미호천 유역의 지역화 연구를 위한 개념적 강우유출모형의 평가

Assessment of Conceptual Rainfall Runoff Models for Regionalisation at Miho Catchment

최호훈* · 이효상**

Choi, Ho Hoon · Lee Hyo Sang

Abstract

The risk of flood and drought have been increasing due to climate change. The major rivers catchments in Korea are relatively well maintained, however, most of mid-small sized ones, which are remained as ungauged, are still in difficulties in water resources management. Therefore, a reliable estimation of discharge is needed for flood risk management in mid-small sized catchment. This study is aimed to find the most suitable Rainfall-Runoff(RR) model for the regionalisation in upper Kengang region. 9 RR models, which are combined form 3 Soil Moisture Accounting models and 3 Routing models in Rainfall-Runoff Modeling Toolkit(RRMT), are applied to 7 sub-catchments in Miho catchment. The performance of continuous simulation of these models is investigated with Monte-Carlo Analysis Toolkit(MCAT). The period of 2004~2007 and 2008~2009 are used for calibration and validation respectively. The Nash Sutcliffe Efficiency($NSE^*=1-NSE$) measures is used as objective function. The results show that CWI-2PMP(0.09-0.39 in NSE^*) and PDM-2PMP(0.16-0.37 in NSE^*) are promising models for further regionalisation research in Upper Kungang region. The routing components (2PMP) in RR models shows that the fast response of catchments are dominant hydrological characteristics in upper Keumgang region. Further research will increase the number of catchments to draw a concrete conclusion.

Key words : Conceptual rainfall-runoff model, Continuous simulation method, Assessment of rainfall-runoff model, Miho catchment

요 지

오늘날 이상기후의 영향으로 홍수 및 가뭄의 위험성이 커지고 있다. 대한민국의 대규모 하천 유역은 잘 관리되고 있으나, 많은 중소 규모의 유역은 미계측 유역으로 남겨져 있어, 수자원 관리에 어려움을 겪고 있다. 따라서 중소 규모 유역의 체계적인 물 위험 관리가 필요하며 이를 위해 신뢰할 수 있는 수문량 산정이 필수적이다. 본 연구는 금강 상류의 미호천 7개 소 유역에 Rainfall-Runoff Modeling Toolkit(RRMT)의 9개의 개념적 강우-유출모형(3개의 토양저류모형과 3개의 유역유출모형의 조합인)을 적용하여 향후 지역화 연구에 적합한 강우-유출모형을 선정하고자 한다. 2004년~2007년 및 2008년~2009년의 수문자료가 검정 및 검증에 적용되었다. 장기 유출모의 성능 분석은 Monte-Carlo Analysis Toolkit(MCAT)를 이용하였으며, 목적함수는 Nash Sutcliffe Efficiency($NSE^*=1-NSE$)를 사용하였다. 그 결과 CWI-2PMP 모형($NSE^*=0.09-0.39$)과 PDM-2PMP($NSE^*=0.16-0.37$) 금강상류지역의 지역화를 위한 모형으로 판단되었으며, 개념적 강우유출 모형의 한 요소인 유역유출모형(2PMP)은 금강상류 지역의 빠른 반응 및 지표하 유출특성이 잘 반영되었음을 확인하였다. 향후 연구유역을 늘려 구체적인 결론을 얻을 필요가 있다.

핵심용어 : 개념적 강우 유출모형, 장기 유출모의, 강우 유출모형의 평가, 미호천 유역

1. 서 론

오늘날 대한민국은 기후 변화 및 이상기후 등으로 인하여 집중호우, 가뭄, 대규모 태풍 등의 자연재해의 위험성이 증대되고 있다. 2011년 여름 서울 지역에서 발생한 집중호우의 사례에서와 같이 자연재해는 막대한 인명 피해와 재산상의 손실을 야기한다. 따라서 체계적인 물 위험 관리 방안의 마련

이 시급하며, 이를 위한 기초적인 분석 도구로서 신뢰할 수 있는 유역 수문량 산정이 필수적이다. 신뢰할 수 있는 수문량 산정을 위하여 국가적 차원에서 다양한 대책 등이 시행되고 있으나 여전히 국토의 많은 부분을 차지하고 있는 중소 규모 유역의 유량관측은 제한적이다. 따라서 본 연구는 이를 위한 해결 방안으로 제시된 개념적 강우 유출모형의 매개변수 지역화 연구를 위하여 금강상류유역에 적합한 개념적 강

*정회원 · 충북대학교 공과대학 토목공학과 석사과정(E-mail : hyosanglee@chungbuk.ac.kr)

**정회원 · 충북대학교 공과대학 토목공학과 조교수(교신저자)

우-유출 모형을 선정 하고자 한다.

미계측 유역의 홍수량 산정은 일반적으로 강우 유출모형의 지역화를 토대로 적용한다. 국제수문학회(Interbational Association of Hydrological Science, IAHS)는 10개년(2003-2013) 연구 아젠다로 미계측 지역의 홍수량 산정(Predictions in Ungauged Basin)을 선정하였으며 현재 폭넓게 연구 되고 있다. Heuvelmans 등(2004)은 준분포형 강우유출모형인 SWAT (Soil and Water Assessment Tool)을 스키프트(Scheldt) 강유역을 대상유역으로 적용하였다. 매개변수와 개변특성인자의 관계도출을 위하여 선형 회귀분석과 인공신경망 방법의 비교 연구를 하였다. 그 결과 특성인자의 매개변수(ALFA_BF, GW_REVAP, REVAOMN, GW_DELAY, CN2)가 토지이용에 관계가 있으며, 인공신경망 방법을 통한 지역화 방법이 선형 회귀분석만큼의 적합성을 보였다. Götzinger와 Bárdossy (2006)는 분포형 모형인 HBV모형을 통해 4가지 지역화 방법 (1. Transfer functions 방법, 2. Modified Lipschitz condition 방법, 3. Monotony condition 방법, 4. Lipschitz와 monotony 결합 방법)을 비교 검토하였다. Modified Lipschitz condition 방법이 목적함수 $NS=0.71$ 로 가장 효과적인 유출모의가 가능하다는 결과를 얻었다. 이병주 등(2009)은 미계측유역에 준분포형 강우유출모형(SWAT선형 회귀분석과 두 개의 다변량 통계기법인 주성분분석법과 계층적 군집분석법을 연계한 매개변수 지역화 기법을 제안하였다. 특성인자의 관측특성인자율(유역면적, 평균표고, 평균경사, 산림면적비, 포화토양수분량, 포장용수량, 영구위조점) 중의 관측위치와의 관측규모가 전체 자료의 82.11%를 설명하는 것으로 나타났으며, 이를 이용하여 유출해석을 수행한 결과 모형효율성계수가 0.8이상으로 관측치와의 적합도가 매우 높게 나타났다. 최윤석 등(2010)은 물리적 기반의 분포형 모형인 GRM(Grid based Rainfall runoff Model)을 낙동강의 위천 과 유등천 유역에 적용하여 지역화 가능성을 검토 하였다. 동일 수계에 있는 상류 미계측 중소 유역의 유량 산정에 적용할 수 있음을 나타내고 있다. 그러나 연구의 결과를 일반화 하여 다른 유역으로 적용하기에는 한계점이 있다.

분포형 모형의 지역화 연구는 다양하게 이루어지고 있으나, 미계측유역의 지역적인 범위가 크고 수문-지질학적 자료의 축적에 따른 정확성이 확보되지 못하였을 때, 신뢰성 있는 모형의 부분 격자별 물리적인 특성 도출이 어려운 단점이 있다. 따라서 주요 매개변수는 유역의 물리적인 특성인자로부터 산정되기 보다는 여전히 검토의 과정을 거쳐 산정 되는 한계점을 보여 주고 있다. 유역면적에 따른 지형자료의 공간해상도 및 강우량과 같은 시계열 자료의 시간 간격 등 자료의 품질이 모의 결과에 큰 영향을 미친다(홍준범, 2006). 따라서 미계측 유역의 홍수량 산정 실무에서는 물리적 기반의 분포형 모형의 이론적인 우수성에도 불구하고, 양질의 자료 확보의 어려움 등의 이유로 국내에서는 개념적 강우-유출 모형(HEC-HMS, Hydrologic Engineering Center, 2000)등이 일반적으로 적용된다.

HEC-HMS 계열의 강우-유출 모형은 대표적인 개념적 모형으로 국내의 미계측 유역의 하천정비 기본계획에서 널리 사

용되고 있다. 이준우 등 (2003)을 비롯하여 국내에서 다양한 연구가 진행되고 있다. 김주철 등(2010)은 굴포천 유역을 대상으로 기존의 매개변수 산정을 통한 매개변수의 타당성을 HEC-1 모형으로 검토하였다. 그 결과 도달시간(T_c)의 Kraven1 공식과 Kraven2공식이 Kirpich 공식보다 더 안정적인 결과를 얻을 수 있다는 결론을 도출하였다. 그러나 이러한 매개변수 산정 공식은 국내에서 개발 된 것이 아니라, 미국의 지형 및 수문특성을 바탕을 두고 있다. 또한 유역의 유출특성을 유역의 수문학적인 변동성등을 고려하지 않고, 유출계수(CN)에 의하여 단순하게 산정되는 문제점 등을 보여 주고 있다. 따라서 국내 유역의 수문학적인 특성을 반영한 미계측 유역의 홍수량 산정 방법의 개선 (예, 매개변수 산정 공식 등)의 필요성이 꾸준히 대두 되고 있다(윤용남 등, 2010).

개념적 강우-유출모형을 적용한 지역화 연구가 널리 연구되고 있으며, 각국의 미계측 유역의 홍수량 산정에서 널리 사용되고 있다. 영국은 Flood Estimation Handbook(1999)을 통하여 미계측 지역의 홍수량 산정 절차를 명확히 하고 있다. 조복희 등(2004)은 지역화 연구인 유역특성인자들과 유량의 상관성을 분석하기 위하여 회귀식을 산정하였다. PRMS모형의 매개변수를 미계측 유역으로의 전이하는 방법을 제시하였으며, 소양강댐유역과 충주댐유역을 미계측 유역으로 가정 후 지역화 방법을 검토하였다. 그 결과 지역화연구의 높은 정확도와 신뢰성 있는 유출해석이 가능할 것으로 판단하였다. 또한 정일원 등(2005)은 PRMS모형의 국내 적용을 위하여 GIS 자료 해상도의 민감도 분석을 실시하였다. 그 결과 최대 토양수분보유능과 평균표고가 가장 민감하게 나타났다. 유철상과 박용희(2006)은 지형 특성과 관련된 IHACRES 모형의 매개변수 지역화 연구를 하였다. 지역인자인 유로연장, 유역면적, 유역경사, 하천경사 등을 회귀분석하여 특성화하고 이를 남한강 상류와 평창강 유역에 적용하여 유출을 평가하였다. 그 결과 유역특성인자들을 이용하여 매개변수 추정이가 가능하였으며, 관측유량과 모의유량은 $R^2=0.84$ 의 오차를 보임을 확인할 수 있었다. Bastola 등(2008)은 TOPMODEL을 총 26개의 유역(웨일즈와 UK 북부의 5개 유역, 호주 동부의 5개, 프랑스의 9개, 네팔의 4개, 일본의 3개 유역)에 적용하여 매개변수의 불확실성에 대한 지역화연구를 실시하였다. 그 결과 $NSE=0.25-0.85$ 로 모든 유역이 지역화 연구에 대한 유역으로 적합함을 알 수 있었으며, 모형과 특성인자간의 상관관계(습윤정도, 부식에 대한 매개변수 m , 포화상태인 흙에서의 투과율 T_0 등)를 연구하였다. 권형중 등(2008)은 용담댐 유역을 대상으로 유역특성자료 분석시스템(KGIS-Hydrology)을 이용하여 PRMS 모형의 입력매개변수를 추출하고 유출모의를 수행함으로써 PRMS모형의 국내 유역 적용성을 검토하였다. Viviroli 등(2009)은 스위스 미계측 지역에 타당한 홍수량 산정을 위하여 개념적 모형인 PREVAH (Precipitation - Runoff- EVEpotranspiration- HRU related model)을 적용하여 매개변수 지역화 연구와 홍수량 산정연구를 하였다. 총 140개의 유역을 대상으로 실시하였으며, 100년 빈도의 홍수량과 비교해본 결과 평균오차 -7%의 결과를 얻었다. 이는 90%의 통계학적 신뢰구간 내에 있어 좋은 모형성능을 보였다.

본 연구에서는 금강 상류의 강우유출모형의 지역화 연구의 기초 단계로서, 미호천 유역에 적합한 개념적 강우 유출모형을 선정하기 위하여 Rainfall Runoff Modeling Toolkit(Wagener et al., 2006) 및 Monte Carlo Analysis Toolkit(Wagener et al., 2006)을 이용하여, 장기 유출모의 성능을 평가하고 이를 바탕으로 미호천 유역의 특성을 반영한 개념적 강우 유출모형을 선정하고자 한다. 이를 위하여 세 개의 토양저류모형(Modified Penman type model, Catchment Wetness Index model, Probability Distributed model)과 세 개의 유역유출모형(2-conceptual reservoirs in parallel, Macro-pre Approach parallel structure, 3-conceptual reservoirs in parallel)의 조합인 총 9개의 모형을 구성하여, 미호천의 7개의 소유역에 적용하여 모형 성능을 비교 평가한다.

2. 연구 유역

금강 상류의 미호천유역은 상류에 대규모 댐이 위치하고 있지 않아, 대규모 홍수 조절이 이루어지고 있지 않는 대표적인 자연 유역이다. 유역의 면적은 약 1,855 km²이고, 유로연장 80.17의 금강 유역(9914.01 km²)의 약18.7%를 차지하는 중규모의 유역이다.

본 연구의 유역 관련 자료는 국가 수자원 관리종합정보 시스템(WAMIS; Water Management Information System) 및 기상청의 미호천 자료를 이용하였다.

미호천 유역의 수위관측소는 총 14개소가 있으나, 수위 및 강우관측소의 보유 자료기간, 자료의 품질 및 물 수지 분석 등을 통하여 최종적으로 일곱 개의 수위관측소(합강, 석화, 북일, 오창, 옥산, 청주 수위관측소) 선정 하였다. 이들 수위관측소를 출구로 미호천 유역을 분할하여 총 7개의 시험 유역을 산정 하였다. 각 유출구(수위관측소)의 품질이 검증된 최근 자료를 바탕으로 일 단위의 유역 유출고를 모형의 입력 자료로 적용하였다. 2004년부터 2007년 기간, 2008년부터 2010년의 기간을 각각 검증 및 검증기간으로 적용하였다.

연구 유역의 강우량 자료는 미호천 유역에 영향을 주고 있

는 10개의 강우관측소(가덕, 병천, 서운, 음성, 오류, 정안, 조치원, 증평, 진천, 청주)에서 관측된 일단위 강우 관측 자료를 Thiessen 방법에 따라 일 단위 면적 평균 강우량으로 산정, 적용하였다.

유역의 기온자료는 청주기상청의 일 평균기온을 사용하였으며, 유역의 증발산량 자료는 국제식량농업기구(FAO; Food and Agriculture Organization of the United Nations)에서 개발한 FAO Penman-Monteith 방법을 이용하여 산정하였다(김재철, 2010).

3. 개념적 강우 유출모형

영국 임페리얼 대학에서 개발된 개념적 강우 유출모형 도구(Rainfall Runoff Modelling Toolkit-RRMT)와 몬테 카를로 분석 도구(Monte Carlo Analysis Toolkit-MCAT)을 활용하여 개념적 모형들을 평가한다. RRMT는 다양한 유역 유효강우량을 산정하는 토양저류(Soil Moisture Accounting)모형 부분과 유역유출을 산정하는 유역추적(Routing)모형부분의 모듈형으로 구성되어 다양한 조합이 가능하다(Wagener et al., 2004). MCAT는 몬테카를로 추출을 최적의 매개변수 산정을 위한 분석을 수행한다. 이러한 모형 도구 및 분석도구를 통하여 미호천 유역의 수문학적 특성을 반영된 모형을 구축 및 평가가 가능하다.

3.1 강우 유출 모형 도구 (RRMT)

1) 토양저류 (Soil Moisture Accounting)모형

토양저류모형으로 수정 펜맨 모형 (Modified Penman type model (MP)), 유역 습윤 지수 모형 (Catchment Wetness Index model (CWI)) 그리고 확률 분포형 모형 (Probability Distributed model (PDM))을 적용한다.

Penman(1949, Jolly, 1995)의 경험적인 토양저류모형인 수정 펜맨 모형은 근역대(식생의 근입 깊이와 모세관 현상을 고려한 토양깊이, Root Zone/Root Reservoir/Root Constant)와 근역대 이하의 깊이에서의 증발 현상을 개념화한 모형이다. 상부의 근역대에서 실제 증발(Actual Evaporation)은 잠재 증발량(Potential Evaporation)과 같은 양으로 발생한다. 근역대의 증발이 종료된 후 근역대보다 깊은 심도에서 잠재 증발의 약 8%로 발생하는 것으로 산정한다(Penman, 1949, Jolly, 1995).

Jakeman et al.(1993)이 유역습윤지수를 이용한 모형(IHACRES, Jakeman and Hornberger, 1993)을 제시한 이래 다양한 형태로 적용되고 있다. CWI 모형은 유효우량을 산정하는 지표로서 유역의 선행 습윤 정도가 사용되며, 유역이 건조한 경우보다 습윤한 경우 더 많은 유효우량을 산정하도록 유역습윤지수를 적용하고 있다.

Moore(1985)는 유역에 걸쳐 다르게 분포하고 있는 토양저류를 확률분포형으로 개념화 한 모형을 제시하였다. PDM 모형은 유역 내 저류용량의 편차를 고려하기 위하여 유역에서 공간적 토양저류(Soil Moisture Storage)분포를 Pareto 확률분포로 개념화 하였다.

Fig. 1 Study Area- Miho catchments

Fig. 2. Schematic description of Soil Moisture accounting model (from Wagener et al., 2004)

Table 1. Description of Soil Moisture Accounting model parameters

Model	Parameters	Description	Range
MP	rc	Root constant	1~200 [mm]
	$bypass$	Bypass(default is 0.15)	0~0.25 [-]
CWI	t	Time constant of catchment	1~40 [dt]
	$refc$	Reference parameter	0~10 [-]
	mf	Modulation factor	0~5 [-]
PDM	$Cmax$	Maximum storage capacity of the catchment	1~1000[mm]
	b	Degree of spatial variability of storage capacity in the catchment	0~2 [-]

각 토양 저류모형별 개략도는 Fig. 2와 같으며, 각각의 매개변수는 다음 Table 1과 같다.

2) 유역 추적(Routing) 모형

토양저류모형에서 산정된 유효우량은 유역의 다양한 경로를 통하여 유역의 출구로 연결되며, 이를 표현하기 위하여 하나 이상의 유출경로들이 고려된다. Jakeman and Hornberger (1993)은 토양저류모형에서 강우와 유출간의 비선형적인 관계가 반영됨에 따라, 유출경로에서는 선형적인 저류지(linear conceptual reservoir)를 사용할 수 있음을 보여주었다. 이러한 선형저류지가 개념적 강우-유출모형에서 일반적으로 사용되며, 다양한 형태의 유역추적이 조합되어 적용된다(Jakeman et al., 1990; Wagener et al., 2004).

가장 일반적으로 적용되는 병렬 2선형 저류지 유출 모형(2-Conceptual Reservoirs in Parallel, 2PAR))으로 2개의 저류지는 유역의 빠른 반응을 형상화한 것과 느린 반응을 형상화한 것이다. 모든 유효강우량은 빠른 반응 저류지로 가는 양을 나타내는 $\%(q)$ 변수를 통해 2개의 저류지로 나누어지며, 각 저류지에서 체류시간 변수 rtq 와 rts 를 통해서 유출유량으로 연결된다.

빠른 지표 하 흐름을 고려한 병렬 2선형 저류지 유출 모형(Macro-pre Approach, Parallel Structure (2PMP))은 2PAR 모형의 빠른 흐름을 반영하는 저류지에 지표하 흐름(Macrospace Mechanism, Interflow)을 반영하는 유출구를 적용한 형태이다(Wagener et al. 2001). 검정 매개변수는 모든 유효 강우량은 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.

병렬 3선형 저류지 유출 모형(3-conceptual reservoirs in

parallel, 3PAR) 모형은 병렬로 연결된 3개의 선형 저류지 모형으로 세 개의 선형 저수지들은 유역의 빠른 반응, 중간 반응, 그리고 느린 반응 요소들을 대표하기 위하여 구성하였다. 모든 유효 강우량은 1저류지, 2저류지로 가는 양을 나타내는 $\%(q1)$ 와 $\%(q2)$ 변수를 통해 3개의 저류지로 나누어진다. 각 저류지에서 체류 시간 변수 $rt1$, $rt2$, $rt3$ 를 통해서 유출 유량으로 연결된다.

각 유역유출모형에 대한 검정 매개변수는 Table 2와 같고 유역추적모형의 개략적인 개념도는 Fig. 3과 같다.

3.2 몬테 칼로 분석 도구 (MCAT)

강우-유출모형의 적용성 분석은 임페리얼 칼리지에서 개발한 Monte-Carlo Analysis Toolbox(MCAT)를 활용하여 분석하였으며, 몬테 칼로 검정 모의 결과를 매개변수의 사후반응 표면(Posterior response surface), 식별성 측도(Identifiability plot) 및 민감도 분석(Regional sensitivity analysis) 등으로 분석하여 최적의 매개변수를 산정하였다.

몬테 칼로 검정 방법은 입력변수에 대한 반복적인 통계학적 샘플링을 통해 다양한 수학적 문제들에 대한 근사해를 얻어내는 방법이다(Fishman,1996). 각 모의수행마다 모형구조에서 하나의 출력 값이나 출력 값들의 집합을 도출할 수 있으며 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(Haan, 1979).

각각의 매개변수들의 상하범위구간에서 다수의 매개변수를 무작위로 추출하고, 이를 모형에 적용하여, 각각의 모의 성능

Table 2. Description of Routing type model parameters

Model	Parameters	Description	Range
2PAR	rtq	Residence time quick flow reservoir	1~15 [dt]
	rts	Residence time slow flow reservoir	15~300 [dt]
	$\%(q)$	Percentage flow through quick flow	0~1 [-]
2PMP	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 [-]
3PAR	$rt1$	Residence time first flow reservoir	1~15 [dt]
	$rt2$	Residence time second flow reservoir	15~300 [dt]
	$rt3$	Residence time third flow reservoir	15~500 [dt]
	$\%(q1)$	Percentage flow through first flow reservoir	0~1 [-]
	$\%(q2)$	Percentage flow through second flow reservoir	0~1 [-]

Fig. 3. Schematic description of Routing (from Wagener et al., 2004)

을 목적함수로 검토하여, 최우수 성능을 보여주고 있는 최적의 매개변수를 선정한다. 매개변수의 반복 모의 결과를 통하여 모형의 구체적인 반응을 분석할 수 있으며, 더 나아가 개별 매개변수의 영향 등을 세밀하게 검토할 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 (최현상과 한건연, 2004).

목적함수는 유역에서 관측된 관측 자료와 모형의 모의 결과의 차이를 검토하여 최적의 모형 성능 및 매개변수를 검토하는 수단으로 적용된다. 본 연구에서는 Nash Sutcliffe Efficiency(NSE^*)를 사용하였다. 목적함수 NSE^* 는 무차원인 목적함수로서 $-\infty$ 에서 1의 값을 나타내며, 1에 가까울수록 최적값을 나타낸다. NSE^* 는 편차의 제곱의 형태를 사용하여, 저유량보다 고유량 기간에 편차의 영향을 크게 받으므로 일반적으로 홍수기 및 최대 홍수량 등의 모의 성능에 초점이 맞춰진다. 목적함수 NSE 는 다음 식(1)과 같다.

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

여기서, o_i 는 시각 i 에 관측된 유량, $c_i(\theta)$ 는 시각 i 에 모델별 변수 세트 θ 로 모의된 유량이다. 본 논문에서는 다른 목적함수 (Root Mean Squared Error)와 같이 0에 근접할수록 우수한 성능을 나타내어 결과를 비교 검토하는데 적합하도록 식(2)와 같이 NSE^* 을 이용한다.

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

4. 강우유출 모형의 적용 및 평가

미호천 내 연구유역(함강, 석화, 북일, 오창, 옥산, 청주, 증평)의 강우-유출모형의 적용성 평가를 위하여 장기유출모의사상에 대한 검정(2004.1.1-2007.12.31) 및 검증(2008.1.1- 2009.12.31)을 실시하였다.

총 9개 모형 (세 개의 토양저류모형(MP, CWI, PDM)과 세 개의 유역 추적모형(2PAR, 2PMP, 3PAR)의 조합)의 일 단위의 장기 유출모의분석을 몬테칼로 방법으로 수행하였다. 각각의 매개변수들의 상하범위구간에서 각 10,000의 무작위 균등 추출(Uniform Random Sampling)을 통하여 추출된 매개변수들을 모형에 적용한다. 이들 매개변수의 모의 성능을 목적함수(NSE^*)로 검토하여, 사후반응표면, 식별성 측도, 민감도 분석을 통하여 최우수 성능을 보여주고 있는 최적의 매개변수를 선정한다. 이를 통하여 모형의 성능의 영향이 큰

민감도 큰 매개변수의 정보 등 모형의 구체적인 성능을 검토한다. 초기 조건의 영향을 최소화하기 위하여 검정 기간의 초기 20%를 제외하여 모형의 목적함수를 계산하였다. 목적함수의 비교 검토 뿐만 아니라 개별 수문곡선을 시각적으로 추가 검토하였다. 본 논문은 연구유역 중 복일 유역을 예로 일련의 장기유출모의의 산정방법을 설명하며 나머지 유역에 대하여 동일한 방법으로 수행하였다.

4.1 몬테 카를로 분석

Monte-Carlo Analysis Toolkit(MCAT)을 사용하여 세 개의 토양저류모형(MP, CWI, PDM)과 세 개의 유역 유출모형(2PAR, 2PMP, 3PAR)의 조합으로 구성된 총 9개의모형의 사후반응표면, 식별성 측도, 민감도 분석 순으로 분석을 실시하였다.

1) 사후반응표면

매개변수의 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.

Fig. 4는 복일 연구유역의 CWI-2PMP모형의 매개변수들의 사후반응표면을 통해 무작위로 추출한 매개변수를 나타낸 것이며, 가로축은 CWI-2PMP의 모형 매개변수(τ , $refp$, mf ,

$k(q)$, $k(s)$, $\%(q)$)의 범위, 세로축은 모형의 성능(NSE^*)을 나타내는 목적함수의 값을 나타낸다. 또한 모형의 성능이 가장 우수한 매개변수는 사각형박스로 표시한다. 사후반응표면이 아랫방향으로 불록한 원추형의 형상을 가지는 매개변수를 검정 근거가 뚜렷하다고 평가한다.

매개변수 τ , $refp$, mf , $k(s)$ 는 매개변수 범위 전 구간에 반응표면이 평평한 특성을 보여 주어 우수한 매개변수를 선정하기 어렵다. 그러나 $k(q)$ 는 값이 0.5 근처에서 그리고 $\%(q)$ 의 경우는 매개변수의 범위가 0.6 근처에서 아래로 불록한 표면 특성을 보여 검정근거가 뚜렷하다고 평가한다. 이 둘 두 매개변수는 빠른 흐름 특성에 관련된 매개변수($k(q)$ 는 빠른 흐름을 나타내는 저류지의 지체 시간, $\%(q)$ 는 빠른 흐름으로의 흐름비)로서, 유역의 유출 특성이 빠른 흐름특성에 큰 영향을 받고 있음을 나타낸다.

2) 식별성 측도

식별성 측도(Identifiability measure)는 어떠한 특정성능 이상의 매개변수들의 빈도수를 임의의 매개변수 구간에 도시한 그래프로 나타낸다. 매개변수의 빈도수는 막대그래프 및 누가 분포그래프를 통해 나타나며 이는 사후반응표면의 검정근거를 보다 객관성 있게 표현할 수 있다는 장점이 있다.

복일 연구유역의 식별성 측도 결과는 사후반응표면의 결과와 같은 양상으로 매개변수 τ , $refp$, mf 그리고 $k(s)$ 는 NSE^* 값 0.1 내외의 막대그래프가 전 구간에 걸쳐서 일정하

Fig. 4. Dotty plots of model parameters (CWI-2PAR, $NSE^*=0.21$, bukil)

Fig. 5. Identifiability plot of model parameters (CWI-2PAR, $NSE^*=0.21$, Bukil)

게 분포하며, 누가분포 그래프는 매개변수 범위 전 구간에 걸쳐 일정한 경사를 가진다. 그러나 $k(q)$ 와 $\%(q)$ 의 경우 매개변수의 일정 범위($k(q)$: 0-4, $\%(q)$: 0.4-0.8)에 증가된 막대 그래프가 존재함을 알 수 있으며 누가 그래프는 이 일정 범위에서 급경한 경사를 가진 누가 그래프가 얻어진다. 이를 통해 $k(q)$ 와 $\%(q)$ 매개변수가 모형의 검정에 있어서 경사도를 객관적인 수치로 제공하여 매개변수의 식별성 측도로 검토한다. Fig. 5는 복일 연구유역의 CWI-2PMP모형의 매개변수들의 식별성 측도 그림으로 검토한 사후반응표면의 검토 예에서와 같이 $k(q)$ 와 $\%(q)$ 만이 뚜렷한 검정 능력을 보이고, 나머지 매개변수 들은 모형의 성능에 영향을 미치지 못하고 있음을 보여 주고 있다.

3) 민감도 분석

부분 민감도분석(Regionals sensitivity analysis)은 우수한 모의 결과와 우수하지 않은 모의결과의 누가분포의 편차를 이용하여 각 변수구간의 민감도를 분석하는 기법이다. 즉, 사후반응표면 산정 결과에 임의의 목적함수 기준 값을 설정하고 그 값보다 좋은 값들을 behavioral set, 설정 값보다 적은 값들을 non-behavioral set으로 정의한 후 behavioral set의 누가분포 그래프와 non-behavioral set의 누가그래프를 비교하여 민감도를 분석한다. 민감도가 높은 매개변수는 behavioral 누가그래프와 non-behavioral 누가그래프 사이의 폭이 크며 그와 반대로 민감도가 작은 매개변수는 behavioral 누가그래프와 non-behavioral 누가그래프 사이의 폭이 좁다 (Beven, 2001).

Fig. 6은 복일 연구유역의 매개변수 민감도 분석 결과이며 우수한 모의 결과의 누가분포는 붉은색으로 표시, 우수하지 않는 모의 결과의 누가분포는 파랑색으로 표시한다. 그래프의 가로축은 매개변수를 나타내며, 세로축은 누가확률을 나타낸다. 그 결과 CWI-2PAR 모형의 매개변수 민감도는 $k(q)$ 매개변수와 $\%(q)$ 매개변수가 크다.

몬테 카를로 방법에 의하여 산정한 10,000의 매개변수 샘플들의 성능을 검토한 결과CWI-2PAR모형의 5개 매개변수 중 모형의 주요 매개변수로서 작용하는 변수는 유역의 빠른 흐름 반응에 관련된 $k(q)$ 와 $\%(q)$ 변수 이며, 나머지 매개변수는 검정능력 및 식별성이 없는 매개변수들로 판단된다. 이는 다

른 유역의 결과에서도 유사하게 나타난다. 이는 목적함수인 NSE^* 이 고 유량에 초점을 맞춘 사항도 있으나, 금강 상류의 미호천 유역의 유출 특성이 강우 후 유역의 빠른 반응이 우세하다고 판단된다.

4.2 강우 유출모형의 검정 결과

9개 모형의 7개 유역에 대한 검정 결과에서 합강 연구유역의 경우 NSE^* 값이 0.36-0.41이 산정되어, 모형의 성능이 일정 수준이하로 평가 되었다. 9개의 모든 모형의 모의된 검정 결과가 실측된 값과의 큰 차이를 보이며, 모든 강우-유출모형은 합강 연구유역의 수문분석에 대하여 적합하지 않다.

이에 반해 석화연구유역은 CWI모형에 의한 검증 결과 ($NSE^*=0.16$)가 MP 모형 및 PDM 모형($NSE^*=0.19$ -0.20)에 비해 우수한 결과를 보인다. 복일 및 오창 연구유역의 경우 MP와 PDM 모형에 의해 우세성이 큰 것으로 판단되었으나 토양저류모형에 대한 비교(예; MP-2PAR, MP-2PMP, MP-3PAR의 비교 혹은 PDM-2PAR, PDM-2PMP, PDM-3PAR의 비교)결과 뚜렷한 차이가 없다. 옥산 연구유역의 경우 MP-2PMP 모형과 CWI-2PMP 모형이 NSE^* 값 0.25로 가장 우수한 결과 값이나 9개의 모형에 대해 뚜렷한 경향성을 찾기 어렵다.

청주 유역의 NSE^* 는 0.16-0.21 값이 산정되었으며, 특히 CWI모형이 MP 및 PDM모형보다 우수한 결과를 얻었다. 따라서 청주 유역에 적합한 강우-유출모형은 CWI-2PAR와 CWI-3PAR 모형이다($NSE^*=0.16$). 증평 연구유역의 경우 CWI-2PMP에서 최적의 모의 결과를 얻었다. 토양저류모형에 따른 비교는 CWI 모형($NSE^*=0.09$ -0.10)이 MP 모형(0.21-0.23)과 PDM모형(0.21-0.23) 보다 비교적 정확히 모의되었다. 증평유역의 경우 CWI-2PMP모형이 가장 적합한 모형으로 판단된다.

7개의 연구유역의 NSE^* 검정 결과는 다음 Table 3과 같다. 각각의 유역에서 가장 우수한 목적함수 값이 나온 모형은 회색으로 표시하였으며 이를 최우수모형으로 한다. 또한, 목적함수인 NSE^* 값이 0.2이하의 양호한 모형성능을 갖는 모형은 *을 붙여서 각각의 연구유역에서의 우수모형으로 한다. 다음 Fig. 7은 복일 연구유역의 CWI-2PAR모형의 검증에 대한 유출수문곡선을 나타낸다. 시각적 유출모의 분석을

Fig. 6 Regional Sensitivity Analysis of Model Parameters (CWI-2PAR, $NSE^*=0.21$, Bukil)

Table 3. Model performance(NSE^*) of Calibration

Calibration	MP			CWI			PDM		
	2PAR	2PMP	3PAR	2PAR	2PMP	3PAR	2PAR	2PMP	3PAR
Habgang	0.38	0.36	0.38	0.40	0.39	0.41	0.38	0.37	0.39
Seokhwa	0.20*	0.19*	0.20*	0.16*	0.16*	0.16*	0.20*	0.19	0.19
Bukil	0.17*	0.17*	0.17*	0.21	0.20*	0.21	0.16*	0.16*	0.16*
Ochang	0.16*	0.16*	0.17*	0.21	0.21	0.21	0.17*	0.16*	0.17*
Oksan	0.29	0.25	0.29	0.26	0.25	0.26	0.29	0.27	0.29
Cheongju	0.21	0.21	0.21	0.16*	0.17*	0.16*	0.20*	0.18*	0.20*
Jeungpyeong	0.23	0.21	0.23	0.10*	0.09*	0.10*	0.22	0.21	0.23

Table 4. Model performance(NSE^*) of Validation

Validation	MP			CWI			PDM		
	2PAR	2PMP	3PAR	2PAR	2PMP	3PAR	2PAR	2PMP	3PAR
Habgang	0.43	0.58	0.56	0.34*	0.65	0.45	0.69	0.82	0.62
Seokhwa	0.54	0.52	0.54	0.55	0.58	0.57	0.56	0.62	0.57
Bukil	0.32*	0.36*	0.38*	0.39*	0.32*	0.35*	0.37*	0.39*	0.36*
Ochang	0.54	0.51	0.49	0.41	0.37*	0.38*	0.43	0.44	0.45
Oksan	1.34	0.36*	1.12	1.54	1.19	1.13	1.27	0.93	0.64
Cheongju	0.31*	0.41	0.30*	0.29*	0.47	0.29*	0.36*	0.31*	0.31*
Jeungpyeong	0.66	0.91	0.76	1.62	1.42	1.81	0.89	0.80	0.95

Fig. 7. Time series of the calibration period showing observed flow(gray) and calculated flow for the Bukil using the CWI-2PAR model structure($NSE^*=0.21$)

위한 유출수문곡선의 가로축은 일단위의 시간축이며, 세로축은 유출고를 나타낸다. 또한 회색그래프는 관측유량을 나타내며 점선그래프는 모의된 유량을 나타낸다.

4.3 강우 유출모형의 검증 결과

강우-유출 모형의 적용에 앞서 검정된 모형의 검증(Validation)과정이 필요하다. 본 연구에서는 2008.1.1-2009.12.31

의 기간을 검증기간으로 적용한 결과도 검정결과와 같이 각 유역에서의 최우수 모형을 회색으로 표시하였으며, 일정 성능($NSE^*=0.4$ 이하)의 검증 결과를 보이는 모형을 우수 모형으로 *을 붙여 Table 4와 같이 표시하였다.

석화 및 증평 연구유역의 경우 목적함수 값이 석화는 $NSE^*=0.52-0.62$, 증평은 $NSE^*=0.66-1.81$ 로 산정되었다. 이는 검정에 의해 산정된 매개변수 셋이 검증기간 동안의 모의에

Fig. 8. Time series of the validation period showing observed flow (gray) and calculated flow for the Bukil using the CWI-2PAR model structure($NSE^*=0.39$)

Table 5. Summary of 9 model performances at 7 catchments in NSE^*

Model		1st in catchment (gray)	Rank	Acceptable performance* (Cal : $NSE^* < 0.2$) (Val : $NSE^* < 0.4$)	Rank
Calibration	MP	3	3	9	2
	CWI	7	1	9	2
	PDM	4	2	12	1
	2PAR	4	2	10	2
	2PMP	7	1	11	1
	3PAR	3	3	10	2
Validation	MP	2	2	6	2
	CWI	5	1	8	1
	PDM	0	3	6	2
	2PAR	3	1	7	1
	2PMP	3	1	6	3
	3PAR	1	3	7	1

대하여 적합하지 않아 검증모의유량과 관측유량의 차이가 발생하였으며, 검증 시 산정된 매개변수가 유역특성을 반영하지 못하였음을 의미한다. 이에 반해 북일 연구유역 및 청주 연구유역은 검증 결과가 양호한 기준으로 선정된 $NSE^*=0.4$ 이하의 값에 대부분의 모형이 부합되므로 검증 시 산정된 매개변수가 유역유출에 적합하다고 유출특성을 반영한다고 판단된다. 옥산 소유역의 경우 MP-2PMP 모형($NSE^*=0.36$)의 매개변수만이 검증능력을 검증되었다. 합강 유역 및 오창 유역은 각각 CWI-2PAR ($NSE^*=0.34$), CWI-2PMP ($NSE^*=0.37$)모형만이 모형의 수문특성을 잘 반영한 매개변수를 산정하였음을 알 수 있다. 다음 Fig. 8은 북일 유역의 검증에 대한 유출수 문곡선이다.

4.3 금강 상류미호천 유역의 강우 유출 모형 평가

금강 상류 미호천 유역의 수문특성을 반영한 최적의 모형을 선택하기 위하여, Table 3과 4에서 표시한 유역별, 검증 기간별 및 검증 기간별로 최우수모형(회색)과 우수 모형(*)의 개수를 산술적으로 합산하여 모형을 평가한다. Table 5은 최우수모형 및 우수 모형의 개수를 모형의 구성 모형인 토양저류모형 및 유역추적모형 별 순위로 나타낸 표이다.

검정기간의 유역별 최우수 토양저류모형은 CWI 모형(7개), 양호한 성능의 토양저류모형은 PDM 모형(12개)이다. 또한 유역유출모형 중 2PMP 모형이 최우수 성능을 보이는 모형(7개) 및 양호한 성능을 보이는 모형(11개)으로 선택되었다. 미호천 유역은 CWI모형과 2PMP모형의 조합인 CWI-2PMP모형이 유출특성을 가장 잘 반영하고 있는 모형이라 판단된다.

또한 최우수 성능을 보이는 모형의 차 순위이자 양호한 성능을 보이는 모형인 PDM 모형에 대한 추가검토가 필요하다. 지표하 빠른 흐름특성을 반영한 2PMP 모형이 우세한 결과는 몬테칼로 분석에서 보여준바와 같이 유역의 빠른 흐름 특성이 미호천 유역의 특성으로 판단할 수 있다. 그러나 이러한 모형의 성능 평가는 7개 유역의 제한된 유역의 적용결과를 바탕으로 했다는 한계점이 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 금강 상류의 강우유출모형의 지역화 연구의 기초 단계로서, 미호천 유역에 적합한 개념적 강우 유출모형을 선정하기 위하여 9개의 개념적 강우 유출모형을 7개의 유역에 적용하여 장기유출모의 성능을 평가한 결론은 다음과 같다.

- 미호천 유역의 장기유출 모형으로 CWI-2PMP ($NSE^* = 0.16-0.39$)가 우수함을 확인하였다. 수문곡선의 모의 결과 전체적으로 우수한 모의 성능을 보이고 있다. 침투 홍수량이 과소 산정되는 문제점이 있으나, 이는 집중형 모형의 일 단위 모의에서 기인한 것으로 판단된다.
- 검증기간의 우수 모형으로 CWI-2PMP와 PDM-2PMP이 선정 되었으며, 유역유출모형으로 유역의 지표하 흐름 특성을 고려한 2PMP가 선정된 것은 미호천 유역의 강우 후 유출로 빠르게 반영한 수문학적 특성을 반영한 것으로 판단된다. 이는 몬테칼로 분석에서 검토된 것 과 같이 빠른 흐름 관련 매개변수(CWI-2PAR의 $\% (q)$ 와 $k(q)$ 등)가 민감함에서도 확인 된다.
- 검증 결과에서는 CWI 모형과 2PAR, 2PMP 및 3PAR가 우수한 성능을 보여 주고 있다. 그러나 각 유역에 적용한 9개의 모형의 목적함수 편차가 크지 않아 CWI-2PMP 모형을 미호천 유역의 적합한 모형으로 일반화하기 어려운 결과이다. 따라서, 차순위의 PDM-2PMP 모형을 향후 지역화 연구를 위한 모형으로 추가로 선정한다. 향후 미호천 유역의 개념적 강우 유출모형으로 CWI-2PMP 및 PDM-2PMP을 선정하여, 지역화 연구의 기본 강우 유출모형으로 적용한다. 또한 보완연구를 통하여 본 연구의 제한된 유역, 검증 및 검증 기간을 극복하여 금강 상류 유역의 대표 강우 유출모형을 검토할 필요성이 있다.

감사의 글

이 논문은 2010년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었음. 이 논문은 2011년 한국 연구재단의 일반연구자지원사업 (신진연구) “중소규모의 유역 홍수량 산정 시스템 개발 (계측 및 미계측 유역의 적용)”의 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

참고문헌

권형중, 황의호, 이근상, 유병혁, 고덕구 (2008) 수문학적 유역특

- 성자료 자동화 추출 및 분석시스템 적용(II)-PRMS 모형을 이용한 용담댐 유역을 대상으로-, **한국지리정보학회지**, 한국지리정보학회, 제11권, 제3권, pp. 13-22.
- 김재철 (2010) **설마천 유역의 증발산량 산정**, 석사학위논문, 인하대학교.
- 김주철, 이상진, 고덕구, 김성곤 (2010) **경험공식에 따라 추정된 HEC-1 모형의 매개변수 타당성 검증**, 대한토목학회 정기학술대회, 대한토목학회, pp. 1833-1836.
- 이병주, 정일원, 배덕효 (2009) 다변량 통계분석을 이용한 준분포형 유출모형 매개변수 지역화, **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제42권, 제2호, pp. 149-160.
- 이준우, 권형중, 신사철, 김성준 (2003) WMS HEC-1 모형을 이용한 경안천 유역의 경년 수문변화 분석, **한국지리정보학회지**, 한국지리정보학회, 제6권, 제1호, pp. 107-118.
- 유철상, 박용희 (2006) 미계측유역의 유출량 산정을 위한 IHACRES모형의 매개변수 지역화에 관한 연구, **한국수자원학회 학술발표회 논문집**, pp. 1792-1796.
- 정일원, 배덕효, 김광천 (2005) **PRMS 적용을 위한 GIS 자료 해상도의 민감도분석**, 대한토목학회 정기학술대회, 대한토목학회, pp. 1368-1371.
- 조복희, 정일원, 배덕효 (2004) **PRMS 모형의 매개변수 지역화에 관한 연구**, 대한토목학회 정기학술대회, pp. 743-747.
- 최윤석, 김경탁, 심명필 (2010) 분포형 강우-유출 모형을 이용한 미계측 중소유역의 유량 추정, **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제43권, 제4호, pp. 353-365.
- 최현상, 한건연 (2004) GIS와 불확실도 해석기법을 이용한 분포형 강우 - 유출 모형의 개발 (I) - 이론 및 모형의 개발 -, **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제37권, 제4호, pp. 329-339.
- 홍준범, 김병식, 윤석영 (2006) VfloTM 모형을 이용한 물리기반의 분포형 수문모형의 정확성 평가, **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제26권, 제6B호, pp. 613-622.
- Bastola, S., Ishidaira, H. and Takeuchi, K. (2008) Regionalisation of hydrological model parameters under parameter uncertainty: A case study involving TOPMODEL and basins across the globe, *Journal of Hydrology*, 357, pp. 188-206.
- Beven, K. (2001) *Rainfall-Runoff Modelling The Primer*. John Wiley & Sons LTD, Chichester, England.
- Fishman, G.S. (1996) *Monte Carlo; Concepts, Algorithms and Applications*. Springer Verlag, pp. 1-4.
- Götzinger, J. and Bárdossy, A. (2006) Comparison of four regionalisation methods for a distributed hydrological model, *Journal of Hydrology*, 333, pp. 374-384.
- Haan, C.T. (1979) *Statistical Methods of Hydrology*. The Iowa State University Press, pp. 271-273.
- Heuvelmans, G., Muys, B. and Jan, F. (2004) Regionalisation of the parameters of a hydrological model: Comparison of linear regression models with artificial neural net, *Journal of Hydrology*, 319, pp. 245-265.
- Hydrologic Engineering Center (2000) *Hydrologic Modeling System; HEC-HMS, Users Manual*, U.S. Army Corps of Engineers Hydrologic Engineering Center, Davis California.
- Institute of Hydrology (1999) *Flood Estimation Handbook*, 3-5 volumes and associated software, Institute of Hydrology.
- Jakeman, A., Hornberger, G. (1993) How Much Complexity is warranted in a Rainfall-runoff model?, *Water Resources Research*, Vol. 29, No. 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.
- Moore, R. (1985). *The probability-distributed principle and runoff prediction at point and basin scales*. Hydrological Sciences Bul-

- letin, Vol. 30, No. 2, pp. 273-297.
- Penman, H (1949) The dependence of transpiration on weather and soil conditions, *Journal of Soil Science*, 1, pp. 74-89.
- Viviroli, D., Mittelbach, H., Gurtz, J. and Weingartner, R. (2009) Continuous simulation for flood estimation on ungauged mesoscale catchments of Switzerland - Part II: Parameter regionalisation and flood estimation results, *Journal of Hydrology*, 377, pp. 208-225.
- 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.
- © 논문접수일 : 11년 12월 13일
 © 심사의뢰일 : 11년 12월 29일
 © 심사완료일 : 12년 02월 13일