

# 매개변수의 불확실성 전이에 따른 강우-유사-유출의 불확실성 분석

## Analysis of Rainfall-Sediment Yield-Runoff Prediction Uncertainty due to Propagation of Parameter Uncertainty

유완식\*, 이기하\*\*, 박찬홍\*\*\*, 조복환\*\*\*\*, 정관수\*\*\*\*\*

Wan Sik Yu, Gi Ha Lee, Chan Hong Park, Bok Hwan Lee, Kwan Sue Jung

### 요 지

토양침식 및 유사유출로 인한 피해를 예방하고 대응방안을 수립하기 위해서는 침식의 발생원인과 규모에 대한 정량적 평가가 필요하다. 이를 위해서는 지속적인 계측에 의한 토양침식량 산정이 가장 바람직하지만 실질적으로 유역규모의 지속적인 모니터링은 불가능하므로 유역의 수문/지형/지질학적 특성을 고려한 수치모형을 사용하여 토양침식량 및 유사유출량을 산정하는 것이 일반적이다. 이러한 수치모형을 이용한 수문모의의 경우 모형의 구조, 모델링에 사용되는 자료, 매개변수 등에 포함된 다양한 불확실성 요인에 의해 계산결과에 상당한 불확실성을 포함하고 있다. 본 연구에서는 매개변수의 불확실성 전이에 따른 수문모의결과의 불확실성의 정량적인 평가를 위해 서로 다른 두가지 수문량(유출량, 유사유출량)을 제공하는 강우-유사-유출 모형을 선택하고, 다중최적화기법인 MOSCEM-UA을 이용하여 매개변수 상호작용에 의한 Pareto 최적해 군 및 균형최적해를 산정하고, 이에 따른 수문예측결과의 불확실성을 평가하였다.

**핵심용어** : 분포형 강우-유사-유출 모형, 매개변수 불확실성, 다중최적화기법, Pareto 최적해

### 1. 서 론

수문학적 모의를 위해 수치모형을 이용할 경우 보다 정확한 모의결과를 획득하기 위해서는 수문관측자료를 이용한 모형의 매개변수 보정이 필요하다. 집중형 개념적 모형의 매개변수의 경우 일반적으로 개발자의 수문시스템에 대한 이해와 경험을 바탕으로 유역의 물리적인 특성을 시·공간적으로 집중화된 형태로 묘사하게 되며, 이러한 매개변수는 실제측정에 의해 직접적으로 보정되기 보다는 수동 또는 자동최적화기법에 의해 추정된다. 물리기반의 분포형 모형의 경우 연속, 운동량, 에너지 방정식을 이용하여 수문현상을 해석하고, 공간적인 이질성을 고려하기 위해 대상유역은 소유역 또는 격자기반으로 구성된다. 물리기반의 분포형 모형은 다양한 기상학적, 지형학적, 지질학적 데이터를 활용함으로써 매개변수의 보정을 생략할 수 있으나, 관측 스케일과 격자 스케일의 차이로 인해 실제적으로 분포형 모형 역시 관측자료와의 비교·분석을 통해 매개변수의 보정이 필요하다. 모형의 매개변수 보정을 위해 현재까지 다양한 수학적 기법들이 개발되어 왔으며, 가능 매개변수 범위 내에서 국부최적해로의 수렴을 방지하고 전역최적해를 산정하기 위해 많은 최적화기법들이

\* 정회원 · 충남대학교 토목공학과 석사 · E-mail : babuwys@nate.com  
\*\* 정회원 · 충남대학교 토목공학과 건설방재연구소 Post-doc 연구원 · E-mail : leegiha@gmail.com  
\*\*\* 충남대학교 토목공학과 석사과정 · E-mail : parkchanhong@cnu.ac.kr  
\*\*\*\* 정회원 · 한국종합기술 수자원부 대리 · E-mail : james7799@rocketmail.com  
\*\*\*\*\* 정회원 · 충남대학교 토목공학과 교수 · E-mail : ksjung@cnu.ac.kr

사용되고 있으며 그 실효성을 인정받고 있다. 그러나 이러한 단일목적 최적화기법은 사용자에게 의해 선택된 목적함수에 따라 각기 다른 수문응답 결과를 제공할 수 있으며, 단일목적함수를 이용하여 산정된 최적매개변수로 수문시스템의 응답을 완벽하게 재현하는 것은 불가능하다.

따라서 본 연구에서는 강우-유출 및 강우-유사유출 모의가 가능한 분포형 강우-유사-유출 모형을 선택하고 직접산정이 불가능하거나 불확실성을 포함한 유출관련 매개변수 4개( ,  $d_s$ ,  $d_m$ ,  $\beta$ ), 유사유출관련 매개변수 5개( $d_{50}$ ,  $k_s$ ,  $\alpha$ ,  $E$ ,  $V_{cr}S$ ) 총 9개의 매개변수를 선택하여 다중최적화 기법인 MOSCEM(Multi-Objective Shuffled Complex Evolution Metropolis)을 이용하여 매개변수를 동시에 보정한 경우에 대하여 Pareto 최적해를 추정하고, 이에 따른 예측결과의 불확실성을 평가하였다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 분포형 강우-유사-유출모형대상유역

본 연구에서 사용된 모형은 사면의 지표 및 지표하 흐름을 고려한 유출모의 모듈(Tachikawa et al., 2004)과 단위수류력(unit stream power; Yang, 1972)이론을 기반으로 한 유사유출 모듈(Sayama, 2003)을 결합하여 확장개발된 raster기반의 분포형 강우-유사-유출 모형이며 유출량과 유사유출량을 동시모의하게 된다. 분포형 강우-유사-유출 모형에 대한 보다 상세한 내용은 유완식(2010) 및 이기하 등(2010)에 기술되어 있다.

### 2.2 다중최적화 기법 MOSCEM

본 연구에서 사용된 모형과 같이 단일모형에서 유량과 유사량을 복합모의 하는 경우에 모형의 매개변수의 보정을 위해서는 최적의 매개변수 개념보다는 둘 이상의 목적함수를 정의하고 매개변수간의 상호작용을 분석하고 이에 따른 모의결과의 불확실성을 평가할 필요가 있다. 그림 1(b)와 (c)는 MOSCEM기법을 이용하여 두 매개변수  $\theta_1$ 과  $\theta_2$ 에 대한 두 목적함수  $F_1(\theta)$ ,  $F_2(\theta)$ 를 동시에 최소화하기 위한 Pareto 최적해에 대한 개념도이다. 그림 1(b)에서의 A와 B는 각각의 목적함수  $F_1(\theta)$ 과  $F_2(\theta)$ 를 최소화하는 최적매개변수를 나타내며, 그림 1(c)에서의 A와 B를 연결하는 곡선은 이론적인 Pareto 최적해에 해당한다. MOSCEM기법은 초기 선택되어진 매개변수들에 의한 목적함수값의 비교우위를 반복적으로 계산함으로써 최종적으로 두 목적함수를 만족시키는 매개변수군, Pareto 최적해로 수렴하게 된다. 또한 그림 1(c)의 A와 B의 연결곡선에서 A를 따라 B로 이동하면  $F_1(\theta)$ 은 개선되는 반면  $F_2(\theta)$ 는 저하되며, 반대의 경우  $F_2(\theta)$ 는 개선되고  $F_1(\theta)$ 은 저하된다.  $\gamma$ 에 해당하는 매개변수는 두 목적함수를 적절하게 모의하는 균형최적해라 한다.

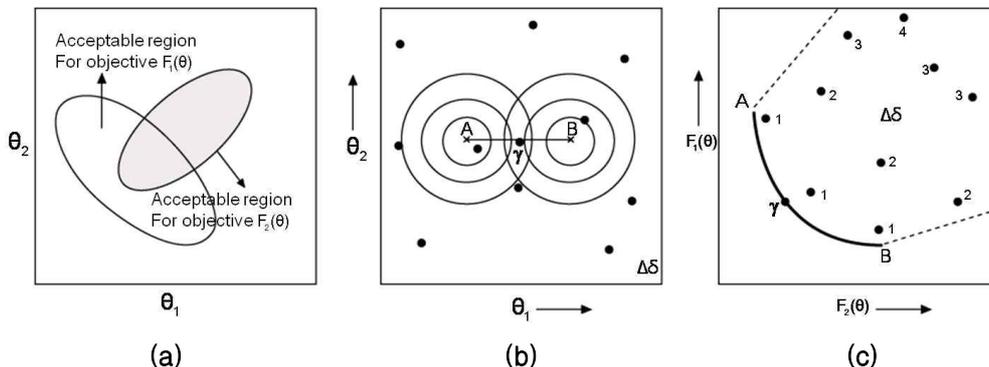


그림 1. MOSCEM 다중최적화기법의 개념도 (Vrugt et al., 2003)

### 3. 모형의 적용

#### 3.1 대상유역

매개변수의 불확실성을 고려한 강우-유사-유출 모의에 대한 대상유역으로 용담댐 상류유역인 천천유역을 선정하였다. 대상유역의 유역면적은 289.8km<sup>2</sup>, 유역평균고도는 EL. 549.13m이며 유로연장은 25.5km이다. 그림 2(a)는 용담댐 유역내에서의 대상유역의 위치 및 우량관측소 현황을 보여주고 있으며, 그림 2(b)는 대상유역의 Thiessen망 및 지형도를 나타내고 있다.

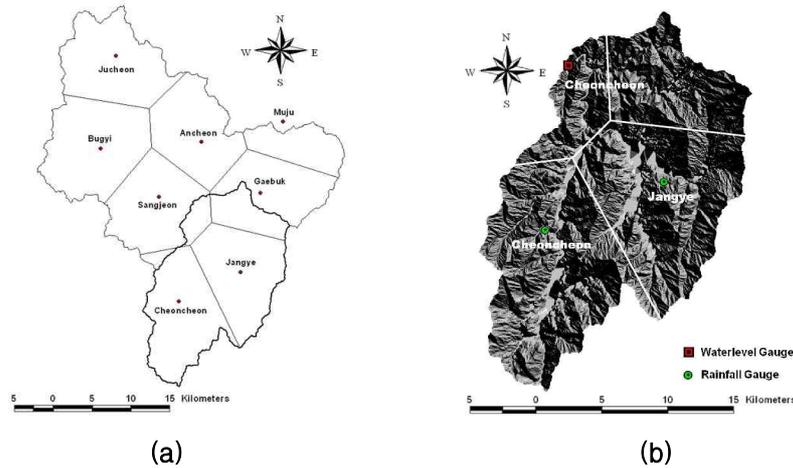


그림 2. (a) 용담댐 유역의 대상유역 위치 (b) 천천유역의 Thiessen망 및 지형도 현황

#### 3.2 MOSCEM을 이용한 Pareto 생성 및 매개변수 불확실성 평가

매개변수의 불확실성에 의한 수문모의 결과의 불확실성의 평가를 위해서 모든 매개변수의 가능 매개변수범위를 설정하고 유량에 대한 오차를 최소로 하는 RMSE와 유사량에 대한 오차를 최소로 하는 RMSE, 두 개의 목적함수를 이용하여 Pareto 최적해의 산정 및 매개변수의 불확실성을 평가하였으며, 매개변수의 증가에 따른 Pareto 최적해의 수렴도 감소를 고려하여 7000번의 반복계산을 통해 Pareto를 생성하였고 이에 따른 매개변수에 대한 불확실성을 검토하였다. 본 연구에서 사용된 목적함수 RMSE와 HMLE는 식 (1)과 식 (2)와 같다.

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (O_t - P_t)^2 \quad (1)$$

$$HMLE = \frac{\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N w_t (O_t - P_t)^2}{\exp[2(\lambda - 1)a_d]} \quad (2)$$

여기서,  $N$  은 자료의 개수,  $O_t$  는 시간  $t$  의 실측유량 또는 실측유사량,  $P_t$  는 계산유량 또는 계산유사량을 나타내며,  $w_t = O_t^{2(\lambda-1)}$ ,  $a_d = \frac{1}{N} \ln O_t$ ,  $\lambda = 0.3$ 이다.

Pareto 최적해(그림 3(a))의 경우 산포된 경향을 보이며 매개변수의 불확실성 범위 역시 유출 및 유사관련 매개변수 모두 상당히 넓게 추정되었다. 이러한 결과의 원인은 매개변수의 증가로 인해 매개변수간의 상호간섭이 증가됨에 따라 Pareto 최적해로의 수렴도가 감소하기 때문으로 판단된다. 또한 유사관련 매개변수  $d_{50}$  과  $V_{cr}S$ 의 경우 그 정도가 약해지기는 했으나 초기범위 양끝 경

계부분으로 수렴하고 있음을 확인할 수 있다(그림 3(b)).

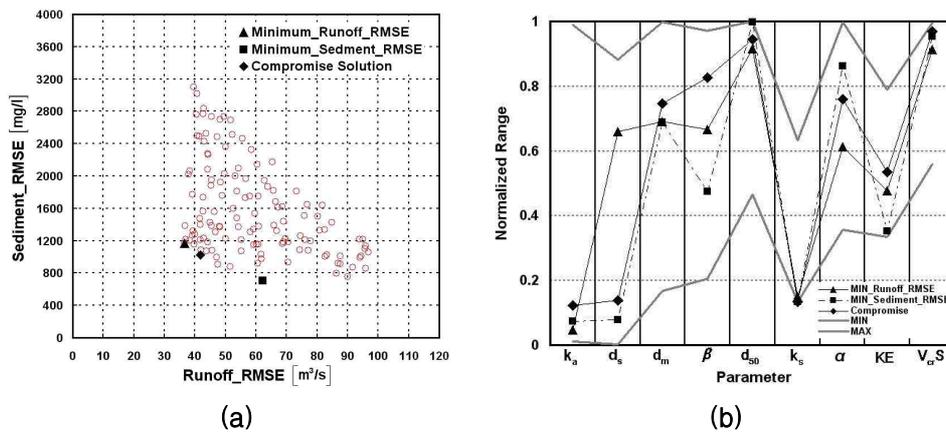
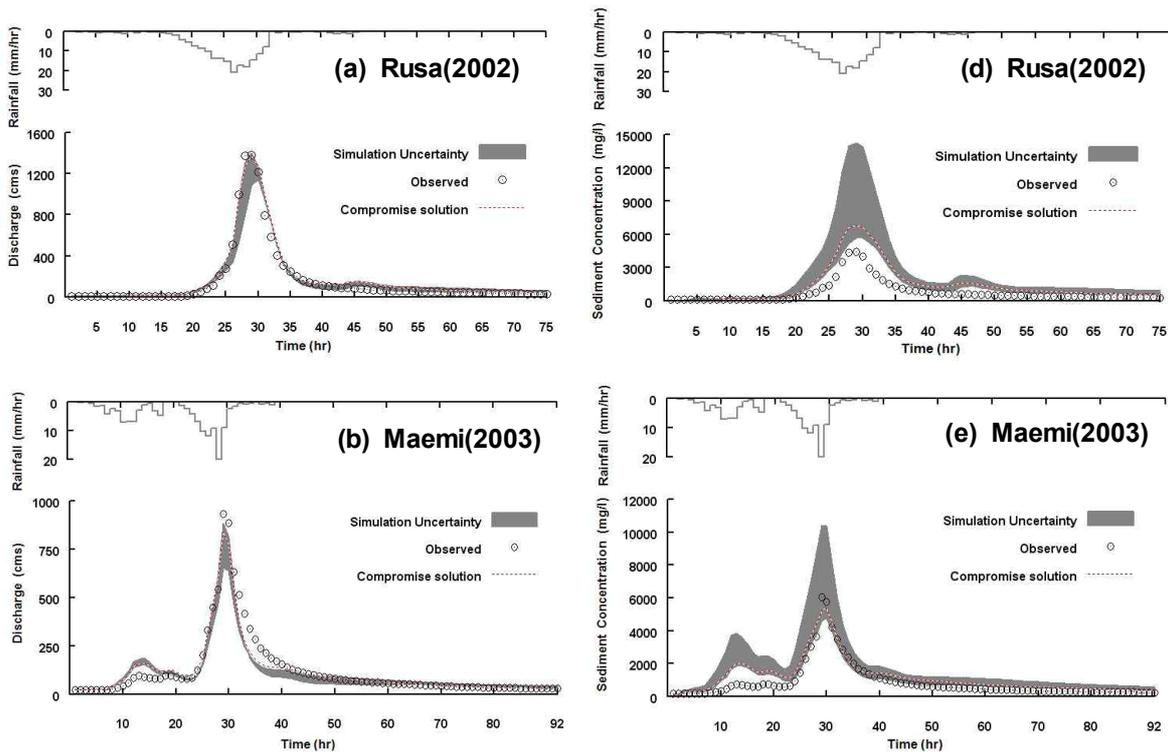


그림 3. (a) Pareto 최적해 (b) 정규화된 매개변수 값

### 3.3 매개변수 불확실성에 따른 수문응답분석

매개변수의 불확실성 전이에 의한 수문곡선의 불확실성에 대한 평가 결과는 그림 4(a) ~ (c)와 같이 분포되는 양상을 보여주고 있으며 유사량 곡선에 대한 평가 결과는 그림 4(d) ~ (f)와 같이 분포되는 양상을 보여주고 있다. 또한 ‘루사’ 강우사상을 이용하여 보정된 균형최적해의 경우 ‘매미’, ‘나리’ 2개 강우사상에 적용한 결과 높은 재현성을 나타내고 있음을 확인할 수 있으며, 유사량 곡선의 불확실성 범위는 관측유사량보다 과다산정된 결과를 나타냈으며, 범위는 모의시간에 걸쳐 전체적으로 넓게 분포되어 있다. 또한 보정된 매개변수의 균형최적해는 모형 검증용 위한 2개의 사상에서 침투유사량을 적절하게 모의하고 있으며, 특히 ‘나리’의 경우 관측유사량은 유사량곡선의 불확실성 범위안에 포함되어 있음을 확인할 수 있다.



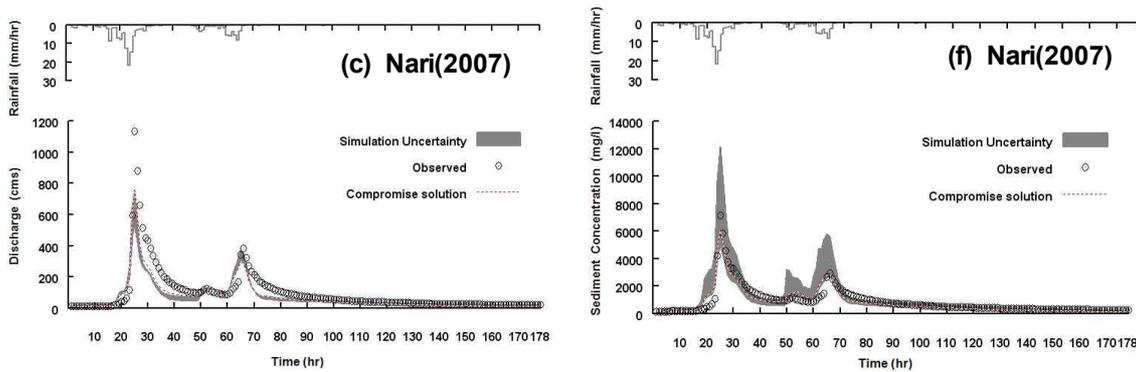


그림 4. 불확실성 전이에 대한 수문곡선의 불확실성 평가 결과: (a)~(c)  
유사량곡선의 불확실성 평가 결과: (d)~(f)

#### 4. 결 론

본 연구에서는 다중최적화기법인 MOSCEM 알고리즘을 이용하여 강우-유사-유출 모형의 유출 관련 매개변수 4개( ,  $d_s$ ,  $d_m$ ,  $\beta$ ), 유사유출관련 매개변수 5개( $d_{50}$ ,  $k_s$ ,  $\alpha$ ,  $E$ ,  $V_{cr}S$ ) 총 9개의 매개변수를 동시에 보정한 경우에 대하여 Pareto 최적해를 추정하고 매개변수의 불확실성을 비교·분석하였다. 또한 매개변수 불확실성의 전이에 따른 수문모의결과의 불확실성을 평가하기 위해 Pareto 최적해에 해당하는 매개변수군을 이용하여 수문곡선 및 유사량곡선의 앙상블 모의를 수행하였다. MOSCEM을 이용한 Pareto 생성 및 매개변수의 불확실성 분석 결과, 매개변수의 증가로 인한 매개변수간 상호간섭이 증가됨에 따라 Pareto 최적해로의 수렴도가 감소하여 불확실성 범위가 넓게 추정되었으며, 매개변수 불확실성의 전이에 따른 앙상블 수문곡선 모의결과 수문곡선 및 유사량곡선의 앙상블 모의결과 모의기간 전반에 걸쳐 넓은 불확실성 범위를 보였으며, 균형최적해에 의한 모의결과는 높은 재현성을 나타냈다.

#### 감 사 의 글

본 연구의 일부는 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 건설기술혁신사업(08기술혁신F01)에 의한 차세대홍수방어기술개발연구단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

#### 참 고 문 헌

1. 유완식 (2010). 매개변수의 불확실성을 고려한 강우-유사-유출량 산정에 관한 연구." 석사학위논문, 충남대학교
2. 이기하, 유완식, 장창래, 정관수 (2010). "분포형 수문모형을 이용한 침식 및 퇴적의 시공간 변동성 분석.", 한국수자원학회논문집, 제43권, 제11호, pp. 995-1009.
3. Tachikawa, Y., Nagatani, G., and Takara, K. (2004). "Development of Stage-Discharge Relationship Equation Incorporating Saturated-Unsaturated Flow Mechanism", Annual Journal of Hydraulic Engineering, JSCE 48, pp. 7-12 (in Japanese).
4. Vrugt, J.A., Gupta, H.V., Bouten, W. and Sorooshian, S. (2003). "A shuffled complex evolution metropolis algorithm for optimization and uncertainty assessment of hydrologic model parameters." *Water Resources Research*, Vol. 39, No. 8, 1201, doi:10.1029/2002WR001642.
5. Yang, C.T. (1972). "Unit stream power and sediment transport." *Journal of the Hydraulics Division, ASCE*, Vol. 98, No. 10, pp. 1805-1826.