

## 다목적함수를 이용한 PDM 모형의 유량 분석

### Prediction of Stream Flow on Probability Distributed Model using Multi-objective Function

안상억\* · 이효상\*\* · 전민우\*\*\*

Ahn, Sangeok · Lee, Hyosang · Jeon, Min-woo

#### Abstract

A prediction of streamflow based on multi-objective function is presented to check the performance of Probability Distributed Model(PDM) in Miho stream basin, Chungcheongbuk-do, Korea. PDM is a lumped conceptual rainfall runoff model which has been widely used for flood prevention activities in UK Environmental Agency. The Monte Carlo Analysis Toolkit(MCAT) is a numerical analysis tools based on population sampling, which allows evaluation of performance, identifiability, regional sensitivity and etc. PDM is calibrated for five model parameters by using MCAT. The results show that the performance of model parameters( $c_{max}$  and  $k(q)$ ) indicates high identifiability and the others obtain equifinality. In addition, the multi-objective function is applied to PDM for seeking suitable model parameters. The solution of the multi-objective function consists of the Pareto solution accounting to various trade-offs between the different objective functions considering properties of hydrograph. The result indicated the performance of model and simulated hydrograph are acceptable in terms on Nash Sutcliffe Efficiency\*(=0.035),  $FSB$ (=0.161), and  $FDBH$ (=0.809) to calibration periods, validation periods as well.

**Key words** : Multi-objective function, PDM, Pareto solution, Monte Carlo

#### 요 지

본 연구는 미호천 유역을 대상으로 유량곡선의 세부적인 특성을 고려한 다목적함수를 적용하여 Probability Distribution Model(PDM) 모형의 유량모의성능을 검토하였다. PDM은 유역을 한 개의 단위구역으로 개념화한 집중형 강우유출모형으로 영국의 지역화 연구 및 홍수량 산정방법에 대표적으로 이용되고 있다. PDM 모형의 5개 매개변수를 Monte Carlo 방법에 기반을 둔 분석도구(MCAT, Monte Carlo Analysis Toolkit)를 활용하여 사후검정분포, 검정근거 및 민감도 분석 등을 수행하였으며, 모형의 매개변수 중  $c_{max}$ 와  $k(q)$ 만이 뚜렷한 검정 근거가 있고 나머지 변수들은 동등성의 영향을 확인하였다. 또한, 유량곡선의 고유량 및 저유량의 특성을 맞춘 목적함수의 Trade-off를 고려한 매개변수의 파레토 최적해를 산정한 결과, 모든 목적에 최대한 부합하는 유량 산정의 가능성을 제시하였다. 검정(calibration)기간에서  $NS^*E=0.035$ ,  $FSB=0.161$ ,  $FDBH=0.809$ 로 안정적이며 만족할만한 모의성능을 나타내었고, 검증(validation)기간에 대해서도 안정적 모의성능을 나타내었다.

**핵심용어** : 다목적함수, PDM 모형, 파레토 최적해, Monte Carlo 방법

#### 1. 서 론

수자원 개발과 계획 및 최적의 관리를 위해서는 정확하고 효율적인 유역의 수문량 산정이 필수적이다. 장기간의 정밀한 강우유출 해석이 필요하며 이를 위해 다양한 강우유출모형들을 개발하여 적용되어 왔다(정일원 등, 2004). 현재 널리 사용되고 있는 강우유출모형은 다음과 같이 수문학적 작용의 고려 정도에 따라 매트릭 모형(metric model), 개념적 모형(conceptual model), 물리기반모형(physical based model)으

로 구분할 수 있다(Wagener et al., 2004). 매트릭 모형은 유역 모형의 가장 간단한 형태로서 유역을 입·출력만 고려한 하나의 black box로 가정하여 개념화한 것이며, 대표적으로 ANN(Artificial Neural Networks; Raid et al., 2004), DBM(Data Based Mechanistic modeling; Young, 1999) 등이 있다. 개념적 모형은 유역의 수문 작용 중 중요부분을 모형으로 간략히 개념화하여 구성되었으며, 대표적으로 TANK(Sugawara et al., 1984), TOPMODEL(Beven and Kirkby, 1976), PDM(Probability Distribution Model; Moore,

\*충북대학교 대학원 토목공학과 석사과정(E-mail: sangeokahn@chungbuk.ac.kr)

\*\*충북대학교 공과대학 토목공학부 조교수(교신저자)

\*\*\*정회원 · 충북대학교 공과대학 토목공학부 교수

1985) 등이 있다. 물리기반모형은 유역의 중요 수문작용을 수학적 방정식을 이용하여 유출메커니즘에 영향을 미치는 지형, 토지피복, 토양특성자료 등을 고려한 흐름방정식을 해석하는 것이며, SHE(System Hydrology European; Abbott et al., 1986), Vflo™(Vieux, 2001) 등이 대표적인 모형이다. 다양한 모형들 중에 정밀한 강우유출모형의 모의를 위해서는 장기간동안 일정한 크기로 세분화된 각 지점별로 물리적 특성치나 매개변수를 입력하여 공간적인 변화를 적절히 반영할 수 있는 분포형, 물리기반, 연속형 강우유출모형을 적용하는 것이 바람직하다. 하지만 현재 유역의 많은 부분이 미계측 지역으로 남아있는 우리나라의 자료 여건상 모든 유역에 대하여 이를 적용하기 어려운 상황이다. 필요로 하는 수문 및 지형자료 취득의 어려움, 유역의 특성을 대표하지 않는 기본값의 적용, 많은 변수들을 검증해야 하는 등 많은 문제점이 있다. 이에 강우유출모형의 적용에 있어서 현실적인 대안으로 개념적 강우유출모형이 사용된다.

강우유출의 해석을 위한 모형을 구축하고 적용하기 위해서는 유역의 특성을 나타내는 매개변수가 필수적으로 사용되는데 최적의 매개변수 선정에 어려움이 있고 그 신뢰성을 증명하여야 한다. 강우유출모형의 매개변수는 유역의 특성을 직접적으로 표현할 수 없는 경우가 대부분으로 일정지점의 관측 유량과 모의한 유량을 비교하여 매개변수를 추정하는 검정을 한다(이길성 등, 2005). 목적함수는 매개변수의 검정을 이용한 최적해를 구하기 위하여 사용되는데 단일목적함수(single objective function)를 적용한 경우 유량의 최대치, 최저치 등 특정 부분에 초점을 맞춘다. 이에 따른 장기간의 유량을 전체적으로 모의하는데 문제점을 나타내어 다목적함수(multi-objective function)의 적용은 필수적이다. Gupta et al.(1998)은 다목적함수에 의한 최적의 매개변수 검정 필요성을 주장하였으며 SAC-SMA(Sacramento Soil Moisture Accounting) 모형을 이용하여 파레토 최적해(pareto solution)를 구하였고, Madson(2003)은 MIKE SHE를 이용한 유역의 수문모의를 실행하는데 지하수위와 표면유출에 대해서 다목적함수의 Trade-off 검정을 통한 최적의 파레토 최적해를 구하였다. 성운경 등(2004)은 일 단위 강우유출모형인 SIMHYD와 TANK를 세 가지 목적함수를 달리하여 세 가지의 최적화 방법으로 유역에 적용하여 모형과 목적함수에 따른 모의 효율을 비교한 결과, 목적함수를 달리할 경우는 무차원 함수인 Nash-Sutcliffe efficiency를 비교하는 것이 모형의 적용성을 비교하는데 적합한 것으로 평가하였다. 이길성 등(2005)은 SSARR 모형의 5개 매개변수를 유역에 검정하기 위하여 다목적함수와 유전자알고리즘을 이용하였고 파레토 최적해를 이용함으로써 적용목적에 따라 적합한 매개변수를 사용자가 선택할 수 있다고 하였다. 김태순 등(2007)은 TANK 모형의 매개변수를 산정하기 위해 다목적 유전자알고리즘 기법인 NSGA-II를 채택하여 4가지 목적함수를 적용하였고, NSGA-II를 이용하여 TANK 모형의 매개변수를 추정할 때 초기조건이 최적화 과정에 미칠 수 있는 영향을 최소화하기 위해 세대수와 개체군의 크기에 대한 민감도 분석을 수행하였다. 또한 구보영 등(2007)은 다목적 유전자알고리즘을 이용

하여 TANK 모형의 매개변수를 추정하는데 있어서 목적함수의 개수가 여러 개인 경우에 발생할 수 있는 파레토최적화의 단점을 해결하기 위하여 선호적순서화(preference ordering)를 적용한 연구를 수행하였다.

본 연구에서는 충청북도의 미호천 유역을 대상으로 장기유출을 모의하기 위해 WAMIS(Water Management Information System)의 수문자료를 바탕으로 PDM 모형을 적용하였다. 유역의 수문작용을 개념적으로 한 개의 단위구역으로 구성하고 있는 Moore(1985)의 PDM 모형을 적용하여 모형의 성능과 유출량 산정을 분석하였다. PDM 모형은 영국의 수자원 및 홍수 관리 목적으로 사용되고 있으며, Flood Estimation Handbook(FEH)의 후속연구인 ReFH(Revitalised Flood Hydrograph, CEH, 2005)에서 단위홍수도 작성에 있어 기초적인 모형으로 사용되고 있다. 매개변수 검정을 위하여 Monte Carlo 방법과 다목적함수(multi-objective function) 방법을 활용하였다. Monte Carlo 방법에 기반을 둔 분석도구(Monte Carlo Analysis Toolkit)를 이용하여 유출량산정에 미치는 주요 매개변수의 특성을 사후반응분포검정, 민감도분석 등을 통하여 검토하였다. 또한, 정확한 평가를 위해 다양한 유량곡선의 특성에 맞춘 세부적인 목적함수를 활용하여 모형의 성능을 검토하였으며, 다목적함수의 성과를 극대화하기 위하여 파레토 최적해(Pareto solution) 기법을 도입하여 수문곡선의 정확도를 높이고자 하였다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 확률분포모형

유역의 수문학적인 작용을 고려하기 위하여 Moore(1985)의 확률분포모형(Probability Distribution Model, PDM)이 적용되었다. PDM 모형은 유역에서 공간적 분포의 토양수분저류(soil moisture storage) 용량을 확률분포로 개념화한 모형이고 Fig. 1과 같다. 토양수분저류 용량이 유역 전역에 걸쳐 다양하게 나타나고 시간에 따라 포화된 유역의 분포도 변화 가능하며, 이러한 시간에 따른 유역의 토양수분저류 용량의 분포는 다음 Eq. (1)과 같은 파레토분포함수(pareto distribution function)로 표현된다(Moore, 1985; Wagener et al., 2004).

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

확률분포함수는 다음 Eq. (2)과 같이 정리된다.

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

여기서,  $c$ 는 토양수분저류 용량,  $c_{max}$ 는 유역의 최대 토양수분저류 용량,  $b$ 는 유역의 토양수분저류 용량의 공간적 변화이고,  $b$ 가 1이 된다면 토양수분저류 용량이 유역에 걸쳐 동일하게 분포하며,  $b$ 가 0과 같으면 토양수분저류 용량은 일정한 값을 갖는다.

이 확률분포는 다음 Eq. (4)와 같이 모형에서 적용된다. 유역의 최대 수분저류 용량은 다음 Eq. (3)와 같이 두 변수

$c_{max}$ 와  $b$ 를 사용하여 계산된다.

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

여기서,  $S_{max}$ 는 유역의 최대 수분저류 용량이다.

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

여기서,  $S_k$ 는 유역의 수분저류 용량,  $c_k$ 는 유역의 저류고이다.

유역의 저류 용량은 다음 Eq. (5)과 같이 계산된다.

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

유역의 수분저류 용량이 포화되었을 때, 유효 강우량 (effective rainfall)은 Eq. (6)과 같이 계산된다.

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

여기서,  $u_k$ 는 유효 강우량,  $r_k$ 는 강수량,  $ae_k$ 는 실제 증발산량이다.

실제 증발산량은 Wagener et al.(2004)의 연구에서 Eq. (7)과 같이 유역의 수분정도에 따라 보정되었다.

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

여기서,  $pe_k$ 는 잠재 증발산량이다.

확률분포모형에서 발생된 유효 강우량은 일 강우유출모형에서 적합하게 사용되고 병렬로 연결된 2개의 선형 저류지 모형에 적용되고, Fig. 2와 같다(Jakeman et al., 1990; Wagner et al., 2004). 선형 저류지 함수(storage function)와 물질 수지(mass balance equation)를 조합한 유입량과 유출량의 관계로 표현된 저류지 함수 Eq. (8)가 사용되었다.

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{1}{T} [u_k(t) - Q(t)] \quad (8)$$

여기서,  $T$ 는 저류지의 체류시간,  $u_k(t)$ 는 유효우량,  $Q(t)$ 는 유출량이다.

병렬로 연결된 2개의 선형 저류지 모형은 유역의 빠른 반응을 형상화한 것과 느린 반응을 형상화한 것이다. 모든 유효 강우량은 빠른 반응 저류지로 가는 양을 나타내는  $\%_o(q)$  변수를 통해 2개의 저류지로 나누어진다. 각 저류지에서 체류 시간 변수  $k(q)$ 와  $k(s)$ 를 통해서 유출 유량으로 연결된다. 유효우량-유출모형에서는 일반적인 선형적 저류지 모형을 적용할 수 있는 근거는 강우유출의 비선형적인 관계가 토양수분저장 모형에서 충분히 고려되었다고 가정하였으며, 식 (8)에서 선형성을 나타내는 변수  $n=1$ 이 사용되었다(Jakeman and Hornberger, 1993).

다목적함수를 이용한 PDM 모형의 유량 분석

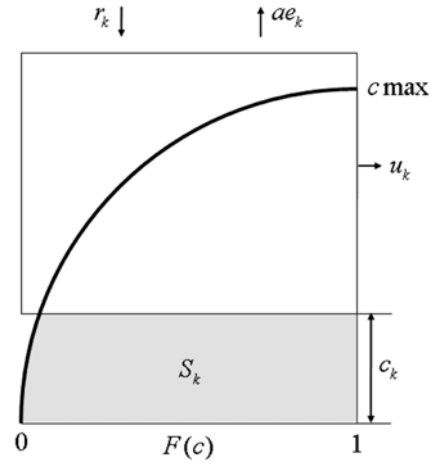


Fig. 1. Schematic description of the PDM.

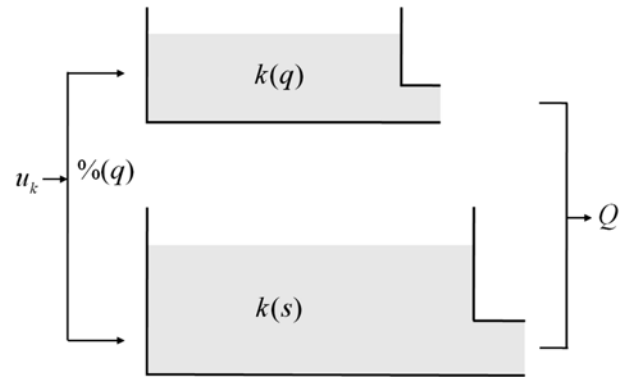


Fig. 2. Schematic description of the 2par routing module.

## 2.2 목적함수

목적함수는 유역의 관측유량과 유역을 모형화한 결과인 모의유량과의 차를 검토하여 최적의 변수를 선정하는데 사용되는 검토 수단이다. 이를 위하여 관측유량과 모의유량의 차를 수학적인 식을 통하여 정리하였으며, 그 사용목적에 따라 다양한 목적함수의 제시가 가능하다.

### 2.2.1 Nash Sutcliffe Efficiency

유량곡선의 일반적인 모형의 성능을 분석하기 위하여 Nash-Sutcliffe Efficiency(NSE, Nash and Sutcliffe, 1970)를 적용하였다. NSE는 Eq. 9와 같이 정의되고,  $-\infty$ 에서 1까지 최적값을 가진다. 목적함수를 일반화하여 무차원인 목적함수로서 다른 유역들의 결과를 비교 검토하는데 적합하다. 그러나 편차의 제곱의 형태를 사용하여 저유량보다는 고유량의 성능에 가중을 부여하고 있다. 그러나 Rainfall Runoff Modeling Toolkit(RRMT)에서 사용하는 모든 목적함수의 최적값을 최소값으로 하여 비교·검토하기 위하여 Eq. 10과 같이 계산하여 적용하고 있다.

$$NSE = 1.0 - \frac{\sum_{i=1}^N (0_i - c_i(0))^2}{\sum_{i=1}^N (0_i - \bar{0})^2} \quad (9)$$

여기서,  $o_i$ 는  $i$ 에 관측된 유량,  $c_i(\theta)$ 는  $i$ 에 모델변수 세트  $\theta$ 로 모의된 유량이다.

$$NSE^* = 1.0 - NSE \quad (10)$$

### 2.2.2 Root Mean Square Error

Root Mean Square Error(RMSE)는 검정하고자 하는 자료와 같은 차원의 단위를 사용하고, 일반적으로 널리 사용되고 있으나 NSE와 마찬가지로 고수위 부분의 유량에 초점을 맞춘 목적함수이다. RMSE는 Eq. 11과 같이 정의된다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (o_i - c_i(\theta))^2} \quad (11)$$

여기서  $o_i$ 는  $i$ 에 관측된 유량,  $c_i(\theta)$ 는  $i$ 에 모델변수 세트  $\theta$ 로 모의된 유량이다.

### 2.2.3 Flow Segmentation RMSE

일반적인 목적함수는 유량곡선의 전구간을 하나의 식으로 표현하여 유량곡선의 세부적인 성능을 파악하기 어렵다. 유량곡선의 특정부분의 성능을 고려하기 위하여 Boyle et al.(2001)에 의하여 유량의 구간분석방법(segmentation scheme)이 제안되었다. Boyle et al.(2001)은 유량곡선의 강우사상에 영향을 받는다고 가정하고 유량곡선의 부분별 모의성능에 주목하였다. 강우에 의하여 유량곡선이 급격하게 증가하는 부분과 강우가 멈추고 유량곡선이 급격하게 감소하는 부분의 발생시작이 서로 다름에 주목하여 유량곡선을 나누고, 각각에 대하여 목적함수를 적용하여 부분별 모형의 성능을 검토하였다. 그러나 유역의 강우사상 유량곡선을 직접적으로 연결하기가 어렵고, 강우의 시작과 끝을 정확히 판별하기 어려운 문제점이 있어서 강우에 의하여 유량곡선이 증가하는 시점을 정확히 산정하기 어렵다. 이에 Wagener and Lees(2001a)은 유량곡선의 증감 기울기만을 바탕으로 하여 유량곡선을 분할하였다. 유량곡선이 증가하나 저유량 부분(Driven Slow: FDBL), 유량곡선이 급격히 증가하는 고유량 부분(Driven Quick: FDBH), 이와 반대로 유량곡선이 감소하는 고유량(Non-Driven Quick: FQB), 저유량 부분(Non-Driven Slow: FSB)으로 구분하여 각각에 대하여 목적함수를 적용하였으며 Fig. 3과 같다. 고유량과 저유량의 기준점으로 평균유량의 75% 값을 각각 수위가 증가하는 부분, 수위가 감소하는 부분에 적용하였다.

### 2.3 파레토 최적해 기법

강우유출모형의 적용에서 대상유역의 얼마나 정확한 유출을 모의했는지의 평가는 관측유량과 모의유량의 유출체적, 수문곡선의 증감양상, 관측한 최대유량과 모의한 최대유량, 저수위부분의 관측유량과 모의유량의 일치성을 판단하여야 한다(Madsen, 2000). 이러하듯 다양한 관점의 기준을 적용하기 위해서는 그 목적에 적합한 목적함수를 구성하여야 한다. 하지만 다양한 목적함수가 사용되는 경우 목적함수들의 결과가 서로 일치하지 않고 상충하는 경우가 일반적이다. 이러한 경

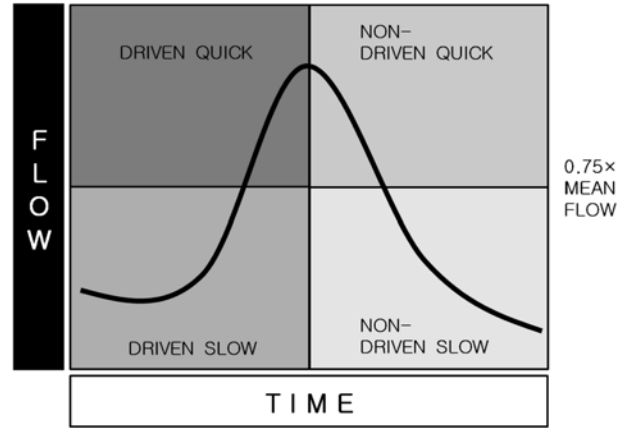


Fig. 3. The segmentation schemes implemented(Wagener and Lees, 2001a)

우에 사용되는 대표적인 다목적함수 방법으로 각각의 목적함수들의 결과를 Trade-off 분석을 통하여 파레토 최적해(pareto solution)를 활용하는 최적화 기법이 있다(김승권, 2006a, 2006b, 2006c). 각각의 목적함수에 대하여 서로 열등하지 않은 매개변수들(non-inferior model parameter set)로 구성된 파레토 최적해 전선(Pareto optimal frontline)을 정의하고, 이들 중에서 파레토 최적해를 선정하여 활용하는 대표적인 다중목적의사결정 기법으로 여러 목적함수를 동시에 일정수준 충족시키는 최대한 목표에 가까운 해를 구하는 방법이다.

## 3. 강우유출모형의 적용

### 3.1 대상유역 및 수문자료

연구의 대상유역은 미호천 유역으로서 이 유역은 금강 유역의 북쪽 중앙부에 위치하고 있으며 유역의 북쪽 및 동쪽은 한강 유역, 북서쪽은 안성·삼교천 유역, 남쪽은 금강 잔류지역과 접하고 있으며, 그 유역면적은 1854.98 km<sup>2</sup>로서 금강 전 유역면적(9914.01 km<sup>2</sup>)의 18.7%를 차지하고 미호천의 유로연장은 80.17 km이다. 미호천 유역의 개괄적인 대상구간은 Fig. 4와 같다.

본 연구의 강우유출모형에 입력되는 수문자료는 강수량, 기온, 잠재증발산량, 유량이다. 강수량은 강우유출모형의 적용에 있어서 가장 중요한 수문 입력 자료로서 정확한 자료 구축을 요구하며, 미호천 유역의 강수량 자료는 18개 지점(청천, 미원, 생곡, 삼죽, 안성, 성환, 안내, 현도, 부강, 청주, 병천, 진천, 가덕, 오류, 증평, 조치원, 정안, 천안)에서의 관측 자료를 티센다각형법(Thiessen polygon method)을 이용하여 면적 평균강수량을 산정하였다. 국가 수자원관리종합정보 시스템(WAMIS, <http://www.wamis.go.kr>)에서 제공하는 미호천 유역(3011)의 장기 유출분석 자료를 유역의 대표 유량자료로 사용하여 강우유출모형의 검증에 적용하였다. 대상유역의 대표 수문자료 현황의 위치는 Fig. 4와 같다. 기온은 10년간(1992-2001년)의 자료를 이용하여 일최고, 일최저, 일평균으로 구분하여 분석하였으며, 최고기온은 1994년 7월에 기록한

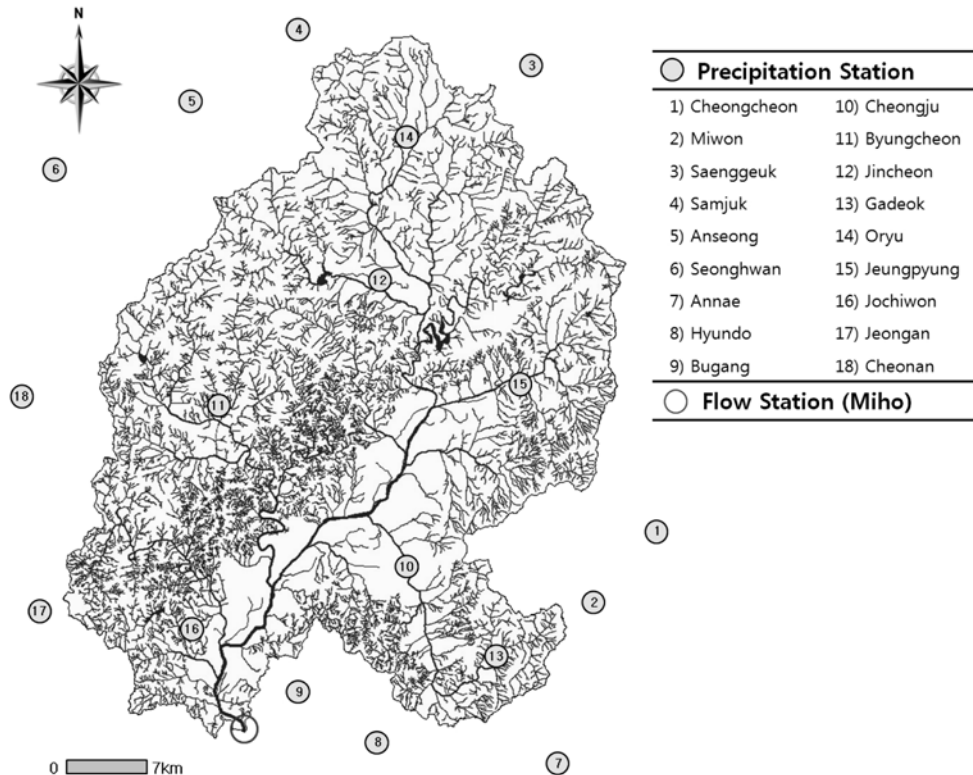


Fig. 4. Miho stream basin.

31.7°C로 조사되었으며, 최저기온은 2001년 1월에 -13.4°C로 기록되었다. 잠재증발산량을 산정하기 위하여 여러 대표적인 방법 중에서 국제식량농업기구(Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO)에서 추천하고 있는 FAO Penman-Monteith 방법을 사용하였고, 공식은 Eq. (12)와 같이 나타낸다.

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{t + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (12)$$

여기서,  $ET_0$ 는 기준잠재증발산량(mm/day),  $R_n$ 는 지구(작물)표면에서 순수하게 축적되는 에너지(MJ/m<sup>2</sup>/day),  $G$ 는 토양 열 유속 밀도(soil heat flux density, MJ/m<sup>2</sup>/day),  $t$ 는 2 m 높이에서 일평균기온(°C),  $u_2$ 는 2 m 높이에서 풍속(m/sec),  $e_s$ 는 포화증기압(kPa),  $e_a$ 는 실제증기압(kPa),  $e_s - e_a$ 는 포화증기압 결손량(kPa),  $\Delta$ 는 증기압 곡선의 기울기(kPa/°C),  $\gamma$ 는 건습계상수(kPa/°C)이다.

### 3.2 PDM의 적용

국가 수자원관리종합정보 시스템(WAMIS)에서 실시간으로 제공하는 자료부터 구축한 모든 강우 입력 자료를 Wageener and Lees(2001a, 2001b)에 의해 개발된 Rainfall Runoff Modeling Toolkit(RRMT)와 Monte Carlo Analysis Toolkit(MCAT)를 활용하였으며, PDM 모형의 매개변수 검정을 위하여 Monte Carlo 방법과 다목적함수 기법(multi-objective function)을 적용하였다. 100,000개의 모형 매개변수를 Table 1에서 주어진 범위에서 무작위로 추출하여 PDM 모형의 성

Table 1. Description of PDM model parameters

Parameters	Description	Range
$c_{max}$	Maximum storage capacity of the catchment	0-400 [mm]
$b$	Degree of spatial variability of storage capacity in the catchment	0-1.5 [-]
$k(q)$	Residence time quick flow reservoir	1-5 [dt]
$k(s)$	Residence time slow flow reservoir	15-400 [dt]
$\%(q)$	Percentage flow through quick flow	0.5-1 [-]

능을 다양한 목적함수로 검토하였다. 모형의 검정기간은 1992년 1월 1일부터 1996년 12월 31일까지, 검증기간은 1997년 1월 1일부터 2001년 12월 31일까지 사용되었으며 각각의 경우에 대해 초기 20%는 초기 조건의 영향이 크다고 판단되어 검정 및 검증에 고려하지 않았다.

#### 3.2.1 Rainfall Runoff Modeling Toolkit

RRMT는 개념적인 토양수분모형(Moisture Accounting Module)과 유역유출모형(Routing Module)을 모듈화 하고, 이들을 조합하여 강우유출모형을 구축하는 구조로 개발되었으며 사용자의 경험 및 유역상황에 따라 강우유출과정과 유역의 특성을 나타낼 수 있는 효율적인 모델링 도구이다(Wageener et al., 2004). RRMT는 GUI(Graphic User Interface)로 구성되어 화면을 통하여 사용자가 쉽게 모형을 조정할 수 있다. 입력자료는 강수량(P), 온도(T), 잠재증발산량(PET) 및 유량자료가 사용되며 토양수분모형으로부터 유효

강우량(ER)을 산정하고 이를 유출모형을 통하여 유량(Q)을 계산하게 된다. 기본적인 구조는 최적화 도구, 시각화 도구 및 자료정리 도구가 포함되어 있으며, 본 연구의 PDM 모형은 Moore의 확률분포형모형의 토양수분모형과 2개의 선형저류지 유출모형을 조합하여 구축하였다.

### 3.2.2 Monte Carlo Analysis Toolkit

MCAT는 RRMT와 마찬가지로 GUI의 다양한 분석도구로 구성되어 있다. Monte Carlo 방법과 Population evolution sampling 방법으로 생성된 많은 매개변수 샘플들을 기반으로 하여 최적의 매개변수를 산정하고 모형의 모의성과 불확실성을 분석하기 위한 다양한 기능을 구축하고 있다(Wagener and Lees, 2001b). MCAT는 이러한 분석방법을 이용하여 강우유출, 지하수흐름, 수질환경 등의 많은 연구가 진행되고 있다(Wagener and Kollat, 2007). 본 연구에서는 매개변수의 사후반응분포(posterior response surface), 매개변수의 검정근거(identifiability measure), 민감도 분석(regional sensitivity analysis) 및 다양한 목적함수들을 활용한 분석(multi-objective options)을 적용하였다.

## 4. 결 과

본 연구에서는 미호천 유역을 대상으로 PDM 모형의 매개변수를 산정하기 위해 Monte Carlo 방법의 사후반응분포, 검정근거, 민감도 분석 및 다목적함수 분석 등을 적용하였다. 또한 수문곡선의 저유량, 고유량 부분의 모의성능을 동시에 만족시킬 수 있는 목적함수를 Trade-off 분석하여 파레토 최적해를 산정하였다.

### 4.1 사후검정분포

사후검정분포(posterior response surface)는 모형의 변수구간에 걸쳐 균등하게 추출한 변수값들의 모의 성능에 따른 검정능력분포를 보여주는 것으로서 최적의 변수뿐만 아니라 변수들의 반응분포를 확인할 수 있는 장점이 있다. Fig. 5는 모의한 모형의 매개변수들의 NSE\* 목적함수에 따른 사후검정분포를 나타낸 것으로 주어진 범위 안에서 균등분포에 의해서 무작위로 샘플링한 매개변수들의 검정모의 성능을 목적함수로 검토한 결과를 보여주고 있다. 가로축은 매개변수의 범위, 세로축은 모형의 성능을 나타내는 목적함수 값을 나타

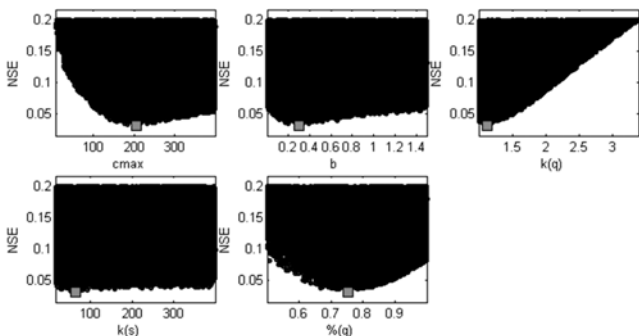


Fig. 5. Dotty plots of model parameters.

낸 것이며 각각의 점들은 매개변수세트를 표시한다. 매개변수 중 가장 우수한 모의 성능을 보인 매개변수는 사각형으로 표시하였다. 전 구간에 걸쳐 균등하게 샘플링한 매개변수들이 모의성능에 따른 분포를 통하여 매개변수의 검정능력을 평가한다. 매개변수들의 사후반응분포가 원추형으로 이렛방향으로 불룩한 형태의 분포를 가지고 있으며, 그 정점에 위치하는 형상을 보이는 매개변수를 검정근거가 뚜렷하다고 평가한다.  $k(q)$ 와  $\%(q)$ 는 검정근거가 뚜렷한 반면  $k(s)$ 는 전 구간에 걸쳐 우수한 성능을 모이는 매개변수가 분포하여 최적의 변수 선정에 어려움이 있다. 나머지변수들은 객관적으로 평가하기 어렵다.

### 4.2 검정근거

검정근거의 객관성을 높이기 위하여 Fig. 6의 매개변수의 검정근거(identifiability measure)가 고려되었다. 이는 변수의 구간을 임의로 나누어 각 구간내의 일정성능 이상을 보이는 변수의 빈도수를 막대그래프 및 누가빈도그래프로 표시한 것으로 이는 초기 모형변수들이 균등분포로 전구간에 걸쳐 균등하게 분포한 것과 우수성능을 보인 구간의 검정결과의 빈도수 및 누적분포의 기울기를 통하여 최적 변수의 근거를 산정한다.  $k(s)$ 는 전 구간에 걸쳐 균등하게 변수샘플이 분포하고 누가빈도그래프의 기울기가 45°를 보여주고 있다. 반면에 변수  $k(q)$ 의 경우에는 변수구간 1이하에 많은 변수가 분포하고 누가빈도그래프의 경사가 급하게 표시되고 있음을 확인할 수 있다. 이를 통하여  $k(q)$ 의 검정 근거가 뚜렷함을 객관적 지표를 통하여 보여주고 있다.

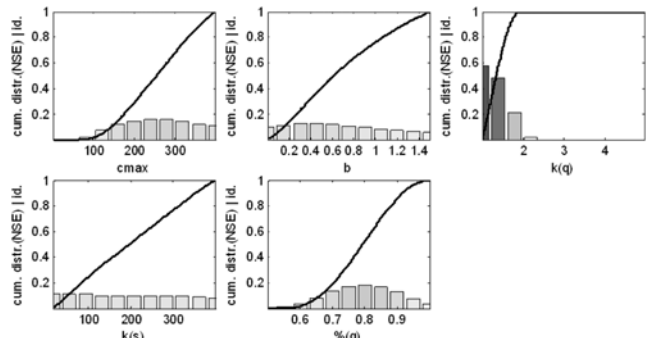


Fig. 6. Identifiability plot of model parameters.

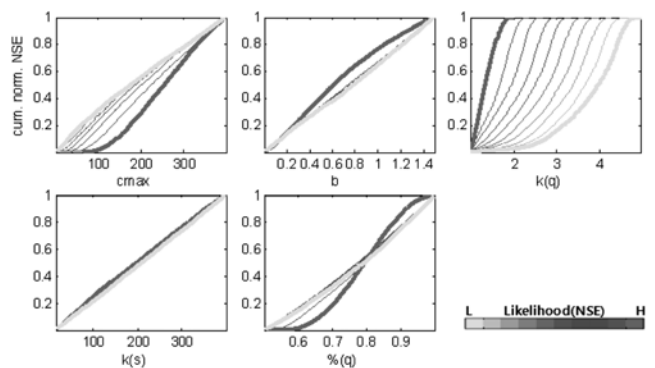


Fig. 7. Regional sensitivity analysis of model parameters.

### 4.3 민감도 분석

지역 민감도 분석(regional sensitivity analysis)은 Generalised (Hombberger-Spear-Young) sensitivity analysis라고도 하며 우수한 모의 결과(behavioral simulations, 붉은색으로 표시)와 우수하지 않은 모의 결과(non-behavioral simulations, 푸른색으로 표시)의 누적 분포의 편차를 이용하여 각 변수 구간(즉 지역)의 민감도를 분석하는 기법이다(Beven, 2001). 모형에 대한 매개변수의 영향을 확인하기 위하여 지역 민감도 분석한 결과는 Fig. 7에서 확인할 수 있다. 가로축은 매개변수의 범위, 세로축은 누적하여 정규화한 목적함수의 값을 표시하였으며, 모형변수  $k(q)$ 의 경우 Likelihood의 편차가 크게 분포하는 반면 나머지 변수들은 편차의 작음을 확인할 수 있다. Likelihood의 편차가 크다는 것은 그만큼 모형변수의 민감도가 크고 모형성능에 미치는 영향이 크다고 해석할 수 있다. 이는 모형변수  $k(q)$ 는 모형의 모의성능에 큰 영향을 미치고,  $cmax$  와  $\%(q)$ 는 민감한 반면  $k(s)$ 는 전구간에 걸쳐 민감하지 않으며 모형의 모의성능에 미치는 영향이 크지 않음을 확인할 수 있다.

MCAT 분석을 통하여,  $k(q)$ ,  $cmax$  및  $\%(q)$ 는 모형의 모의과정에서 일정한 역할을 수행하고 있음을 보여주고 있으나  $b$ 와  $k(s)$ 는 검정근거가 희박하고, 또한 민감하지 않으며 모의성능에 큰 영향을 미치지 못하는 결과를 보여주고 있다. 이러한 모형의 분석결과는 향후 유역의 특성을 반영한 모형의 개발의 기초 자료로 활용할 수 있다.

### 4.4 다목적함수 분석

각각의 목적함수에 대한 최적의 매개변수 및 모의결과를 Table 2에 표시하였고, Fig. 8의 다목적함수를 통하여 목적함수간의 상관관계를 분석하였다. 매개변수 최적화 과정은 목적함수의 영향을 받으며, 이는 최적의 매개변수 값들의 차이를 통하여 확인할 수 있다. 그러나 일부 목적함수(NSE\*와 RMSE)는 대표유량과 모의유량의 편차를 사용하는 목적함수의 유사성에 따라 동일한 최적변수를 얻었다. 이러한 사항을 Fig. 8에서 확인한 바와 같이 두 목적함수에 의한 매개변수들의 성능이 선형적인 관계를 보이며, 같은 내용의 목적함수 정보를 제공하고 있다.

Table 2. Optimum model parameters to multi objective function

	NSE* (0.032)	RMSE (0.884)	FQB (0.231)	FSB (0.115)	FDBL (0.094)	FDBH (0.738)
$cmax$	206.024	206.024	117.256	200.987	326.727	227.650
$b$	0.300	0.300	0.408	0.125	0.152	0.288
$k(q)$	1.127	1.127	1.684	1.255	1.319	1.087
$k(s)$	63.182	63.182	128.468	224.511	42.535	361.050
$\%(q)$	0.754	0.754	0.528	0.792	0.516	0.784

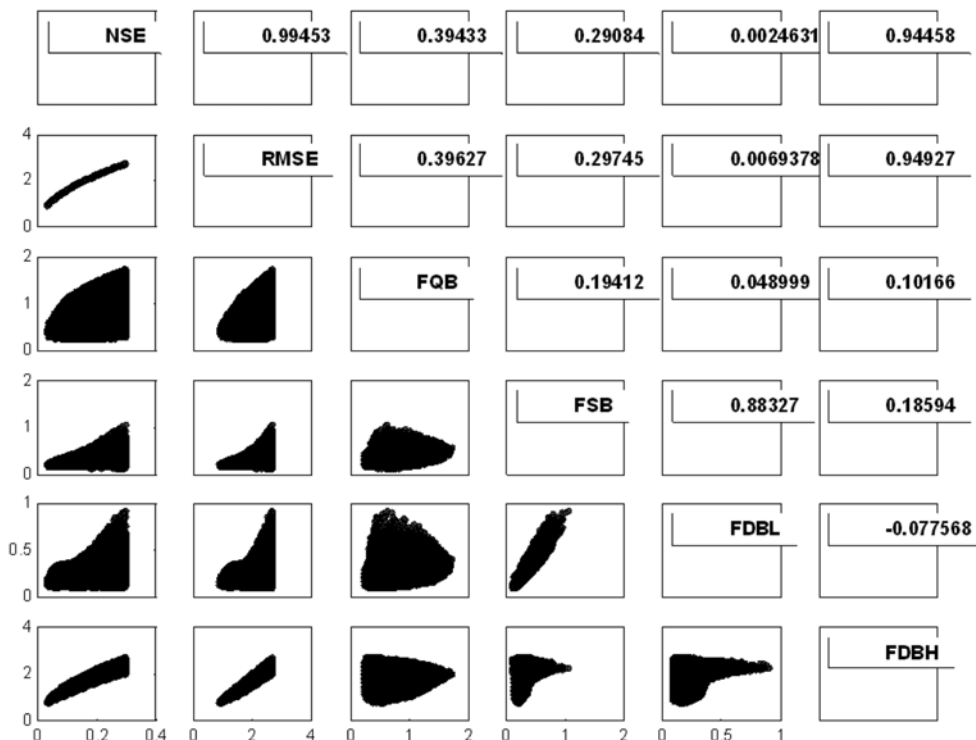


Fig. 8. Dotty plots of model parameters to multi objective function.

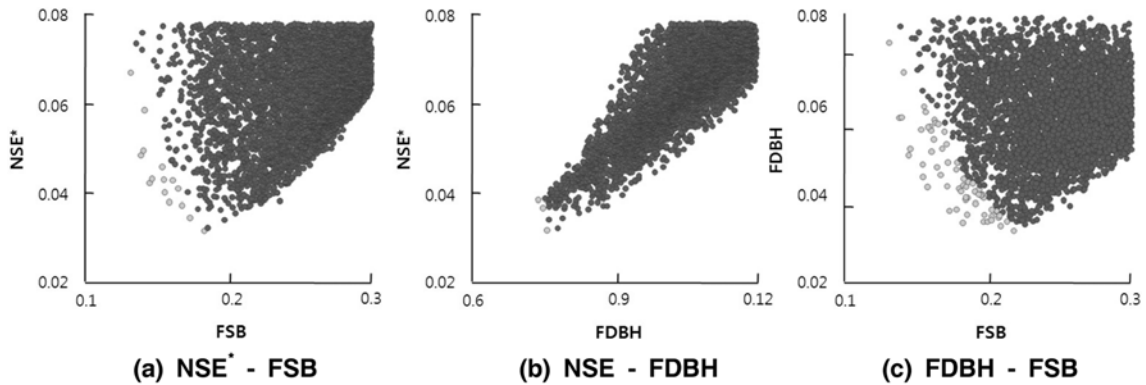


Fig. 9. Objective function values of evaluated parameter sets and corresponding Pareto sets.

여러 가지의 목적함수를 고려하여 모형의 성능을 주목적에 따라 검토하는 것이 바람직하다고 판단되나 각각의 목적함수의 효용성에 대한 검토가 필요하다. 이를 위하여 각각의 목적함수들의 상관관계를 분석하기 위하여 Fig. 8의 multi-objective plot을 사용하였다. 이는 각각의 Monte Carlo 매개변수 세트의 목적함수에 따른 성능을 표시한 것으로서, 최상단 좌측에 위치한 그림으로 설명을 하면 X축은  $NSE^*$ , Y축은  $RMSE$ 의 성능을 각각의 Monte Carlo 매개변수들의 성능을 표시한다. 또한, 확인할 수 있는 사항은  $NSE^*$ 와  $RMSE$ 의 값들은 서로 선형적인 관계이며 두 목적함수를 사용하였을 때 Table 2에서와 같이 최적의 매개변수는 일치함을 확인할 수 있다. 이러한 분석을 통하여 검토과정에서 선형적인 분포를 나타내는 두 목적함수는 비슷한 정보를 제공하며 반면에 비선형적인 분포는 다른 종류의 정보를 제공한다. 두 목적함수간의 상관관계의 정도는 숫자로 표기 가능하며,  $NSE^*$ 와  $RMSE$ 의 관계는 0.99453으로 가장 선형적인 분포를 보이고,  $FDBH$ 와도 각각 선형적인 관계를 보여 주고 있다. 이로부터  $NSE^*$ ,  $RMSE$ ,  $FDBH$ 가 동일한 목적함수 정보를 제공함을 확인하였으며, 고유량 부분의 목적함수로서  $FDBH$ 를 선정하였다. 저유량 부분의 목적함수인  $FSB$ 와  $FDBL$ 은 상대적으로 약한 상관관계를 보여주고 있다. 그러나 유사한 정보를 제공하므로 이 중  $FSB$ 를 저유량 부분의 목적함수로 선정하였다. Multi-objective plot 분석으로 목적함수들의 상관관계를 검토할 수 있으며, 유량곡선의 특성을 맞는  $NSE$ ,  $FDBH$  및  $FSB$ 를 통하여 다양한 목적에 맞는 유량예측의 가능성을 검토할 수 있다.

#### 4.5 파레토 최적해 분석

다목적함수를 사용할 경우 모든 목적함수에 대하여 동일한 최적의 매개변수를 선택하기는 거의 불가능하고, 이는 고유량 부분( $NSE^*$ ,  $FDBH$ ) 및 저유량 부분( $FSB$ )에서 각각의 최적 매개변수가 상이함을 확인할 수 있었다. 이러한 목적함수들의 결과가 서로 일치하지 않고 상충하는 경우에는 일반적으로 각각의 목적함수들의 결과를 Trade-off분석을 통하여 파레토 최적해(Pareto solution)를 구하였다.

고유량 부분과 저유량 부분의 모의성능을 동시에 만족시키는 매개변수를 산정하기 위하여 각 목적함수의 성능을 최소

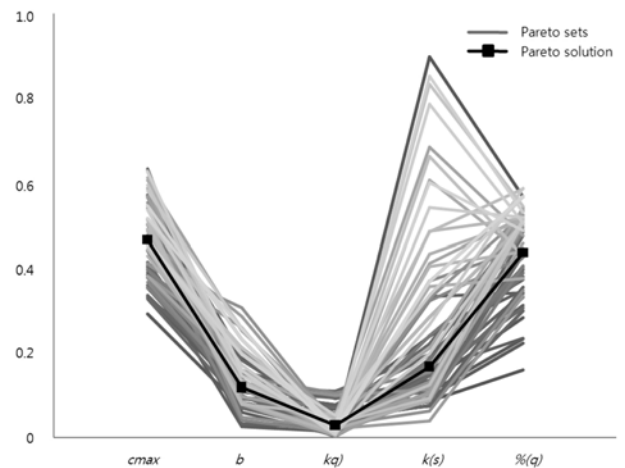


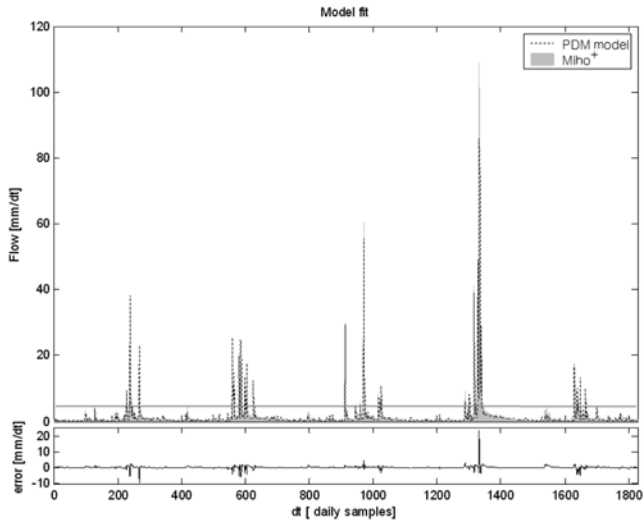
Fig. 10. Standardized parameter values for pareto sets and pareto solution

한으로 저하시키는  $NSE^*$ ,  $FDBH$  및  $FSB$ 에 대한 매개변수 세트와 Pareto sets을 Fig. 9와 같이 표시하였다. 이는 Fig. 8의 목적함수에 대한 부분을 확대하여 살펴본 내용이다.

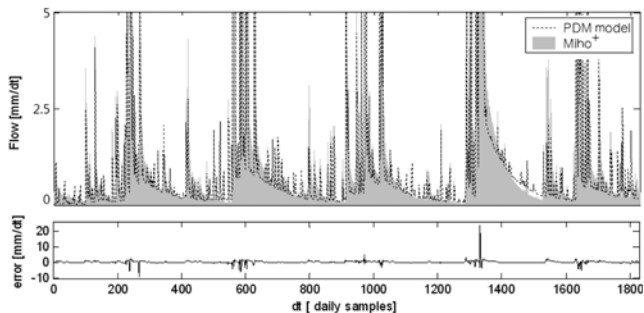
다목적함수의 관계  $NSE$ - $FSB$ ,  $NSE$ - $FDBH$ ,  $FDBH$ - $FSB$ 에서 Trade-off 분석을 한 Pareto sets을 표준화(standardization)하여 Fig. 10에 나타내고, 통계분석을 통한 Pareto sets의 중앙값(median)을 나타낸 파레토 최적해를 산정하였다.

미호천 유역에 대한 PDM 모형의 최적의 파레토 최적해를 적용하여 수문곡선을 나타내었다. Fig. 11(a)는 파레토 최적해를 사용하여 검토기간(1992년 1월 1일-1996년 12월 31일)에 대하여 모의한 수문곡선으로 점선은 모의된 유량, 회색부분은 대표유량을 표현하고 있다. Fig. 11(b)는 Fig. 11(a)의 회색선 이하의 저유량 수문곡선 부분을 확대 표시하고 있다. 유량곡선을 통한 목적함수와 같이 고유량, 저유량 부분에 대한 두 목적함수 모두 만족할만한 모의성능( $FSB= 0.161$ ,  $FDBH= 0.809$ )을 확인할 수 있다. 또한,  $NSE^*$  목적함수에서 알 수 있듯 전체적으로 우수한 모형 모의성능( $NSE^*= 0.035$ )을 확인할 수 있다. Fig. 12는 PDM 모형의 파레토 최적해를 이용하여 검증기간(1997년 1월 1일-2001년 12월 31일)에 대한 수문곡선을 보여주고 있다. 검토기간과 마찬가지로 전체적인 모의성능은 우수하였지만( $NSE^*= 0.050$ ), 침투유량의 부분에서 과다산정을 반복적으로 나타냈다.





(a) Hydrograph



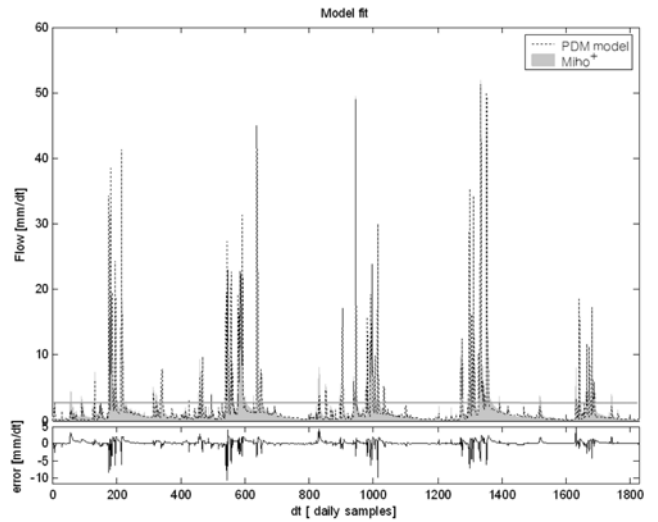
(b) Low stage Hydrograph

Fig. 11. Hydrograph of PDM in calibration period at Miho (3011) stream basin( $NSE^*=0.035$ ,  $FSB=0.161$ ,  $FDBH=0.809$ ), +representative outflow of Miho stream basin (WAMIS)

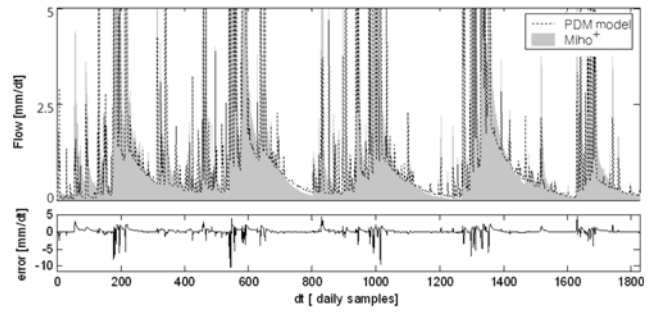
## 5. 결 론

본 연구는 PDM(Probability Distributed Model) 모형을 우리나라 유역에 적용하여 검토하였다. 미호천 유역을 대상으로 최소한의 수문자료를 입력자료로 이용하는 개념적 강우유출모형 PDM 모형에 적용하여 장기유출을 모의하였다. 또한, 다양한 목적함수를 활용하여 모형의 성능을 검토하였고, 매개변수 추정방법인 Monte Carlo 방법과 다목적함수를 이용한 파레토 최적해를 산정하였다. 이와 같은 연구를 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 과거 우리나라의 체계적인 수문 관측 시스템의 결함으로 유역자료(강수량, 증발량, 유량, 지질정보 등)의 부족으로 강우유출을 모의하는데 어려움이 있었으나 영국의 대표적인 개념적 강우유출모형(PDM)을 적용하여 장기유출 모의 결과 우수한 성능을 나타내었으며, PDM 모형을 적용함으로 최소한의 입력 자료를 가지고 강우유출을 모의할 수 있다고 판단된다.
- 2) 모형의 모의성능 향상을 위한 수문곡선의 세부적인 고유량, 저유량 부분에 초점을 맞춘 다양한 목적함수  $NSE^*$ ,  $FSB$ ,  $FDBH$ 의 효용성을 검토하여 최적의 매개변수를 추출하였다. 다목적함수를 사용한 수문곡선의 부분별 최적해를 산정한 다음 파레토 최적해 기법을 도입하여 수



(a) Hydrograph



(b) Low stage Hydrograph

Fig. 12. Hydrograph of PDM in validation period at Miho(3011) stream basin( $NSE^*=0.050$ ,  $FSB=0.276$ ,  $FDBH=1.010$ ), +representative outflow of Miho stream basin (WAMIS)

문곡선의 전구간에 적합한 파레토 최적해를 산정하므로 목적에 따라 홍수기 및 갈수기에 적합한 모의가 가능하다고 판단된다.

- 3) 매개변수 추정방법인 Monte Carlo 방법의 검증과정에서 MCAT의 다양한 기능(posterior response surface, identifiability measure, regional sensitivity analysis, dot plots of multi objective function)을 이용하므로 모형 매개변수들의 세부적인 내용 검토가 가능하여 모형의 모의 성능을 높일 수 있었다.
- 4) 현재 우리나라의 수문자료의 부족으로 강우유출모의의 어려움이 있는 중·소규모의 유역에 적합할 것으로 판단되므로 다양한 유역을 대상으로 PDM 모형의 검토가 요구되고, 향후 우리나라의 홍수량 산정 및 수자원 관리에 적용될 수 있다고 판단된다.

## 참고문헌

- 구보영, 김태순, 정일권, 배덕호 (2007) 다목적 유전자알고리즘을 이용한 Tank 모형 매개변수 최적화(II): 선호적 순서화의 적용. **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, Vol. 40, No. 9, pp. 687-696.
- 김승권 (2006a) 수자원 공학에서의 최적화 기법의 활용 (I). **한국수자원학회지**, 한국수자원학회, Vol. 39, No. 7, pp. 81-87.
- 김승권 (2006b) 수자원 공학에서의 최적화 기법의 활용 (II). **한**

- 국수자원학회지, 한국수자원학회, Vol. 39, No. 8, pp. 108-117.
- 김승권 (2006c) 수자원 공학에서의 최적화 기법의 활용 (III). **한국수자원학회지**, 한국수자원학회, Vol. 39, No. 9, pp. 83-94.
- 김태순, 정일권, 구보영, 배덕호 (2007) 다목적 유전자알고리즘을 이용한 Tank 모형 매개변수 최적화(I): 방법론과 모형구축. **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, Vol. 40, No. 9, pp. 677-685.
- 성윤경, 김상현, 김현준, 김남원 (2004) 다양한 목적 함수와 최적화 방법을 달리한 SIMHYD와 TANK 모형의 적용성 연구. **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, Vol. 37, No. 2, pp. 121-131.
- 이길성, 김상욱, 홍일표 (2005) 다중목적함수를 이용한 강우-유출 모형의 자동보정. **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, Vol. 38, No. 10, pp. 861-869.
- 정일권, 배덕호, 오윤근, 이환기 (2004) 장기유출모형의 모의능력에 관한 연구. **한국수자원학회 2004년도 학술발표회 논문집**, 한국수자원학회, pp. 1037-1041.
- Abbott, M.B., Bathurst, J.C., Cunhem, J.A., O'Connell, P.E., and Rasmussen, J. (1986) An Introduction to European Hydrological System-Systeme Hydrologique Europeen, (SHE): History and Philosophy of a Physically-Based Distributed Modeling System. *Journal of Hydrology*, Vol. 87, pp. 45-59.
- Beven, K. (2001) *Rainfall-Runoff Modelling The Primer*. John Wiley & Sons Ltd, Chichester, England.
- Beven, K and Kirkby, M. (1976) *A physically based variable contributing area model of basin*. Hydrological Sciences Bulletin, Vol. 24(1), pp. 43-69.
- Boyle D., Gupta H., Sorooshian S., Koren V., Zhang Z. and Smith M. (2001) Towards improved streamflow forecasts: The value of semi-distributed modelling. *Water Resources Research*, Vol. 37(11), pp. 2739-2759.
- CEH. (2005) *The Revitalised FSR/FEH Rainfall-Runoff Method*. Centre for Ecology & Hydrology, Wallingford.
- Gupta H.V., Sorooshian S., and Yapo P.O. (1998) Toward improved calibration of hydrologic models: Multiple and noncommensurable measures of information. *Water Resource Research*, Vol. 34, No. 4, pp. 751-763.
- Jakeman, A., Hornberger, G. (1993) How Much Complexity is warranted in a Rainfall-runoff model? *Water Resources Research*, Vol. 29(8), pp. 2637-2649.
- 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.
- Madsen Henrink (2000) Automatic calibration of a conceptual rainfall-runoff model using multiple objectives. *Journal of hydrology*, Vol. 235, pp. 276-288.
- Madsen Henrink (2003) Parameter estimation in distributed hydrological catchment modelling using automatic calibration with multiple objectives. *Advances in Water Resources*, Vol. 26, pp. 205-216.
- Moore, R. (1985) *The probability-distributed principle and runoff prediction at point and basin scales*. Hydrological Sciences Bulletin, Vol. 30(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.
- Raid, S., Marina, J., Bouchaou, L., and Najjar, Y. (2004) Rainfall-runoff model using an artificial Neural Network Approach. *Mathematical and Computer Modelling*, Vol. 40, No. 7-8, pp. 839-846.
- Sugawara, M., Watanabe, I., Ozaki, E., Katsuyama, Y. (1984) *Tank Model with Snow Component*. National Research Center for Disaster Prevention, Tchuchuba, Japan.
- Vieux, B.E. (2001) *Distributed Hydrologic Modeling Using GIS*. Kluwer Academic Publishers, Nowell. Massachusetts, Water Science Technology Series, Vol. 38.
- Wagener, T. and Kallat, J. (2007) Numerical and visual evaluation of hydrological and environmental models using the Monte Carlo analysis toolbox. *Environmental Modelling & Software*, Vol. 22, No. 7, pp. 1021-1033.
- Wagener, T. and Lees, M. (2001a) *Rainfall-Runoff Modelling Toolbox user manual*. Civil and Environmental Engineering Department, Imperial College London, London.
- Wagener, T. and Lees, M. (2001b) *Monte Carlo Analysis Toolbox user manual*. Civil and Environmental Engineering Department, Imperial College London, London.
- Wagner, T., Wheeler, H. and Gupta, H. (2004) *Rainfall-Runoff modeling in gaged and ungaged catchments*. Imperial College Press, London, UK.
- Young, P. (1999) Data-based mechanistic modelling, generalised sensitivity and dominant mode analysis. *Computer Physics Communications*, Vol. 117, No. 1-2, pp. 113-129.

© 논문접수일 : 09년 08월 06일  
 © 심사의뢰일 : 09년 08월 07일  
 © 심사완료일 : 09년 09월 28일