강우자료의 불확실성을 고려한 강우 유출 모형의 적용

Application of Rainfall Runoff Model with Rainfall Uncertainty

이 호 상* / 전 민 우** / 발린 다니엘라*** / 로드 미하엘****

Lee, Hyosang / Jeon, Min Woo / Balin, Daniela / Rode, Michael

Abstract

The effects of rainfall input uncertainty on predictions of stream flow are studied based extended GLUE (Generalized Likelihood Uncertainty Estimation) approach. The uncertainty in the rainfall data is implemented by systematic/non-systematic rainfall measurement analysis in Weida catchment, Germany. PDM (Probability Distribution Model) rainfall runoff model is selected for hydrological representation of the catchment. Using general correction procedure and DUE(Data Uncertainty Engine), feasible rainfall time series are generated. These series are applied to PDM in MC(Monte Carlo) and GLUE method; Posterior distributions of the model parameters are examined and behavioural model parameters are selected for simplified GLUE prediction of stream flow. All predictions are combined to develop ensemble prediction and 90 percentile of ensemble prediction, which are used to show the effects of uncertainty sources of input data and model parameters. The results show acceptable performances in all flow regime, except underestimation of the peak flows. These results are not definite proof of the effects of rainfall uncertainty on parameter estimation; however, extended GLUE approach in this study is a potential method which can include major uncertainty in the rainfall-runoff modelling.

Keywords : Rainfall Runoff modelling, Uncertainty analysis, Prediction of streamflow, GLUE

요 지

강우유출모형의 입력 자료로 사용되는 강우 관측 자료의 불확실성이 유량예측에 미치는 영향을 분석하기 위하여 모형변수 검정의 불확실성 연구에서 사용하는 GLUE (Generalized Likelihood Uncertainty Estimation)방법을 입력 자료 부분으로 확장하여 적용 하였다. 독일의 Weida 유역의 강우 관측 자료를 바탕으로 구조적 및 비구조적인 불확실성 부분을 각각 구조적인 오차 수정 과정과 DUE (Data Uncertainty Engine)을 통하여 강우자료를 구성하였다. 이를 유역의 수문학적 작용을 고려하기 위해 선정한 집중형 강우유출모형, PDM (Probability Distribution Model)에 MC (Monte Carlo)와 GLUE 방법을 활용하여 적용하였다. MC검정변수들의 검정 후 반응 표면(Posterior response surface)을 검토하고 GLUE 의 반응검정 모형변수(Behavioural model parameter set)를 선택, 간략한 GLUE 유량곡

* 교신저자, 충북대학교 공과대학 토목공학과 조교수

Corresponding Author, Assistant professor, Dept. of Civil Eng., Chungbuk Nat. Univ., Chungbuk, Korea
(e-mail: hyosanglee@chungbuk.ac.kr)

** 충북대학교 공과대학 토목공학과 교수

Professor, Dept. of Civil Eng., Chungbuk Nat. Univ., Chungbuk, Korea

*** 스위스 로잔 대학교 지리학과 연구원

Researcher, Institute of Geography, University of Lausanne, Swiss

**** 독일 헬름홀츠 환경연구소-UFZ 연구원

Researcher, Helmholtz Centre for Environmental Research-UFZ, Germany

선들을 계산하였다. 계산된 GLUE 유량곡선들을 모두 합하여 앙상블 유량을 산정하고, 이 유량의 90 분위를 강우량 자료 및 모형변수 검정의 불확실성을 고려한 신뢰구간으로 제시하였다. PDM 모형의 결과는 유량곡선의 전구간에서 안정적인 모의 능력을 보여주고 있으나, 첨두유량 부분이 적게 산정되는 문제점을 보이고 있다. 본 연구에서 상대적으로 적은 수의 강우 시나리오 및 반응검정 모형변수의 적용이라는 한계에도 불구하고, GLUE 방법을 강우관측자료의 불확실성 부분으로 확장하여 강우자료 및 변수 검정의 불확실성을 고려한 모의된 유량예측의 신뢰구간의 적용 가능성을 보여주고 있다.

핵심용어 : 강우 유출 모형, 불확실성, 유량예측, GLUE

1. 서 론

강우 유출 연구 분야에 있어서 유량예측의 불확실성에 대한 많은 연구가 진행되어 왔지만, 모형 구조와 모형변수 검정에 대한 연구에 비해서, 강우자료 등과 같은 입력 자료에 의한 유량예측의 불확실성에 관한 연구는 상대적으로 소홀히 다루어져 왔다. 주로 모형 구조 및 변수의 검정부문에서의 불확실성이 유량예측에 미치는 영향이 상대적으로 커서, 입력 자료의 불확실성은 감내할 정도의 수준으로 여겨져 왔다는 데에서 그 이유를 찾을 수 있다(Beven, 2006). 국내의 연구도 유량산정의 불확실성을 감소하기 위하여, 모형 및 검정방법에 대한 연구가 중점적으로 이루어져 왔다(성영두 등, 2008; 손경호와 김정곤, 2008). 김진훈 등(2005)은 레이더 추정 강우가 가질 수 있는 불확실성이 수문모형에 미치는 영향을 분석하였으며, 레이더 강우와 매개변수가 혼합된 불확실성이 유량모의에서 가장 큰 오차를 보일 수 있음을 보여 주고 있다. 기후변화에 대한 다양한 시나리오 해석의 측면에서 입력자료의 불확실성에 관한 연구가 진행 중이다(정일원 등, 2008). 정일원 등(2008)은 강수와 기온의 불확실성이 수자원에 미치는 영향을 다양한 모형을 통하여 분석하였고, 불확실성을 통계적으로 다루는 앙상블 기법의 적용의 필요성을 강조 하였다. 최근의 이상 기후, 기후 변화, 강우 양상 변화 등은 강우 자료 등과 같은 강우 유출모형의 입력 자료의 중요성을 강조하고 있으며, 주요 입력 자료인 강우 자료의 불확실성이 강우 유출 모형에 미치는 영향에 대한 연구의 필요성이 증대되고 있다(Kavetski *et al.*, 2002; Kavetski *et al.*, 2006 Ajami *et al.*, 2007). Kavetski *et al.* (2002)은 강우 입력 자료, 강우유출모형 및 변수 검정의 불확실성을 확률적인 베이지언(Bayesian)방식을 적용하여 유출량 산정에 미치는 영향을 분석하였다. 그들이 개발한 BTEA (Bayesian Total Error Analysis method)은 입력 자료의 불확실성 부분과 유량예측의 불확실성 부분을 베이지언 방법으로 연결하여 모형 검정부문을 개선, 유출량 예측의 신뢰도를 높였다. Ajami

et al. (2007)은 다양한 강우 유출 모형을 포함함으로써 베이지언 방법에서 강우유출모형의 구조적인 불확실성을 고려하여 유출량을 산정하였다. 그러나 이러한 각각의 입력 자료의 불확실성 및 유량예측의 결과 등을 베이지언 방식으로 연결한 방법은 입력 자료의 불확실성에 대한 모형 구조 및 모형변수의 불확실성이 상호 연관을 가지고 있으며, 입력 자료의 불확실성에 모형변수 검정과정이 영향을 받는다. 또한 이러한 유량예측결과가 입력 자료의 불확실성에 다시 영향을 주는 순환적인 고리를 가지고 있으며, 이는 입력 자료에 따른 모형 유량예측결과의 취사선택이라는 문제점이 있다. 이러한 문제점은 강우유출모형의 변수검정의 불확실성을 고려하기 위해 사용되고 있는 기존의 GLUE (Generalized Likelihood Uncertainty Estimation)을 입력 자료의 불확실성 부분으로 확장하여 적용하는 방법을 활용하여 극복할 수 있다. Beven (2006)의 강우입력자료로 확장한 GLUE방법은 Kavetski *et al.* (2006) 및 Ajami *et al.* (2007)의 베이지언 방식과는 달리 각각의 강우입력자료 및 모형 검정의 불확실성을 독립적으로 적용하여, 각각에 대한 기존 입력 자료의 축적된 연구, 모형변수 검정의 결과 등을 모두 활용하였다.

본 연구에서는 기존의 모형구조 및 변수의 불확실성을 고려한 유량예측 방법에 대표적인 입력 자료인 강우량 자료의 불확실성을 고려하여 유량예측의 신뢰성을 높이하고자 한다. 이를 위하여 독일의 Weida 유역의 자료를 바탕으로 하여 강우 입력 자료의 불확실성을 구조적 및 비구조적인 오차로 고려하고, 이를 간략화한 GLUE 방법으로 적용, 앙상블 유량모의 기법으로 유량예측에 미치는 영향을 연구하였다.

2. 연구 자료

2.1 연구 유역

연구 유역으로 사용된 Weida 유역은 독일 동부지방에 위치한 Elbe 강의 주요 유역인 Weiss Elster 지역의 소 유역이다. Weiss Elster 유역은 독일 헬름홀츠 환경

연구소(UFZ)에서 많은 연구가 이루어지고 있는 유역으로서, 2000년 이후 이 지역에 대하여 지형정보, 강우 및 유량 등에 관한 수문 자료들에 대한 검증을 하였고, 이를 바탕으로 하여 Weiss Elster Data Report (Rode *et al.*, 2006)가 출간 되었다. Weida 유역의 면적은 100 km² 로 중소 규모이며, 표고가 해발 270~650 m인 저고도의 산지와 계곡으로 구성된 독일의 저산지 유역이다. 또한 이 지역의 연평균 기온은 7°C이며, 주변의 Thüringer 산지와 Harz 산의 영향으로 상대적으로 적은 강수량(640 mm/년)을 기록하며, 일반적으로 건조한 여름철, 습윤한 겨울철의 특성을 갖는 유럽 대륙성 기후의 특징을 보여주고 있다. 5개 지점의 강수량 관측 자료(2개는 유역 내부에 위치, 3개는 유역의 외부에 위치)를 활용하였고, 유역 외부에 위치한 3개 지점의 기상 관측 자료를 더불어 활용하였다. 연구 유역의 개괄적인 위치는 Fig. 1에서 보여주고 있다.

Fig. 1. Weida Study Catchment

2.2 강우유출 모형

유역의 수문학적 특성을 반영하기 위하여 유역을 하나의 개념적 단위구역으로 적용한 PDM (Probability Distribution Model) 강우유출모형을 적용하였다. Moore (1985)의 PDM 모형은 유역을 한 개의 단위구역으로 사용한 개념적 확률 분포 모형(Wagener *et al.*, 2004)으로서, 유역의 토양 수분 저장(soil moisture storage)용량이 유역 전역에 걸쳐 변하고, 포화 유역 분포가 시간에 따라 변한다는 가설을 확률 분포 함수로 적용하여 개념화한 모형이다. 이 모형은 영국의 홍수예/경보 및 홍수량 산정 실무에 사용되고 있는 모형이며, 기존의 영국 홍수량 산정 방법(Flood Estimation Handbook, Carr, 1999)의 강우 유출방법을 대체하는 “The revitalised FSR/FEH rainfall-runoff method”에서 핵심적으로 사용되고 있는 개념적 강우유출모형이다(Kjeldsen, 2007). 본 연구의 적용 모형은 시간에 따라 변하는 유역의 토양 수분 저장 용량의 분포를 파레토 함수(Pareto distribution function)로 표현하였으며, 가

장 널리 사용되고 있는 모형이며, 다음과 같은 함수식으로 표현된다(Moore, 1985; Wagener *et al.*, 2004).

$$F(c) = 1 - \left(1 - \frac{c}{c_{max}}\right)^b, \quad 0 \leq c \leq c_{max} \quad (1)$$

확률분포 함수는 다음과 같이 정리 된다:

$$f(c) = \frac{dF(c)}{dc} = \frac{b}{c_{max}} \left(1 - \frac{c}{c_{max}}\right)^{b-1}, \quad 0 \leq c \leq c_{max} \quad (2)$$

여기서, c 는 토양수분저장 용량, c_{max} 는 유역의 최대 토양수분저장 용량, b 는 유역의 토양수분저장 용량 변화 정도. 만약 b 값이 1 이 된다면, 토양수분저장 용량이 유역에 걸쳐 균등하며 분포하며, 만일 b 값 이 이면 유역의 용량은 일정하다. 이 확률분포는 다음과 같이 모형에서 적용된다, 유역의 최대 수분 저장용량(S_{max})은 다음 과 같이 두 변수, c_{max} 와 b 를 사용하여 계산 된다,

$$S_{max} = \frac{c_{max}}{b+1} \quad (3)$$

$$S_k = S_{max} \left[1 - \left(1 - \frac{c_k}{c_{max}}\right)^{(b+1)} \right] \quad (4)$$

유역의 저장 용량(c_k) 은 다음 과 같이 계산 된다,

$$c_k = c_{max} \left[1 - \left(1 - \frac{S_k}{S_{max}}\right)^{\frac{1}{(b+1)}} \right] \quad (5)$$

유역의 수분 저장 용량이 포화 되었을 때, 유효 강우량(effective rainfall, u_k)이 발생 된다:

$$u_k = \max[r_k - ae_k - (S_k - S_{k-1}), 0] \quad (6)$$

실제 증발산량(ae_k)은 Wagener *et al.* (2004)의 연구에 따라 잠재 증발산량(pe_k)을 유역의 습윤 정도에 따라 보정 되었다:

$$ae_k = \frac{S_k}{S_{max}} pe_k \quad (7)$$

대상 연구지역인 독일 중부 지역은 겨울에 쌓인 눈

이 봄철에 일시에 녹아내려 발생하는 유출이 발생하기도 한다. 기존의 PDM 모형은 이러한 적설의 영향을 고려하고 있지 않기때문에, 본 연구에서는 강우 발생 시 온도에 따라 적설과 강우로 구분하고, 적설 부분의 온도가 일정온도 이상이면 강우로 전환되는 simple degree-day 방법을 PDM 모형에 도입하였으며, Eq. (8)과 같이 표시된다(Schulla and Jasper, 2001). 또한 표면의 직접 유출을 고려하기 위하여 *bypass*를 고려하였다. 여기서, *M*은 단위시간당 적설에 의한 강우환산비율, *T*는 기온, *T_{0,m}*는 눈이 녹기 시작하는 온도, *T_{R/S}*는 강우/눈이 50 %로 혼합해서 내릴 때의 온도(예, 0.5°C), *T_{trans}*는 눈이 강우로 바뀌기 시작할 때의 온도(예, 1°C), *mfl*는 매개변수로서 범위는 1.5~4이며, 스웨덴의 경우에는 산지 지형이 2 정도의 값을 가지며, 사방이 트인 노지의 경우 3.5의 값이 사용된다.

$$M = mf(T - T_{0,m}) \text{ for } T > T_{0,m} \quad (8)$$

$$T_{R/S} + T_{trans} \text{ or else } M = 0$$

토양 수분 저장 모형에서 발생한 유효 강우량을 일 강우유출모형에서 적합하게 사용되고 있는 유역의 Eq. (9)와 같은 선형 저류지 모형에 적용하였다(Jakeman *et al.*, 1990; Wagener *et al.*, 2004). 유효우량-유출모형에서는 일반적인 선형적 저류지 모형을 적용할 수 있는 근거는 강우-유출의 비선형적인 관계가 토양수분저장 모형에서 충분히 고려되었다고 가정하였으며, Eq. (9)에서 선형성을 나타내는 변수, *n=1*이 사용되었다(Jakeman and Hornberger, 1993). 여기서, *T*는 저류지의 체류시간, *u_k*(*t*)은 유효우량을 나타내며, *Q*(*t*)는 유출량을 나타낸다.

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{1}{T} [u_k(t) - Q(t)]^n \quad (9)$$

유역전역을 하나의 단위 구역으로 적용하였기 때문

에 표면유출, 하도 유출 등을 모두 고려하여 빠른 흐름 반응 및 느린 흐름반응을 나누어 병렬로 연결한 2개의 저류지 모형이 적용되었다. 두 개의 저류지는 *%q* 변수를 활용하여 빠른/느린 흐름의 두 저류지로 나누어지며, 변수, *%q*는 유효 유량 중 빠른 반응저류지로 가는 양으로 정해진다. 그리고 각 저류지는 각각의 체류시간 변수(*rtq* 그리고 *rts*)로 유량에 영향을 미치는 양을 결정하게 된다. 이 확률분포 함수 모형의 개요도는 Fig. 2와 같으며, 모형의 검정변수는 Table 1에 정리되어 있다.

Fig. 2. Schematic description of the PDM model

2.3 GLUE(Generalized Likelihood Uncertainty Estimation)

강우유출모형의 구조적인 불확실성을 고려하기 위해 1992년 Beven와 Binley가 GLUE방법을 제안하였으며, 이 방법은 “복잡한 자연의 유역 수문작용을 정확히 있는 그대로 수치 모형화 할 수 없다”는 우리의 현실적인 수문 모의 방법의 한계에서 출발하였다. 다양한 모형을 통해서 최적의 유량 예측과 유사한 결과들을 얻을 수 있다는 사실과 모형의 성능이 거의 동등(equally)하며 기준을 만족시키는(acceptable) 모형(및 매개변수)이 하나 이상 존재한다는 사실(동등성 equifinality)을 고려한 방법이다. 이러한 수문 모형의 동등성이 모형의 구조 및 매개변수의 불확실성에서 기인한다고 가정하고, 기준을 만족시키는 모형을 모두 포함하여 불확실성을 고려한 유량예측방법을 제시한 방법이다. GLUE방법을

Table 1. Description of the PDM Model Parameters

Parameters	Description	Range []
cmass	Maximum storage capacity of the catchment	150 - 400 [mm]
b	Degree of spatial variability of storage capacity in the catchment	0.05 - 1.5 [-]
mfl	Snow retention factor	1.5 - 4[-]
rtq	Residence time quick flow reservoir	5 - 10 [dt]
rts	Residence time slow flow reservoir	150 - 350 [dt]
%q	Percentage flow through quick flow	0.5 - 1 [-]
bypass	Bypass of the rainfall to routing components	0- 0.5 [-]

다음과 같이 단계별로 간략히 설명할 수 있다.

- 1) 모형의 성능을 판단하기 위한 일반화한 우도 함수 (Generalised likelihood measure)를 정의한다. 사용 목적에 따라 다양한 우도 함수가 사용되나 본 연구에서 사용한 NSE^* (Nash-Sutcliffe Efficiency, Eq. (10))가 일반적으로 널리 사용되고 있다 (Beven, 2001). 여기서, $c_i(\theta)$ 는 i 일에 모델 변수 세트 θ 로 계산된 유량, o_i 는 i 일에 계측된 유량이다.

$$NSE^* = 1.0 - NSE = \frac{\sum_{i=1}^N (o_i - c_i(\theta))^2}{\sum_{i=1}^N (o_i - \bar{o})^2} \quad (10)$$

- 2) 주어진 모형의 매개변수의 사전 분포형으로부터 많은 수의 매개변수 세트를 무작위로 추출한다. 모형의 유역의 적용에 관한 정확한 사전 정보가 없는 경우 일반적으로 균등분포를 사용한다.
- 3) 각각의 매개변수 세트는 선정된 우도함수의 기준치(Threshold)에 따라 반응변수(Behavioural)와 비반응변수(Non-behavioural)으로 구분한다. 기준치의 선정은 모형의 성능 및 목적에 따라 사용자의 주관적인 판단이 고려된다.
- 4) 선정된 반응변수 세트에 대하여 우도함수의 가중치를 다음과 같이 산정하여 우수한 성능을 보인 변수 세트에 대한 가중치를 부여한다. 여기서 N 은 반응변수 세트의 개수다.

$$w_i = \frac{L(\theta_k)}{\sum_{k=1}^N L(\theta_k)} \quad (11)$$

- 5) GLUE 유량예측은 가중치된 모형의 매개변수들에 대하여 모의된 유량의 누적분위를 통하여 평가하고 있다. 일반적으로 사용되고 있는 90분위는 상하위의 5%의 예측을 제외한 범위로서 유량예측의 신뢰도를 나타내고 있다.

2.4 DUE(Data Uncertainty Engine)

대부분의 수문자료는 관측과정, 표본추출과정 및 내외삽 과정 등을 거쳐 생성되므로 어느 정도의 불확실성 또는 오차를 포함하고 있다. 유럽 연합에서는 이러한 자료의 불확실성을 평가하고, 입력 자료로서 다른 모형에 사용되었을 때의 불확실성의 전파를 연구하기 위하

여 Harmonirib Project (Harmonirib, 2007) 연구를 수행하였으며, 연구의 성과물로 Data Uncertainty Engine (DUE, Brown and Heuvelink, 2007)이 개발되었다. Brown and Heuvelink (2007)이 개발한 DUE는 다양한 입력 자료에 적용할 수 있으며, 입력 자료에 불확실성을 대표한다고 가정한 확률 분포형에서 임의의 값을 추출하여 불확실성을 포함한 자료를 생성하는 모델링 도구로서 다음의 5단계로 구성되어 있다: 1) 대상 자료의 입력 및 저장, 2) 불확실성 원인에 대한 고찰, 3) 확률 분포형에 바탕을 둔 불확실성 모형의 선정, 4) 불확실성 모형의 평가, 5) 무작위 추출(Monte Carlo Simulation)에 의한 불확실성을 고려한 자료의 생성.

3. 연구 방법

모형의 구조 및 변수검정의 불확실성이라는 관점에서 강우유출모형의 불확실성을 다루고 있는 GLUE 방법을 강우 입력 자료의 불확실성 부분으로 확장, 강우 입력 자료의 불확실성을 포함하여 유량을 산정하는 방법의 효용성을 검토하였다. 본 연구에서는 이러한 GLUE의 개념을 강우 입력자료의 불확실성 부분으로 확장하여, 강우관측자료의 불확실성으로 인하여 유역의 강우특성을 잘 반영하는 “충족시키는(acceptable)” 강우 관측 자료가 하나 이상 또는 여러 개가 존재할 수 있다는 가정에서 출발하였다. 본 연구방법은 다음과 같이 정리할 수 있다.

- 1) 강우 자료의 불확실성 검토: 강우 입력 자료의 불확실성을 강우 관측의 구조적인 불확실성과 비구조적인 불확실성으로 검토하였다. 다양한 관측 장비가 독일에서 사용되고 있지만, 많은 관측소에서 Hellmann Type 장비를 표준장비로 사용하고 있다. 이 장비의 구조적인 불확실성(structural error)에 관한 사항은 다음과 같이 구조적 오차 수정과정에 따라 정리할 수 있다. 관측기 주변 및 유입구 상단에서 바람의 영향을 최소화하는 장소 및 장치를 설치하기도 하지만 바람에 의한 강수량의 손실량을 무시할 수 없다. 관측기가 위치한 장소에서의 바람의 영향 정도에 따라 A, B, C등급 등으로 산정하며, 각 등급에 대하여 관측기 상단부 바람의 영향에 따른 손실량, 유입관 및 보관통에서의 흡착량, 관측기에서 증발되는 손실량을 각각 고려하였다. 이러한 구조적인 손실량은 연구 유역의 바람의 영향- C등급 관측소에서 Table 2에서 보는 바와 같이 실 관측량 자료의 15.7~23.3 %가 손실량으로 발생함을 확인할 수 있다. 이러한 실관측 강우

량 자료에서 발생하는 오차 부분을 구조적인 조건 하에서 발생하여 이를 구조적인 불확실성 부분으로 고려하였다. 특히 연구 유역이 포함된 Weiss Elster 유역에 대한 자료에 대한 체계적인 검토가 진행되어왔으며, 본 연구의 기초자료로 사용하였다(Rode *et al.*, 2006).

강우 관측자료의 무작위로 발생하는 비구조적인 불확실성 부분은 확률적 분포를 따른다고 가정하였다. 이러한 강우 관측의 비구조적 불확실성부분은 DUE으로 검토되었다. 강우자료의 불확실성을 대표한다고 가정한 확률 분포형에서 임의의 값을 추출하여 이를 강우입력자료에 더하여 불확실성을 고려한 입력자료를 만드는 방법이다. 다양한 확률 분포형이 각 자료의 특성에 맞는 불확실성을 선정할 수 있도록 고려되고 있으나, 본 연구에서는 강우 자료의 불확실성에 대한 사전 정보가 없어, 관측자료를 중심으로 오차가 분포하는 정규 분포형을 따른다고 가정하였다.

본 연구는 먼저 구조적인 불확실성 부분을 Table 2에서와 같이 손실량을 보정하는 방법으로 고려하였으며, 비구조적인 불확실성부분은 정규분포형을 따르고, 적정 표준편차 범위 안에서 불확실성이 발생한다고 가정하고, 이 범위 안에서 임의의 값을 산정하여 이를 비구조적인 불확실성으로 고려하였다. 불확실성을 고려한 “충족시키는” 강우 시나리오는 관측 자료에 구조적인 불확실성과 비구조적인 불확실성을 각각 더하여 10개의 강우시나리오를 제시하였다.

2) GLUE 적용: 제시된 각각의 강우 시나리오들을 강우 유출 모형에 적용, GLUE방법에 따라 모형구조의 변수검정의 불확실성을 고려하였다. 불확실성을 고려한 각각의 강우시나리오를 PDM 강우유출모형에 따라 적용하였다. 모형의 검정(calibration)과 검증(validation)을 위하여 1998년

11월 1일~2001년 10월 31일 기간, 2001년 11월 1일~2003년 10월 31일 기간을 각각 선정하였다. 기간의 시점인 11월은 Weida연구유역이 건조한 상태에서 점차 습윤해지는 시기이므로 모델링의 초기 조건을 건조한 상태로 설정하였다. 또한 기간의 초기 20 %는 초기 조건의 영향이 크다고 판단되어 검정 및 검증 과정에서 고려하지 않았다. 모형 변수들의 적정범위 내에서 10,000개의 변수들을 Uniform Random Search하여 그 변수들의 성능을 Eq. (10)의 NSE^* 를 이용하여 확인하였다. NSE^* 값이 0에 가까울수록 유량 관측값(Q_i , i 일에 예측된 유량)과 모형의 유량 예측값($c_i(\theta)$)이 유사함을 나타내고 있고, 제공근의 형태가 사용되어, 일반적으로 고 유량 부분의 성능이 결과에 영향을 크게 미치고 있다. GLUE의 반응변수(behavioural model parameter)들을 선정하기 위한 만족할 만한 제한조건을 제시하고, 그에 따른 우도 함수(likelihood measure)의 가중치를 적용하여야 하나, 본 연구에서는 변수들의 반응분포(response surface)의 특성을 잘 표현하는 검정능력 상위 10개의 변수를 선정하고 동일 가중치를 부여하였다. 이들 변수들이 모형 및 변수검정의 불확실성을 표현하는 것으로 가정하고, 이 변수들을 모두 활용하여 10개의 유량을 산정, 이들 유량들을 모형의 불확실성을 고려한 GLUE유량으로 산정하였다.

3) 확장 GLUE 방법: 입력 자료의 불확실성으로 GLUE 방법을 확장하여, 각각의 강우관측의 불확실성을 포함한 강우 강우시나리오에 대한 모형 구조 및 변수의 불확실성을 포함하는 GLUE결과들을 모두 합하여 강우 관측 자료의 불확실성을 포함, 모형(구조 및 변수포함)의 불확실성을 고려한 유량 예측을 산정한다.

Table 2. Correction Factors for Hellmann Precipitation Measurement of Wind Shelter Class C in Germany

Source of losses	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Year
a) Wind effects loss	17.3	17.9	15.5	12.7	10.1	8.8	9.1	8.5	10.2	11	13.3	15	12
b)Wetting collecting funnel loss	5.1	5.4	5.5	6.5	6.7	5.5	5.7	5.4	6.9	5.6	4.6	4	5.6
c)Wetting collecting can loss	-	-	0.2	0.3	0.4	0.4	0.4	0.4	0.3	0.2	-	-	0.3
d)Evaporation loss	-	-	0.1	0.5	1	1.3	1.4	1.4	1.3	0.6	-	-	0.8
Whole loss (%)	23.4	23.3	21.3	20	18.1	16	16.6	15.7	18.7	17.4	17.9	19	18.7

(Rode and Wenk, 2006)

본 연구에서는 1) 단계에서 산정한 10개의 강우 시나리오에 대하여 2) 단계에서 산정한 각각 10개의 반응변수에 의한 유량예측 결과를 합하여, 총 100개의 유량산정결과로부터 90 분위 구간을 산정하여 불확실성을 고려한 신뢰구간으로 제시 하였다.

4. 적용결과

Andreasson *et al.*(2001)이 강우자료의 불확실성을 검토하기 위하여 제안한 수정한 $GORE^*$ (Goodness of Rainfall Estimation, Andreasson *et al.*, 2001)을 통하여 DUE를 통하여 생성한 강우자료의 비구조적인 불확실성을 검토하였다. $GORE^*$ 는 구조적인 불확실성을 고려한 강우량을 기본값($\hat{P}$)으로 하고, 비구조적 불확실성을 고려한 강우량(P_t)에 대해서 그 차이를 전 구간에 걸쳐 Eq. (12)로 계산한 값으로 값이 0에 가까울수록 비구조적 불확실성부분의 영향이 적음을 나타내고 있다. 본 연구에서는 적절한수준의 비구조적인 불확실성을 고려하여야 하기에, 불확실성이 따른다고 가정한 정규분포의 편차 정도를 0.05, 0.1, 0.15, 0.2 수준으로 하여 각 10개씩의 비구조적 불확실성량을 임의로 추출하였다. 각각의 편차 그룹의 10개의 강우 시나리오들에 대한 $GORE^*$ 평균값은 각각 0.0011, 0.0043, 0.0187,

0.0171인 값을 나타내고 있다. 분포의 편차를 증가시킴에 따라 $GORE^*$ 의 평균값이 증가하는 경향을 보여주고 있으나, 편차수준 0.15에서 이상치($GORE^*=0.01$)가 발생하여 평균값(0.187)이 편차수준 0.2의 결과보다 크게 분포함을 확인하였다. 이상치가 발생하지 않는 수준과 모형의 성능이 적정수준을 나타내는 0.1의 편차를 선택하여, 구조적인 불확실성에 DUE의 비구조적인 불확실성을 더하여 강우시나리오를 구성하였다.

$$GORE^* = \frac{\sum_{t=1}^n (\sqrt{P_t} - \sqrt{\hat{P}_t})^2}{\sum_{t=1}^n (\sqrt{P_t} + \sqrt{\hat{P}_t})^2} \quad (12)$$

제안된 총 10개의 강우 시나리오에 대하여 PDM모형을 MC방법을 통하여 검토하여 각각의 강우 시나리오에 대한 각 모형 변수의 반응표면분포와 모형의 결과인 유출량의 모의 성능을 NSE^* 목적함수로 검토하였다. MC방법을 통하여 10,000개의 변수에 의한 모의 결과를 Fig. 3와 같은 Dotty plot으로 표현하였다. X축은 변수의 범위를, Y축은 모형의 성능을 목적함수(NSE^*)로서 표현한 것으로, 각각의 변수들의 NSE^* 성능을 점으로서 표현하였으며, 가장 우수한 모의성능을 보여 준 변수는

Fig. 3 Posterior Distributions of PDM Model Parameters in Calibration Period (1/11/1999–31/10/2001): a) Posterior distributions of calibration results with structural uncertainty corrected rainfall, b) Best model calibration results with corrected and non-structural DUE rainfalls, and c) Combined all posterior distributions of corrected and DUE

사각형 점으로 표시하였다. 변수구간에서 모의 성능의 분포를 보여주고 있는 그림의 하단부의 변수반응표면의 형태를 검정근거(“Identifiability”)를 검토하였다. 우수한 성능(Fig. 3에서 작은 NSE^* 값을 갖는)의 변수들이 변수구간의 일정부분에 모여서 분포하는 원추형의 분포가 가장 이상적인 형태로 검정근거가 높은 경우이며, 이를 통하여 최적화할 수 있는 변수들을 평가한다. 그러나 많은 경우 우수한 성능을 보이는 변수들이 변수 전 구간에 걸쳐서 분포하고 있어 최적변수 선정에 어려움이

있으며, 이러한 경우를 “non-Identifiable”으로 정의한다 (Wagener *et al.*, 2004).

Fig. 3는 불확실성을 고려한 하나의 강우시나리오에 대한 PDM의 MC결과를 예로 보여주고 있다 (a)는 구조적인 불확실성은 고려한 강우 시나리오에 대한 결과, (b)는 강우자료의 구조적 및 비구조적인 불확실성을 고려한 10개의 강우 시나리오에 대한 각각의 최적변수의 분포, 그리고 (c)는 강우자료의 구조적 및 비구조적인 불확실성을 고려한 10개의 강우 시나리오에 대한 모든

Fig. 4. Ensemble Prediction of GLUE Simulated Flows of PDM(100 realisations: combinations of 10 feasible rainfall time series and 10 optimum model parameter sets respectively) in Calibration Period-(grey lines) and Measured Flow (black dots)

Fig. 5. Ensemble Prediction of GLUE Simulated Flows of PDM(100 realisations: combinations of 10 feasible rainfall time series and 10 optimum model parameter sets respectively) in Validation Period-(grey lines) and Measured Flow (black dots)

변수의 분포를 나타내고 있다. 구조적인 불확실성은 고려한 MC결과의 Fig. 3(a)에서 변수 C_{max} , b , rtq 그리고 $\%(q)$ 는 상대적으로 가장 우수한 모사 능력을 보여주는 변수인 최적변수가 변수의 반응표면이 오목한 원추형형태의 꼭지점에 위치한 경우로 검정근거가 뚜렷하지만, 나머지 변수들은 최적변수의 선정이 어렵다. 모형 변수의 검정에 있어서 최적의 변수를 구할 수 없고, 최적과 동등한 성능을 보이는 많은 변수가 있는 변수검정의 동등성("Equipfinality") 경향을 확인할 수 있다. Fig. 3(b)에서 보는 바와 같이 각각의 강우 시나리오에 대한 최적변수들이 Fig. 3(a)와 유사하게, 검정근거가 뚜렷한 변수(C_{max} , b , rtq 그리고 $\%(q)$)들은 최적의 변수 값들이 모여 있는 경향을 보이고, 나머지 변수들은 전 구간에 걸쳐 분포하고 있다. 각각의 강우시나리오에 대한 모든 MC 결과의 Fig. 3(c)는 Fig. 3(a)와 유사함을 보여주고 있다. 이 결과로부터 비구조적인 강우 입력 자료에 대한 변수검정의 영향은 크지 않음을 확인할 수 있다.

제안된 총 10개의 강우 시나리오에 대하여 PDM의 유출량 모의 성능은 목적함수(NSE^*)로 검토되었다. 검정과정(Calibration)에서 PDM은 목적함수 값이 0.32~0.35 분포를 보여주며, 검증(Validation) 기간에서는 이보다 조금 증가한 0.39~0.46 값의 분포를 보여주고 있다. 주어진 목적 함수의 값은 유량 구간의 모의 성능을 하나의 값으로 정리한 것으로, 객관적인 모형의 성능 비교에서 중요한 역할을 담당하고 있지만, 세부적인 유량 모의 결과에서 각각의 모형특성이 영향을 주고 있다. PDM은 전 유량 구간에 걸쳐 우수한 성능을 보여주고 있으나, 첨두 유량 부분에서 저 평가 되는 문제점을 모든 강우시나리오에 대하여 보여주고 있다.

모든 강우 시나리오에 대한 각각의 반응변수들의 모의 결과를 합하는 과정을 거쳐 입력 강우량과 모형 변수의 불확실성을 고려한 간략한 GLUE 양상블 유량 모의 결과를 얻었다. 검정 및 검증기간의 유량모의 결과에서 상위 및 하위의 5 %씩을 제외하고 유량의 90분위를 각각에 대하여 Fig. 4와 Fig. 5와 같이 나타내었다. 그림에서 관측 유량을 점으로, 모의된 90분위의 유량곡선들을 회색 선으로 나타내고 있다. 검정기간의 모형의 성능(Fig. 4)는 전 구간에 걸쳐 안정적인 성능을 보여주고 있으나 겨울철의 초기 홍수 사상(1999년 11월 및 2001년 2월) 및 첨두 유량 부분(2000년 3월 및 2001년 3월)을 충분히 모의 하지 못하고 있다. 검증기간의 초기 기간(초기 20 %)를 제외한 나머지 부분에서 검정결과와 비슷한 성능의 수문곡선을 보여주고 있다. 입력 및 모형의 불확실성을 고려한 유량예측의

신뢰구간이 상대적으로 폭이 좁아 검정 및 검증 기간에 대하여 각각 관측유량의 약 30 %, 31 %가 90분위의 신뢰 구간 안에 위치하고 있다. 이는 입력 강우량의 불확실성을 고려하였음에도 불구하고, PDM 모형의 구조적인 문제점에 유량예측능력이 제한되는 것으로 판단된다. Fig. 3에서 보는 것과 같이 입력 자료의 불확실성이 매개변수 선정의 불확실성 부분으로 회석되어 유량 예측에서 입력 자료의 영향을 명확히 확인할 수 없었다. 또한 입력자료의 불확실성 부분(정규 분포형의 표준오차 범위 0.1의 값)이 상대적으로 매개변수의 오차 보다 적게 산정 되었을 가능성도 있다. 본 연구에서는 입력 강수량과 모형 변수의 불확실성의 가능성을 고려하였으나, 모형의 구조적인 불확실성이 전체적인 불확실성 중에서 많은 부분을 차지하고 있음을 간접적으로 확인할 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 강우 입력 자료의 불확실성이 유량 예측에 대한 영향을 개념적 강우 유출 모형을 통하여 검토하였다. 모형 및 변수 검정의 불확실성에 바탕을 둔 기존의 GLUE방법을 강우 입력 자료의 불확실성부분으로 확장하여 입력자료, 모형의 불확실성을 모두 고려한 유량 예측 방법의 가능성(유량 예측의 신뢰 구간)을 제시하였다. 주요 결론은 다음과 같다.

- 유량예측의 불확실성에 관한 기존의 모형 및 매개변수 추정에 관한 GLUE 방법을 입력 자료의 불확실성 부분으로 확장하여, 다양한 입력 자료의 불확실성을 모형 및 변수의 불확실성과 같이 고려할 수 있는 방법론을 간단한 신뢰구간 적용사례를 통하여 제시 하였다. 이를 통하여 향후 다양한 불확실성 요소를 모두 고려한 유량산정 방법으로 확장할 수 있는 토대를 마련하였다.
- 입력 자료의 불확실성이 매개변수 산정에 미치는 영향을 MC 검정의 사후 매개변수의 반응분포를 통해 검토한 결과, 입력 자료의 비구조적인 불확실성이 매개변수 검정에 미치는 영향을 확인할 수 없었으며, 매개변수 검정의 불확실성의 영향이 크게 작용함을 확인할 수 있었다.
- 유량예측의 신뢰구간의 산정 방법의 효용성에도 불구하고, 신뢰구간이 약 30 %의 관측 유량만을 포함한 결과는 입력 자료에서 도입한 비 구조적인 불확실성의 보수적인 적용 및 강우유출 모형의 구조적인 한계에 의하여 영향을 받음을 간접적으로 확인할 수 있다.

- 향후 연구는 자료의 특성을 반영한 불확실성 모형의 산정 및 강우유출모형 성능 개선에 중점을 두어야 하며, 강우를 포함한 다양한 입력 자료의 불확실성 및 분포형 강우유출모형을 포함한 다양한 모형들을 고려한다면 유량예측의 신뢰성을 향상시킬 것으로 기대된다.

감사의 글

“이 논문은 2008학년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었음(This work was supported by the research grant of the Chungbuk National University in 2008)”, 독일 헬름홀츠 환경 연구소(UFZ)의 자료 제공에 감사드립니다.

참고 문헌

- 손경호, 김정곤 (2008). “SWAT을 이용한 기후변화의 수문학적 영향평가를 위한 Proxy-basin Differential Split-Sampling 및 Blind-Validation 테스트 적용” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제41권, 제10호, pp. 969-982.
- 성영두, 정구열, 신철균, 박진혁 (2008). “저류함수를 이용한 일단위 장기유출모의 모형 구축” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제41권, 제7호, pp. 737-746.
- 정일원, 이병주, 진태현, 배덕효 (2008). “유출모형이 기후변화 수자원 영향평가에 미치는 영향분석.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제41권, 제9호, pp. 907-917.
- Ajami, N.K., Duan, Q., and Sorooshian, S. (2007). “An integrated hydrologic Bayesian multimodel combination framework: Confronting input, parameter, and model structural uncertainty in hydrologic prediction.” *Water Resource Research*, Vol. 43: W01403, pp. 1-19.
- Andreasson, V., Perrin, C., and Michel, I. (2001). “Impact of imperfect rainfall knowledge on the efficiency and the parameters of watershed models.” *Journal of Hydrology*, Vol. 250, pp. 206-223.
- Beven, K. (2001). *Rainfall-runoff modelling-The primer*. John Wiley and Sons.
- Beven, K. (2007). “Equifinality and disaggregating sources of error in uncertainty estimation: an extended GLUE methodology”, http://www.es.lancs.ac.uk/hfdg/uncertainty_workshop/PDF/Keith_Beven_p.pdf Accessed January 2009.
- Beven, K., and Kirkby, M. (1979). “A physically based variable contributing area model of basin hydrology.” *Hydrological Science Bulletin*, Vol. 24, No. 1, pp. 43-69.
- Brown, J., and Heuvelink, G. (2007). “The Data Uncertainty Engine (DUE): A software tool for assessing and simulating uncertain environmental variables.” *Computers & Geosciences*, Vol. 33, 172-190.
- Carr, Helen (1999). “Flood Estimation Handbook Vol. 4 Restatement and application of the Flood Studies Report rainfall runoff method” Institute of Hydrology, UK.
- Harmonirib. (2007). <http://www.harmonirib.com/download.htm>. Accessed January 2008.
- Jakeman, A., Littlewood, I., and Whitehead, P. (1990). “Computation of the instantaneous unit hydrograph and identifiable component flows with application to two small upland catchments.” *Journal of Hydrology*, Vol. 117, pp. 275-300.
- Jakeman, A. and Hornberger, G. (1993). “How Much Complexity is warranted in a Rainfall-runoff model?” *Water Resources Research*, Vol. 29, No. 8, pp. 2637-2649.
- Kavetski, D., Franks, S., and Kuczera, G. (2002). “Confronting input uncertainty in environmental modelling.” *Calibration of Watershed Models*. AGU WSA Series, pp. 49-68.
- Kavetski, D., Kuczera, G., and Franks, S. (2006). “Bayesian analysis of input uncertainty in hydrological modeling: 1. Theory.” *Water Resources Research*, Vol. 42, W03407.
- Kjeldsen, T. (2007). “Flood Estimation Handbook Supplementary report No. 1: The revitalised FSR/FEH rainfall-runoff method.” Centre for Ecology and Hydrology.
- Moore, R. (1985). “The probability-distributed principle and runoff prediction at point and basin scales.” *Hydrological Sciences Bulletin*, Vol. 30, No. 2, pp. 273-297.
- Nash, J., and Sutcliffe, J. (1970). “River flow forecasting through conceptual models part I A

discussion of principles.” *Journal of Hydrology*, Vol. 10, pp. 282-290.

Rode, M., and Wenk, G. (2006). “Weisse Elster River Basin Data Report.”, HarmoniRiB-EVK1-CT-2002-00109. EU.

Schulla, J., and Jasper, K. (2001). “Model description WaSiM-ETH, Internal report.” IAC, ETH Zürich,

pp. 166.

Wagener, T., Wheater, H., and Gupta, H. (2004). *Rainfall-runoff modelling in gaged and ungaged catchments*. Imperial College Press, London, UK.

논문번호: 09-023	접수: 2009.02.18
수정일자: 2009.05.04/08.20	심사완료: 2009.08.20