, Multi Model Ensemble, Bayesian Model Averaging Ensemble 등

1) MWR: Monthly Weather Review(AMS Online Journals), CC: Climatic Change(SpringerLink), GRL: Geophysical Research Letters (AGU), JC: Journal of Climate(AMS Online Journals), Tellus(Wiley), EES: Environmental and Ecological Statistics(Springer), JGR: Journal of Geophysical Research(AGU), JCGS : Journal of Computational and Graphical Statistics(ASA)

하였으며, 주저자 등의 웹페이지 등에서 연구 보고서 및 학술발표 자료 등을 내려받을 수 있었다. 기후변화를 고려한 수문 전망과정의 불확실성 저감기법에 대하여 조사한 여러 국외 문헌들의 범위를 아래 표 1과 같이 정리하였다.

2. 국외 연구동향

기후변화의 불확실성 저감기법에 대하여 다양한 연구가 진행 중이며 특히 Multi-Model Ensemble(MME)기법은 전세계에 걸쳐 활발히 이루어지고 있다. MME 기법은 많은 전지구 모형들에서 나온 전망값(기온 혹은 강수량 등) 중에 어느 특정 전지구 모형으로 전망하는 것이 아니라 정확성이 높은 전지구 모형에는 높은 가중치를 주고 정확성이 낮은 전지구 모형에는 낮은 가중치를 주어 결합하는 방법이다. 전지구 모형에서 나온 결과는 과거부터 미래의 값이 있고 전지구 모형에 결과에 대응되는 관찰값은 과거부터 현재의 값이 있다. 기후 변화를 고려한 수문 전망과정에서 중요한 것은 현재부터 과거의 값이 아니라 미래의 값이다. 과거를 잘 전망한 모형에 가중치를 높게 주더라도 미래를 잘 전망한다 할 수 없다. 이러한 문제점들을 보완하기 위하여 많은 연구자들이 새로운 방법을 제안하였다.

MME 기법의 선행 연구의 초창기에는 연구자들의 경험에서 나온 방법들이 제안되었다. Giorgi and Mearns(2002)는 과거를 잘 전망하고 전지구 모형들의 미래의 전망값의 평균과 각 전지구 모형들의 미래 전망값의 차이가 작은 모형에 가중치를 높게 주는 측면의 고려한 방법을 제안하였다. Giorgi and Mearns(2002)는 편의만 고려하였지만 Dessai et al.,(2005)는 편의와 분산을 모두 고려한 수정된 방법을 제안하였다.

이후 제안된 방법들은 통계 모형을 고려하였다. 먼저 회귀모형 방법은 회귀계수를 가중치로 주는 방법이다. 세부적으로 회귀 계수는 음의 값을 가질수 있

는데 음의 값을 가지는 전지구 모형은 빼고 다시 회귀 계수를 구하는 방법(Gneiting et al., 2005), 자료를 EOF변환 후 회귀계수를 구하는 방법(Yun et al., 2005)과 Maximal Entropy로 구하는 방법(Laurent and Cai, 2007)등이 제안되었다. Greene et al.(2006)는 회귀 계수 자체 즉 가중치에 사전 분포를 가정하여 사후 분포를 계산하여 가중치에 불확실성을 고려한 베이زي안 회귀분석 방법과 Sain and Furrer(2009)는 사전분포의 분산에 다시 분포를 주는 계층적 베이زي안 회귀분석 방법을 제안하였다.

혼합 모형 방법은 앞에서 언급한 방법처럼 전망값을 예측하는 것이 아니라 각 전지구 모형의 전망값에 대하여 사전 분포를 가정하고 가중치를 계산하여 전망값의 분포를 추정하는 방법이다. 가중치를 계산하는 방법으로 먼저 가중치를 잠재변수로 생각하여 Expectation-Maximization 알고리즘으로 추정하는 방법(Raftery et al., 2005; Slougher et al., 2007)이 있고 Bayes factor 방법은 기준 모형과 각 모형의 우도비를 이용하여 각 모형에 가중치를 주는 방법(Min and Hansen, 2006; Min et al., 2006; Min et al., 2007)이다. 마지막으로 회귀분석에서 회귀계수에 제약을 주는 Ridge방법과 유사하게 가중치에 제약을 주어 계산하는 방법(Yeon et al., 2010)이 있다. 마지막 방법은 통계학 분야의 문헌으로 수문 분야에 적용 가능한 할 것으로 사료된다.

불확실성 저감 기법의 국외 연구동향 문헌조사 내용을 아래 표 2와 그림 1으로 정리하였다.

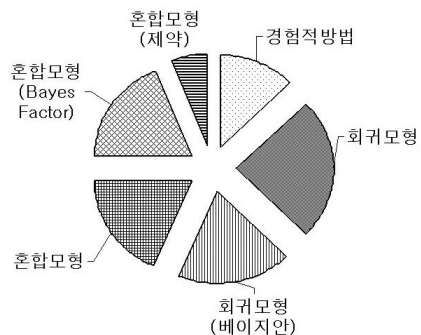


그림 1. 불확실성 저감기법별 분류


표 2. 국외 연구 동향 목록 정리

논문 번호	예측	Emission Scenario	GCM	자료 길이	Time Step	적용지역	방법	간략한 특징
7	기온 강수량	A2, B2	9개 GCM	1961-1990, 2071-2100	월	전지구	경험적방법	과거 관측값과 GCM에서 나온 값의 차이, 미래 GCM값과 GCM 평균값과의 차이, 두 차이의 가중 평균
4	기온 강수량	A1, A2, B1,B2	9개 GCM	1961-1990, 2071-2100	월	2개시즌 (여름, 겨울), 22개의 지역 (전지구)	경험적방법	Regional Skill Score를 이용하여 높은 쪽에 가중치를 많이 주는 방법
8	기온		5개 (Washington mesoscale ensemble)	2000 년1월 12일부터 6월30일	시간	North American Pacific Northwest	회귀모형	Least square, CRPS방법의 회귀계수로 가중치 예측, 만일 0보다 작으면 0으로 하여 다시 예측
9	기온 강수량	A1B	18개 GCM	1961-1990	월	미국	회귀모형	회귀계수를 Maximal Entropy method를 이용하여 분석
18	강수량		7개 GCM	1987-2000, 2001년 예측	월	전지구 (계절별)	회귀모형	GCM 결과값들을 EOF방법으로 변환한 새로운 결과값들로 회귀계수 예측
3	기온 강수량		23개(WCRP CMIP3)		년	전지구	회귀모형	여러가지 모형에서 나온 output를 long term의 평균값으로 전체적인 기온과 강수량을 예측
6	온도	A2,B1	14 GCM	1902-98, 2005-98	년	전지구	회귀모형 (베이지안)	회귀 계수에 사전 분포를 주고 회귀계수를 계산
14	강수량		5개지역 모델	1980-1981년 겨울부터 1999-2000년 겨울까지	월	5개지역	회귀모형 (베이지안)	회귀모형에서 회귀계수에 사전분포를 가정하고 사전분포의 분산에 다시 사전분포 가정.
5	기온 강수량		9개 GCM		평균	전지구	회귀모형 (베이지안)	격자별 GCM별로 과거 평균과 미래평균의 차이를 회귀분석, 회귀계수에 다시 사전분포 가정
16	강수량	A2,B2	9개 GCM	1961-1990, 2070-2099	월	전지구, 2개시즌 (여름, 겨울)	혼합모형	관측값, 전망값에 사전분포들을 가정하여 사후분포들의 평균을 계산하여 가중치를 계산
13	기온		5개 MM5 (Washington and Pennsylvania)	2000년1월부터 6월, 6월 12일부터14일 (48시간예측)	시간	Pacific Northwest	혼합모형	혼합모형을 적용할 때 가중치를 잠재변수로 생각하고 EM알고리즘을 이용하여 가중치를 계산
15	강수량		9개 (Washington mesoscale ensemble)	2003-2004	시간	Pacific Northwest	혼합모형	강수량을 예측할때 강수량이 0인 경우와 아닌 경우로 분류하여 혼합모형 분석
10	기온		22개 GCM	1900-1999	월	전지구	혼합모형 (Bayes Factor)	Bayes Factor를 계산하여 Bayes Factor를 가중치로 적용
11	기온		AOGCM(23)	1900-49, 1950-99	년	전지구	혼합모형 (Bayes Factor)	자료가 ill-condition일때 Legendre Series Expansions 으로 보정하여 Bayes Factor 적용
12	기온		AOGCM(23)	1900-49, 1950-99	월	전지구	혼합모형 (Bayes Factor)	자료가 ill-condition일때 Legendre Series Expansions 으로 보정하여 Bayes Factor 적용
17							혼합모형 (제약)	혼합모형에서 제약을 적용

3. 국내 연구동향

국내에서는 미래 기후변화에 대한 연구가 진행되고 있지만 아직 불확실성을 줄이는 새로운 저감 기법을 제안한 연구는 전무한 상태이며 대부분 국외 연구를 국내 지역에 적용하는 실정이다. 국내 지역에 적용한 문헌을 살펴보면 이재경 등(2008)은 경험적 방법중 하나인 REA를 충주댐 지역에 적용하였고 이재경 등(2009)은 경험적 방법과 Raftery et al.(2005)의 혼합 모형 방법을 금강 유역에 적용하여 저감 기법들을 비교 분석하였다. 이러한 기존 방법의 비교 분석을 통해 국내에서도 곧 새로운 불확실성 저감기법을 개발할 수 있을 것으로 기대된다.

4. 맺음말

전지구 모형 전망값의 불확실성을 정량화 하고 저감하기 위한 많은 연구들을 살펴보았다. 이러한 연구들은 연구자들의 경험적 방법으로부터 시작하여 통계 기법을 적용한 회귀모형을 거쳐 혼합모형으로 발전하고 있다. 일반적으로 설명변수들의 상관관계가 큰 경우 일반적인 기법보다 제약을 이용한 기법들이 불확실성을 잘 저감할 수 있는 것으로 알려져 있다. 전지구 모형의 전망값들의 살펴보면 서로 상관관계가 크므로 기존의 회귀모형과 혼합모형에서 제약을 이용한 방법을 적용하면 전지구 모형의 전망값들의 불확실성을 잘 저감할 수 있을 것으로 사료된다. 이처럼 불확실성을 저감하기 위하여 전지구 모형의 전망값들에 적합한 통계 기법들을 제안할 수 있을 것으로 기대된다. 

참고문헌

1. 이재경, 김영오 (2008) 기후변화 영향평가의 불확실성 저감연구, 한국수자원학회 2009년도 학술발표회 논문집, pp. 345-351
2. 이재경, 김영오, 이경택 (2009) 기후변화 시나리오의 조합기법에 관한 연구, 제 35회 대한 토목학회 정기 학술대회, CD.
3. Boer, G.J., and Lambert, S.J. (2008) "Multi-model decadal potential predictability of precipitation and temperature." *Geophysical Research Letters*, Vol. 35, No. 6, L05706.
4. Dessai, S., Lu, X., and Hulme, M. (2005). "Limited sensitivity analysis of regional climate change probabilities for the 21st century." *Journal of Geophysical Research*, Vol. 110, No. 19, D19108.
5. Furrer, R., Sain, S.R., Nychka, D. and Meehl, G.A., (2007) "Multivariate Bayesian Analysis of Atmosphere Ocean General Circulation Models." *Environmental and Ecological Statistics*. Vol. 14, No. 3, pp. 249-266.
6. Greene, A.M., Goddard, L., and Lall, U. (2006). "Probabilistic multimodel regional temperature change projections." *Journal of Climate*, Vol. 19, No. 17, pp. 4326-4346.
7. 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, No. 5, pp. 1141-1158.
8. Gneiting, T., Raftery, A.E., Westveld, A.H., and Goldman, T. (2005). "Calibrated probabilistic Forecasting Using Ensemble Model Output Statistics and Minimum CRPS Estimation." *Monthly Weather Review*, Vol. 133, No. 5, pp. 1098-1118.
9. Laurent, R., and Cai, X. (2007) "A maximum entropy method for combining AOGCMs for regional intra-year climate change assessment" *Climate Change*. Vol. 82, No. 4, pp. 411-435.
10. Min, S.K., and Hense, A. (2006). "A Bayesian approach to climate model evaluation and

- multi-model averaging with an application to global mean surface temperature from IPCC AR4 coupled climate models." *Geophysical Research Letters*, Vol.33, No. 8, L0870.
11. Min, S.K., and Hense, A. (2006). "A Bayesian Assessment of Climate Change Using Multimodel Ensembles. Part I: Global Mean Surface Temperature." *Journal of Climate*, Vol. 19, No. 13, pp. 3237–3256
 12. Min, S.K., and Hense, A. (2007). "A Bayesian Assessment of Climate Change Using Multimodel Ensembles. Part II: Regional and Seasonal Mean Surface Temperatures." *Journal of Climate*, Vol. 20, No. 12, pp. 2769–2790
 13. Raftery, A. E., Gneiting, T., Balabdaoui, F. and Polakowski, M. (2005). "Using Bayesian model averaging to calibrate forecast ensembles." *Monthly Weather Review*, Vol. 133, No. 5, pp. 1155–1174.
 14. Sain, S.R., and Furrer, R. (2009). "A Proposal for combining Climate Model Output" Unpublished manuscript.
 15. Sloughter, J. M., Raftery, A. E., Gneiting, T., and Fraley, C. (2007). "Probabilistic quantitative precipitation forecasting using Bayesian model averaging." *Monthly Weather Review*, Vol. 135, No. 11, pp. 3209–3220.
 16. Tebaldi, C., Mearns, L.O., Nychka, D., and Smith, R.L. (2004). "Regional probabilities of precipitation change: A Bayesian analysis of multimodel simulations." *Geophysical Research Letters*, Vol. 31, No. 5, L24213.
 17. Yen, K., Song, M.S., Kim, Y., and Choi, H. (2010). "Model Averaging via Penalized Regression for Tracking Concept Drift." *Journal of Computational and Graphical Statistics*, Vol. 19, No. 2, pp. 457–473.
 18. Yun, W.T., Stefanoya, L., Mitra, A.K., Vijayakumar, T.S.V. Dewar, W., and Krishnamurti, T.N. (2005). "A multi-model superensemble algorithm for seasonal climate prediction using DEMETER forecasts." *Tellus*. Vol. 57, No. 3, pp. 280–289.