

PDMM 개념적 강우-유출모형을 활용한 북일 지역의 단기 홍수사상의 분석*

Analysis of Flood Events at Bukil, Korea using PDMM
Rainfall Runoff Model

Hyung Joon Chang**, Hyo Sang Lee***

School of Civil Engineering, 102, E8-6, Chungbuk National University, 52 Naesudong-ro, Heungduk-gu,
Cheongju, Korea

Abstract

Flood event data is a crucial resource for the flood risk assessment. However, there are few catchments which are precise gauged their flood event with sub hourly time step. Therefore, the ungauged catchment issues are especially highlighted in regionalization studies. In this study, the PDMM(Probability Distributed Model with Macro-pre Approach parallel routing structure) model is applied to Bukil, Guem river, Korea. 10 flood event data are carefully employed with Monte Carlo analysis and SCE-UA optimization procedure. The result shows that the PDMM model has acceptable model performance in all flood events, while preferable model performance(NSE* <0.2) in 7 flood events. However, SCE-UA results show marginally better performances. The PDMM model has better performance with larger amount of total rainfall, stronger rainfall intensity and delayed high precipitation time distribution(i.e., 3 rd Huff distribution). This study is a starting point to assess strength and weakness of the PDMM model with event based flood data. Further study will extend number of study catchments and flood events to suggest a general outlines of the PDMM model to Guem river region.

Key words: rainfall runoff model, calibration, validation, NSE

* 본 연구는 국토교통부 물관리연구사업의 연구비지원(11기술혁신C06)에 의해 수행되었습니다.

** Tel. +82-43-262-0312. E-mail. param79@chungbuk.ac.kr

*** Corresponding author. Tel. +82-43-261-2379. Fax. +82-43-275-2377, E-mail. hyosanglee@chungbuk.ac.kr

Submission & Publication Process

Received: May. 7, 2014 / Revised: Jun. 3, 2014 / Accepted: Jun. 9, 2014

국문초록

유역의 단기 홍수사상은 홍수재해의 위험성을 평가 및 분석하기 위한 기초 자료로서 그 중요성이 증대되고 있다. 하지만 국내 대다수의 중-소규모 유역의 수문 계측 자료의 미흡으로 홍수사상에 기반을 둔 모형의 개발과 관련된 연구는 미미하였다. 본 연구에서는 PDMM 개념적 강우 유출모형(Probability Distributed Model with Macro-pre Approach parallel routing structure)을 금강, 북일 유역의 관측된 10개의 단기 홍수사상을 바탕으로 평가한다. 몬테칼로(URS) 분석 및 SCE-UA 검정 기법을 통하여 모의 성능을 평가한다. URS 검정결과에서 우수 모의 성능(NSE*: 7사상<0.3, 10사상<0.5)을 나타내나, SCE-UA에의한 검정 이 조금 개선된 결과(약 0.01 NSE* 개선)를 나타내고 있다. 그러나 검증 결과에서는 URS 검정(0.18 NSE*)에 의한 결과가 안정된 성능을 나타내고 있다. 총강우량, 강우강도가 증가 할수록, 3분위 시간 분포를 가지고 있는 강우사상에 대하여 우수한 모의 성능을 나타내고 있다. 향후 금강 유역의 단기 홍수사상의 모의에 적용하기 위한 기초연구로서 의미가 있으며, 유역의 자료를 확대하여 본 연구의 결과를 일반화 하고자 한다.

주제어: 개념적 강우-유출모형, NSE, URS, SCE-UA

1. 서론

기후 변화 및 이상기후 등으로 인하여 집중호우, 가뭄, 대규모 태풍 등의 자연재해의 위험성이 증대되고 있다. 최근 국지적인 집중호우 발생으로 인해 막대한 인명피해와 재산상의 손실을 야기하였다. 이러한 재해 위험을 예방하고 방지하기 위하여 체계적인 유역 관리가 필수적이며, 이를 위한 유역 단위의 유출 특성 분석의 중요성이 증대되고 있다. 하지만 유역의 유출 특성을 분석하기 위해서는 유역의 신뢰할 수 있는 수문자료가 필요함에도 불구하고 많은 유역의 경우 이러한 자료가 충분치 않다. 이는 국내뿐만 아니라 국외도 같은 여건이다. 그러나 국내에는 미 계측 유역의 유출 특성 분석에 관한 연구가 미미하며, 특히 중소 규모의 유역의 효율적인 수문관리가 어려운 실정이다. 이를 해결하기 위해 개념적 강우 유출 모형의 매개변수 지역화 연구는 위와 같은 연구의 어려움을 해소할 수 있는 연구로 제시되고 있다. 다양한 개념의 강우 유출모형이 폭넓게 적용되고 있다.

1990년대 이후 컴퓨터의 발전 및 활용할 수 있는 자료의 비약적인 확대에 인하여 연구적인 측면에서 많은 입력 값과 계산을 필요로 하는(예, GIS, 격자기반의 흐름방정식의 해석 등) 물리적 분포형 모형이 다양하게 연구되고 있다. 차상화·이순탁(2002)은 낙동강 수계의 강우, 수위 및 유량자료를 이용하여 Snyder 합성단위유량도인 SUH를 유도하고 3개의 호우사상을 통하여 GIS-SUH모형과 SUH모형의 유출량 비교 분석을 실시하였다. 그 결과 GIS를 이용하여 Grid 분석을 실시하여 상관분석을 한 GIS-SUH 모형이 기존의 SUH 모형보다 유출현상을 더 정확히 모의하는 것으로 나타났다. 최용준·김주철(2010)은 기존의 면적 평균강우량이 공간적인 상관관계를 고려하기 위하여 Kriging기법을 적용하여, HyGIS-GRM을 이용하여 분포형 강우자료로 만들어 위천 유역의 강우-유출모의를 실시하였다. 그 결과 분포형 유출모형의 가장 중요한 입력변수인 강우자료의 형태에 따라 유출수문곡선의 차이를

볼 수 있었으며, GIS를 이용한 격자 기반의 분포형 유출모형과의 결합으로 실시간 분포형 강우-유출 해석의 가능성을 제시하였다. 정인균 외(2010)은 충주댐 유역을 대상지역으로 원격탐사기법으로 구축된 SRTM(The Shuttle Radar Topography Mission) DEM과 기존 수치지형도로부터 구축한 TOPO DEM을 격자기반 분포형 강우-유출모형인 KIMSTORM(grid-based KIneMatic wave STOrn Runoff Model)에 적용시켜 6개의 강우 사상을 모의·분석하였다. 그 결과 초기토양수분함량이 유출용적에 민감하였고, 하천조도계수는 침투유량에 가장 민감한 변수로 나타났다.

연구적인 목적에서 물리적 모형의 연구가 최근 많이 진행된 반면 미계측 유역에서의 자료의 확보의 어려움 등의 이유로 인해 실제 적용의 측면에서는 개념적 강우-유출모형이 일반적으로 사용된다. 영국의 Flood Estimation Handbook의 미계측 유역의 적용부분이 대표적이다. 국내의 경우 가장 널리 사용된 대표적인 강우-유출 모형에는 미 공병단에서 개발한 HEC-1과 HEC-HMS 그리고 SSARR, 일본의 Tank 모형 등이 있다. 국내외 개념적 강우-유출 모형의 주요 연구현황은 다음과 같다.

박준일 외(2000)는 개념적 강우-유출모형인 HEC-HMS를 남강댐 유역에 적용함으로써 적용성을 평가하였다. 그 결과 HEC-HMS는 침투 유출량 및 직접 유출고를 잘 모의함을 확인 하였다. Flint, *et al.*(2001)은 적은 강우(대략 170mm/yr)의 불포화성지역인 Nevada주의 Yucca Mountain을 대상으로 한 개념적 모형을 제시하였으며, Dunn and Lilly(2001)는 개념적 유역-스케일 수문학적 모델의 토양분류와 매개변수사이의 관계에 대한 조사를 실시하였다. 토양의 수문적 분류는 HOST(Hydrology of Soil Types)으로 개념적 모형은 DIY model의 매개변수의 효과의 관계를 알아보기 위하여 Monte-Carlo simulation을 이용하여 역 모델링 하였다. 안승섭 외(2002)는 기존 강우-유출분석 시 사용되는 인자인 지형·지질특성, 토지피복상태 등의 인자를 고려치 않고 단순히 유역 하천 분기 특성만을 고려한 유출 해석방법을 제안하였다. 사용된 모형은 순간단위도 모형인 Clark 모형과 GIUH 모형을 사용하였으며, GIUH모형을 이용할 경우 기존 사용되던 Clark 모형에 비해 침투홍수 발생시간이 늦는 것으로 검토되었다. 또한 이준우 외(2003)는 경안천 유역을 대상으로 HEC-1모형을 이용하여 1980년-2000년 동안의 토지피복 변화에 따른 수문변화 분석을 수행하였다. 총 유역면적에 대한 도시면적은 약 5.6%가 증가하였으나 모의결과 1986년-2000년 동안의 침투유출 시간은 약 4시간 감소, 침투유량은 456cms가 증가함을 확인 하여, 유역 개발 에 따른 영향을 평가 하였다.

Kuczera, *et al.*(2006)은 개념적 강우-유출 모형의 평가는 잠정적 또는 공간적 평균을 포함하고 있기 때문에 추계학적 분량으로써 다루어져야만 하는 모형의 흐름을 말하고자 하였으며, 개념적 강우-유출 모형의 종합적 오차 분석에 대한 연구를 실시하였다. 권현한 외(2008)는 국·내외에서 주로 이용되고 있는 NWS-PC 강우-유출모형을 대상으로 매개변수 추정과 불확실성 분석이 가능한 Bayesian Markov Chain Monte Carlo 기법과 결합하여 국내 소양강댐 유역 일유입량 모의에 적용하였다. 이는 실측 일유량 자료를 대상으로 모형을 검증하였으며, 총 13개의 매개변수에 대한 사후분포를 추정하여 유출수문곡선의 불확실성 구간을 추정하였다. 그 결과 검증 및 검증 모두에서 Bayesian Markov Chain Monte Carlo 기법이 모형의 적합성 측면에서 기존 방법론과 비교해 보면 다소 우수하거나 비

슷한 결과를 나타나, 불확실성이 접목된 강우-유출 분석이 이루어진다면 보다 합리적으로 홍수 위험도 분석이 가능하다고 판단하였다. 김주철 외(2010)는 미계측유역의 설계홍수량을 산정할 경우 적용하는 강우-유출모형의 종류에 관계없이 신뢰성 있는 매개변수의 추정이 필요하다는 것을 인식하며 굴포천 유역을 대상으로 경험식을 통한 매개변수의 타당성을 HEC-1 모형에 적용함으로써 검토하였다. 그 결과 도달시간 산정식인 Kraven1공식과 Kraven2공식은 기존 실무에서 사용하는 Kirpich 공식보다 더 안정적인 결과를 얻을 수 있다는 결과를 도출하였다.

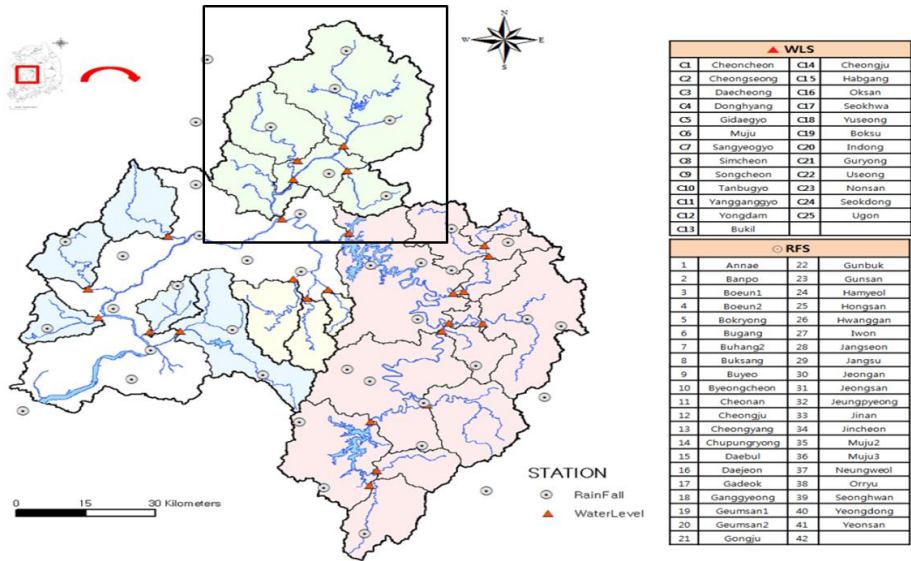
본 연구에서는 금강 유역의 장기 유출 특성(최호훈·이효상, 2012; 이소정 외, 2014)에서 우수한 모의 성능을 보인 PDMM(Probability Distributed Model with Macro-pre Approach parallel structure) 강우 유출 모형을 대상으로 금강-북일 유역의 단기 유출 특성을 분석하고자 한다., 미호천 유역의 단기 홍수 유출 특성과 PDMM 모형의 적용 특성을 분석한다. 이를 통하여 금강 유역의 종합적인 유역 수문분석의 기초자료를 제공하고자 한다.

II. 대상 유역 및 연구 방법

1. 북일 유역

북일 유역은 금강 상류에 속해 있는 미호천 유역 내에 위치하고 있으며, 유역 면적은 909.1km^2 이다. 북일 유역은 도시화 비율이 낮으며, 상류에는 대규모 댐이 위치하고 있지 않으므로 비교적 인위적인 홍수 조절로부터 자유로운 대표적인 자연 유역으로 평가받고 있다.

<그림 1>은 금강 유역의 강우 관측소와 수위관측소의 현황을 나타내고 있다. 북일 유역은 <그림 1>의 박스부분에 위치하고 있으며, 박스의 좌측 하단부에 북일 수위관측소가 위치하고 있다. 금강 유역에 관한 일반적인 현황과 북일 유역의 대표 유역특성인자들은 <그림 1> 및 <표 1>과 같다.



<그림 1> 금강 유역 현황도

<표 1> 북일 유역의 유역 특성 인자

	면적(km ²)	유로 연장(km)	평균 표고(m)	평균 경사(°)
북일	909.10	35.63	151.17	9.72

본 연구에서 적용된 PDMM 강우-유출 모형의 수문 입력 자료는 강우량, 기온, 잠재증발산량 및 유역유출 유량이다. PDMM 강우 유출 모형에 사용되는 강우 자료는 면적평균 강우량을 사용하였으며, 강우관측소는 북일 유역에 근접한 가덕과 진천, 병천, 증평, 청주 강우 관측소를 선정하였다. 또한, 유역의 기온자료는 청주기상청의 기온을 사용하였으며, 유역의 증발산량 자료는 국제식량농업기구(FAO: Food and Agriculture Organization of the United Nations)에서 개발한 FAO Penman-Monteith 방법을 이용하여 산정하였다(김재철, 2010).

수문 자료는 국가수자원관리시스템(Water Management Information System, WAMIS) 및 기상청의 기상자료를 바탕으로 준비되었으며, 결측 및 자료의 오류 등을 고려하여, 2004년부터 2011년까지의 시자료를 우선 고려하였다. 수집한 자료로부터 총 10개의 홍수 수문 사상이 확보되었으며, 이를 본 연구에서 적용하였으며, 이는 <표 2>와 같다.

<표 2> 북일 유역의 단기 홍수 수문 사상

Events	Start date	End date	강우지속시간 (hr)	총강우량 (mm)	최대강우강도 (mm/hr)	Huff 분위
1	2004-06-19	2004-06-22	70	311.1	35.6	3
2	2005-07-28	2005-07-30	22	59.8	18.4	1
3	2006-07-13	2006-07-20	73	290.3	23.4	3
4	2007-07-24	2007-07-26	19	85.1	18.0	1
5	2007-08-04	2007-08-06	31	131.0	17.9	1
6	2009-07-14	2009-07-15	26	67.2	24.9	2
7	2010-07-16	2010-07-19	30	67.0	7.0	1
8	2010-08-10	2010-08-12	21	28.4	4.8	2
9	2011-04-29	2011-05-04	29	90.1	14.2	1
10	2011-05-31	2011-06-02	13	41.7	9.2	1

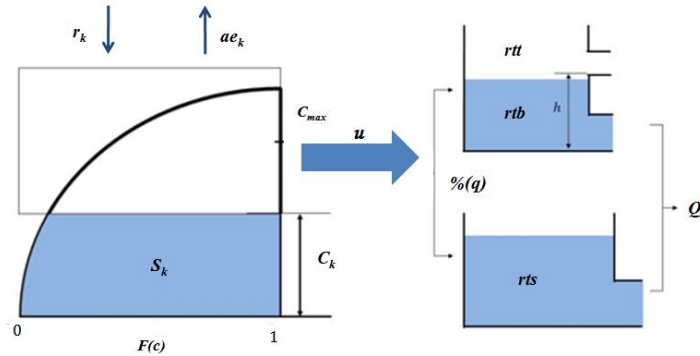
홍수 수문사상은 단일 수문사상을 위주로 선정하였으며, 강우의 지속 기간은 13시간부터 70시간 까지 분포하고 있다. 총강우량(및 강우 강도)의 분포는 28.4mm(4.8mm/hr)부터 311mm(35.6mm/hr)까지 위치하고 있다. 또한 최대 강우 강우량이 발생한 부분의 Huff분위는 1,2 및 3분위로 고르게 분포하고 있다.

1) 모형 도구

본 연구에서는 유역의 유효 우량을 고려하여 유량을 산정하는 토양저류(Soil Moisture Accounting) 부분과 유역의 유출에 관계가 있는 유역 추적(Routing) 부분이 다수의 모듈형으로 구성된 강우유출모형 도구인 Runoff Rainfall Modeling Toolkit(RRMT, 2014)를 적용한다. 또한 Monte Carlo Analysis Toolbox(MCAT, 2014)을 활용하여, URS(Uniform Random Sampling) 및 SCE-UA(Shuffled Complex Evolution - University of Arizona) 검정 기법을 적용한다. 본 연구에서는 금강 유역의 장기 유출 특성(최호훈·이효상, 2012; 이소정 외, 2014)에서 우수한 모의 성능을 보인 PDMM(Probability Distributed Model with Macro-pre Approach parallel structure)강우 유출 모형을 북일 유역의 단기 홍수 사상에 대하여 적용성을 평가한다.

(1) PDMM 강우 유출 모형

PDMM은 분포형 확률 저류함수 모형(Probability Distributed Model, SMA)을 활용하여 유역의 유효강우량을 산정하고, 이를 지표하의 빠른 흐름(Interflow or Macrospore routing)의 특성을 반영한 병렬 2선형 저류지 유출 모형(Macropre Approach-Parallel Structure, Routing)의 유역추적모형에 적용한 모형이다. 다음 <그림 2>는 PDMM 모형의 개념도이다.



<그림 2> Schematic description of the PDMM

※ 자료: Moore(2007).

PDMM 모형의 토양저류함수로 적용된 PDM 모형은 유역을 공간적 분포를 갖는 토양수분 저장 용량(soil moisture storage)의 확률분포로 개념화한 모형으로 유출 모형으로 Moore(1985)가 제안하였다(Moore(2007)). 이후 영국의 홍수량 산정 방법(Flood Estimation Handbook: Supplementary Report 1)의 강우-유출모형에 유효 우량 산정을 위한 토양저류함수 모형으로 적용되고 있다(Kjeldsen, 2009). 토양수분저장 용량이 유역 전역에 걸쳐 다양하게 나타나고 시간에 따라 포화된 유역의 분포도 변화가 가능하며, 이러한 시간에 따른 유역의 토양수분저류 용량의 분포는 다음 식(1)과 같은 Pareto 분포함수(Pareto distribution function)로 표현된다(Lee, 2006).

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

(여기서, c는 토양수분저류 용량, 는 유역의 최대 토양수분저류 용량, b는 유역의 토양수분저류 용량의 공간적 변화이고, b가 1이 된다면 토양수분저류 용량이 유역에 걸쳐 동일하게 분포하며, b가 0과 같으면 토양수분저류 용량은 일정한 값을 갖는다.)

유역의 유출은 토양저류함수 모형에서 산정된 유효강우량을 개념적 유역유출모형으로 산정하게 된다. PDMM은 빠른 지표 하 흐름을 고려한 병렬 2선형 저류지 유출 모형(Macro-pre Approach, Parallel Structure)을 사용하였으며 이는 일반적인 병렬 2선형 저류지 모형에 빠른 흐름을 반영하는 저류지에 지표하 흐름(Macropore Mechanism, Interflow)을 반영하는 유출구를 적용한 형태이다(Wagener, 2001b).

모형 매개변수는 유역의 최대 저류 용량인 Cmax, 유역 저류 용량의 확률적 모양을 나타내는 b, 유효 강우량이 빠른 반응 저류지로 가는 비율인 %q, 빠른 반응의 저류지에서의 체류 시간과 지표하 유출 고인 k(t), k(b), h 와 느린 반응의 저류지의 체류시간 k(s)로 구성되어 있다. <표 3>은 PDMM 강우-유출모형의 매개변수를 나타낸다.

<표 3> Parameters of PDMM

Parameters		Description	Range
SMA	Cmax	Maximum storage capacity of the catchment	1-1000(mm)
	b	spatial variability of storage capacity in the catchment	0-2
R	k(t)	Residence time from top outlet of quick flow reservoir	1~15 [dt]
	k(b)	Residence time from bottom outlet of quick flow reservoir	1~15 [dt]
	h	Threshold of quick flow reservoir	0~100 [mm]
	k(s)	Residence time slow flow reservoir	15~300 [dt]
	%q	Percentage flow through quick flow reservoir	0~1 [-]

※ SMA: Soil Moisture Accounting, R: Roting

(2) 몬테 칼로 분석 도구(MCAT)-URS

Monte-Carlo Analysis Toolbox(MCAT)은 영국의 임페리얼 칼리지에서 개발한 강우 유출 모형의 적용성 분석 도구로서 Monte-Carlo 방법을 통해 생성된 많은 매개변수 샘플들을 기반으로 하여 최적의 매개변수를 산정하고, 모형의 성능과 불확실성을 분석하기 위한 다양한 분석 사후반응표면(Posterior Response Surface), 식별성 측도(Identifiability Measure), 민감도 분석(Regional Sensitivity Analysis))을 수행한다(Wagener, *et al.*, 2004).

Monte-Carlo 방법은 입력변수에 대하여 일정 범위에서의 균일한 난수 발생을 통하여 수학적인문제들의 최적해를 도출해내는 방법이다(Metropolis, *et al.*, 1949; 최호훈, 2012). Monte-Carlo 방법은 각 난수 발생 단계마다 모형구조에 대한 하나의 출력값이나 출력값들의 집합을 도출할 수 있다. 이러한 출력들이 모였을 때 빈도분포의 향으로 구성된 예측을 할 수가 있고, 빈도분포의 정확도는 모의수행의 횟수에 달려있다. Monte-Carlo 방법은 개념적으로 단순하고 이론적으로 타당하여 많은 연구자들에 의해 수치모형에 적용되었으며, 또한 이미 알고 있는 확률분포로부터 많은 양의 자료를 생성하거나 복잡한 수자원시스템의 확률적 거동을 연구하는데 많이 사용되고 있다(최호훈, 2012).

Monte-Carlo 방법은 실제에 대한 가정과 이에 대한 모형과의 일련의 조합을 기초하여 실제 상황을 반복적으로 수행하는 모의발생 과정으로 공학적인 목적을 위하여 시스템의 실행이나 반응을 예측하거나 조사하는데 적용될 수 있다. 모의수행 과정은 매개변수로 규정된 일련의 값들을 이용하여 모형의 실행이나 반응에 대한 구체적이고 정량적인 결과를 얻게 된다. 많은 연구자들에 의해서 Monte-Carlo 해석 결과가 확정론적 결과에 비해 안정된 해를 제시하는 것으로 나타났다(최현상·한건연, 2004).

Uniform Random Search(URS) 방법은 Monte-Carlo 최적 매개변수의 검색 방법 중의 하나로 본 연구에서 적용하고자 하는 최적화 방법이다. URS 방법은 검색하고자 하는 매개변수의 범위 내에서 균등하게 분포한 난수를 전 범위에 걸쳐 균등한 개수로 모집단을 발생시켜 이를 모형에 적용하여 반응표면을 확인하고, 그 중 가장 좋은 목적함수 결과를 보여주는 매개변수를 찾아가는 방법을 기초로 하고 있다(Beven, 2001). 이는 모형 및 모형 변수의 선행 조건을 모르는 가장 일반적인 상황에 반영하고 있다.

(3) SCE-UA 최적화 기법

Shuffled Complex Evolution - University of Arizona(SCE-UA) 방법은 미국의 아리조나 주립대에 서 Simplex method(Nealder and Mead, 1965), Competitive Evolution(Holland, 1975), New Complex Shuffling Concept(Duan, *et. al.*, 1992)를 단순화하여 개발한 전역적 최적화 기법이다. 본 최적화 기법은 모형의 검정에 있어서 전역적 매개변수 최적화 기법인 유전자 알고리즘(Genetic Algorithm)보다 우수한 결과를 보여준다고 알려져 있다(Wagener, 2004).

Controlled Random Search(CRS) 기법을 기반으로 하는 전역 최적화 기법으로써 Competitive evolution 개념과 Complex shuffling 개념이 추가된 기법이다. SCE 계산과정은

- ① 모집단으로부터 임의적으로 표본이 수집된다.
- ② 모집단이 complex 단위로 분할된다.
- ③ 각각의 complex가 독립적으로 downhill simplex 방법에 의하여 진화한다.
- ④ 모든 complex 가 서로 간에 섞임으로써 또 다른 complex 집합을 형성해 간다.
- ⑤ 위와 같은 절차를 계속적으로 반복해 나가면서 최적의 매개변수 값을 찾아나간다.

SCE-UA 기법은 가능해 공간에서 무작위 추출을 통한 초기 모집단(population)을 형성한다. 적합 매개변수 공간은 매개변수들의 최소값과 최대값의 범위를 정의하여 결정되며, 초기 집단의 무작위 추출 후에 $2n+1$ 개의 점으로 구성된 집합체로 분할된다(이용근, 2012).

III. 강우 유출 모형의 적용 및 결과

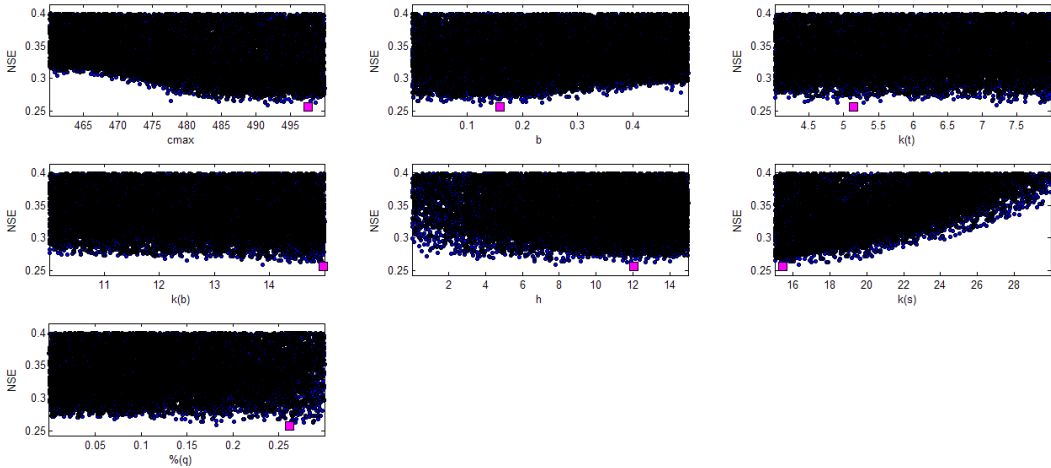
모형의 적용은 모든 사상에 대하여 동일하게 수행하였으며, 복일 유역의 1번 적용을 통하여 설명한다. 해당 유역의 강우 유출 모형을 적용하기 위해 2004년부터 2011년까지의 수문자료를 활용하여 총 10개의 사상(시간 단위)을 구축하였으며, PDMM에 적용하여 검정 및 검증 실시한다.

강우 유출 모의를 위해 각 매개변수들의 검정 범위 내에서 최적화 방법인 URS 방법과 SCE 방법을 각각 적용하여 각 10,000번의 무작위 매개변수들을 생성하여 모형에 적용한다. 검정 후 URS방법으로 인한 매개변수 추정에는 몬테칼로 방법을 통하여 사후반응표면, 식별성 측도, 민감도 분석을 통해 유역을 가장 잘 반영하는 최적 매개변수를 선정한다. 최종적으로 두 가지 방법으로 추정한 이들 매개변수의 적합도를 판단하기 위해 목적함수(NSE*)를 활용하여 분석한다.

1. URS-몬테칼로 분석

1) 사후반응표면

사후반응표면(Posterior Response Surface)은 임의의 변수구간 내의 균등한 수의 매개변수 값을 추출하여 목적함수로서 평가하는 모형성능에 따라 도시한 그림으로서 최적의 매개변수뿐만 아니라 변수와 목적함수와의 분포관계를 확인할 수 있는 장점이 있다. 사후반응표면은 4개의 모형이 적용되므로 4개의 분석이 실시된다. 본 연구에서는 홍수사상 5의 PDMM모형의 경우를 일련의 예로 분석한다.



<그림 3> Dotty plots of model parameters(PDM-2PAR, NSE*=0.0094, bukil)

<그림 3>은 독일 유역의 PDMM모형의 매개변수들의 사후반응표면을 통해 URS 샘플링 한 매개변수를 나타낸 것이며, 가로축은 PDMM 매개변수(cmax, b, k(t), k(b), h, k(s), %(q))의 범위, 세로축은 모형의 성능(NSE*)을 나타내는 목적함수의 값을 나타낸다. 목적함수인 NSE*값이 가장 작은 즉, 모형의 성능이 가장 좋은 매개변수는 사각형박스로 표시한다.

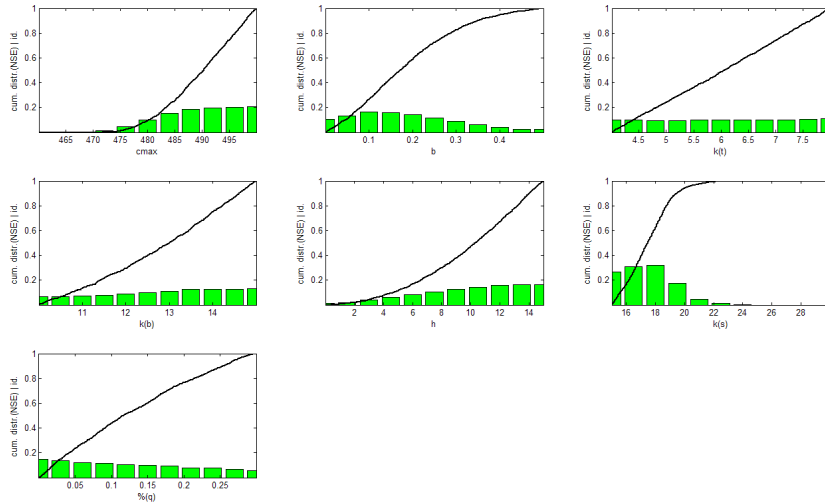
매개변수 b, k(s), k(t), k(b), h, %(q)는 매개변수 범위 전 구간에 걸쳐 목적함수 NSE*값이 고르게 분포한다. 이에 반해 cmax의 경우는 매개변수의 범위가 450이상으로 갈수록 가장 목적함수의 성능이 좋아진다. k(s) 매개변수는 값이 15에 가까워질수록 가장 성능이 좋은 매개변수를 찾을 수 있다.

사후반응표면이 아랫방향으로 볼록한 원추형의 형상을 가지거나 일정 범위 내에 집중하는 형태를 보이는 매개변수를 검정 근거가 뚜렷하다고 평가하며, 균등하게 분배되어 있는 형상을 가지는 것을 검정 근거가 뚜렷하지 않다고 평가한다(Wagener, *et al.*, 2004). 따라서 cmax, b 및 k(s)의 분포가 일정 범위 내에 집중하는 형상을 띄므로 검정근거가 뚜렷하다고 평가 가능하다.

2) 식별성 측도

식별성 측도(Identifiability Measure)는 어떠한 특정성능 이상의 매개변수들의 빈도수를 임의의 매개변수 구간에 도시한 그래프를 나타낸다. 매개변수의 빈도수는 막대그래프 및 누가분포그래프를 통

해 나타나며 이는 사후반응표면의 검정근거를 보다 객관성 있게 표현할 수 있다는 장점이 있다. 검정 근거도 사후반응표면과 동일하게 모든 사상에 적용되며, 다음 <그림 4>는 홍수사상 5의 예이다.



<그림 4> Identifiability plot of model parameters(PDM-2PAR, NSE*=0.0094, bukil)

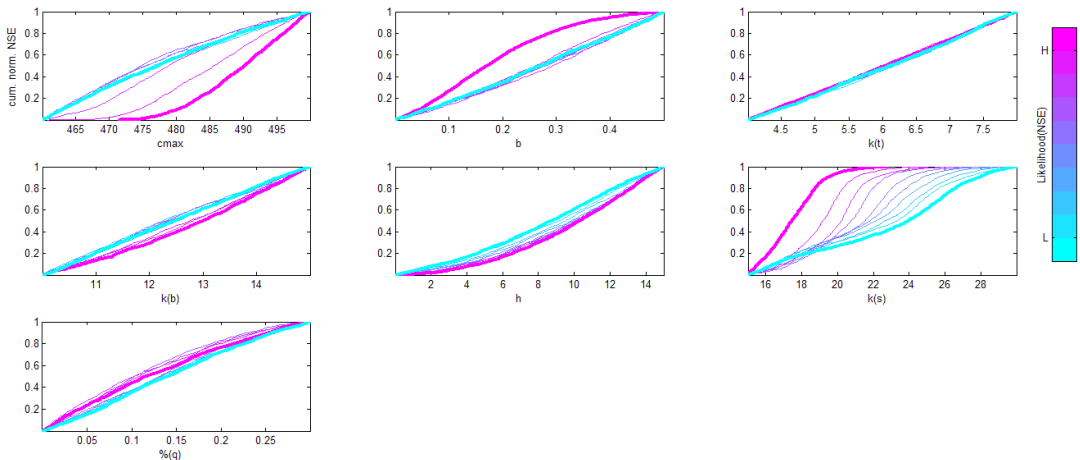
<그림 4>는 북일 연구유역의 검정근거이며, 가로축은 매개변수의 종류, 세로축은 일정 성능 이상 목적함수 값의 누가울을 나타낸다. 매개변수 $k(t)$ 와 $k(b)$ 는 NSE* 값 0.1 내외의 막대그래프가 전 구간에 걸쳐서 거의 균일하게 분포하고 있다. 이는 전 구간에 걸쳐 변수가 고르게 분포함을 나타내며, 누가분포 그래프는 45도의 일정한 경사를 가지는 것을 확인할 수 있다. 그러나 b 와 $k(s)$, $\%(q)$ 의 경우 매개변수의 범위 중 앞부분에 긴 막대그래프가 분포하고 있으므로 일정성능 이상의 목적함수 빈도개수가 많이 분포하고 있다. 때문에 누가분포 그래프는 전반부에서 45도보다 높은 기울기로 급격히 증가하다가 후반부에서는 완만한 형태의 위로 볼록한 그래프가 도시된다. 마지막으로 $cmax$ 의 경우 매개변수 값 460-500사이에 일정성능 이상의 매개변수가 많이 존재하므로 0-160까지는 완만한 곡선을 그리다가 460-500범위에서 급격히 위로 상승 그래프가 얻어지며, 이용 바탕으로 매개변수의 식별성이 크다고 판단한다.

3) 민감도 분석

민감도 분석(Sensitivity Analysis)은 우수한 모의 결과와 우수하지 않은 모의결과의 누가분포의 편차를 이용하여 각 변수구간의 민감도를 분석하는 기법이다(Beven, 2001). 즉, 사후반응표면 산정 결과에 임의의 목적함수 기준 값을 설정하고 그 값보다 좋은 값들을 반응조(Behavioural set), 설정값보다

적은 값들을 비반응조(Non-behavioural set)으로 정의한 후 반응조의 누가분포 그래프와 비반응조의 누가그래프를 비교하여 민감도를 분석한다. 일반적으로 민감도가 높은 매개변수는 두 누가그래프 사이의 폭이 크며 그와 반대로 민감도가 작은 매개변수는 경우에는 두 그래프의 폭이 좁다.

<그림 5> 는 사상 5의 분석 결과이며 우수한 모의 결과의 누가분포는 붉은색으로 표시, 우수하지 않는 모의 결과의 누가분포는 파란색으로 표시하였다. 그래프의 가로축은 매개변수를 나타내며, 세로 축은 누가확률을 나타낸다. 앞서 분석한 결과와 같이 Cmax, b 및 k(s)가 민감함을 확인하였다. 사상 5의 민감도 분석 결과에서는 토양 습윤 모형의 매개변수들이 특별하게 민감하게 반응하며, 유역이 가지는 저류 용량 및 그에 대한 유출 반응이 모형의 성능에 큰 영향을 미치고 있다. 상당히 유효하다는 것을 보여준다.



<그림 5> Regional Sensitivity Analysis of Model Parameters(PDM-2PAR, NSE*=0.0094, bukil)

2. 결과

본 연구의 강우 유출 모의는 PDMM 강우 유출모형에 북일 유역의 10개 사상을 적용하여 MCAT 분석을 수행 하였다. 검정 사상 별로 URS 방법 및 SCE 방법을 적용하여 모형의 매개변수를 최적화 하는 검정 절차를 수행하였다. 그리고 목적함수(NSE*)와 모의 수문곡선을 활용한 평가를 통하여 모형의 성능을 평가하였다. <그림 6>은 PDMM 모형의 사상 2,3 및 5에 대한 검정 수문곡선을 나타내며, 첨두 홍수량과 전체적인 수문곡선의 형상을 잘 모의하고 있다. 그러나 첨두 홍수량이 사상 2에서와 같이 조기에 발생 하는 경우 또는 사상 3에서와 같이 과소하게 산정 되는 문제가 일부 발생 하고 있다. 검정 결과를 통해 목적함수(NSE*) 값이 0.2이하일 때 우수한 모형성능을 보여준다고 분석하였으며, 우수한 모형성능을 보이는 사상에 <표 4>와 같이 회색으로 표시하였다. 본 연구에서는 1-NSE를 NSE*로 활용하여, 0에 가까울수록 우수한 모의 성능을 나타내고 있다. SCE-UA 방법 적용에서도

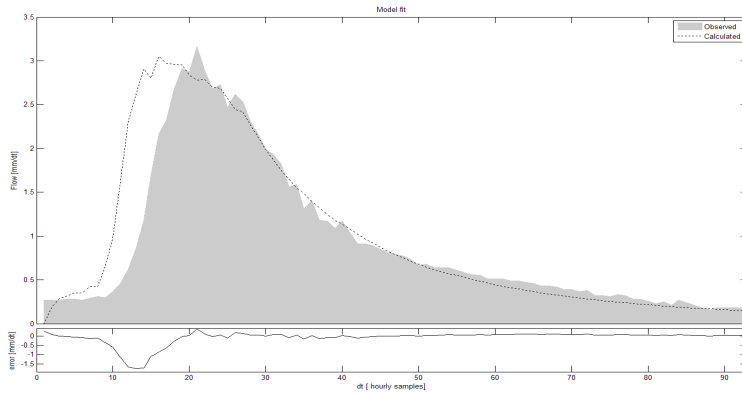
URS 방법을 적용하여 검정하였을 때와 유사한 모의 성능을 나타내고 있다.

URS 방법과 SCE-UA 방법을 통하여 도출된 목적함수 값들로서 모형을 평가해 보았을 때, 사상 별 모형의 성능 편차가 검정 방법의 편차보다 크게 발생하여 전 사상에 대하여 검정 방법의 우열을 가리기는 어려우나, SCE-UA가 다소 우위에 있다.

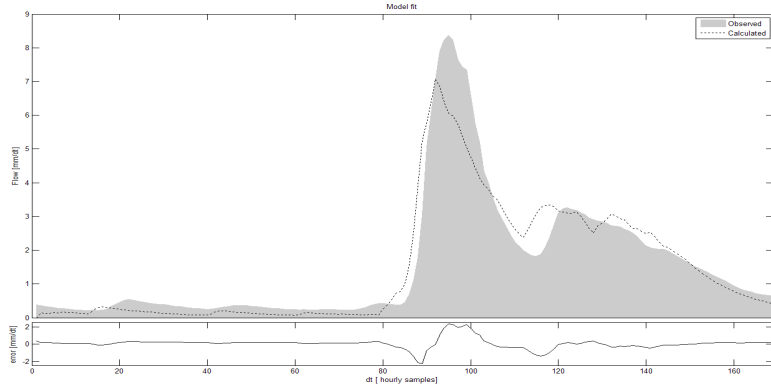
<표 4> PDMM Calibration results with URS and SCE-UA in terms of NSE*

EVENTS	Calibration	
	URS	SCE-UA
1	0.14	0.12
2	0.02	0.02
3	0.11	0.11
4	0.02	0.02
5	0.26	0.25
6	0.39	0.39
7	0.25	0.14
8	0.45	0.42
9	0.11	0.10
10	0.38	0.33

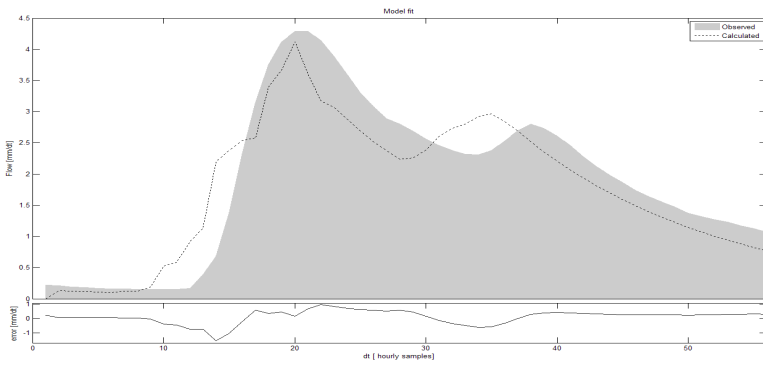
※ NSE*, 0 is perfect fit.



a) Event_2(URS, Calibration, NSE*= 0.02)



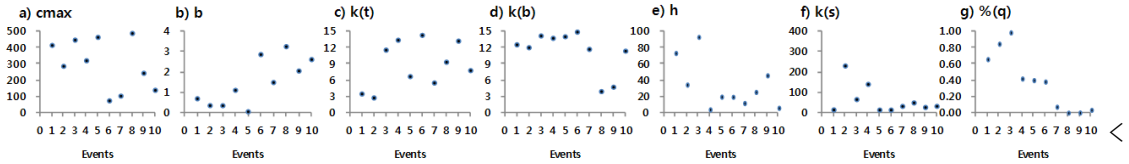
b) Event_3(URS, Calibration, NSE*= 0.11)



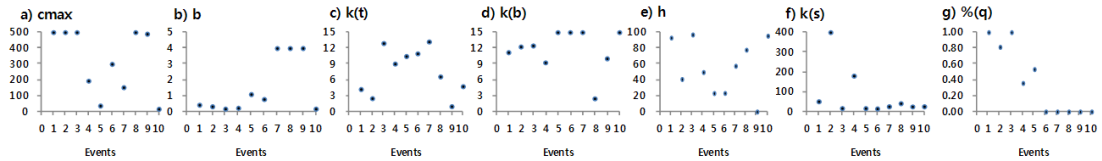
c) Event_5(URS, Calibration, NSE*= 0.26)

<그림 6> Calibrator hydrograph using PDMM with flood event No.2,3 and 5(URS mode, NSE*)

사상 별 검정 매개변수는 <그림 7> 및 <그림 8> 에서와 같이 나타난다. URS검정 수행 결과 PDMM 모형이 0.02~0.45의 NSE* 값을 나타내고 있다. SCE-UA 방법을 통해서 검정을 수행한 결과는 0.02~0.42의 범위를 나타낸다. URS 방법 및 SCE-UA 방법을 적용한 모형의 목적함수 값 및 최적화된 매개변수를 비교해 보았을 때, 전체에서 비슷한 목적함수 범위를 가지는 것으로 나타나, SCE-UA가 조금 개선된 성능을 나타내고 있다. 또한 <그림 7> 및 <그림 8>의 b) b 매개변수에서와 같이 SCE-UA 방법이 균집화된 경향을 나타내고 있으나, 그 경향성이 강하지 않다.



<그림 7> Distribution of calibrated PDMM model paramters with URS



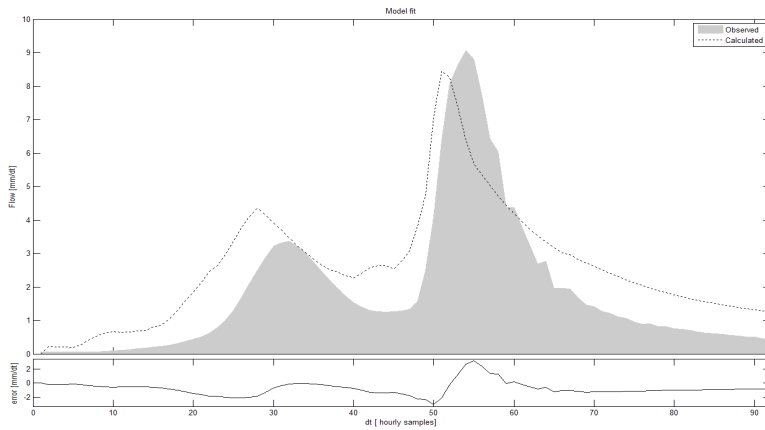
<그림 8> Distribution of calibrated PDMM model parameters with SCE-UA

북일 유역에 강우 유출 모형의 적용을 위하여 앞서 검정된 모형들에 대한 검증(validation) 수행 과정이 필요하다. 검증을 위해서 본 연구에서는 2004. 6. 19-2004. 6. 22 기간의 단기사상을 검증기간으로 선정하여 적용하였으며, 이를 위하여 검정 과정에서 도출된 매개변수 집합 총 10개의 매개변수 집합들을 평균하여 한 그룹의 매개변수로 산정하여 적용하였다. <표 5>는 검정 방법 별 평균 매개변수 산정 값을 보여준다.

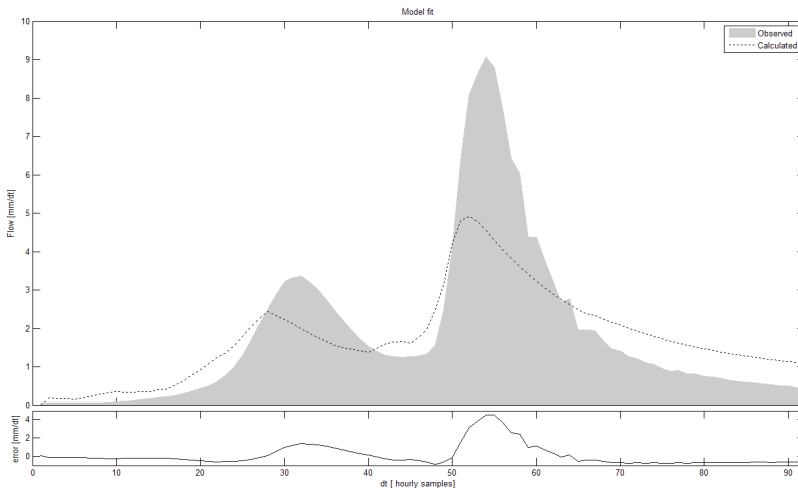
<표 5> Averaged model parameters for URS and SCE-UA method

PDMM	Averaged Calibrated Model parameters	
	URS	SCE-UA
cmax	273.6	319.2
b	1.7	1.5
k(t)	7.9	7.6
k(b)	11.0	11.8
h	41.3	55.9
k(s)	57.2	80.4
%(q)	0.6	0.4

모형의 검증 수행을 위하여 평균 매개변수를 PDMM의 검증 기간 사상에 적용하였다. 검증 수행 결과 검증 수문 모의 그래프를 <그림 9>와 같이 얻을 수 있었으며, 검증 기간에 4개의 모형과 그에 따른 최종적인 선정 매개변수를 적용한 검증 결과가 <표 6>과 같이 나타났다.



a) validated Event(URS, Valibration, NSE*= 0.39)



b) Validated Event(SCE-UA, Valibration, NSE*= 0.37)

<그림 9> Validated Hydrograph using PDMM with averaged calibrated model parameters in URS and SCE-UA

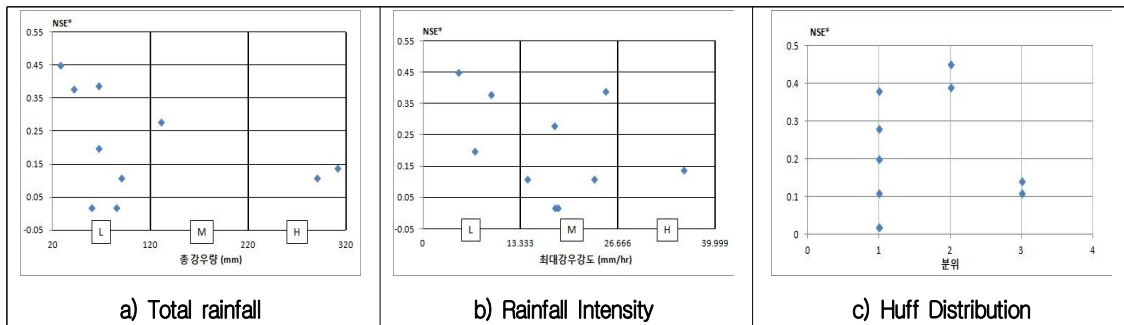
<표 6> URS 및 SCE-UA 검정 매개변수의 검증 기간의 적용 값

Validation	Averaged Calibrated Model parameters	
	URS	SCE-UA
(1-NSE*)	0.39	0.37

검정 시 SCE-UA 방법을 적용하여 산정된 최적 매개변수 집합이 검증 절차에 사용됐을 때 목적함수값(NSE*) 이 0.37, URS 방법에 의한 결과로 NSE*값 0.39을 제시하고 있어, SCE-UA 방법이 다소 우수한 결과(0.02 NSE*)을 나타내고 있다. 그러나 검증 수문곡선을 살펴보면 SCE-UA 는 침투 홍수량을 과소 산정하는 문제점을 나타내고 있으며, 오히려 검증 된 수문곡선의 침투 홍수량의 경우, URS

경우 <그림 9>의 a)가 우수함을 확인할 수 있다. 본 결과를 통해 첨두 홍수량에 관점을 두고 있는 본 연구에서는 URS 방법을 적용하는 것이 복일 유역의 홍수 수문특성을 잘 반영한 방법으로 판단된다.

PDMM 모형의 성능을 강우 특성과 관련하여 살펴보기 위하여, 검정 홍수 사상을 총 강우량(mm), 최대 강우강도(mm/hr) 및 Huff 분위법에 따른 사상의 분위에 따라 분류 하였고, 이를 모형성능(NSE*, URS 방법)과 같이 도시 하였다. 총 강우량은 강우 유출 모형 적용 시 활용된 강우 자료에 대한 사상 별 기간에 따른 누적강우량을 나타내었으며, 최대 강우강도는 각 사상에서 1시간에 대하여 발생한 최대강우를 나타내었다. 강우 사상 별 Huff 분위 산정은 Huff 분위법에 따라 총 강우지속기간을 4등분하여 가장 큰 강우량이 어느 구간에서 발생하는가를 바탕으로 하여 수행하였다(윤용남, 2007). <그림 10>은 각 사상 별 강우 특성에 따른 모형성능 분포 그래프이다.



<그림 10> a)총 강우량에 따른 모형성능, b) 사상 별 선행강우 유무에 따른 모형성능, c)Huff의 분위에 따른 모형성능

<그림 10>에서와 같이 총 강우량에 따른 모형성능을 분석해 보았을 때, 총 강우량이 약 300mm이상인 강우 사상을 적용하여 모의한 결과가 우수한 성능을 보여지만 총 강우량이 100mm 이하인 강우 사상을 모형에 적용 시 경향성을 나타내지 못하였다. 따라서 PDMM의 적용은 큰 강우 사상이 적용될 때 대상 유역을 잘 반영한다고 추측할 수 있다. 또한 Huff 분위에 따른 강우 사상 별 모형성능의 관계를 분석하면, 1분위의 강우 사상을 모의하였을 때는 경향을 보이지 않았으나 3분위의 강우 사상에 대해서는 우수한 모형성능을 확인할 수가 있었다. 또한 최대 강우 강도가 증가 할수록 모형의 성능이 개선되고(작은 수치의 NSE*) 있음을 확인할 수 있다. 하지만 두 가지 강우 특성에 따른 모형성능 분석은 총 강우량에 따른 분석에서 300mm 이상의 큰 강우 사상의 모의 사례 수가 적고, Huff 분위 기반의 분석에서도 3분위의 강우 사상 모의 사례가 부족하다는 한계점을 가지고 있다.

IV. 결론

본 연구에서는 PDMM 강우 유출 모형을 복일 유역의 단기 홍수 사상(2004년부터 2011년까지의 총

10개의 사상에 적용하여 그 모형의 적용성능을 평가한 연구로서, 다음과 같은 주요 결론을 도출하였다.

북일 유역에 대하여 검정(URS 와 SCE-UA)을 수행한 결과 PDMM 모형의 목적함수(NSE*) 값을 적합한 수준(7개사상이 모두 0.2 이하, 3개 사상 도 0.5 이하)으로 단기 홍수사상 모의에 PDMM 모형이 적합함을 확인하였다.

점점 및 검증 수행 결과를 통하여 최적화 모형의 성능을 확인한 결과 사상 별 편차가 모형 최적화 방법의 편차보다 커서, 최적화 방법의 우열을 제시하기 어렵다. 그러나 반응표면 등 모형의 다양한 특성을 파악할 수 있고, 검증 수문곡선에서 첨두 홍수량 모의에 강점을 보인 Monte carlo -URS 방법을 현실적으로 선택한다.

강우 특성에 따른 모형성능의 변화를 살펴보기 위하여 각 사상 별 총 강우량(mm), 최대 강우강도(mm/hr), Huff 분위법에 따른 사상의 분위 산출 및 선행강우가 발생한 강우 사상을 분류하여 분석한 결과, 총 강우량이 약 300mm이상인 강우 사상을 모의하였을 때와 3분위의 강우 사상을 모의하였을 때 PDMM 모형이 우수한 성능을 나타내고 있어, 향후 단기 홍수 사상 모의의 아웃라인을 제시하고 있다.

향후 금강 유역의 대표 강우 유출 모형으로써 PDMM모형을 선정하여, 미계측 연구를 위한 지역화 연구의 기본 강우 유출 모형으로 적용하고자 한다. 또한 추가적인 보완 연구를 통하여 본 연구의 제한된 유역, 검정 및 검증 기간을 확장하여 미호천 전 유역의 대표 강우 유출 모형을 검토할 필요성이 있다.

참고문헌

- 권현한, 문영일, 김병식, 윤석영. 2008. Bayesian Markov Chain Monte Carlo 기법을 통한 NWS-PC 강우-유출 모형 매개변수의 최적화 및 불확실성 분석. 대한토목학회 논문집 B. 28(4): 383-392.
- 김주철, 이상진, 고덕구, 김정곤. 2010. 경험공식에 따라 추정된 HEC-1 모형의 매개변수 타당성 검증. 대한토목학회 학술대회.
- 박준일, 신형우, 조봉철, 장영태. 2000. 남강댐 유역에서의 HEC-HMS 모형의 적용성. 生産技術研究所 論文集. 16: 161-167.
- 안승섭, 김대형, 허창환, 박종권. 2002. 하천분기 특성인자를 고려한 지형학적 순간단위도 모형의 해석. 한국지리정보학회지. 5(4): 9-23.
- 윤용남. 2007. 수문학 기초와 응용. 경기: 청문각.
- 이소정, 조원호, 이효상. 2014. 금강 유역특성과 PDMM 강우-유출모형의 적용성 관계 평가. 한국위

- 관리논집. 10(3): 41-60.
- 이용근. 2012. SCE-UA 알고리즘을 이용한 저류함수 모형의 매개변수 최적화에 관한 연구. 경희대학교 석사학위논문.
- 이준우, 권형중, 신사철, 김성준. 2003. WMS HEC-1 모형을 이용한 경안천 지역의 경년 수문변화 분석. 한국지리정보학회지. 6(1): 107-118.
- 정인균, 박중윤, 박민지, 신형진, 정현교, 김성준. 2010. SRTM DEM을 이용한 격자기반 강우-유출모형의. 한국지리정보학회지. 13(4): 157-169.
- 차상화, 이순탁. 2002. GIS-SUH 모형을 이용한 강우-유출 해석. 대한토목학회논문집 B. 22(5): 689-700.
- 최용준, 김주철. 2010. 강우자료 형태에 따른 분포형 유출 모형의 적용성 평가. 수질보전 한국물환경학회지. 26(2): 252-260.
- 최현상, 한건연. 2004. GIS와 불확실도 해석기법을 이용한 분포형 강우-유출 모형의 개발(II)-적용 및 분석. 한국수자원학회논문집. 37(4): 341-352.
- 최호훈, 이효상. 2012. 미호천 지역의 지역화 연구를 위한 개념적 강우유출모형의 평가. 한국방재학회 논문집. 12(1): 193-203.
- Beven, K. J. 2001. *Rainfall-Runoff Modelling The Primer*. England: Chichester.
- Dunn, S. M. and A. Lilly. 2001. Investigating the Relationship between a Soils Classification and the Spatial Parameters of a Conceptual Catchment-scale Hydrological Model. *Journal of Hydrology*. 252(1-4): 157-173.
- Flint, A. L., L. E. Flint, G. S. Bodvarsson, E. M. Kwicklis, and J. Fabryka-Martin. 2001. Evolution of the Conceptual Model of Unsaturated Zone Hydrology at Yucca Mountain, Nevada. *Journal of Hydrology*. 247(1-2): 1-30.
- Kuczera, G., D. Kavetski, S. Franks, and M. Thyer. 2006. Towards a Bayesian Total Error Analysis of Conceptual Rainfall-runoff Models: Characterising Model Error Using Storm-dependent Parameters. *Journal of Hydrology*. 331(1-2): 161-177.
- Lee, H. S. 2006. *Regionalisation of Rainfall-Runoff Models in the UK*. London: Ph.D. Thesis of Imperial College.
- Moore, R. J. 2007. The PDM Rainfall-runoff Model. *Hydrology & Earth System Sciences*. 11(1): 483-499.
- Kjeldsen, T. 2009. *Flood Estimation Handbook: Supplementary Report No.1*. Wallingford: Centre for Ecology & Hydrology.
- Wagener, T. and M. Lees. 2001b. *Monte Carlo Analysis Toolbox User Manual*. Civil and Environmental Engineering Department. London: Imperial College Press.

Wagener, T., H. S. Wheater, and H. V. Gupta. 2004. *Rainfall-runoff Modelling in Gauged and Ungauged Catchments*. Chungbuk National University Press.

장형준: 충북대학교 대학원 토목공학 석사과정에 재학 중이며, 강우유출모형의 적용 및 설계홍수량 산정에 관하여 연구중에 있다(param79@chungbuk.ac.kr).

이효상: 충북대학교 토목공학부에 교수로 재직 중이며 영국의 Imperial College London UK에서 박사학위(논문: Regionalisation of Rainfall-Runoff Models in the UK, 2006)를 취득하였다. 주요 연구 분야는 강우-유출모형의 계측 및 미계측 유역의 적용이며 주요 논문으로는 “강우자료의 불확실성을 고려한 강우 유출 모형의 적용(2009)”, “미호천 유역의 지역화 연구를 위한 개념적 강우-유출 모형의 적용성 평가(2012)” 등이 있다(hyosanglee@chungbuk.ac.kr).