

금강 유역특성과 PDMM 강우-유출모형의 적용성 관계 평가*

Relationship between Catchment Characteristics and PDMM Rainfall Runoff Model at Geum River Catchments

So Jeong Lee**, Won Ho Cho, Hyo Sang Lee***

Department of Public Administration, 312, E8-6, Chungbuk National University, 52 Naesudong-ro,
Heungduk-gu, Cheongju, Korea

Abstract

Hydrological disasters such as typhoons, floods, and droughts are rapidly rising all over the world due to extreme weather and climate changes. This study aims to analysis a relationship between catchment characteristics and the Probability Distribution Model with Macropore response(PDMM) at Geum river region. PDMM is applied to 18 subcatchments of Geum River. The Rainfall Runoff Modelling Toolbox(RRMT) and Monte Carlo Analysis Toolkit(MCAT) are used for modelling environment. The periods of 2001-2005 and 2006-2012 are applied for validation and calibration respectively. The Nash Surcliffe Efficiency(NSE*) objective function is employed for performance measure. The model simulates the observed hydrograph acceptably well; ten catchments shows acceptable performance in calibration(less than 0.3) and validation(less than 0.5). The relationships between catchment characteristics and PDMM model are not clear. however, PDMM shows a consistently good performance for midium sized catchment. It shows that the PDMM model is a potential model for Geum river region.

Key words: probability distribution model with macropore response, rainfall runoff model, calibration, validation, NSE

국문초록

유역의 수문학적 모형화 연구는 유역의 바라보는 다양한 관점에 따라 다양하게 이루어지고 있다. 이 중 개념적 강우-유출 모형이 수자원관리 부분에서 실무적인 모형으로 폭넓게 적용되고 있다. 본 연구에서는 금강 유역의 18개의 계측 유역을 대상으로 유역의 지표하 빠른 반응을 고려한 확률분포형모형(Probability Distribution Model with Macropore response, PDMM)을 적용, 금강 유역의 유역 특성인자와의 관계를 평가, 모형의 국내 금강 유

* 본 논문은 2014년 한국연구재단 일반연구자지원사업의 연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

** Tel. +82-43-262-0312. E-mail. sojung3410@naver.com

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

Submission & Publication Process

Received: Jan. 20, 2014 / Revised: Feb. 15, 2014 / Accepted: Mar. 5, 2014

역의 활용가능성을 평가한다. Rainfall Runoff Modelling Toolkit(RRMT)와 Monte Carlo Analysis Toolkit(MCAT)을 바탕으로 2006-2012년 기간을 모형의 보정기간으로, 2001-2005 기간을 검증 기간으로 적용한다. 모형의 Nash Surcliffe Efficiency(NSE*) 적용 결과, 적합한 보정(12개 유역:0.3 이하) 및 검증(10개 유역:0.5이하) 결과를 나타내고 있다. 또한 유역의 모의 수문곡선은 유역의 특성을 잘 반영하고 있다고 판단된다. 그러나 모형의 성능과 유역의 특성인자(경사도, 강우량 및 CN 수치)와는 뚜렷한 상관관계가 없다. 그러나 유역의 면적, 특히 중규모 면적(250-1000km²)의 유역에서 우수한 성능을 나타내고 있다. 본 연구의 결과에서 PDMM모형의 금강유역의 활용가능성을 확인하였다.

주제어: 확률분포모형, 강우-유출모형, 보정, 검증, NSE

1. 서론

강물의 근원이 샘물이 아니라, 강우라는 유역의 물 순환 관계가 17세기 프랑스, 세느 강 유역에서 제시된[1] 이래로 유역에서의 물의 흐름, 강우-유출 과정은 오랫동안 연구되어 있다. 그러나 여전히 수문학자들은 유역에 떨어진 물방울의 움직임 등 유역에서 벌어지는 수문과정에 대하여 완벽히 알고 있다고 말할 수 없다. 우리가 알고자 하는 모든 수문 특성 및 과정을 계측할 수 있다면, 하늘에서 떨어진 물이 시/공간적으로 어떻게 움직이는지 모두 관찰할 수 있다면, 우리는 이에 대한 답을 제시할 수 있을 것이다. 그리고 유역의 별도의 강우-유출 모형이 필요하지 않을 것이다[2]. 그러나 현재의 기술 수준에서는 시/공간적으로 제한된 수문 과정(예: 강우 및 수위관측소의 자료, 유역의 물리적인 특성인자 등)만을 실질적으로 확인할 수 있다.

이러한 유역의 물의 순환 등을 완벽히 이해하기 위하여 다양한 관측이 진행 중에 있고, 또한 이를 반영한 다양한 강우-유출모형이 개발 되어 왔으며, 현재도 개발 되고 있는 중이다. 유역의 수문 특성을 모형화 하는 과정에서 수문모형정도에 따라 수문자료 기반의 모형(블랙박스, 수문과정의 입력자료 및 출력자료를 기반으로 한 모형), 개념적 모형(회색박스, 수문과정의 주요 과정을 간략히 개념화 한 모형) 및 물리적 모형(흰색박스, 수문과정의 물리적 수식으로 산정한 모형)으로 구분할 수 있다[3]. 대표적인 수문자료 기반의 모형으로 인공신경망모형 및 자료 기반의 물리모형(Data Based Mechanical model)등이 대표적이며[4], 이러한 모형들은 유역의 복잡한 수문(예: 증발산, 침투, 침류, 저류 등)의 고려 없이 입력(강우) 및 출력(유출)의 관계로부터 모형을 구현한다. 이러한 유역의 수문과정을 충분히 고려하지 않은 한계로 인하여 일반적인 모형 적용에 제약이 있다. 물리적 모형은 유역의 수문과정을 물리-수학 기반의 식 등을 활용하여 최대한 실제와 유사하게 물리적으로 모형을 구축한다.

대표적인 모형으로는 SHE 모형(<http://www.crwr.utexas.edu>)등이 있다. 모형의 구축을 위하여 유역의 높은 품질의 관측 자료(예, 시공간적인 토양 수분의 질의 등)가 필요하며 또한 이를 구동하기 위한 다수의 매개변수가 요구된다. 이러한 자료 들은 일부 연구 유역에서는 활용가능하나 모든 유역에서는 확보하기 어려운 점이 있어 실무에 적용하기 어려운 점이 있다.

개념적 모형은 유역의 주요 수문과정을 개념화하고 이를 매개변수의 수를 적게 갖는 간략한 모형으로 구축한다. 상대적으로 모형 구축이 용이하고 적합한 모의 성능을 보유하고 있어 각종

의 실무에 적용되고 있는 많은 모형이 이 범주에 포함된다. 한국의 설계홍수량 산정 실무에서는 대표적인 단위도 기반의 개념적 강우-유출모형인 HEC-HMS(<http://www.hec.usace.army.mil>)가 일반적으로 적용되고 있다. 또한 영국의 설계홍수량 산정 방법(Flood Estimation Handbook, Supplementary report 1)에서는 PDM 기반의 ReFH모형을 적용하고 있다[5].

개념적 강우-유출모형을 바탕으로 한 다양한 연구가 진행 중이다. 국외 연구사례로는 Carpenter, *et. al.*(2004)은 불확실성 분석방법 중 하나인 앙상블 유량 모의(Ensemble Flow Simulation)을 이용하여 분포형 수문모형인 HRCDHM 모형의 매개변수와 강우 입력 자료의 불확실성에 대하여 분석을 실시하였으며, 그 결과 90% 앙상블 유량 값과 10% 앙상블 유량 값을 이용하여 모의된 유량의 신뢰구간을 제시하였다[6]. Moradkhani, *et. al.*(2005)는 개념적 강우-유출모형인 HyMOD([7])와 Monte Carlo 모의기법을 이용한 앙상블 칼만 필터(Ensemble Kalman Filter; EnKF) 기법을 연계하였으며, 갱신 대상으로 모형의 상태변수인 유역 토양수분과 저류량 뿐만 아니라 모형 매개변수를 같이 갱신하는 Dual state-parameter 기법을 적용하여 유출모의결과의 정확도가 향상됨을 제시하였다[8].

국내의 연구 사례로는, 영국의 대표적인 강우-유출모형인 TOPMODEL([9])을 적용한 Lee & Noh(2009)은 TOPMODEL을 용담댐 상류 천천 유역에 적용하여 연속유출을 모의한 사례가 있다. 그 결과 연속 유출에 대한 수문곡선이 양호하며 대상 유역의 고유 매개변수 산정에는 추가 연구가 필요할 것으로 검토되나 국내의 중규모 유역에 대한 적용도 가능하다고 판단하였다[10]. Kang & Park(2011)은 미세측유역에 대한 TOPMODEL의 적용성을 평가하기 위하여 섬진강 상류유역인 쌍치 소유역에 대한 유출분석을 실시하였다. 2006-2009년에 선택된 6시간 간격의 강우-유출 자료를 가지고 Pattern Search 방법에 의한 관측 유출자료를 사용하여 모형의 매개변수들을 조정하였다. 분석결과, 모형의 매개변수인 지수저류 매개변수(m), 투수량계수(T0), 불포화대 지체시간(TD)등은 수문학적인 반응에 민감하였으며, 모의된 유출자료는 관측 유출자료와 잘 일치하여 합리적인 적용성을 갖는 것으로 판단하였다[11].

영국의 대표적인 개념적 강우-유출모형인 PDM(Probability distribution Model, [12])모형을 적용한 국내의 연구로는 Choi & Lee(2012)는 금강 미호천 유역의 7개 소유역에 대하여 총 Rainfall Runoff Modelling Toolkit(RRMT)을 활용하여 PDM 모형을 포함한 9개의 개념적 강우-유출모형을 적용 평가 하였다. 평가 결과 CWI(Catchment Wetness Index) 및 PDM계열의 모형이 우수한 모의 능력을 보여주었다[13].

본 연구에서는 PDMM(Probability Distributed Model with Macropore routing)을 금강의 18개 유역에 적용하여 국내 유역의 적용성 평가와 활용 가능성을 검토하고자 한다. 또한 금강 유역의 모형 적용결과와 유역 특성인자와의 성능 상관성을 검토하여, 금강 유역의 수문학적 특성을 반영한 모형 개발을 위한 기초자료 확보에 연구의 목적이 있다.

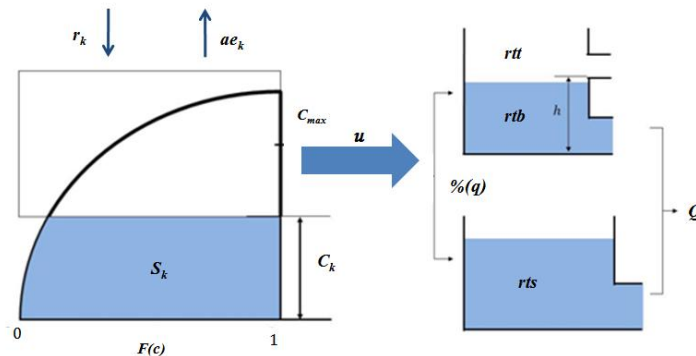
II. 개념적 강우-유출모형의 개요-PDMM(Probability Distributed Model with Macropore Routing)

개념적 강우-유출 모형은 다양하고 복잡한 수문작용을 간단하게 개념화 한 모형으로 유역의 유효강우량을 산정하는 토양저류모형(Soil Moisture Accounting)과 유역유출을 산정하는 유역추적모형(Routing)으로 일반적으로 구성되어 있다.

본 연구에서 모델링도구로 활용한 개념적 강우-유출모형 도구(Rainfall Runoff Modelling Toolkit-RRMT)와 몬테 칼로 분석 도구(Monte Carlo Analysis Toolkit-MCAT)는 영국의 임페리얼 대학에서 개발하였으며[3], 모형의 개발 및 평가에 활용되고 있다[13]. RRMT는 다양한 토양저류모형부분과 유역추적모형부분의 모듈형으로 구성되어 있다. MCAT는 몬테칼로 추출기법을 바탕으로 최적의 매개변수 산정을 위한 다양한 분석의 수행이 가능하다.

1. PDMM 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 <Fig 1>은 PDMM 모형의 개념도이다.



<Fig 1> Schematic Description of the PDMM[14]

PDMM 모형의 토양저류함수로 적용된 PDM 모형은 유역을 공간적 분포를 갖는 토양수분 저장용량(soil moisture storage)의 확률분포로 개념화한 모형으로 유출 모형으로 Moore(1985)가 제안하였다[12]. 이후 영국의 홍수량 산정 방법(Flood Estimation Handbook: supplementary report 1)의 강우-유출모형에 유효 우량 산정을 위한 토양저류함수 모형으로 적용되고 있다[5]. 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[14].

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

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.

유역 유출모형은 토양저류함수 모형에서 산정된 유효강우량을 개념적 유역유출모형으로 고려하여 유역의 유출-유량을 산정하게 된다. 본 연구에서는 빠른 지표 하 흐름을 고려한 병렬 2선형 저류지 유출 모형(Macro-pre Approach, Parallel Structure))을 사용하였으며 이는 2PAR 모형의 빠른 흐름을 반영하는 저류지에 지표하 흐름(Macropore Mechanism, Interflow)을 반영하는 유출구를 적용한 형태이다[7].

보정 매개변수는 모든 유효 강우량이 빠른 반응 저류지로 가는 양을 나타내는 % q 변수를 통해 2개의 저류지로 나누어지며, 빠른 반응의 저류지에서의 rtt , rtb , h 와 느린 반응의 rts 로 구성되어 있다. <Table 1>은 본 연구에서의 개념적 강우-유출모형의 매개변수를 나타낸다.

<Table 1> Parameters of PDMM

Parameters		Description	Range
SMA	C_{max}	Maximum storage capacity of the catchment	1-1000(mm)
	b	Degree of spatial variability of storage capacity in the catchment	0-2
R	rtt	Residence time from top outlet from quick flow reservoir	1~15[dt]
	rtb	Residence time from bottom outlet from quick flow reservoir	1~15[dt]
	h	Threshold	0~100[mm]
	rts	Residence time slow flow reservoir	15~300[dt]
	% q	Percentage flow through quick flow reservoir	0~1[-]

※ SMA: Soil Moisture Accounting, R: Roting

2. 목적함수

모형의 정확도를 평가하기 위한 기준을 제시하는 목적함수는 모형의 모의과정에서 과정변수의 우수성을 평가하는 기준으로 객관적인 모형의 보정에 있어 필수인 사항이다. 본 연구에서는 Nash Sutcliffe Efficiency[15]을 사용하였다.

목적함수 NSE는 무차원인 목적함수으로써 $-\infty$ 에서 1까지 최적값을 가지며, 평균값으로 일반화하여, 다른 유역들의 결과를 비교 검토하는데 적합하다. NSE는 편차의 제곱의 형태를 사용한다. 저유량 차이보다 고유량 근처에서 차이가 크게 나타나므로 일반적으로 고유량의 성능에 초점이 맞춰진다. 또한 NSE는 관측유량과 모의유량사이의 타이밍 에러에 대해 민감하다는 특징이 있다[13]. 목적함수 NSE는 다음 식(1)으로 사용된다.

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

여기서 o_i 는 시각 i 에 관측된 유량, $c_i(\theta)$ 는 시각 I 에 모델별 변수 세트 θ 로 모의된 유량이다. 본 연구에서는 식 (2)과 같이 NSE*을 이용한다.

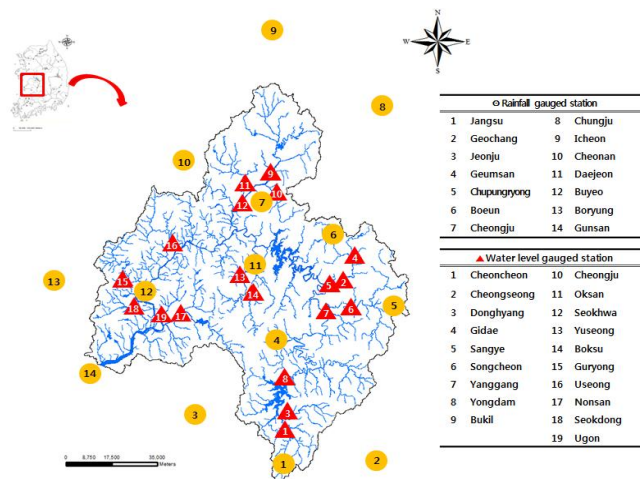
$$NSE^* = 1.0 - NSE \quad (2)$$

III. 대상 연구 유역

PDMM 강우-유출 모형의 금강 유역의 적용성을 평가하기 위하여 18개 계측 유역의 수문자료 및 유역 특성인자를 구축한다. 대상 유역의 수문자료(강수량, 유량, 온도, 증발산량)는 국가수자원관리종합정보시스템(WAMIS) 및 기상청의 자료를 바탕으로 2001년부터 2012년까지의 일 단위 장기유출시계열 자료를 구축한다. 또한 유역의 7개 대표 유역 특성인자(유역면적, 경사도, 형상계수, 연평균 강우량, 수계밀도, 호수/저수지 홍수저감지수)를 산정하였다. 유역 특성인자는 1/5000의 수치지도를 통하여 산정하였으며, 토양 특성은 1/25000의 정밀 토양도를 바탕으로 하였다. ARC-GIS를 활용하여 물리기반의 특성인자는 산정 하였다.

1. 금강유역

금강 유역은 한반도의 중서부에 위치하고 있으며, 한강유역과 낙동강유역과 접하고 있다. <Fig 2>는 금강유역의 유역도이다. 본 연구는 홍수조절의 영향을 받지 않는 수위관측소를 선정하여 총 18개 유역을 대상으로 한다. 금강 유역은 대청댐 및 금강하구둑 등으로 인하여 본류의 많은 수위관측소가 상류의 홍수 조절 및 배수위의 영향을 받는다.



<Fig 2> Map of Geum River Region

금강의 대청댐 상류유역의 면적은 약 4,252 km²이며 금강 유역면적의 43%를 차지한다. 본 연구에서 활용한 대청댐 상류의 수위관측소는 7개(천천, 청성, 동향, 기대, 산계, 송천, 양강), 강우관측소는 6개(장수, 보은, 추풍령, 거창, 금산, 전주)이다.

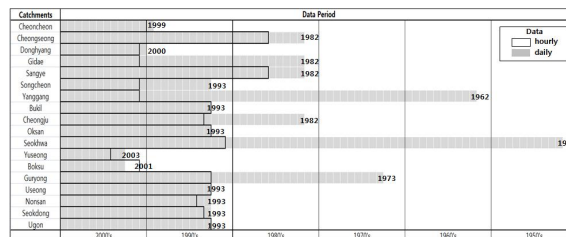
미호천 유역은 금강 유역의 북쪽 중앙부에 위치하고 있으며 유역면적은 1844.7 km²로서 금강 전 유역면적(9914.0 km²)의 18.7%를 차지한다. 미호천 유역은 여름에는 고온 다습한 남동풍이나 남서풍이 불며, 겨울에는 한랭 건조한 북서풍이 부는 건기와 우기가 뚜렷한 기후현상을 보이고 있다[16]. 미호천의 기온은 우리나라의 평균기온인 11℃에 비해 12.7℃(청주 기준)로 비교적 기상여건이 양호하며 강수량은 연평균 1,200mm이상으로 6~9월에 집중적으로 비가 내린다. 본 연구에서 활용한 미호천 수위관측소는 4개(북일, 청주, 옥산, 석화), 강우관측소는 5개(이천, 충주, 청주, 천안, 보은)이다.

갑천유역의 유역면적은 687km²이며 대둔산(EL.878m)에서 발원하여 북서쪽으로 방향을 바꾸어 두계천, 금곡천, 매노천과 차례대로 합류한다. 그 후 북향으로 흐름을 바꾸어 대전광역시를 관통하여 흐르고 유성천과 합류하여 제 1지류인 유등천과 합류한다. 대전광역시의 경계를 벗어나면서 금강으로 유입된다. 본 연구에서 활용한 수위관측소는 2개(유성, 복수)이며 강우관측소는 2개(금산,대전)이다.

금강하류 유역은 대청댐에서 금강하구둑까지 유로연장 150km에 유역면적은 5710km²으로 금강 유역의 58%에 해당하며 지형학적으로 완만한 경사를 지니고 상류에 비하여 넓은 하천 폭을 지닌다. 금강 하류의 주요 지류로는 갑천, 미호천, 유구천, 지천, 논산천 등이 있다. 본 연구에서 활용한 수위관측소는 5개(구룡, 우성, 논산, 석동, 우곤), 강우관측소는 8개(보령, 부여, 천안, 대전, 금산, 전주, 보령, 군산)이다.

2. 금강유역의 수문자료 현황

본 연구의 18개의 대상 연구유역은 유성과 복수를 제외하고 10년 이상의 시자료, 일자료를 보유하고 있다. 석화 유역의 경우 가장 긴 일자료(1952-2013)를 보유하고 있으며 그 다음으로 송천(1962-2013)이 약 40년의 자료를 보유하고 있다. 시자료도 10년 이상의 자료 보유기간을 갖지만 청성과 산계유역을 제외하고는 자료 보유기간이 20년 미만이다. 이는 일자료에 비하여 시자료의 보유기간이 짧음을 알 수 있고, 특히 유성과 복수와 같이 시자료의 보유기간이 10년이 되지 않는 유역도 있어 단기사상의 해석을 하기 위하여 고려해야 할 부분이다. 다음 <Fig 3>은 금강 대상 유역의 강우자료, 수위자료의 보유현황도이다.



<Fig 3> Condition of Hourly and Daily Data in Geum River Region

3. 금강유역의 유역 특성인자

유역의 물리학적 특성을 바탕으로 구축된 특성인자는 대상유역의 수문학적 반응을 추정할 수 있는 기초자료로 활용한다. 유역특성인자는 국가수자원관리 종합정보시스템(wamis)에서 표준 단위유역에 대한 지형학적 특성인자 21개, 토양학적 특성인자(SCS-CN, 토지이용비)와 수문학적 특성인자(FARL, SAAR)로 구분된다. 본 연구는 수위관측소를 중심으로 한 새로운 유역에 맞는 지형학적 특성인자를 이용하였으며 Ko(2012)가 제안한 7개의 대표유역특성인자를 사용한다. 다음 <Table 2>는 18개 금강 소유역의 유역특성인자 값을 나타낸다[17].

<Table 2> Representative Catchment Characteristics in Geum River

Catchments	AREA[km ²]	SLPBAR[°]	Rf	Dd	SAAR	FARL	CN	
1	Cheoncheon	285.99	14.63	0.27	3.27	1093.29	0.96	65.4
2	Cheongseong	499.67	12.87	0.14	3.09	1197.9	0.95	65.64
3	Donghyang	164.58	16.15	0.21	1.68	1231.33	0.96	60.03
4	Gidae	373.21	12.86	0.27	3.09	1180.65	0.97	65.35
5	Sangye	492.4	12.9	0.16	3.1	1195.29	0.96	65.6
6	Songcheon	608.48	14.77	0.24	2.17	968.56	0.97	60.58
7	Yanggang	2078.15	16.2	0.08	2.24	1163.94	0.89	61.33
8	Bukil	909.1	9.72	0.25	2.08	1221.9	0.92	67.42
9	Cheongju	178.92	9.74	0.18	2.4	1191.71	0.98	71.66
10	Oksan	342.38	9.73	0.25	3.05	1215.85	0.98	69.34
11	Seokhwa	1599.95	9.73	0.27	2.29	1223.16	0.94	68.57
12	Yuseong	250.12	12.08	0.11	3.47	1314.94	0.99	62.79
13	Boksu	161.66	15.21	0.11	3.97	1273.85	1	70.83
14	Guryong	208.58	12.31	0.1	3	1258.29	0.99	72.32
15	Useong	263.25	13.75	0.19	2.76	1309.16	0.99	72.19
16	Nonsan	476.55	11.35	0.17	2.31	1317.7	0.91	62.49
17	Seokdong	155.49	8.06	0.22	2.68	1271.08	0.96	66.17
18	Ugon	133.86	4.99	0.25	2.84	1235.33	0.98	68.88

유역면적은 수위관측소를 중심으로 분할된 소유역의 면적을 나타내며 유역면적은 유출특성과 밀접한 관계를 갖는다. 양강 유역이 2078.15km²으로 대상 연구 유역 중 가장 크게 나타나며 금강 하류의 우곤은 133.86km²으로 가장 작은 면적을 나타낸다. SLPBAR는 유역경사를 나타낸 값이며 지표면의 유출속도에 기여한다. 복수 지역은 15.21°로 산지유역으로 분류하며 청주, 옥산, 석화는 비교적 도시화가 진행된 유역이라 그 경사가 9.72°-9.74°로 완만하다. Rf(형상인자)는 유역면적과 최대유로연장의 제곱된 값의 비이다. 일반적으로 유역면적이 증가할수록 유역형상인자 값은 작아져 상대적으로 수계는 길어진다. 정삼각형 수계의 경우 형상인자는 1.0의 값을 갖고 원형인 경우엔 0.79, 마름모 형태의 정사각형의 경우는 0.5의 값을 갖는다. 일반적으로 자연하천의 경우 0.5이하의 값을 갖으며 금강 18개 유역도 구룡(0.1)-석화, 천천, 기대(0.27)으로 모두 0.5이하의 값을 나타낸다. Dd(수계밀도)는 하천 수계의 조밀한 상태 및 유역 내에 지류가 많고 적음을 나타내는 지표이다. 수계밀도가 높은 유역은 복수(3.97)이며 수계밀도가 3이상의 값을 갖는 유역은 천천(3.27), 청성(3.09), 기대(3.09), 산계(3.1), 옥산(3.05), 유성(3.47), 구룡(3.0)이다. 수계밀도 값이 크게 나올수록 단위면적당 하천 길이가 길다는 것을 의미하며 이는 강우에

대한 유출률이 빠르게 반응하며 배수가 양호함을 알 수 있다. SAAR는 1981-2010, 30년 동안의 연평균 강우량을 의미한다. 논산이 1317.7mm로 가장 큰 SAAR값을 나타내며 두 번째로 우성이 1309.16mm의 값을 갖는다. 가장 작은 SAAR은 송천 968.56mm로 논산과 약 350mm차이가 난다. FARL은 저수지의 홍수저감지표를 나타내며 값이 작을수록 홍수 저감효과가 큰 것을 의미한다. 금강유역은 모든 유역이 0.89-1.0사이의 값을 나타낸다. CN은 토양의 특성과 식생피복상태, 선행강수조건 등을 고려하여 유역의 유출 특성을 하나의 인자로 나타낸 값이다. 구룡(72.32)이 가장 큰 값을 보이며 대표적인 도시화 지역인 청주의 CN 값도 71.66으로 큰 값을 갖는다.

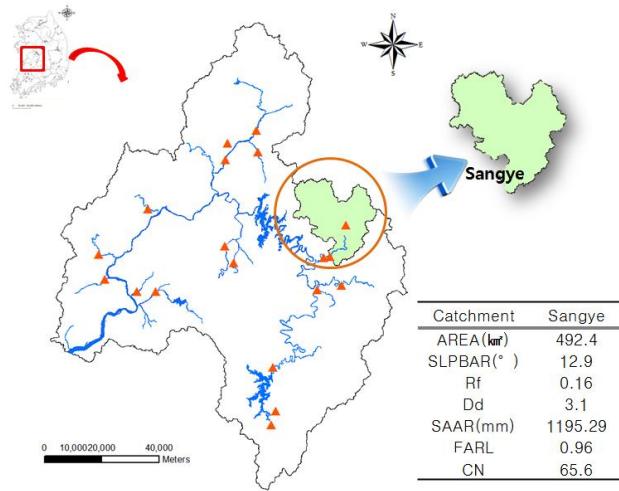
IV. PDMM 모형의 적용: 보정 및 검증

금강 18개 연구유역의 PDMM의 적용성 평가를 위하여 장기유출모의사상에 대한 보정(2006-2012년) 및 검증(2001-2005년)을 실시하였다. 장기유출모의분석 자료는 기저유출, 중간유출, 지표유출을 포함한 일 강우에 대한 입력 자료로 사용하였으며, 이는 대상 유역의 출구자료를 이용하여 전체 유역의 장기유출모의를 분석할 수 있다. 구축된 모형과 대상유역 그리고 보정기간 등 조건에 대한 최적의 매개변수를 추출하기 위하여 Monte Carlo 방법을 적용하였다. 모형 성능은 목적함수 NSE* 으로 검토하였으며, 모의된 수문곡선의 시각적 검토를 실시하였다. 본 연구에서는 연구유역 중 산계 유역을 예로 일련의 장기유출모의의 산정방법을 설명하며 나머지 유역에 대하여 동일한 방법으로 수행하였다.

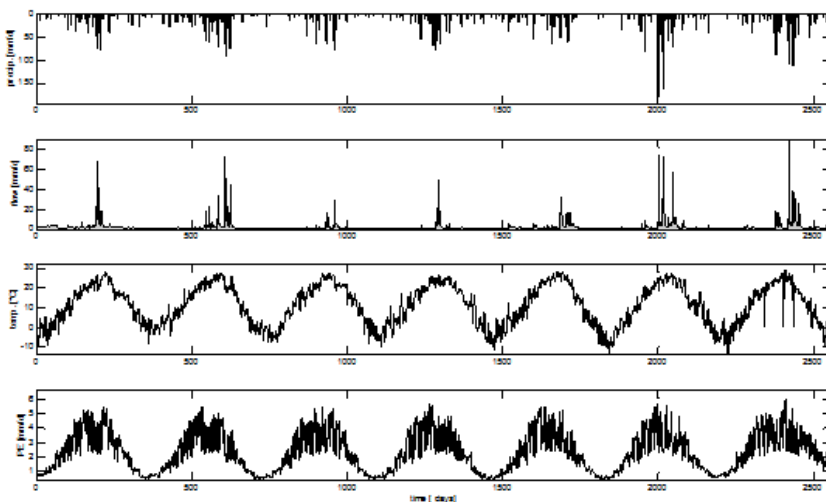
1. 산계유역의 적용

1) 산계유역

산계 유역은 보청천 수계의 산계 수위관측소를 유출구로 한 유역으로, 유역 면적은 492km²의 중규모의 유역이고, 유역의 경사도(SLPBAR)가 12.9°인 산지 유역이다. 유역의 주요 특성 및 위치도는 <Fig 4>와 같다. 산계유역의 보정 기간(2006-2012)의 수문자료(강우량, 관측 유량, 온도 및 증발산량)는 <Fig 5>와 같다.



<Fig 4> Map and Catchment Characteristics in Sangye



<Fig 5> The Hydrological Data in Sangye

※ Rainfall, Runoff, Temperature, Evapotranspiration, 2006.01.01.-2012.12.31.

2) PDMM의 적용결과

PDMM 모형은 MCAT 분석 도구를 바탕으로 보정 및 검증을 수행한다. 보정기간(2006-2012)에 대하여 몬테칼로 URS(Uniform Random Sampling) 로 추출한 1만개에 대하여 각각의 모의 성능을 개별 매개변수의 사후 보정 분포를 바탕으로 가장 우수한 보정 결과를 나타낸 매개변수를 선정한다. 모의 초기의 버림 기간을 보정 기간의 20%로 설정하여 초기 조건의 영향을 배제한다. 또한 보정된 매개변수를 2001-2005의 5년의 기간에 검증(Validation)하여 보정된 변수의 일관된 적용성을 평가한다.

(1) MCAT 분석

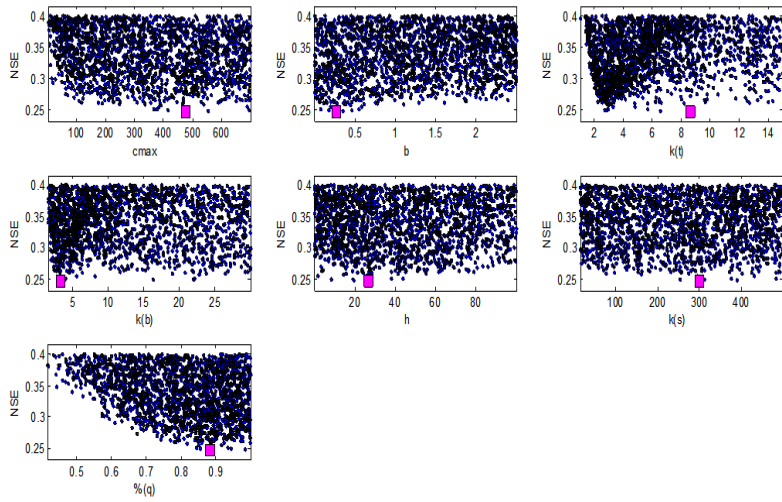
본 연구는 MCAT을 사용하여 최적의 매개변수를 산정하고, 모형의 모의 성능을 분석하기 위하여 사후반응표면 및 민감도 분석 등을 수행하였다.

① 사후반응표면

모형의 매개변수 사후반응표면(posterior response surface)은 목적함수에 따른 모형성능을 도시화한 그림으로서 임의의 변수구간내의 균등한 수의 매개변수 값을 추출하며 최적의 매개변수 및 목적함수와의 관계를 쉽게 확인할 수 있는 장점이 있다.

<Fig 6>은 산계 유역의 PDMM모형의 매개변수들의 사후반응표면을 통해 도식화된 그림이며 가로축은 형 매개변수(c_{max} , b , $k(t)$, $k(b)$, h , $k(s)$, $\%q$)의 범위, 세로축은 모형의 성능(NSE*)을 나타내는 목적함수의 값을 나타낸다. 모형의 성능이 가장 우수한 매개변수는 사각형으로 표시한다. 임의의 변수구간내의 매개변수의 사후반응표면은 원추형의 형상을 나타낼 때 보정 결과가 뚜렷하지 않다고 평가한다. 근거가 가장 뚜렷하다고 평가하며 균등하게 배분된 경우에는 보정 결과가 뚜렷하지 않다고 평가한다.

매개변수 c_{max} , b , $k(b)$, h , $k(s)$ 는 매개변수 범위 전 구간에 걸쳐 목적함수 NSE*값이 고르게 분포한다. 이에 반에 $k(t)$ 및 $\%q$ 의 경우는 매개변수의 범위가 1 범위에 가까워질수록 목적함수의 성능은 좋아진다. 따라서 $k(q)$, $\%q$ 의 분포가 원추형 형상을 띠므로 보정근거가 뚜렷하다고 평가 가능하다.



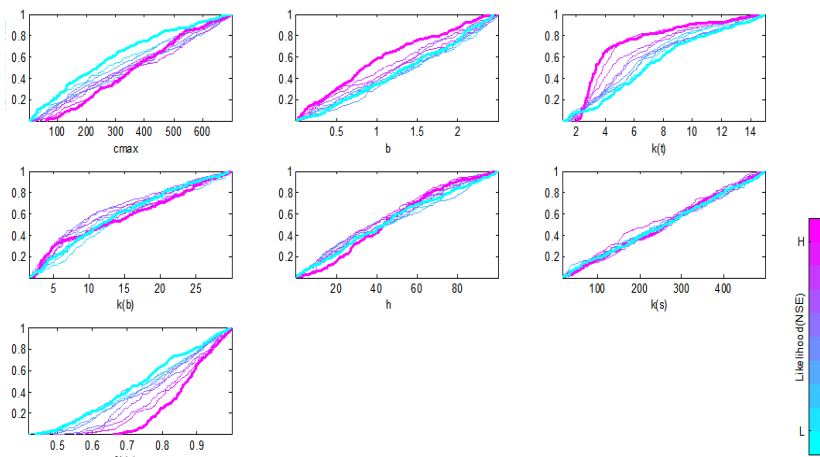
<Fig 6> Result of Posterior Response Surface in Sangye

② 민감도 분석

민감도분석(Sensitivity analysis)은 매개변수의 우수한 모의결과와 우수하지 않은 모의결과의 누가분포 편차를 이용하여 각각의 변수구간에 대한 민감도를 분석하는 기법이다. 사후반응표면 산정결과에서 임의의 목적함수를 기준으로 하여 그 값보다 좋은 값들을 behavioral set,

설정 값보다 적은 값들을 non-behavioral set으로 정의하고 behavioral set의 누가분포 그래프와 non-behavioral set의 누가그래프를 비교하여 민감도를 분석한다[8]. behavioral 누가그래프와 non-behavioral 누가그래프 사이의 폭이 큰 경우는 민감도가 크며, 그와 반대로 behavioral 누가그래프와 non-behavioral 누가그래프 사이의 폭이 좁은 경우에는 민감도가 작다.

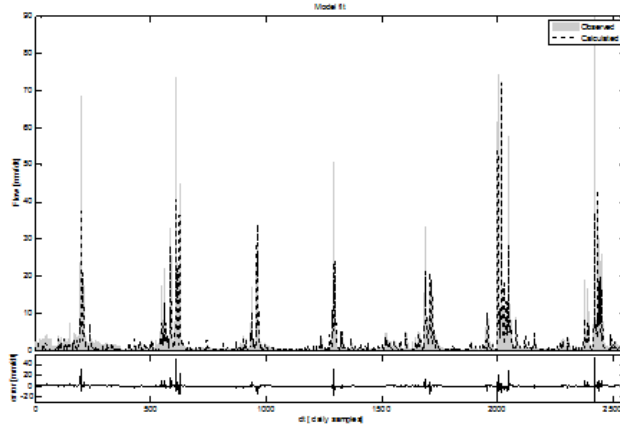
<Fig 7>은 산계 유역의 민감도 분석 결과이며 우수한 모의 결과의 누가분포는 짙은(붉은)색으로 표시, 우수하지 않는 모의 결과의 누가분포는 옅은(파랑)색으로 표시하였다. 그래프의 가로축은 매개변수를 나타내며, 세로축은 누가확률을 나타낸다. 그 결과 PDMM모형의 매개변수 민감도는 붉은 색과 파란색 곡선의 차이로서 시각적으로 평가 하며, $k(t)$ 매개변수와 %q매개변수가 큰 것을 확인할 수 있다.



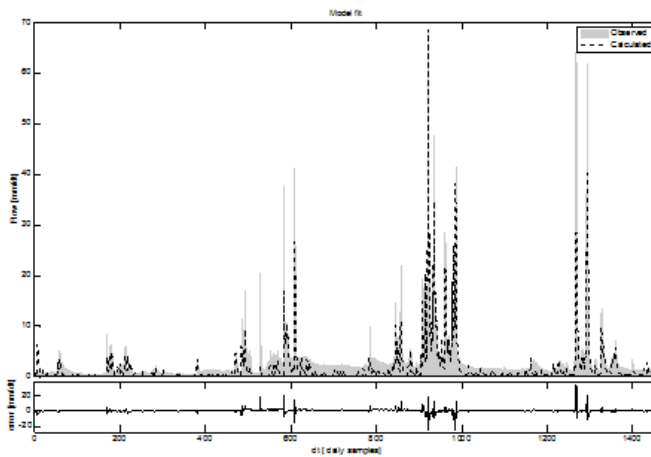
<Fig 7> Result of Sensitivity in Sangye

(2) 보정 매개변수 및 모의 수문 곡선

본 연구에서는 NSE*을 목적함수를 이용하여 모형성능을 객관적으로 검토하였다. 산계 유역의 보정 및 검증 결과는 <Table 3>의 유역 5와 같으며, 보정 및 검증 수문 곡선은 <Fig 8>, <Fig 9>와 같다. 산계유역의 모형의 적용결과는 표 3에서와 같이 보정(0.25 NSE*) 및 검증(0.32 NSE*)부분에서 모두 적합하다. 산계유역의 모의 수문곡선은 그림 <Fig 8>은 산계 유역의 보정 수문곡선이며 <Fig 9>는 검증 수문곡선의 모의 수문곡선을 살펴보면, <Fig 9>에서와 같이 수문곡선의 전체적인 양상은 잘 모의 하나, 첨두 홍수량 부분에서 일부 과소하게 산정되는 경향을 보이고 있으며 또한 저유량 부분(갈수기)에서는 과다하게 산정되는 문제점을 보이고 있다. 검증기간의 저유량이 500일 전후로 급격히 상승되어 이러한 경향이 1200일 까지도 유지되는 차이점을 보이고 있다. 이는 저유량 부분의 수위유량 관계곡선식의 개정 등 수문 자료의 문제점으로 판단된다.



<Fig 8> The hydrological Graph of Calibration in Sangye(NSE*=0.25, 2006-2012)



<Fig 9> The Hydrological Graph of Validation Sangye(NSE*=0.32, 2001-2004)

2. 금강 18개 유역의 적용 결과

금강 18개의 대상 연구유역에 적용한 PDMM의 적용 결과는 <Table 3>과 같으며 최적화된 매개변수와 보정 및 검증 기간의 목적함수를 나타내고 있다. 본 연구에서는 보정 NSE*0.3이하, 검증 NSE*0.5이하의 값을 나타낼 때 모형이 적합하다고 판단하여, 표에서 굵게 표시하였다.

보정 결과는 모든 유역에 대하여 0.1-0.43의 적합한 결과를 나타내고 있으며, 우수(0.3 이하의 NSE*)합 모의 성능유역은 12개이며, 이들 유역 중 검증기간에서도 우수(0.5 이하의 NSE*)성능을 보인 유역은 총 10개 유역(천천, 기대, 산계, 송천, 양강, 북일, 유성, 복수, 우성, 논산)으로 이들 유역에 대하여 우수한 모의 성능을 나타내고 있다.

<Table 3> Results of Optimised Parameters in Geum River Catchments

Catchments	Optimised parameter set							Calibration (NSE*)	Validation (NSE*)
	Cmax	b	k(t)	k(b)	h	k(s)	%q		
1 Cheoncheon	540.5	0.9	2.8	7.2	43.4	337.2	0.9	0.10	0.29
2 Cheongseong	285.7	0.0	3.7	15.0	34.3	363.7	0.9	0.31	0.42
3 Donghyang	53.0	2.3	2.2	13.1	92.0	219.5	1.0	0.28	0.53
4 Gidae	268.5	0.5	4.3	11.0	21.1	370.7	1.0	0.26	0.33
5 Sangye	476.6	0.3	8.6	3.3	26.9	300.2	0.9	0.25	0.32
6 Songcheon	331.1	1.1	3.1	4.1	37.0	237.3	1.0	0.22	0.30
7 Yanggang	437.0	0.2	4.7	9.1	1.5	326.5	0.4	0.27	0.49
8 Bukil	501.8	1.9	6.9	4.6	21.4	320.5	0.9	0.24	0.47
9 Cheongju	367.9	2.4	2.3	8.8	11.3	445.8	0.5	0.32	0.41
10 Oksan	697.7	1.7	3.1	16.4	50.7	452.2	1.0	0.32	0.45
11 Seokhwa	269.9	0.9	3.9	6.5	26.4	159.3	0.9	0.26	2.67
12 Yuseong	92.1	0.9	2.6	6.2	50.6	471.1	0.9	0.24	0.31
13 Boksu	219.9	0.5	2.4	23.1	10.0	497.0	0.9	0.29	0.48
14 Guryong	107.7	0.7	3.3	26.2	10.6	455.4	0.7	0.31	0.85
15 Useong	108.9	0.1	12.8	2.5	71.4	274.1	1.0	0.29	0.45
16 Nonsan	277.7	0.5	3.5	8.4	7.6	138.0	1.0	0.27	0.36
17 Seokdong	52.3	1.3	2.5	21.5	48.5	143.2	1.0	0.43	0.63
18 Ugon	183.4	0.8	7.3	2.3	37.5	373.3	1.0	0.41	0.61

V. 유역특성인자와 모형성능의 관계 평가

유역특성인자와 모형성능의 관계를 검토하기 위해 18개 유역의 유역특성인자와 모형의 매개 변수간의 상관관계를 산점도를 통하여 분석하였다. 영국의 FEH(Flood Estimation Handbook, [18])에서 제시한 유클리디안 거리 산정에 사용되는 유역특성인자 값으로 AREA(유역면적), SAAR(연평균 강우량), BFIHOST가 있다. 위의 특성인자는 유역의 지형학적, 기후학적 강우특성, 수문학적인 유출특성을 반영한다. 본 연구에서는 유출특성 지표인 BFIHOST대신 국내의 현실을 반영한 SCS-CN을 사용한다. 또한 유역의 경사(SLPBAR)는 유역 내의 유출에 영향을 끼치는 인자로 본 연구에서 유출특성지표로 적용하였다. 산정된 유역특성인자(유역면적(AREA), 유역경사(SLPBAR), 연평균강우량(SAAR), CN)의 특성인자 그룹을 소(L), 중(M), 대(H)으로 그룹화하여 이들 특성그룹과 매개변수 및 모형성능과의 관계를 분석한다.

1. 유역특성인자 VS 모형의 매개변수

유역 특성인자의 그룹화는 다음 <Table 4>에서와 같이 총 4개의 유역 특성인자에 대하여 각각의 특성 구간을 대(High),중(Medium),소(Low)로 나누어 이를 각각 H, M, L으로 하고, 이의 조합을 구성하였다. 개별 유역 특성인자의 그룹은 다음 <Table 4>와 같이 구분한다.

면적의 경우 0km²-250km²를 소규모유역으로, 250km²-1000km²을 중규모유역, 1000km² 이상을 대규모

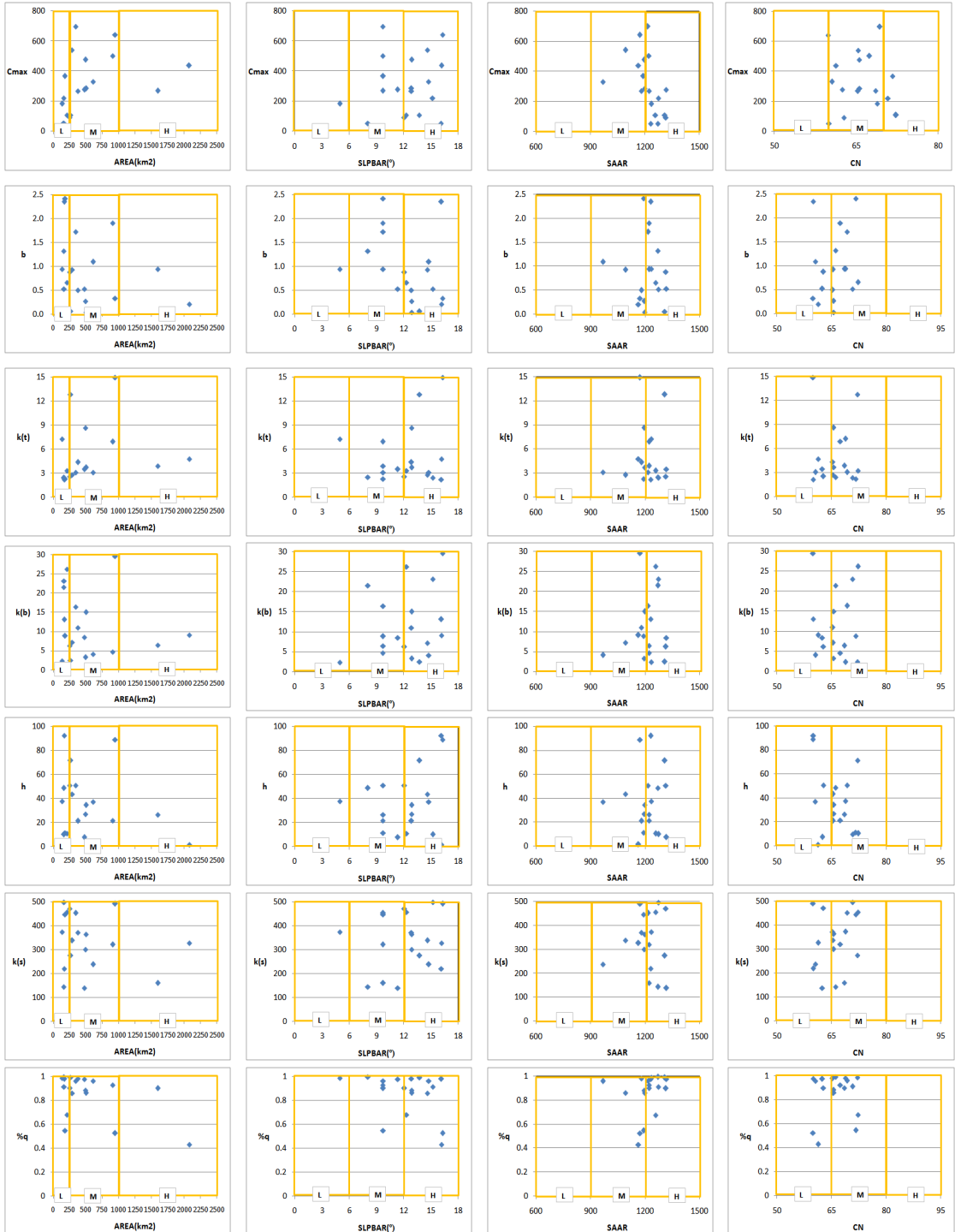
모유역으로 분류하였다. 설계홍수량 산정요령[19]에서 제시한 단위도법의 단일유역으로 제시된 면적인 250km²을 소규모 유역의 상한선으로 적용한다. 유역의 경사(SLPBAR)는 저지대를 0°-6°를 경사가 낮은 지역, 6°-12°를 중(M) 12°-18°를 비교적 경사가 있는 대(H)로 구분하였다. 연평균 강우량(SAAR)은 600mm-900mm을 소(L), 900mm-1200mm를 중(M), 1200mm-1500mm를 대(H)로 구분하였다. CN의 경우 50-65을 소(L), 65-80을 중(M), 80-95를 대(H)로 구분하였다.

<Table 4> Ranges of Catchment Characteristics

Low	Medium	High
0≤AREA<250	250≤AREA<1000	AREA≥1000
0≤SLPBAR<6	6≤SLPBAR<12	12≤SLPBAR≤18
600≤SAAR<900	900≤SAAR<1200	1200≤SAAR≤1500
50≤CN<65	65≤CN<80	80≤CN≤95

유역특성인자와 모형의 매개변수간의 산점도를 도시하고 유역특성인자 값을 각각의 소(L), 중(M), 대(H)에 해당하는 부분으로 표시하여 상관성 검토하였다.

다음 <Fig 10>은 유역특성인자와 매개변수간의 상관성 검토를 나타낸 결과이다.



<Fig 10> Analysis of Assessment between Catchment Characteristics and PDMM

Cmax 값은 유역의 면적이 커질수록(M,H) 증가하는 일반적인 경향성을 나타내고 있으나, 소

규모 유역그룹(L) 경우, 이러한 경향성을 확인할 수 없다. 또한 강우량이 증가할수록 C_{max} 가 감소하는 경향을 나타내고 있다. 이러한 특성은 유역의 면적이 커지면 유역의 토양 저류 능력도 커지는 수문학적인 이론과 동일한 결과로 추론할 수 있다. 그러나 유출 토양 특성과 밀접한 관계를 나타낼 것으로 예상된 CN 수치와는 뚜렷한 상관성을 나타내지 못하고 있다. b 값은 토양 저류의 분포를 나타내는 매개변수로 경사도와 약한 음의 경향성을 나타내며 0에 가까우면 빈약한 토양 저류 함수의 분포를 나타내며, 1에 가까운 값은 전 유역에 걸쳐 동일한 저류함수의 분포를 나타내어 유역의 경사가 급할수록 유역의 토양 저류의 양이 감소하는 경향은 이론적으로 타당하다. $k(t)$, $k(b)$, h , 및 $k(s)$ 의 보정 변수와 유역 특성인자와의 뚜렷한 경향성을 나타내고 있지 않다. 이들 매개변수는 유역의 빠른 반응 저수지 유출모형의 매개변수로 각각 빠른 반응 저수지의 높은 위치의 출구의 지체시간, 빠른 반응 저수지의 낮은 위치의 출구의 지체시간을 나타내며, 이와 관련된 유역경사, CN, SAAR 등과 밀접한 관계가 있을 것으로 추정되나 뚜렷한 상관성을 보이지 않고 있다. $\% (q)$ 는 유효강우량이 빠른 저수지로 가는 양을 나타내는 매개변수이며 면적, 경사, 강수량, CN과 밀접한 연관이 있을 것이라 예상하였지만 본 연구 결과 뚜렷한 경향성이 없다. 모든 매개변수에 대하여 약한 경향성을 보이거나 경향성이 나타나지 않는 결과를 보여주며 이는 추후에 유역의 다양성을 확보하여 검토해야 할 부분이라 판단된다.

2. 유역 그룹 VS 모형의 보정 및 검증 성능

4개의 특성인자를 소(L), 중(M), 대(H)로 구분하여 각각의 유역의 특성인자가 속하는 범위를 나타낸 결과는 <Table 5>와 같으며 그룹화 된 유역은 사각형박스로 표시하였다.

<Table 5> Grouping Result by Catchment Characteristics

Catchments	AREA	SLPBAR	SAAR	CN	Calibration NSE*	Validation NSE*
8 Bukil	M	M	H	M	0.24	0.47
10 Oksan	M	M	H	M	0.32	0.45
16 Nonsan	M	M	H	L	0.27	0.36
2 Cheongseong	M	H	M	M	0.31	0.42
4 Gidae	M	H	M	M	0.26	0.33
5 Sangye	M	H	M	M	0.25	0.32
6 Songcheon	M	H	M	L	0.22	0.30
15 Useong	M	H	H	M	0.29	0.45
12 Yuseong	M	H	H	L	0.24	0.31
9 Cheongju	L	M	H	M	0.32	0.41
17 Seokdong	L	M	H	M	0.43	0.63
18 Ugon	L	L	H	M	0.41	0.61
1 Cheoncheon	L	H	M	M	0.10	0.29
3 Donghyang	L	H	H	M	0.28	0.53
13 Boksu	L	H	H	M	0.29	0.48
14 Guryong	L	H	H	M	0.31	0.85
11 Seokhwa	H	M	H	M	0.26	2.67*
7 Yanggang	H	H	M	L	0.27	0.49

유역의 특성인자(경사도, 강우량 및 CN 수치의 그룹(H,M,L) 그룹과 모형의 성능과의 뚜렷한 경향성을 확인하지 못하였다. 이러한 경사도, 강우량 및 CN 수치에 따른 모형의 성능편차는 미미하여 뚜렷한 모형과의 관계를 발견하지 못했다. 그러나 유역의 면적, 특히 중규모 면적(250-1000 km²)의 유역에서는 일반적으로 우수한 모형 적용성능을 나타내고 있다. 중규모 유역은 CN, SAAR, SLPBAR에 관계없이 옥산, 청성유역을 제외한 모두에서 일관된 보정 및 검증 기간에서 우수한 성능(0.2-0.35)을 나타내고 있다. 소규모 유역에서 경사가 큰 경우에는 보정 결과가 0.1-0.31의 값으로 우수한 성능을 보여준다. 또한 경사가 크면서 비가 중간크기로 내리는 경우에는 보정, 검증결과에 만족할 만한 결과를 나타내나 연평균 강우량의 H그룹에서는 검증결과와 편차가 크게 나타난다. 유역의 경사가 낮은 우곤은 보정(0.41) 및 검증(0.61) 결과가 우수하지 않다. 대규모 유역의 경우는 양강은 보정(0.27) 및 검증(0.49)에 우수한 성능을 보이지만 석화의 경우는 보정은 적합하나 검증결과가 2.67의 수치를 나타내어 검증 적용에 있어 문제점을 나타내고 있다.

4개의 대표 유역특성의 그룹과 모형성능을 비교한 결과 뚜렷한 상관성을 확인할 수 없다. 그러나 중규모 면적의 유역이 일관된 우수한 성능을 나타내고 있다.

VI. 결론

본 연구는 PDMM을 금강의 18개 소유역을 대상으로 적용하여 금강 유역의 적용성을 검토하였으며, 이를 유역의 대표 유역 특성인자와의 관계분석을 통하여 금강 유역의 특성을 반영한 모형개발의 기초자료를 구축한다. 연구를 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 개념적 강우-유출 모형인 PDMM을 금강 18개 소유역에 적용한 결과 6개 유역을 제외한 12개유역(천천, 동향, 기대, 산계, 송천, 양강, 북일, 석화, 유성, 복수, 우성, 논산)에서 우수한 보정 결과(0.3이하의 NSE*)를 나타내고 있으며, 이들 유역 중 10개유역(천천, 기대, 산계, 송천, 양강, 북일, 유성, 복수, 우성, 논산)에서 우수한 검증 결과(0.5이하의 NSE*)를 보여주고 있어, 금강 유역 10개 유역에 대하여 우수한 적용성을 나타내고 있다.

2) 수문 모의 곡선의 결과 10개 유역에 대하여 곡선의 형태 및 첨두 홍수량의 시간차등은 우수한 성능을 나타내나, 첨두 홍수량 부분 및 저유량 부분에서는 관측치를 모의 하지 못하는 문제점을 나타내고 있다.

3) 보정된 매개변수 및 모형의 모의 성능과의 유역 특성인자들과의 상관관계분석결과 뚜렷한 관계를 나타내지 못하나, 중규모 유역에서 일관되게 우수한 모의 성능을 나타내고 있다.

본 연구의 강우-유출모형은 성계홍수량 산정을 위한 금강 유역의 대표 모형으로 적용될 것이며, 향후 연구에서는 모형의 적용 대상유역을 다양하게 늘려 보정된 매개변수의 일반성을 확보하고자 한다. 또한 첨두유량 산정의 문제를 해결하기 위해 홍수수문곡선 구간별(고유량 수문곡선 부분, 저유량 수문곡선 부분)로 목적함수를 적용하여 세분화된 모의 성능개선을 수행 하고자 한다.

References

- [1] Shaw, E. 1994. *Hydrology in Practice, 3rd Edition*. London: Chapman and Hall.
- [2] Beven, K. 2012. *Rainfall-Runoff Modelling The Primer. 2nd Edition*. Chichester, England: John Wiley & Sons, Ltd.
- [3] Wagener, T., H. S. Wheater, and H. V. Gupta. 2004. *Rainfall-Runoff Modelling in Gauged and Ungauged Catchments*. London: Imperial College Press.
- [4] Choi, H. H. 2012. *Development of the Real-time Water Quality Forecasting System by Linking of Data-driven Analysis with Numerical Model*. Ph.D. Dissertation. Kyungbuk National University..
- [5] Kjeldsen, T. 2009. *Flood Estimation Handbook: Supplementary Report No.1*. Centre for Ecology & hydrology.
- [6] Carpenter, T. M. and K. P. Georgakakos. 2004. Impacts of Parametric and Radar Rainfall Uncertainty on the Ensemble Streamflow Simulations of a Distributed Hydrologic Model. *Journal of hydrology*. 298: 202-221
- [7] Wagener, T. and M. Lees. 2001b. *Monte Carlo Analysis Toolbox User Manual. Civil and Environmental Engineering Department*. London: Imperial College Press.
- [8] Moradkhani, H., S. Sorooshian, H. V. Gupta, and P. R. Houser. 2005. Dual State Parameter Estimation of Hydrological Models Using Ensemble Kalman Filter. *Advances in Water Resources*. 28: 135-147.
- [9] Beven, K. 2001. *Rainfall-Runoff Modelling The Primer*. Chichester: John Wiley & Sons LTD.
- [10] Lee, J. N. and J. K. Noh. 2009. Application of HyGIS-TOPMODEL to the Cheoncheon Watershed. *Conference of the Korea Water Resources Association*. 21: 1033-1037.
- [11] Kang, S. J. and Y. G. Park. 2011. Estimation for Application of the Runoff Analysis Using TOPMODEL at an Ungaged Watershed. *The Korea Academia-Industrial Cooperation Society*. 12(3): 1458-1464.
- [12] Moore, R. 1985. The Probability-distributed Principle and Runoff Prediction at Point and Basin Scales. *Hydrological Sciences Bulletin*. 30(2): 273-297.
- [13] Choi, H. H. and H. S. Lee. 2012. Assessment of Conceptual Rainfall Runoff Models for Regionalisation at Miho Catchment. *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*. 12(1): 193-203.
- [14] Lee. H. S. 2006. *Regionalisation of Rainfall-Runoff Models in the UK*. Ph.D. Thesis of Imperial College London.
- [15] Nash, J. E. and J. V. Sutcliffe. 1970. River Flow Forecasting through Conceptual Models. I. A

discussion of principles. *J. Hydrol.* 10: 282-290.

[16] Ministry of Land, Infrastructure and Transport. 2002. *The Report of Basic Plan for Geum River Maintenance*. Ministry of Land, Infrastructure and Transport.

[17] Ko, A. R. 2012. *Derivation of the Relationship Equation between the Representative Catchment Characteristics and the Flood Index on Small-Mid Sized Catchments in the Upper Geum River*. Graduate of Chungbuk National University

[18] Institute of Hydrology. 1999. *Flood Estimation Handbook, 3 Volumes and Associated Software*. Institute of Hydrology

[19] Ministry of Land, Infrastructure and Transport. 2012. *The Method of Designed Flood Estimation*. Ministry of Land, Infrastructure and Transport.

참고문헌 (References in Non-roman Script)

[4] 최현호. 2012. 자료기반 해석과 물리적 모형을 연계한 실시간 하천수질예측 시스템구축. 경북대학교 박사학위논문.

[10] 이재남, 노재경. 2009. HyGIS-TOPMODEL의 천천유역 적용. 한국수자원학회 2009년도 학술발표회 초록집. 21: 1033-1037.

[11] 강성준, 박영기. 2011. 미계측 유역에 대한 TOPMODEL의 적용성 평가. 한국산학기술학회. 12(3): 1458-1464.

[13] 최호훈, 이효상. 2012. 미호천 유역의 지역화 연구를 위한 개념적 강우유출모형의 평가. 한국방재학회논문집. 12(1): 193-203.

[16] 국토교통부. 2002. 금강 하천정비기본계획. 국토교통부.

[17] 고아라. 2012. 금강 상류 중소 규모 유역을 대상으로 한 대표유역특성인자와 홍수지표의 관계식 도출. 충북대학교 석사학위논문.

[19] 국토교통부. 2012. 설계홍수량 산정요령. 국토교통부.

이소정: 충북대학교 대학원 토목공학 석사과정에 재학 중이며, 강우유출모형의 적용 및 설계홍수량 산정에 관하여 연구중에 있다(sojung3410@naver.com).

조원호: 충북대학교 대학원 토목공학과 산업대학원(석사)을 졸업하였으며 논문으로는 확률분포모형(PDM)의 금강유역에의 적용에 관하여 연구를 수행하였다. 현재 (주)상현선재에 재직 중에 있다(whcho2183@hotmail.com).

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).