J. Korea Water Resour. Assoc. Vol. 51, No. S-1 (2018), pp. 1079-1089
doi: 10.3741/JKWRA.2018.51.S-1.1079
pISSN 1226-6280
eISSN 2287-6138

Quantitative uncertainty analysis for the climate change impact assessment using the uncertainty delta method

Lee, Jae-Kyoung[a]*

[a]Innovation Center for Engineering Education, Daejin University

Paper number: 18-051
Received: 25 July 2018; Revised: 19 October 2018 / 31 October 2018; Accepted: 31 October 2018

Abstract

The majority of existing studies for quantifying uncertainties in climate change impact assessments suggest only the uncertainties of each stage, and not the total uncertainty and its propagation in the whole procedure. Therefore, this study has proposed a new method, the Uncertainty Delta Method (UDM), which can quantify uncertainties using the variances of projections (as the UDM is derived from the first-order Taylor series expansion), to allow for a comprehensive quantification of uncertainty at each stage and also to provide the levels of uncertainty propagation, as follows: total uncertainty, the level of uncertainty increase at each stage, and the percentage of uncertainty at each stage. For quantifying uncertainties at each stage as well as the total uncertainty, all the stages - two emission scenarios (ES), three Global Climate Models (GCMs), two downscaling techniques, and two hydrological models - of the climate change assessment for water resources are conducted. The total uncertainty took 5.45, and the ESs had the largest uncertainty (4.45). Additionally, uncertainties are propagated stage by stage because of their gradual increase: 5.45 in total uncertainty consisted of 4.45 in emission scenarios, 0.45 in climate models, 0.27 in downscaling techniques, and 0.28 in hydrological models. These results indicate the projection of future water resources can be very different depending on which emission scenarios are selected. Moreover, using Fractional Uncertainty Method (FUM) by Hawkins and Sutton (2009), the major uncertainty contributor (emission scenario: FUM uncertainty 0.52) matched with the results of UDM. Therefore, the UDM proposed by this study can support comprehension and appropriate analysis of the uncertainty surrounding the climate change impact assessment, and make possible a better understanding of the water resources projection for future climate change.

Keywords: Uncertainty quantification, Uncertainty propagation, Climate change, Uncertainty delta method, Total uncertainty

기후변화 영향평가에서의 Uncertainty Delta Method를 활용한 정량적 불확실성 분석

이재경[a]*

[a]대진대학교 공학교육혁신센터

요 지

기존 기후변화 영향평가에서 발생하는 불확실성에 대한 연구들은 전체과정에서 총 불확실성과 그 전파에 대한 것보다 각 단계별 불확실성에 초점을 맞추어 연구가 진행되었다. 따라서 본 연구에서는 first-order Taylor series expansion에 기반하여 전망의 분산을 이용하는 Uncertainty Delta Method (UDM)를 제안하였으며, 이 방법은 각 단계별 불확실성 정량화와 증감정도, 단계별 불확실성 비율, 총 불확실성의 전파 과정 제시가 가능하다. 본 연구에서는 기후변화 영향평가 과정의 단계별 불확실성 정량화와 전파과정 분석을 위해 미래 2030년부터 2059년까지를 대상으로 2개 배출 시나리오, 3개 GCM, 2개 상세화기법, 2개 수문모형을 사용하였다. 결과를 분석하면, UDM을 이용한 총 불확실성은 5.45(배출시나리오: 4.45, 상세화기법: 0.45, 상세화기법: 0.27, 수문모형: 0.28)이며, 배출 시나리오의 불확실성(4.45)이 가장 크게 나타났다. 불확실성은 각 단계를 거칠수록 증가하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 어떠한 배출시나리오를 선정하느냐에 따라 미래 수자원전망이 매우 달라질 수 있음을 의미한다. 다음으로 Hawkins and Sutton (2009)가 제안한 Fractional Uncertainty Method (FUM)을 이용한 기후변화 영향평가 불확실성 분석에서 가장 불확실성이 큰 요인은 배출 시나리오(FUM 불확실성: 0.52)이며, 이 결과는 UDM 결과와 동일하게 나타났다. 따라서 이 연구에서 제안한 UDM은 기후변화 영향평가에서의 불확실성 이해와 적합한 분석 및 미래 기후변화 대비 보다 나은 수자원 전망이 가능하도록 기여할 것으로 판단된다.

핵심용어: 불확실성 정량화, 불확실성 전파, 기후변화, Uncertainty Delta Method, 총 불확실성

***Corresponding Author.** Tel: +82-31-539-2357
E-mail: myroom1@daejin.ac.kr (J.-K. Lee)

© 2018 Korea Water Resources Association. All rights reserved.

1. 서 론

최근 기후변화 영향평가를 수행하는 많은 연구들이 미래에 대한 수문·기상인자들을 전망함에 있어서 비정상성(nonstationarity)과 불확실성(uncertainty)을 반영하고 있다(Milly *et al*., 2010). 미래 상황에 대비하여 수자원 관리와 계획은 매우 위험성이 존재하며, 특히 미래 수자원 전망의 기반이 되는 기후(변화)전망은 아직 많은 불확실한 요인들을 포함하고 있다(Yu *et al*., 2001; Wilby and Harris, 2006; Maurer, 2007; Prudhomme and Davis, 2009; Poulin *et al*., 2011; Zhang *et al*., 2011; Lawrence *et al*., 2013; Zhang *et al*., 2014). 미래 기후변화에 대한 많은 연구들이 아직은 기후변화 영향평가의 과정에서 각 단계가 되는 배출시나리오, Global Climate Model (GCM), Regional Climate Model (RCM), 상세화기법, 수문모형, 수자원관리모형 등에서 한 두개의 단계에만 초점을 맞추어 불확실성을 연구가 진행되었다(Katz, 2001; Kay *et al*., 2009; Chen *et al*., 2011; Poulin *et al*., 2011; Zhang *et al*., 2011). 특히, 기존 기후변화 영향평가 과정에서 GCM 자체 혹은 어떤 GCM을 선택하느냐에 따라 불확실성이 가장 많이 발생한다는 결과를 제시한 연구들이 많았으며(Wilby and Harris, 2006; Kay *et al*., 2009; Prudhomme and Davis, 2009; Chen *et al*., 2011), GCM 이외의 단계에서 불확실성이 가장 크게 발생한다는 결과나 계절성에 의한 불확실성 고려를 제시한 연구들도 진행되었다(Maurer, 2007; Najafi *et al*., 2011; Bae *et al*., 2011; Jung *et al*., 2013). 또한 몇몇 연구들은 불확실성을 분석하는 방법이나 과정이 민감도 분석(sensitivity analysis)과 비슷하게 진행한 결과들을 제시하였다.

1980년대 이후 기후변화 영향평가의 전체 과정에서 단계별로 연속적으로 발생하는 불확실성에 대한 연구들(Schneider, 1983; Henderson-Sellers, 1993; Jones, 2000)이 진행된 이후, IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) 3차 보고서(2001)에서 기후변화 영향평가에서 단계별로 불확실성이 전파되는 개념이 소개되었다. 하지만 앞서 살펴본 바와 같이 기후변화 불확실성에 대하여 많은 연구가 진행되었으나 기후변화 불확실성을 정량화하여 평가하는 명확하고 표준화된 방법이 없는 실정이다. 이에 연구나 연구자의 목적과 방향 등에 따라 기후변화 불확실성이 분석되고 평가되고 있으며, 이러한 연구들의 접근방법은 몇 가지 문제점을 내포하고 있다. 첫째, 기존 많은 연구들이(GCM 자체 혹은 GCM 선택에 따른) GCM 단계에서 불확실성이 가장 크게 발생한다고 제시한 바와 같이, 기후변화 영향평가에서 각 단계별 상대적인 불확실성은 정량적으로 제시하나 전체 불확실성(total uncertainty)이 어느 정도 되는지 정량적으로 제시하지는 못하고 있다. 이에 따라 전체에 대한 각 단계별 불확실성 발생비율 제시에 한계가 있다. 둘째, 기존 연구들의 접근방법은 불확실성 분석을 기후변화 영향평가 전체과정을 포함하는 포괄적인 방법으로 수행하지 못하고 있으며 단계별 민감도 분석 결과나 변동성을 불확실성으로 제시하고 있다(Murphy *et al*., 2004; Stainforth *et al*., 2005; Maurer, 2007; Kay *et al*., 2009). 즉, 임의의 한 단계를 고정하고 다른 단계에서 다양한 모형들의 모의결과들(수문기상변수들의 분산, 평균 등)의 과거대비 변동성(variability) 등을 이용하여 불확실성을 정량화하였다. 마지막으로 기존 연구들에서는 기후변화 영향평가의 각 단계를 거치면서 불확실성이 증감정도를 제시하지 못하고 있으며, 이에 따라 불확실성이 전체적으로 어떻게 전파되는지 파악하기가 힘들다. 이러한 단점들을 극복하기 위해 국내에서도 maximum entropy나 분산분석기법 등을 활용한 다양한 연구들이 수행되었으나 보다 다양한 기법을 활용하거나 개발하는 등의 폭넓은 연구가 진행되어야 한다(Lee *et al*., 2016; Lee *et al*., 2017).

이에 따라 본 연구에서는 기존 기후변화 불확실성 연구들의 한계점을 극복할 수 있는 대표적 통계값인 분산을 이용하는 기후변화 불확실성 정량화 기법인 Uncertainty Delta Method (UDM)을 제안하고자 한다. 기후변화 영향평가 과정에서 본 연구에서 제안하는 UDM을 활용한다면 단계별로 발생하는 불확실성을 정량화하고 불확실성이 단계별로 전파되는 정도도 분석이 가능하다. 2장에서는 UDM의 기본개념을 살펴보고, 3장에서는 UDM을 적용하여 단계별 불확실성을 정량화하고 전파과정을 분석하고자 한다. 또한 기존 불확실성 정량화 방법과 비교하여 UDM의 적정성을 파악하고자 한다. 4장에서는 결론을 서술하고자 한다.

2. 기후변화 불확실성 정량화 방법

2.1 Uncertainty Delta Method

2.1.1 기후변화 불확실성 전파와 정량화

앞서 언급한 바와 같이, IPCC 3차보고서(2001)에서 제시한 불확실성 전파에서 중요한 기본개념은 기후변화 수행단계에서 발생하는 불확실성은 모든 단계가 연결되어 있어 전 단계가 다음 단계에 영향을 주기 때문에 각 단계별로 독립적으로 불확실성을 정량화하는 것이 아니라 전체 수행단계에 대하여 포괄적으로 불확실성이 분석되어야 한다는 것이다. 따라서 불확실성 정량화·평가·전파는 단계별로 점점 증가하는 형

태로 제시되어야 하며, 이렇게 제시된 최종 결과물을 활용하면 전체 불확실성의 크기, 각 단계별 불확실성의 비율, 불확실성의 전파과정의 제시가 가능하다. 우리나라에서도 이와 동일한 개념을 활용한 연구가 진행된 바 있으나(Lee *et al.*, 2017), 사용자료, 불확실성 정량화 방법, 정량화를 위해 사용된 변수가 다르다는 차이점이 있다.

또한 기후변화 불확실성을 정량화하는 연구들에서는 모의(혹은 전망)된 변수들의 분산이나 분포값을 이용한 방법, Bayesian 방법과 이를 이용한 방법, entropy를 이용한 방법, GLUE (Generalized Likelihood Uncertainty Estimation)를 이용한 방법 등이 활용되었으며, 각 방법별로 각 모형, 모형의 매개변수들, 모형들의 조합 등에 불확실성을 정량화하는 차이점들이 있다(Beven and Freer, 2001; Tebaldi *et al.*, 2005; Ghosh and Mujumdar, 2007; Kay *et al.*, 2009; Gay and Estrada, 2010; Lee *et al.*, 2017).

2.1.2 Uncertainty Delta Method (UDM)를 이용한 불확실성 정량화

본 연구에서는 기후변화 불확실성을 정량화하고 전파과정을 분석하기 위해 널리 알려진 Delta method를 개선하였다. 본 연구에서 사용된 Delta method는 Taylor series expansion에서 first order항만을 고려한 first-order Taylor expansion을 기반으로 한 방법이다. 여기에 2차 모멘트(2nd moment)인 분산(variance)을 이용하여 단계별 변동성(variability)을 분석할 수 있는 방법이다. 즉, 단계별로 모의된 모든 결과들이 어느 정도 퍼지는가에 대한 통계특성을 이용하는 방법이다. 무작위변수(random variable) $X(X \sim N(\mu, \sigma^2))$와 x의 특정값을 a, Taylor series expansion의 함수를 $f(\cdot)$라 하면, Taylor series expansion에서 first order를 제외한 높은 차수의 항을 제외하고 나타내면 다음과 같다.

$$f(x) \approx f(a) + f'(a)(x-a) \tag{1}$$

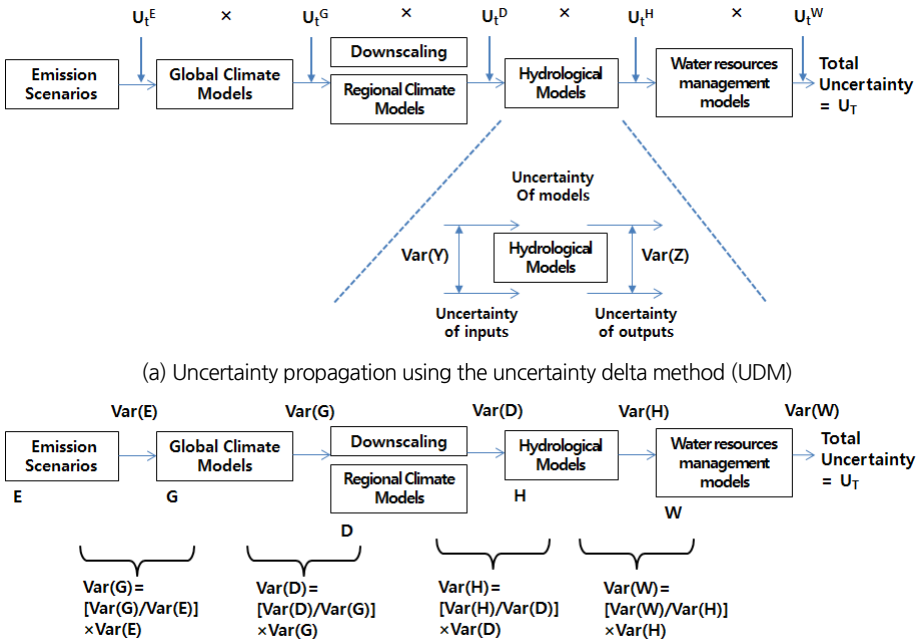
여기서 특정값 a는 X의 평균 μ_X, Y는 $f(x)$라 하면,

$$y = f(x) \approx f(\mu_X) + f'(\mu_X)(x-\mu_X) \tag{2}$$

Eq. (2)의 양변에 분산을 적용하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} Var(Y) &= Var(f(x)) = (f(x) - f(\mu_X))^2 \\ &\approx (f'(\mu_X)(x-\mu_X))^2 = [f'(\mu_X)]^2 Var(X) \end{aligned} \tag{3}$$

Eq. (3)을 살펴보면, X단계와 Y단계가 연속적으로 수행되는 경우, Y단계의 분산을 X단계의 정보를 이용하여 추정할 수 있음을 의미한다. Eq. (3)을 이용하여 간단히 각 단계별 불확실성을 추정할 수 있으며, 이를 기반으로 본 연구에서는



(a) Uncertainty propagation using the uncertainty delta method (UDM)

(b) Uncertainty quantification at each stage using the uncertainty delta method (UDM)

Fig. 1. Basic concept of application of the uncertainty delta method (UDM) in the climate change impact assessment

Uncertainty Delta Method (UDM)로 개선하였고, 기후변화 영향평가 과정에 대하여 UDM을 적용하는 기본개념은 Fig. 1(a)와 같다. Fig. 1(a)에서 최종불확실성(U_T)는 최종단계(수자원관리모형)에서 발생한 분산이 될 것이며, Eq. (3)을 이용하여 단계별 연결을 정리하고 수식화하면 다음과 같다.

$$U_T = Var(W) = Var(l(H)) = (l'(\mu_W))^2 (h'(\mu_H))^2 (g'(\mu_D))^2 (m'(\mu_G))^2 Var(E) \quad (4)$$

여기서 E, G, D, H, W는 기후변화 영향평가 과정에서의 각 단계를 나타내며, $l(\cdot), h(\cdot), g(\cdot), m(\cdot)$은 각 단계별 평균값($\mu$)에 대한 함수이다. Eq. (4)를 이용하여 각 단계별 불확실성을 분산으로 표현하면, 특정 단계의 평균에 대한 도함수 제곱은 그 단계와 전 단계의 분산으로 나타낼 수 있으므로(예: $(l'(\mu_W))^2$=Var(W)/Var(H)), 이를 동일하게 전체 단계에 동일하게 적용하여 정리하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$U_T = Var(W) \approx \left(\frac{Var(W)}{Var(H)}\right) \times \left(\frac{Var(H)}{Var(D)}\right) \times \left(\frac{Var(D)}{Var(G)}\right) \times \left(\frac{Var(G)}{Var(E)}\right) \times Var(E) \quad (5)$$

$$\ln(U_T) = \ln(Var(W)) \approx \ln\left(\frac{Var(W)}{Var(H)}\right) + \ln\left(\frac{Var(H)}{Var(D)}\right) + \ln\left(\frac{Var(D)}{Var(G)}\right) + \ln\left(\frac{Var(G)}{Var(E)}\right) + \ln(Var(E)) \quad (6)$$

Eq. (5)의 구성은 (전체불확실성)=(배출시나리오 불확실성)×(GCM 불확실성)×(상세화기법 불확실성)×(수문모형 불확실성)×(수자원관리모형 불확실성)으로 나타낼 수 있으며, 이를 이용하면 전체불확실성을 각 단계별 분산값을 이용하여 불확실성 정량화가 가능하다. 각 단계별 분산값을 이용한 정량화 개념은 Fig. 1(b)와 같이 도식화할 수 있다(예: GCM 불확실성 $Var(G)$= [$Var(G)$/ $Var(E)$]×$Var(G)$). 이를 이용하면 각 단계별 불확실성의 증감분석이 가능하다. 예를 들어, GCM 단계의 불확실성이 1보다 작은 경우($Var(G)$= [$Var(G)$/ $Var(E)$]×$Var(G)$ < 1), GCM의 불확실성은 전 단계인 배출시나리오의 불확실성보다 작게 발생한다는 의미이며, 반대인 경우에 GCM의 불확실성이 배출시나리오보다 더 크므로 불확실성을 더 증가시키는 원인으로 판단할 수 있다. 따라서 UMD를 활용하면, (1) 각 단계별 정량화된 불확실성 제시가능; (2) 전체 불확실성 산정 가능; (3) 불확실성 전파과정의 설명이 가능하다.

2.2 기후변화 불확실성 비교방법: Fractional Uncertainty Method

본 연구에서 제시한 UDM과 비교하기 위해 Hawkins and Sutton (2009)가 제안한 Fractional Uncertainty Method (FUM)을 적용하였다. FUM은 기후변화 영향평가에 의해 발생하는 불확실성을 크게 세 개의 불확실성으로 구분하였고 각 불확실성에 대하여 정량화하는 방법을 제안하였으며, 총 불확실성(total uncertainty)은 각 불확실성을 전부 더하는 것으로 나타냈다. 첫 번째 불확실성은 기후시스템 내부의 변동성(internal variability)에 의한 불확실성으로서 실제 기후에 의한 자연적 변동(natural fluctuation)을 의미한다. 두 번째 불확실성은 모형에 의한 불확실성(model uncertainty)으로서 기후모형, 수문모형 등에 의한 모의결과와 실체 관측값의 차이에 기인한 불확실성을 의미한다. 마지막 불확실성은 배출 시나리오에 의한 불확실성(scenario uncertainty)으로서 어떤 배출 시나리오를 기반으로 미래를 전망하는가에 따라 달라지는 전망결과에 의한 불확실성을 나타낸다. 각 불확실성을 정량화하는 식은 다음과 같다(Hawkins and Sutton, 2009).

• 총 불확실성

$$T(t) = V + S(t) + M(t) \quad (7)$$

• 기후시스템 내부의 변동성에 의한 불확실성

$$V = \sum_m W_m var_{s,t}(\epsilon_{m,s,t}) \quad (8)$$

• 모형에 의한 불확실성

$$M(t) = \frac{1}{N_s} \sum_s var_m^W(x_{m,s,t}) \quad (9)$$

• 배출 시나리오에 의한 불확실성

$$S(t) = var\left(\sum_s W_m x_{m,s,t}\right) \quad (10)$$

여기서 s, m, t는 각각 배출 시나리오, 모형, 시간을 의미하며, N은 시나리오의 수, W는 각 모형의 가중치를 나타낸다. 각 모형의 가중치는 과거기간(1971년~2000년) 동안 모형의 기온 모의 정확성을 이용하여 추정한다. x는 모의예측(raw prediction) X를 회귀식을 이용하여 평활화(smooth fitting)한 값을 의미하며, i는 과거 참조변수값(reference variable value), ε는 잔차(residual)를 의미한다. 모의예측 X는 다음과 같이 구성되어 있다.

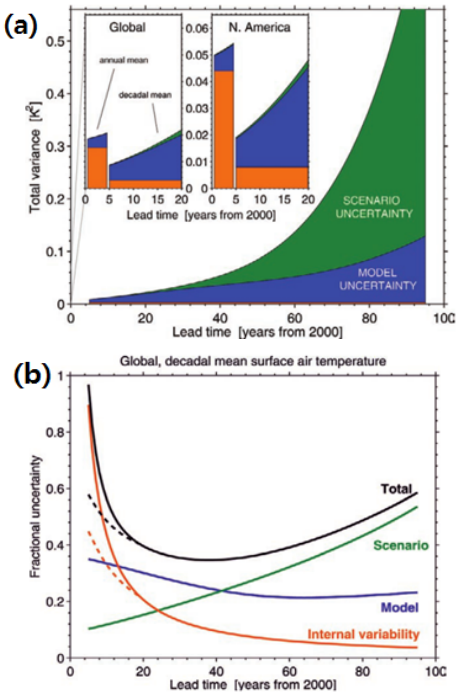


Fig. 2. The relative importance of each source of uncertainty in climate change impact assessment: (a) Uncertainty changes significantly with region, forecast lead time, and the amount of any temporal meaning applied, (b) Fractional uncertainty in decadal mean surface air temperature prediction for global mean

$$X_{m,s,t} = x_{m,s,t} + i_{m,s} + \epsilon_{m,s,t} \tag{11}$$

위의 과정을 통하여 정량화된 각 불확실성은 Fig. 2와 같이 나타낼 수 있다(Hawkins and Sutton, 2009). Fig. 2(a)는 2000년을 시작으로 100년 동안 지구 전체와 북미 지역에 대하여 기후변화 영향평가에 의해 발생한 기후시스템 내부의 변동성에 의한 불확실성, 모형에 의한 불확실성, 배출 시나리오에 의한 불확실성을 나타내고 있다. Fig. 2(b)은 지구 전체에 대하여 평균 지표면 온도를 이용하여 각 불확실성에 대하여 전망기간에 따라 어떻게 비율이 달라지는지 나타내고 있다. 불확실성을 정량화함에 있어서 부분 불확실성(fractional uncertainty, 예측 불확실성을 예측 평균으로 나눈 값)을 이용하여 무차원화하였다.

3. 불확실성 정량화 방법의 적용 및 결과

3.1 적용개요

본 연구에서는 앞서 살펴본 기후변화 영향평가 단계별 불확실성을 정량화하기 위하여 배출시나리오부터 수문모형까지 수자원 분야에서 필요한 기본적 기후변화 영향평가 단계를 모두 수행하였다. 충주댐 상류지역(국가수자원관리종합정보시스템 기준: 남한강상류(1001), 평창강(1002), 충주댐(1003))을 적용지역으로 하였으며, 충주댐 상류지역에 대한 기본특성은 Table 1과 같다. 또한 본 연구에서 미래 전망기간(projection period)은 2030년 1월부터 2059년 12월까지, 과거 기준기간(reference period)은 강수의 경우 1970년 1월부터 2010년 12월, 유량의 경우 1986년 1월부터 2010년 12월까지의 월 자료이다. 배출시나리오는 IPCC 5차 보고서에 있는 RCP (Representative Concentration Pathway) 8.5 (온실가스가 저감되지 않고 현재 추세대로 배출되는 경우)와 RCP 4.5 (온실가스 저감 정책이 상당히 실현되는 경우)를 이용하였으며, GCM은 CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project, Phase 5)의 3개 GCM (CSIRO-Mk3.6.0, MRI-CGCM3, HadGCM-ES)를 선정하였다. 상세화기법은 통계적 상세화 기법 중 간단하고 많이 활용된 기법인 bilinear regression과 ANN (Artificial Neural Network) 기법을 적용하였으며 (Ojha *et al*., 2010; Minh *et al*., 2016; Lee, 2017), 지상관측소를 포함하는 GCM 4개 격자값의 총강수량, 표면기온(surface air temperature), 비습도(specific humidity) 자료를 이용하였다. 충주댐 상류지점을 대상으로 선정된 3개 GCM의 과거모의(1980-1999) 월단위 강수량을 상세화하고 보정한 결과, bilinear regression의 R^2는 93.5%, ANN 기법의 R^2는 89.0%로서 적용가능성을 나타냈다. 수문모형으로는 장기간 유출량 모의에 많이 활용되는 월단위 물수지모형인 *abcd* 모형과 GR2M 모형을 이용하였다(Wolock and MaCabe, 1999; Wilby and Harris, 2006; Hwang *et al*., 2007; Kim and Kaluarachchi, 2009). 특히 *abcd* 모형과 GR2M 모형은 적용지역에 대하여 검정(1986년 1월부터 1994년 12월)과 검증(1995년 1월부터 1999년 12월)을 수행하였으며, 주요 입력자료인 잠재증발산량 산정을 위해 Thornthwaite방법을 이용하였다. 충주댐 상류지역을 대상으로 모의한 결과, *abcd* 모형의 R^2는 89.5%,

Table 1. Characteristics of the study basin

Characteristics	Description
Upstream of Chungju Dam	3 sub-basins (6705.06 km^2)
Precipitation on average (1970～2010)	1169.32mm/year (808.0 mm/year, 69.1%)*
Streamflow on average (1986～2010)	1927.61cms (1403.3 m^3/s, 72.8%)

* (): Average in flood seasons (June～September) and relative ratio to the total

Table 2. Description of emission scenario, GCM, downscaling technique, and hydrological model stages in the climate change impact assessment

Order	Stage	Description
1	Emission scenario	RCP8.5 and RCP4.5
2	GCM	CSIRO-MK3.6.0 (Australia), MRI-CGCM3 (Japan), and HadGCM-ES (UK)
3	Downscaling technique	Bilinear regression and Artificial Neural Network (ANN)
4	Hydrological model	*abcd* and GR2M

GR2M 모형의 R^2는 90.1%로서 적용가능성을 나타냈다. Table 2는 본 연구에서의 기후변화 영향평가 과정을 나타낸다.

3.2 전망결과

앞서 언급한 바와 같이 본 연구에서는 2개의 배출시나리오, 3개의 GCMs, 2개의 상세화기법, 2개의 수문모형을 사용하였으며, 적용지역에 대하여 총 12(=2×3×2)개의 강수전망결과와 24(=2×3×2×2)개의 유량 전망결과를 모의하였다. 모의결과에 대하여 우선 충주댐 상류지역에 대하여 시나리오별, 모형별로 분석하였는데, Table 3(a)에서 강수전망의 경우, 전체평균에서 배출시나리오별, GCM별(MRI-CGCM3 제외) 모두 과거기간(1970년 1월부터 2010년 12월 연평균강수량)보다 증가하는 것으로 나타났다. 배출시나리오에서는 RCP8.5 시나리오가 평균 13.3% 증가하여 RCP4.5 시나리오(평균 9.1% 증가)보다 강수 증가율이 높게 나타났다. GCM에서는 CSIRO-Mk3.6.0이 평균 7.8% 증가하는 것으로 나타나 미래 강수가 가장 증가하는 것으로 전망하였으며, MRI-CGCM3은 미래 강수량이 감소(평균 −2.6%)하는 것으로 상반된 전망결과를 나타냈다. Table 3(b)의 유출량 전망의 경우, 배출시나리오에서는 RCP8.5 시나리오가 평균 22.4% 증가하여 RCP4.5 시나리오(7.0% 증가)보다 유출량 증가율이 매우 높게 나타났다. GCM에서는 CSIRO-Mk3.6.0이 평균 42.5% 증가하는 것으로 나타나 미래 강수가 가장 많이 증가하는 것으로 전망하였으며, MRI-CGCM3은 미래 강수량이 감소(평균 −8.6%)하는 것으로 상반된 전망결과를 나타냈다. 특히 HadGCM-ES의 경우에 RCP8.5에서는 미래 유출량이 27.1% 증가하는 것으로 전망하였으나 RCP4.5에서는 감소하는 것으로 나타냈다. 충주댐 상류지역에 대한 전망 결과는 IPCC 4차보고서의 SRES (Special Report on Emission Scenarios) 시나리오를 적용한 국내 다른 연구(Kim *et al*., 2010; Bae *et al*., 2011)와 많은 차이를 보이지 않았으며, 최근 RCP 시나리오를 이용한 연구들(Rim and Kim, 2014; Kim *et al*., 2014; Lee *et al*., 2016)과도 비슷한 경향을 나타냈다.

Table 3. Precipitation and streamflow projection results from January 2030 to December 2059

(a) Precipitation projection

GCM \ ES	RCP8.5 (mm/year)	RCP4.5 (mm/year)	Average (mm/year)
CSIRO-Mk3.6.0	1277.5 (9.3%)*	1299.5 (6.0%)	1288.5 (7.8%)
HadGCM-ES	1231.3 (5.3%)	1223.1 (4.6%)	1227.2 (4.9%)
MRI-CGCM3	1135.4 (-2.9%)	1137.8 (-2.2%)	1136.6 (-2.6%)
Average	1219.8 (13.3%)	1175.0 (9.1%)	1217.4 (3.4%)
Observation (Jan. 1970～Dec. 2010)	1169.3 mm/year		

* (%) indicates an increase rate over the observation

** ES represents Emission Scenario, GCM represents Global Climate Model

(b) Streamflow projection

GCM \ ES	RCP8.5 (m^3/s/year)	RCP4.5 (m^3/s/year)	Average (m^3/s/year)
CSIRO-Mk3.6.0	2938.8 (52.5%)	2554.1 (32.5%)	2746.4 (42.5%)
HadGCM-ES	2449.6 (27.1%)	1795.4 (-6.9%)	2122.5 (10.1%)
MRI-CGCM3	1688.2 (-12.4%)	1836.1 (-4.8%)	1762.1 (-8.6%)
Average	2358.8 (22.4%)	2061.9 (7.0%)	2210.3 (14.7%)
Observation (Jan. 1986～Dec. 2010)	1927.6 m^3/s/year		

3.3 불확실성 정량화 결과

본 장에서는 3.1장에서 언급한 기후변화 영향평가 과정을 수행하고, 이 결과들에 대하여 UDM를 적용하고 분석하였다. 그 결과들은 크게 두 가지로 나누어 분석하였으며, 첫 번째로 각 단계별 불확실성을 추정하고 전체 불확실성 대비 상대적 기여도를 분석하였다. 다음으로 불확실성 정량화 추정값을 기반으로 전체 과정에서 어떻게 불확실성이 전파되었는지를 분석하였다.

3.3.1 불확실성 정량화 추정 및 상대적 기여도 분석

Table 4는 기후변화 영향평가에서 발생하는 단계별 분산과 UDM를 이용한 단계별 불확실성 결과를 나타낸다. Table 4에서 두 번째 칼럼은 각 단계별, 모형별 분산을 나타내고, 세 번째 칼럼은 각 단계별로 가장 큰 분산을 나타내며, 이는 불확실성 측면에서 가장 큰 분산을 선택하는 것이 적합할 것으로

Table 4. Uncertainty quantification results for each stage in the climate change impact assessment using the uncertainty delta method (UDM)

Stage		Variance ($\times 10^3$ m^3/s/year)	Maximum of variance	Uncertainty using UDM	Ratio (%) to the total uncertainty
ES	RCP8.5	86.04	86.04	4.45	81.6
	RCP4.5	70.23			
GCM	CSIRO-Mk3.6.0	135.39	135.39	0.45	8.3
	HadGCM-ES	77.20			
	MRI-CGCM3	63.62			
DS	BR	177.85	177.85	0.27	5.0
	ANN	60.83			
HM	abcd	186.19	234.87	0.28	5.1
	GR2M	234.87			
Total uncertainty		234.87	234.87	5.45	100.0
Natural variability		57.05		4.04	74.1

* ES: Emission scenario, DS: Downscaling, HM: Hydrological model, BR: Bilinear regression

판단하였다. 네 번째와 마지막 칼럼은 UDM 방법을 이용한 불확실성 추정값(Eqs. (6) and (7) 이용)과 전체 불확실성(100% 가정) 대비 단계별 불확실성 비율을 나타낸다. UDM를 적용한 각 단계별 불확실성을 살펴보면, 배출시나리오에서는 최대 분산이 RCP8.5의 86.04×10^3 m^3/s/year이었으며, 이에 따른 UDM을 적용한 배출시나리오 불확실성은 4.45이며, GCM에서 최대 분산(45.88～135.39×10^3 m^3/s/year)은 135.39×10^3 m^3/s/year로서 UDM에 의한 GCM 불확실성은 0.45로 산정되었다. 다음으로 상세화기법의 최대 분산은 177.85×10^3 m^3/s/year이므로 UDM에 따른 상세화 기법의 불확실성은 0.27이며, 수문모형의 최대 분산은 234.87×10^3 m^3/s/year로서 UDM에 따른 수문모형의 불확실성은 0.28로 추정되었다. 각 단계별 불확실성을 정리하면, 배출시나리오, GCM, 상세화기법, 수문모형에서 각각 4.45, 0.45, 0.27, 0.28로 나타났으며, 배출시나리오의 불확실성이 가장 크다는 것을 의미한다. 이 결과는 기존 기후변화 불확실성 연구들이 제시한 GCM에 의한 불확실성이 가장 크다는 결론과 다른 결과를 나타내고 있다(Jenkins and Lowe, 2003; Wilby and Harris, 2006; Kay *et al*., 2009; Prudhomme and Davies, 2009; Chen *et al*., 2011; Poulin *et al*., 2011). 또한 본 연구에서 제시한 UDM에서는 각 단계별로 어떤 모형(또는 시나리오, 방법)의 불확실성이 가장 큰지 판단할 수 있으며, 배출시나리오에서는 RCP8.5가 RCP4.5보다 불확실성이 더 크며, GCM에서는 CSIRO- Mk3.6.0, 상세화기법에서는 bilinear regression 기법, 수문모형에서는 GR2M 모형이 상대적으로 불확실성이 큰 것으로 나타났다.

다음으로 각 단계별 추정된 불확실성을 이용하여 총 불확실성 대비 상대적인 기여도를 살펴보면, 총 불확실성은 Eq. (7)을 이용하여 산정되며 이에 따른 총 불확실성은 5.45로 나타났다. 이를 이용한 각 단계별 불확실성의 상대적 기여도를 살펴보면, 배출시나리오의 불확실성은 4.45로서 총 불확실성 대비 81.6%, GCM의 불확실성은 총 불확실성 대비 8.3%, 상세화기법과 수문모형은 각각 총 불확실성 대비 5.0%와 5.1%로 나타났다. 앞서 언급한 바와 동일하게 배출시나리오의 기여도가 80% 이상으로 총 불확실성의 주요 인자로 나타남을 확인하였다.

또한 본 연구에서는 자연변동에 대한 불확실성과도 비교하였다. 자연변동 불확실성의 산정은 기준기간 관측유량의 10년 이동평균(moving average)을 한 뒤, 분산에 Eq. (7)과 같이 로그를 취하여 간단히 산정하였다. 이 과정을 통한 자연변동의 불확실성은 4.04로 나타났으며, 기후변화 영향평가의 총 불확실성인 5.5의 약 74%로 나타났다. 이는 미래 전망에 대한 불확실성이 과거 자연변동의 불확실성보다 크다는 것을 나타내며, 이는 미래 수자원을 전망한다는 것이 매우 불확실하고 과거 관측된 자연변동을 벗어나는 결과를 낳을 수 있다는 것을 나타내는 중요한 의미라 할 수 있다.

3.3.2 불확실성 전파 분석

앞 절에서 살펴본 바와 같이, 배출 시나리오 단계에서 UMD 불확실성은 4.45 (81.6%)이며, GCM 단계에서는 0.45 (8.3%)로 나타났다. 상세화 기법과 수문모형에서는 각각 0.27 (5.0%)와 0.28 (5.1%)로 나타났으며, 최종적으로 전체 불확실성(total uncertainty)은 5.45로 단계를 수행하면서 불확실성이 점점 증가하는 것으로 나타났다. 또한 각 단계별 불확실성 증가량을 이용하여 각 단계별 불확실성 누적비율을 보면, 배출

시나리오 단계는 4.45 (81.6%), GCM 단계에서는 4.90 (89.9%), 상세화 기법에서는 5.17 (94.9%), 수문모형에서는 5.45 (100.0%)로서 단계별로 불확실성이 증가하고 있음을 알 수 있다. Lee *et al*. (2017)이 제시한 기후변화 불확실성 전파 도식화를 이용하여 위의 결과를 Fig. 3과 같이 도식화 하였으며, 언급한 바와 같이 불확실성이 증가하고 있음을 확인하였다. 이는 어떠한 배출시나리오를 선정하느냐에 따라 미래 수자원전망이 매우 달라질 수 있음을 의미한다. 다음으로 불확실성 기여도는 기존 연구결과와 동일하게 GCMs의 불확실성이 가장 큰 것으로 나타났다.

3.4 Fractional Uncertainty Method를 이용한 불확실성 정량화 비교

다음으로 UDM 불확실성 결과와 비교하기 위해 앞서 살펴본 Fractional Uncertainty Method (FUM)의 Eqs. (7)~(10)을 이용하여 기후변화 영향평가에서 발생하는 단계별 불확실성을 정량화하였다. 불확실성 정량화는 FUM에서 제시한 세 가지 불확실성(기후시스템 내부의 변동성에 의한 불확실성, 모형에 의한 불확실성, 배출 시나리오에 의한 불확실성)에 대하여 전망기간에 대한 평균과 2059년인 전망기간 종료 시의 부분 불확실성(fractional uncertainty)을 산정하였다. UDM 방법과 비교하면, 배출시나리오는 동일하며 모형에 의한 불확실성에서는 GCM, 상세화기법, 수문모형에 의한 불확실성을 모두 포함하고 있다. 특히, 기후시스템에 의한 불확실성은 UDM에서 자연변동에 대한 불확실성과 비교할 수 있으며, FUM에서는 자연변동에 대한 것을 기후시스템에 대한 불확실성으로 하여 포함하고 있다는 것이 큰 차이점이라 할 수 있다.

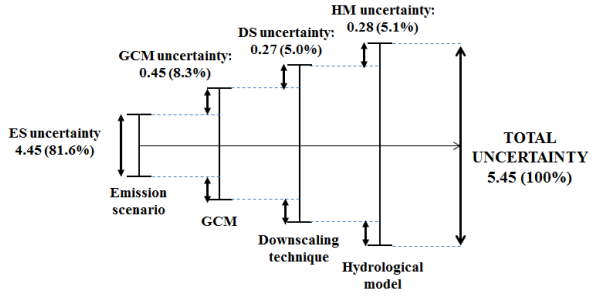


Fig. 3. Uncertainty propagation in the climate change impact assessment by employing the UDM

Table 5. Uncertainty quantification of three uncertainty sources in the climate change impact assessment using the fractional uncertainty method (FUM)

Source	Fractional uncertainty on average over lead time (2030～2059)	Ratio (%)	Fractional uncertainty in 2059	Ratio (%)
Emission scenario	0.52	51.9	1.25	77.1
Internal variability	0.12	11.7	0.11	7.0
Models (=GCMs+DS+HM)	0.36	36.4	0.26	15.9
Total	1.00	100.0	1.51	100.0

Table 5에서 FUM을 적용한 결과를 살펴보면, 우선 전망기간에 대한 평균값은 각 단계별로 기후시스템 내부의 변동성에 의한 부분 불확실성은 0.12, 모형에 의한 불확실성은 0.36, 배출 시나리오에 의한 불확실성은 0.52로 나타났으며, 총 불확실성은 1.00으로 산정되었다. 단계별로 총 불확실성 대비 비율을 보면, 배출 시나리오의 불확실성 상대비율이 51.9%, 모형 불확실성의 상대비율이 36.4%, 기후시스템에 의한 내부 변동성의 불확실성의 상대비율이 11.69로서 배출 시나리오에 의한 불확실성이 가장 크게 나타나 UDM과 동일한 결과를 나타냈다. 다음으로 2030년부터 2059년 전망기간 종료 시 각 단계별 불확실성을 살펴보면(Table 5 and Fig. 4 참조), 기후시스템 내부의 변동성에 의한 부분 불확실성은 2030년에 0.12로 시작하여 2059년 0.11로 산정되어 큰 변동이 없는 것으로 나타났으며, 모형에 의한 불확실성은 2030년에 0.48에서 2059년에 0.26으로 산정되어 감소폭은 작으나 지속적으로 감소하는 것으로 나타났다. 배출 시나리오에 의한 불확실성은 2030년 0.11에서 2059년 1.25로서 다소 급하게 지속적으로 증가하는 것으로 나타났다. 다음으로 전망기간 종료인 2059년의 각 단계별 불확실성 비율을 살펴보면, 배출 시나리오의 불확실성이 77.06%로 가장 크게 나타나 미래 전망에 있어서 배출 시나리오의 선정이 매우 중요함을 확인하였다. 특히, 전망기간 초인 2040년까지는 모형에 의한 불확실성이 가

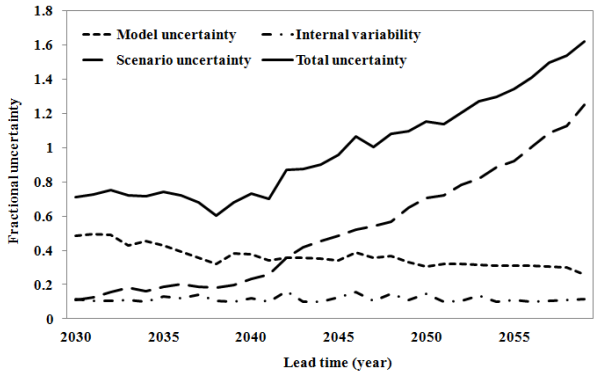


Fig. 4. Fractional uncertainties of the three sources of uncertainty and total uncertainty in the climate change impac assessment over lead time (2030～2059)

장 크게 나타났으나 모형에 대한 안정성에 따라 불확실성은 천천히 감소하고, 전망기간이 길어질수록 배출 시나리오에 의한 불확실성이 급격히 증가하여 가장 크게 나타나고 있다. 또한 기후시스템의 변동성에 의한 불확실성은 전망기간에 따라 거의 일정한 범위 안에서 존재하여 기후 시스템에 의하여 기후변화 불확실성이 큰 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. 이는 미래 수자원 변동이라는 것은 자연적인 기후변화에 의한 영향보다 배출시나리오, 기후모형, 상세화기법, 수문모형의 선택 등의 외부적인 요인으로 인한 영향이 더 크다는 것을 나타내는 중요한 내용이라 판단된다. 최종적으로 UDM의 불확실성 결과와 비교하면, UDM와 FUM에서 모두 총 불확실성 대비 배출시나리오의 불확실성이 가장 큰 것으로 나타났으며, 다음으로 모형에 의한 불확실성이 큰 것으로 나타났다. 또한 (기후시스템에 의한) 자연적 변동의 불확실성 결과를 살펴보면, 방법별로 총 불확실성에 대한 비율의 차이는 있으나 총 불확실성보다 작게 나타나 미래 수자원의 변화는 자연적으로 발생하는 기후의 변화보다 외부적인 요인의 영향이 더 큰 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 기존 기후변화 영향평가 불확실성 연구결과의 문제점을 개선할 수 있는 새로운 불확실성 정량화 방법을 제안하였으며, 이를 이용하여 기후변화 영향평가 각 단계별 불확실성을 정량화하고 단계별 불확실성의 전파정도를 추정하였다. 본 연구에서 수행한 세부 연구를 자세히 살펴보면, 첫째, 기존 기후변화 영향평가 과정에서 발생하는 불확실성 분석의 문제점을 분석하고 이를 개선할 수 있는 새로운 방법을 제안하였다. 기존 기후변화 영향평가에서의 불확실성 연구는 각 단계별 불확실성만을 분석하거나 특정 단계의 정확성을 개선하는 연구에 치중되었으나 본 연구에서는 총 불확실성, 각 단계별 불확실성 증감 정도, 각 단계별 불확실성 비율을 제시할 수 있는 새로운 방법인 Uncertainty Delta Method를 제안하였다. 이 방법은 first-order Taylor expansion에 기반한 delta method를 이용한 방법으로서 각 단계별 불확실성 및 총 불확실성의 정량화와 단계별 불확실성 전파 분석이 가능하다.

두 번째로 본 연구에서는 기후변화 영향평가 과정의 단계별 불확실성 정량화와 전파과정 분석을 위해 미래 2030년부터 2059년까지를 대상으로 2개 배출 시나리오, 3개 GCM, 2개 상세화기법, 2개 수문모형을 사용하였다. 각 단계별 불확실성을 살펴보면, 배출시나리오, GCM, 상세화기법, 수문모형에서 UDM을 적용한 불확실성이 각각 4.45, 0.45, 0.27, 0.28로 나타났으며, 총 불확실성은 5.45로 산정되었다. 이에 따라 배출시나리오의 불확실성이 가장 크게 나타났으며, 이 결과는 기존 기후변화 불확실성 연구들이 제시한 GCM에 의한 불확실성이 가장 크다는 결론과 상이한 결과가 나타났다. 즉, 이러한 결과는 어떠한 배출시나리오를 선정하느냐에 따라 미래 수자원전망이 매우 달라질 수 있음을 의미하는 중요한 결과이다. 기후변화 영향평가 불확실성의 전파정도를 분석한 결과, 배출 시나리오의 불확실성은 4.45 (81.6%), GCM은 0.45 (8.3%), 상세화 기법은 0.27 (5.0%), 수문모형은 0.28 (5.1%)로 나타났고 단계를 거치면서 불확실성 누적비율이 증가하여 불확실성이 점점 증가하는 것으로 나타났다.

마지막으로 UDM 결과와 비교하기 위하여 Fractional Uncertainty Method를 이용하여 기후변화 영향평가 불확실성을 정량화하였다. 기후시스템 내부의 변동성, 모형, 배출 시나리오에 의한 전망기간에 대한 평균 불확실성은 각각 0.12, 0.36, 0.52로 나타났으며, 총 불확실성은 1.00으로 산정되었다. 이에 따라 배출 시나리오의 불확실성 상대비율이 51.9%로서 가장 크게 나타나 UDM과 동일한 결과를 나타냈다. 또한 전망기간 초에는 모형에 의한 불확실성이 가장 크게 나타났으나 전망기간이 길어질수록 모형의 불확실성은 천천히 감소하고, 배출 시나리오에 의한 불확실성이 급격히 증가하는 것으로 나타났다. 이는 미래 수자원 변동은 외부적인 요인(배출시나리오, 기후모형, 상세화기법, 수문모형 등의 선택)으로 인한 영향이 더 크다는 중요한 결과를 도출하였다.

따라서 본 연구에서 제시한 Uncertainty Delta Method를 통하여 기후변화 영향평가 과정에 있어서 첫째, 전체 및 단계별 불확실성을 정량화할 수 있고, 둘째, 최종 불확실성 대비 각 단계별 불확실성을 비율을 제시할 수 있으며, 마지막으로 수행단계별로 불확실성 전파과정을 파악할 수 있다. 본 연구에서는 이를 위해 연평균 유출량의 자료만을 이용하였으나 계절적 영향이 큰 우리나라의 특징상 향후 계절별 유출량에 따른 불확실성 주요 요인분석도 필요할 것으로 판단된다. 특히, 본 연구와 다른 시나리오와 모형을 적용한다면 다른 결과를 얻을 수 있으며, 본 연구는 기후변화 영향형가에서의 불확실성 정량화와 전파 분석을 위해 Uncertainty Delta Method과 같은 적합한 방법론을 제시하는 데 그 목적이 있다. 이와 같이 적합한 불확실성 정량화 방법을 적용한다면, 향후 기후변화 영향평가 과정에 있어서 불확실성을 발생시키는 주요 원인파악과 이에 대한 집중적인 투자를 가능하게 한다. 이러한 과정을 통하여 보다 정확한 미래 기후변화에 의한 수문전망이 가능할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 2018학년도 대진대학교 연구지원에 의해 수행되었습니다.

References

Bae, D.-H., Jung, I., Lee, B. J., and Lee, M. H. (2011). "Future Korean water resources projection considering uncertainty of GCMs and hydrological model." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 44, pp. 389-406.

Bae, D.-H., Jung, I., and Lettenmaier, D. P. (2011). "Hydrologic uncertainties in climate change from IPCC AR4 GCM simulations of the Chungju basin." *Journal of Hydrology*, Vol. 401, No. 1-2, pp. 90-105.

Beven, K. J., and Freer, J. (2001) "Equifinality, data assimilation, and uncertainty estimation in mechanistic modeling of complex environmental systems using the GLUE methodology." *Journal of Hydrology*, Vol. 249, pp. 11-29.

Chen, J., Brissette, F., Poulin, A., and Leconte, R. (2011). "Overall uncertainty study of the hydrological impacts of climate change for a Canadian watershed." *Water Resources Research*, Vol. 47, W12509.

Gay, C., and Estrada, F. (2010). "Objective probabilities about future climate are a matter of opinion." *Climatic Change*, Vol. 99, pp. 27-46.

Ghosh, S., and Mujumdar, P. P. (2007). "Nonparametric methods for modelling GCM and scenario uncertainty in drought assessment." *Water Resources Research*, Vol. 43, W07405, doi:10.1029/2006WR005351.

Hawkins, E. and Sutton, R. (2009). "The potential to narrow uncertainty in regional climate predictions." *Bulletin of American Meteorological Society*, Vol. 90, pp. 1095-1107, doi:10.1157/2009BAMS26071.1.

Henderson-Sellers, A. (1993). "An antipodean climate of uncertainty." *Climatic Change*, Vol. 25, pp. 203-224.

Hwang, J. S., Jeong, D. I., Lee, J.-K., and Kim, Y.-O. (2007). "Application of monthly water balance models for the climate change impact assessment." *Journal of Korean Water Resources*, Vol. 40, No. 2, pp. 147-158.

IPCC (2001). *Climate Change 2001: Impacts, Adaptations, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge, UK and New York, NY, USA, Intergovermental Panel on Climate Change.

Jones, R. N. (2000). "Managing uncertainty in climate change projections − Issues for impact assessment: An editorial comment." *Climatic Change*, Vol. 45, pp. 403-419.

Jung, I., Bae, D.-H., and Lee, B. J. (2013). "Possible change in Korean streamflow seasonality based on multi-model climate projections." *Hydrological Processes*, Vol. 27, No. 7, pp. 1033-1045.

Katz, R. W. (2001). *Techniques for estimating uncertainty in climate change scenarios and impact studies*, Environmental and Societal Impacts Group Report, National Centers for Atmospheric Research.

Kay, A. L., Davies, H. N., Bell, V. A., and Jones, R. G. (2009). "Comparison of uncertainty sources for climate change impacts: flood frequency in England." *Climatic Change*, Vol. 92, pp. 41-63.

Kim, B. S., Kim, S. J., Kim, H. S., and Jun, H. D. (2010). "An impact assessment of climate and landuse change on water resources in the Han River." *Journal of Korean Water Resources*, Vol. 43, No. 3, pp. 309-323.

Kim, S. J., Kim, Y. S., and Kim, H. S. (2014). "Drought and flood risk assessment considering climate change in Chungju Dam." *Water for future, Korea Water Resources Association*, Vol. 296, pp. 8-17.

Lawrence, J., Reisinger, A., Mullan, B., and Jackson, B. (2013). "Exploring climate change uncertainties to support adaptive management of changing flood-risk." *Environmental Science and Policy*, Vol. 33, pp. 133-142.

Lee, J.-K., Kim, Y.-O., and Kim, Y. (2017). "A new uncertainty analysis in the climate change impact assessment." *International Journal of Climatology*, Vol. 37, pp. 3837-3846.

Lee, M.-H., So, J.-M., and Bae, D.-H. (2016). "Development of climate change uncertainty assessment method for projecting the water resources." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 49, No. 8, pp. 657-671.

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.

Minh, T. V., Thannob, A., Siriporn, S., Srivatsan, V. R., and Shie-Yui, L. (2016). "Statistical downscaling rainfall using artificial neural network: significantly wetter Bangkok?" *Theoretical and Applied Climatology*, Vol. 126, pp. 453-467.

Murphy, J. M., Sexton, D. M. H., Barnett, D. N., Jones, G. S., Webb, M. J., Collins, M., and Stainforth, D. A. (2004). "Quantification of modelling uncertainties in a large ensemble of climate change simulations." *Nature*, Vol. 430, pp. 768-772.

Najafi, M. R., Moradkhani, H., and Jung, I. (2011). "Assessing the uncertainties of hydrologic model selection in climate change impact studies." *Hydrological Processes*, Vol. 25(18), pp. 2814-2826.

Ojha, C. S. P., Goyal, M. K., and Adeloye, A. J. (2010). "Downscaling of precipitation for lake catchment using linear multiple regression and neural network." *The Open Hydrology Journal*, Vol. 4, pp. 122-136.

Poulin, A., Brissette, F., Leconte, R., Arsenault, R., and Malo, J.-S. (2011). "Uncertainty of hydrological modeling in climate change impact studies in a Canadian, snow-dominanted river basin." *Journal of Hydrology*, Vol. 409, pp. 626-636.

Prudhomme, C., and Davies, H. (2009). "Assessing uncertainties in climate change impact analyses on the river flow regimes in the UK. Part 2: future climate." *Climatic Change*, Vol. 93, pp. 197-222.

Rim, C.-S., and Kim, S.-Y. (2014). "Climate aridity/humidity characteristics in Seoul according to changes in temperature and precipitation based on RCP 4.5 and 8.5." *Journal of Water Resources Association*, Vol. 47, No. 5, pp. 421-434.

Schneider, S. H. (1983). "CO_2, climate change society: A brief overview." In: Social Science Research and Climate Change: Interdisciplinary Appraisal. [Chen, R. S., E. Boulding, and S. H. Schneider (eds)]. D. Reidel, Boston, MA, UAS, pp. 9-15.

Stainforth, D. A., Aina, T., Christensen, C., Collins, M., Faull, N., Frame, D. J., Kettleborough, J. A., Knight, S., Martin, A., Murthp, J. M., Piani, C., Sexton, D., Smith, L. A., Spicer, R. A., Thorpe, A. J., and Allen M. R. (2005). "Uncertainty in predictions of climate response to rising levels of greenhouse gases." *Nature*, Vol. 433, pp. 403-406.

Tebaldi, C., Smith, R. L., Nychka, D., and Mearns, L. O. (2005). "Quantifying uncertainty in projection of regional climate change: A Bayesian approach to the analysis of multimodel ensembles." *Journal of Climate*, Vol. 18, pp. 1524-1540.

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.

Yu, P. S., Yang, T. C., and Chen, S. J. (2001). "Comparison of uncertainty analysis methods for a distributed rainfall-streamflow model." *Journal of Hydrology*, Vol. 244, pp. 43-59.

Zhang, H., Huang, G. H., Wang, D., and Zhang, X. (2011). "Uncertainty assessment of climate change impacts in the hydrology of small prairie wetlands." *Journal of Hydrology*, Vol. 396, pp. 94-103.

Zhang, X., Xu, Y.-P., and Fu, G. (2014). "Uncertainties in SWAT extreme flow simulation under climate change." *Journal of Hydrology*, Vol. 515, pp. 205-222.