

영국의 설계홍수량 산정모형인 FEH-ReFH의 국내 남천유역 적용성 평가*

김상호¹ · 안소라¹ · 장철희² · 김성준^{1*}

Applicability Test of UK Design Flood Estimation Model FEH-ReFH to Korean Namcheon Watershed*

Sang-Ho KIM¹ · So-Ra AHN¹ · Cheol-Hee JANG² · Seong-Joon KIM^{1*}

요 약

본 연구는 미계측유역의 설계홍수량 산정을 목적으로 영국의 강우-유출모형인 FEH-ReFH (Flood Estimation Handbook-Revitalised Flood Hydrograph)의 국내 적용성을 평가하기 위해 위천유역의 일부인 남천유역(165.12km²)을 대상으로 한 강우-유출 모형을 구성하는데 있다. 모형의 입력자료인 유역 및 수문특성인자를 한국 실정에 맞게 구축하기 위해 GIS기반 전처리 프로그램을 개발하였다. 모형은 남천 유역에 대하여 관측된 6개의 강우-유출 사상을 이용한 보정을 실시하여, 모형의 적용 적합성을 분석하였다. 모형의 손실율 및 단위유량도 매개변수를 대상으로 실측자료를 이용한 보정을 실시하였다. 본 연구의 결과는 기존의 설계홍수량 산정과정에 있어, 영국의 방법을 고려한 국내의 표준 설계홍수량 산정과정을 정립하는데 기여할 것으로 판단된다.

주요어 : 강우-유출 분석, FEH-ReFH, 지리정보시스템, 미계측유역, 설계홍수량

ABSTRACT

The purpose of this study is to evaluate the applicability of UK design flood estimation model, FEH-ReFH through rainfall-runoff simulation of Korean watershed. For the Nam stream watershed(165.12km²), the model was calibrated using 6 storm events. The watershed and hydrological characteristics for the model requirements was prepared by developing input data pre-processors based on open GIS. The parameters of rainfall loss rate and unit hydrograph were calibrated from the observed data. The results can be used for improving and standardizing the Korean design flood estimation method.

2013년 6월 6일 접수 Received on June 6, 2013 / 2013년 8월 19일 수정 Revised on August 19, 2013 /
2013년 9월 3일 심사완료 Accepted on September 3, 2013

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

1 건국대학교 사회환경시스템공학과 Dept. of Civil & Environmental Systems Engineering, Konkuk University

2 한국건설기술연구원 수자원연구실 Water Resources Research Division, Korea Institute of Construction Technology

* Corresponding Author E-Mail : kimsj@konkuk.ac.kr

KEYWORDS : Rainfall-Runoff Analysis, FEH-ReFH, GIS, Ungaged Watershed, Design Flood

서 론

자연재해 중 홍수에 의한 재해가 점차 늘고 있다. 우리나라의 경우, 여름철 저기압, 장마전선, 태풍 등의 위험에 노출된 지역이 많이 있어 각종 산업시설을 보호하고 있는 하천제방 등의 홍수방지 시설물들은 그 설계와 관리에 만전을 기하고 있음에도 불구하고 홍수범람은 하천의 주변 지역에서 많은 인명피해 및 재산피해 등 사회적 문제를 초래하고 있어 근본적인 대책이 필요한 실정이다. 이러한 홍수피해를 방지하기 위해서는 대상유역에 대한 강우-유출 분석을 실시하여 정확한 홍수유출량의 산정이 선행되어야 하지만 국내의 많은 중소 규모의 유역이 미계측 유역 또는 유량 관측 자료가 제한적인 유역으로 분류되어 신뢰할 수 있는 홍수량 산정이 어려운 실정이다(Lee *et al.*, 2011).

강우-유출 분석에 대한 연구를 살펴보면, Park *et al.*(2000)은 남강댐 유역에 대해 HEC-HMS를 이용하여 홍수량을 산정, 관측된 홍수량과 비교 분석하여 홍수예경보 시스템으로의 활용가능성을 제시하였고, Choi *et al.*(2002)은 강원도 내린천 유역에 HEC-HMS를 적용, 홍수량을 산정하였다. Kwon *et al.*(2003)은 TOPMODEL과 Muskingum 기법을 연계하여 안성천유역의 홍수유출분석을 실시하였고, Lee *et al.*(2003)은 WMS HEC-1 모형을 이용한 경안천 유역의 경년수문변화를 분석하였다. 또한 최근에는 Joo and Lee (2011)가 증평 유역에 대한 홍수량 산정을 위해 HEC-HMS와 FEH-ReFH를 비교 분석하기도 하였다.

유역의 유출량을 산정하기 위한 유역유출모형의 입력자료들은 지형과 관련된, 즉 지형정보로부터 추출되어지는 자료들이 다수를 차지하고 있다. 홍수유출량 산정을 위한 주요 매개변수로는 유역면적, 유로연장, 유역경사, 집중시

간, 저류상수, 유출계수 등이 요구되며 홍수량 산정을 위한 단위도 산정방법에 따라 요구되는 매개변수는 달라진다(Hong *et al.*, 2011). 기존에는 이러한 지형입력자료의 구축에 있어 중이지도와 구적기 및 현장측량에 의해 지형정보를 추출하였고 최근 GIS의 발달과 수치지도 제작이 활발히 이루어지면서 유역의 수문학적 특성을 자동으로 계산하고 분석하는 GIS도구와 수치지도모형(Digital Terrain Model, DTM)으로부터 하천단면을 추출하고 수리해석을 실시하며, 그 결과를 그래픽, 그래프, 또는 텍스트 등으로 나타낼 수 있는 통합모형이 널리 보급되어 있다(Park *et al.*, 2003). 영국의 홍수량 산정 방법은 국가 기관에서 홍수량 산정 방법(컴퓨터 전산 프로그램, 유역 수문자료 및 특성인자 등)과 정확한 적용 지침을 제공하고 있어, 참여 기술자의 주관적인 판단을 배제하여 모든 유역에 대하여 일관된 설계홍수량 산정이 가능한 특징을 보여주고 있다. 따라서 미계측 유역의 신뢰할 수 있는 홍수량 산정 방법은 우리 국토의 많은 부분이 미계측 유역이고, 또한 돌발호우가 증대되어 이에 대한 신뢰성 있는 한계홍수량의 평가 등을 감안하면 충분히 검토할 필요성이 있다고 생각된다.

따라서 본 연구에서는 지리정보시스템(Geographic Information System)의 전처리 자료 추출 결과를 영국의 수문모형(FEH-ReFH)에 적용하여 위천유역의 일부인 남천유역(165.12km²)의 수문곡선과 호우사상에 대한 강우-유출관계 분석을 실시하였다. 지형과 관련된 입력자료의 GIS와의 연계를 통해 유역면적, 최원유로연장, 유역평균폭, 총하천연장, 수계밀도, 평균표고, 평균경사, 기복비 등 기존 하천 및 유역특성인자를 추출하였다. 또한 토양습윤비, 기저흐름유출비, 총유출비, 홍수저감계수, 도시집중비 등 영국 고유의 하천 및 유역특성인자는 한국 실정에 맞도록 유효토양수분, CN 등 대체 인자를 파악하였으며, 이에 따라

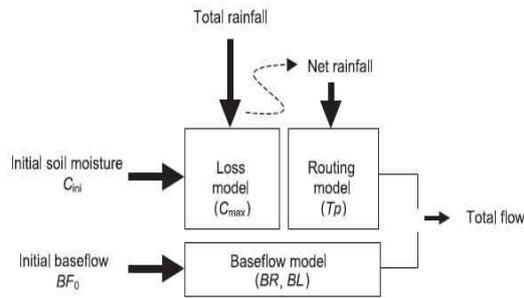


FIGURE 1. Schematic representation of the ReFH model (FEH supplementary report, 2006)

영국의 홍수량 산정 가이드라인(FEH, 1999)으로 널리 활용되는 ReFH 강우-유출모형(Kjeldsen, 2006)에 대한 국내 적용 가능성을 검토하고자 하였다.

FEH-ReFH 개요

영국의 홍수량 산정 모형인 ReFH 강우-유출모형은 Flood Studies Reports(FSR) of Natural Environment Research Council(NERC, 1975)에서 제안한 방법을 근간으로 홍수수문곡선의 작성 및 홍수량 산정부분에 적용되고 있다. ReFH 모형은 영국의 대표적인 개념적 강우유출모형인 PDM(Probability Distributed Model) 모형(Moore, 1985)을 도입하여 지표흐름과 기저흐름의 상호작용을 고려, 지표흐름과 기저흐름을 별도의 모형으로 고려하였다. ReFH 모형의 개요도는 다음 그림 1과 같다.

1. 손실모형(Loss model)

손실모형부분은 영국에서 폭넓게 적용되고 있는 Moore(1985)의 PDM 모형을 바탕으로 하고 있으며, 그림 2는 모형의 토양습윤부분(Soil Moisture Accounting)의 개략도이다. 손실모형 적용 시 중요한 매개변수인 초기 토양함수 조건 C_{ini} 는 홍수사상의 관측 유량으로부

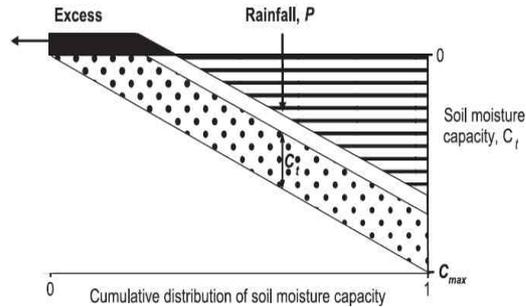


FIGURE 2. Schematic description of loss model (FEH supplementary report, 2006)

터 분석된다. PDM 모형은 장기유출모의를 통한 홍수빈도 해석연구의 기본 강우 유출 모형으로 적용되고 있으며(Lamb, 1999; Calver *et al.*, 2005), 영국 환경부의 실시간 홍수 예정보 모형(Moore, 1999), 그리고 기후변화에 따른 소규모 지역의 유출특성 변화 연구(Prudhomme *et al.*, 2003) 등에 폭넓게 적용되고 있다(Lee *et al.*, 2011).

2. 홍수추적 모형(Routing model)

홍수추적 모형 부분에서는 지역의 개념적 유출 특성을 반영하며 기존의 FSR/FEH 단위도법(Standard Triangular Shaped Unit Hydrograph)을 개선한 그림 3과 같은 Kinked Triangle 단위도법을 적용하고 있다. 이는 장기간 지속되는 기저 유출 특성을 반영한 사항이다(Lee *et al.*, 2011).

3. 기저흐름 모형(Baseflow model)

기저흐름 모형은 기여유역(Contributing Area) 개념을 바탕으로 선형저류함수 모형을 적용하고 있다. 그림 4는 ReFH 기저흐름 모형을 나타내며, 홍수사상의 관측 사상들을 기저흐름 감소 모형(Baseflow recession model)을 통하여 BL 및 BR을 산정한다(Lee *et al.*, 2011).

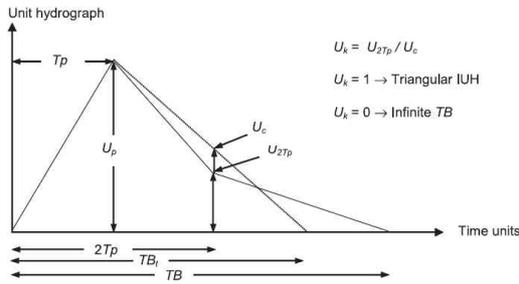


FIGURE 3. Schematic description of routing model(FEH supplementary report, 2006)

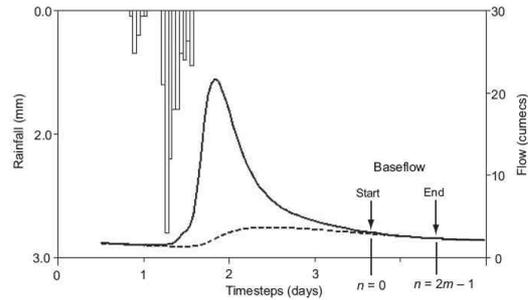


FIGURE 4. Schematic description of baseflow model (FEH supplementary report, 2006)

대상 유역 현황

1. 남천유역의 개요

본 연구에서는 위천유역의 소유역인 남천유역을 대상지역으로 선정하였다(그림 5a). 남천은 위천의 제1지류로서 위, 경도 상으로는 동경 128° 55' ~ 128° 70' 와 북위 36° 00' ~ 36° 20' 사이에 위치하고 있으며, 유역면적과 유로연장은 각각 165.12km², 31.1km이다. 또한 전체적인 유역경사와 하상경사는 각각 18.1° , 0.0374이다.

2. GIS 자료 구축

1) 수치 표고 모형(Digital Elevation Model)

동일 크기의 셀 내에 유역의 고도분포정보를 담고 있는 DEM을 1:5,000 수치지도를 이용, 검수과정을 통해 제작하여 유역유출모형에서 흐름방향 및 흐름합산 등을 계산하여 유역경계와 하천도와 같은 지리적 자료와 속성자료를 추출하였다. DEM은 모형의 구동 시 필요한 입력자료를 산출하는 기본자료가 되므로 정확한 DEM의 제작 기법이 중요하다. 한편 사용된 DEM의 격자 크기는 10m이고, 대상유역의 고도는 90~1,182m의 분포를 나타내고 있으며 평균 322m이다(그림 5a).

2) 토지이용도(Landuse) 및 토양도(Soil Map)

남천유역의 토지이용현황은 LandSat 위성영

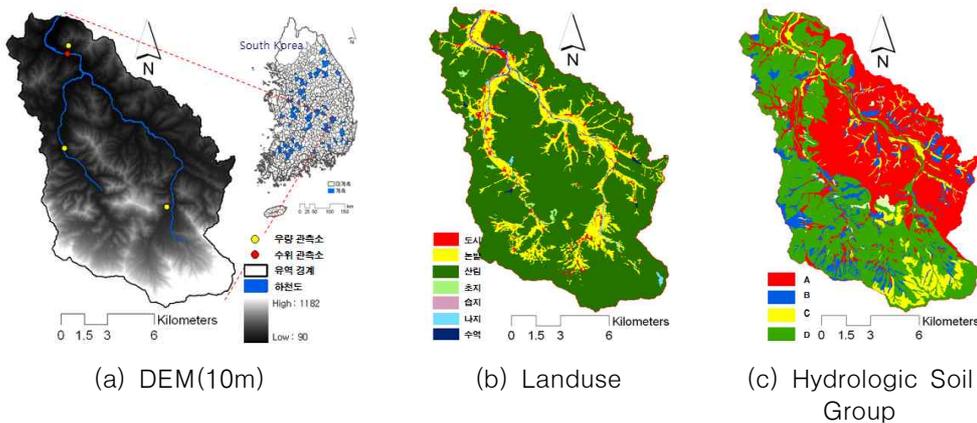


FIGURE 5. Study watershed & GIS data

TABLE 1. Landuse of study watershed

유역	구분	계	도시	농경지	산림	초지	습지	나지	수역
남천	면적(km ²)	165.12	3.64	26.04	130.92	0.91	0.74	1.45	1.42
	(%)	(100.0)	(2.2)	(15.8)	(79.3)	(0.5)	(0.4)	(0.9)	(0.9)

TABLE 2. Soil type and area of study watershed

유역	유역면적(km ²)	구분	토양형			
			A	B	C	D
남천	165.12	면적	63.41	12.49	12.24	76.98
	(100.0)	(%)	(38.4)	(7.6)	(7.4)	(46.6)

상을 이용하여 영상의 보정 후 Reclass 작업을 통해 토지이용을 분류, 농경지, 임야, 대지 및 기타를 중심으로 토지이용도를 작성하여 파악하였다. 토지이용구성비는 산림 면적이 130.92 km²(79.3%)으로 가장 많은 비중을 차지하고 있다(그림 5b, 표 1). 한편 유역의 토양특성은 강우로 인한 유출과정에 직접적인 영향을 미친다. 즉, 토양의 성질에 따라 침투능이 상이하므로 총 유량 중 직접유출로 유하하는 유효유량의 크기도 다를 수밖에 없다. 그런데 토양의 성질을 양적으로 표현하기란 힘들므로 미국토양보존국(Soil Conservation Service, SCS)은 토양의 침투능을 기준으로 Type A, B, C, D 4개의 토양군으로 분류하고 있다. 각 토양군의 토양침투능 크기는 A, B, C, D 순이고 유출률은 이의 역순이다. 남천유역의 토양특성은 농촌진흥청에서 제작한 개략토양도(S=1:50,000)로부터 토양도를 작성하여 토양분포, 토양배수상태, 수문학적 토양군 등으로 구축하였다. 또한 토양부호별 자료를 토양종류, 배수특성 등의 수문학적 토양군으로 재분류하였다(그림 5c). 토양형별 분포 분석결과 배수상태가 양호한 수문학적 토양군 A, B는 동쪽지역에, 배수상태가 불량한 수문학적 토양군 C, D는 북쪽과 남쪽지역에 주로 분포함을 알 수 있다(표 2).

3. 수문자료구축

1) 강우 및 유출량자료

ReFH 모형의 적용성 평가를 위하여 필요한 강우 및 유출량 자료를 구축하였다. 대상유역

내 강우관측소는 효령, 고매, 대울 3개 관측소가 있고 수위 관측소는 효령 관측소가 있으며, 경도 상으로는 동경 128° 35' 10", 북위 36° 09' 08" 에 위치하고 있다(그림 5a). 본 연구에서는 대상유역의 수문분석을 위해 한강홍수통제소와 국가수자원관리종합정보시스템(WAMIS)의 관측된 수위와 유량자료를 활용하였으며 대상 호우사상은 2009, 2010, 2012년 3개년에 대해, 보정을 위한 3개의 강우사상과 검정을 위한 3개의 강우사상을 선정하여 강우-유출 분석을 실시하였다.

2) 기상자료

유역모의를 위하여 남천유역의 일/시간 수문자료(강우량, 유출량) 및 일 기상자료(잠재증발산량)를 2009년 1월 1일부터 2012년 12월 31일까지 준비하였으며, 일 강우량 및 잠재증발산량 자료는 ReFH 모형의 선행강우 일수/량, 강우강도, 초기토양수분 등을 계산하기 위한 선행함수 모형에 적용되었다. 또한 잠재증발산량의 산정은 국제식량농업기구에서 제시한 FAO-56 Penman-Monteith 공식을 사용하였고 이를 위해 모의기간의 일별 습도, 풍속, 일조시간, 평균온도, 최고 및 최저온도 총 6개의 기상자료를 구축하였다.

유역 특성 인자의 구축

영국의 ReFH 모델은 계측유역과 더불어 미계측유역의 홍수량을 추정하기 위해 유역의 물

리적 및 수문적 특성인자를 이용하여 모델의 매개변수를 추정하도록 되어있다. 모델에서 사용되는 유역특성인자는 다음 표 3과 같이 지형, 하천, 토지이용, 토양 그리고 수문 특성 항목으로 분류되며 DEM과 토지이용 및 토양도와 같은 GIS 데이터를 이용하여 추정하였다. 하천의 유출특성 중 유출규모를 파악하는데 중요한 인자인 유역면적은 표준유역의 면적을 산정하였으며, 유로연장은 DEM자료를 기초로 $brun-DEM$ 을 통해 흐름방향을 조정하여 DEM 각 노드(Node)에서 유출구로의 흐름 거리를 평균하여 계산하였다. 하천의 유출 특성 중 홍수의 도달시간과 유출능력을 결정하는 주요 인자인 평균유로경사는 유로연장의 각 노드 고도 사이의 경사를 평균하였고, CN은 토양도(토양조건)와 토지이용도(토지이용항목)를 사용하여 NRCS방법으로 계산 후 가중평균하여 유역대표 CN을 산정하였다. 기상인자에서는 구축된 기상자료를 이용하여 연평균 강수량과 일평균 증발산량이 조사되었으며, 토지이용인자는 도시화비, 도시 집중도 및 도시위치 등 주로 유역의 불투수층을 나타내는 도시와 관련된 인자가 조사되었다. 수문인자에서는 토양습윤시간비, 기저흐름유출비, 직접유출비 및 홍수저감계수 등이 조사되었는데 영국의 경우 토양습윤시간비는 1년중 일별 SMD(Soil Moisture Deficit)가 6mm이하인 날의 비율로 정의되지만 우리나라는 SMD 실측자료가 없기 때문에 토양도의 유효토양수분자료를 이용하였다. 또한 기저흐름유출비 및 직접유출비는 영국의 경우 29개의 토양그룹에 따른 각 수치를 정의하고 있고 우리나라도 이와 같은 개념인 CN을 사용하고 있기 때문에 이를 대체하였다. 특히 ReFH 모델에서는 유역의 호소나 저수지에 의한 홍수저감 특성을 나타내는 유역특성인자로서 홍수저감특성계수(Index of Flood Attenuation due to Reservoirs and Lakes, FARL)의 개념을 사용하는데 0~1값의 범위를 가지며 홍수저감 특성계수가 1이면 홍수조절기능을 가진 저수지가 없는 유역을 의미한다. 홍수저감 특성계수는 식 (1)과 같이 저수지 만수면적(Surface area)

및 유역면적(Subwatershed area) 자료를 이용하여 조사하였다.

$$a = (1 - \sqrt{r})^w, \text{ 여기서}$$

$$r = \frac{\text{surface area}}{\text{subwatershed area}}, \quad (1)$$

$$w = \frac{\text{subwatershed area}}{\text{watershed area}}$$

FARL을 한국실정에 맞게 적용하기 위해 남천유역에 분포되어있는 농업용 저수지를 고려하여 FARL을 산정하였다. 남천유역 FARL계수는 농업용저수지의 유역면적과 만수면적을 고려하여 0.993으로 분석되어 치수능력이 적은 것으로 나타났다. ReFH에서는 홍수도달시간 산정을 위해 다음 식 (2)와 식 (3)을 사용하는데 식 (2)는 기존의 FSR/FEH 단위도법이고 식 (3)은 이를 개선한 Kinked Triangle 단위도법에서의 홍수도달시간 산정이고 본 연구에서는 식 (3)을 사용하였다. 여기서 S_{1085} (Average slope between the 10% and 85% from downstream to upstream, m/km), MSL(Main Stream Length, km) 및 DPSBAR (Mean Drainage Path Slope)는 유역 및 하천 경사와 관련된 인자들이고, SAAR4170은 연평균 강우량(Standard-period Average Annual Rainfall), URBANFSR(URBANization index)과 URBEXT은 유역의 도시화 비율과 관련된 인자들이다. PROPWET은 유역토양이 습윤되는 시간의 비율(PROPortion of time watershed soils are WET)이고 DPLBAR는 평균유로연장(Mean Drainage Path Length)이다.

$$T_p(0) = 283(S_{1085})^{-0.33}(SAAR_{4170})^{-0.54} (MSL)^{0.23}(1 + URBAN_{FSR})^{-2.2} \quad (2)$$

$$T_p(0) = 4.270(DPSBAR)^{-0.35} (PROWET)^{-0.80}(DPLBAR)^{0.54} (1 + URBEXT)^{-5.77} \quad (3)$$

TABLE 3. Watershed characteristics of study watershed

유역특성 (Raw data)	ReFH 유역특성인자	Description	국내적용 유역특성인자	Value
지형특성 (DEM, 유역도)	Area	Watershed area (km ²)	유역면적	165.12
	ALTBAR	Mean ALTitude (m)	평균표고	322.3
	ASPBAR	Mean ASPECT (Degree)	평균경사향	178.7
	ASPVAR	Invariability in Aspect	경사향분산	0.57
하천특성 (하천도)	DPSBAR	Mean Drainage Path Slope (m/km)	평균유로경사	37.4
	DPLBAR	Mean Drainage Path Length (km)	평균유로연장	7.16
	LDP	Longest Drainage Path (km)	최원유로연장	29.2
기상특성 (기상자료)	SAAR6190	Standard-period Average Annual Rainfall (mm)	연평균강수량	1193.5
	RMED-1H, 1D, 2D	MEDian annual maximum Rainfall (mm)	연평균최대	77.0
			강수량	256.0
	Ep	Evapotranspiration (mm/day)	잠재증발산량	311.0
토지이용 (토지이용도)	URBEXT	EXTent index of URBan land cover	도시화비	0.02
	URBCONC	CONCetration index of URBan land cover	-	0.79
	URBLOC	LOCation index of URBan land cover	-	0.74
토양 및 수문특성 (토양도, 토지이용도, 저수지자료)	PROPWET	PROPortion of time watershed soils are WET	유효토양수분	0.35
	BFIHOST	Base Flow Index from the Hydrology Of Soil Types classification	-	0.1
	SPRHOST	Standard Percentage runoff from the Hydrology Of Soil Types classification	CN	49.5
	FARL	Index of Flood Attenuation due to Reservoirs and Lakes	홍수저감계수	0.993

ReFH 모형의 적용성 검토

1. 입력자료 생성

ReFH의 실행에 필요한 유역특성인자 자료구축을 위해 GIS 오픈소스를 이용하여 C#기반의 ReFH 전처리 프로그램을 개발하였다. 프로그램은 표 3의 유역특성인자를 자동으로 추출하고 ReFH의 입력자료 포맷으로 변환하는 일련의 프로세스를 탑재하고 있다. 크게 2가지의 프로세서 주요기능이 있는데 첫째로 대상유역의 하천도, 유역경계, DEM, 토지이용도, 토양도 자료를 기초로 GIS 함수를 이용한 지형처리 작업을 통해 유역면적, 평균표고, 평균경사향/분산, 평균유로경사, 최원유로연장, 홍수저감계수 등 유역특성인자를 산정 및 ReFH 유역입력파일을 생성하였고, 둘째로 모의기간의 대상유역 강우, 기상 및 수위관측소 자료를 다양한 경로를 통해(기상청, WAMIS, 홍수통제소 등) 다운로드 받아 관측소 유량의 실제 보유상황, 강우

와 유량의 시간적 적절성 등을 가지적으로 확인하였다. 또한 그래프에서 특정 기간의 범위를 설정하여 ReFH의 기상/수문 입력자료인 강우 사상과 그에 따른 유량자료를 ReFH 기상입력 파일로 생성하였다. 구축된 유역특성인자 자료는 ReFH의 유출량 산정에 있어 지표, 중간, 기저 유출로 분리하여 각각의 유출량을 산정하기 위한 매개변수 값의 입력이 필요하다. 홍수량 산정에 필요한 각 인자들의 매개변수 값은 ReFH의 최적화 기법을 사용하여 평가하게 되는데, 적절한 초기값 입력을 위해 ReFH에서는 유역특성인자를 통한 매개변수 추정 기능을 제공하고 있다. 또한 ReFH 전처리 프로그램은 ReFH 기상 및 수문 입력파일을 자동으로 작성토록 개발되었으며 이를 통해 시간단위 강우사상과 관측 유량자료, 일 단위 선행강우자료와 기상자료를 통한 증발산량을 구축하여 모형에 의해 산정된 유출량 값의 적정성을 판단하는데 사용하였다(그림 6).

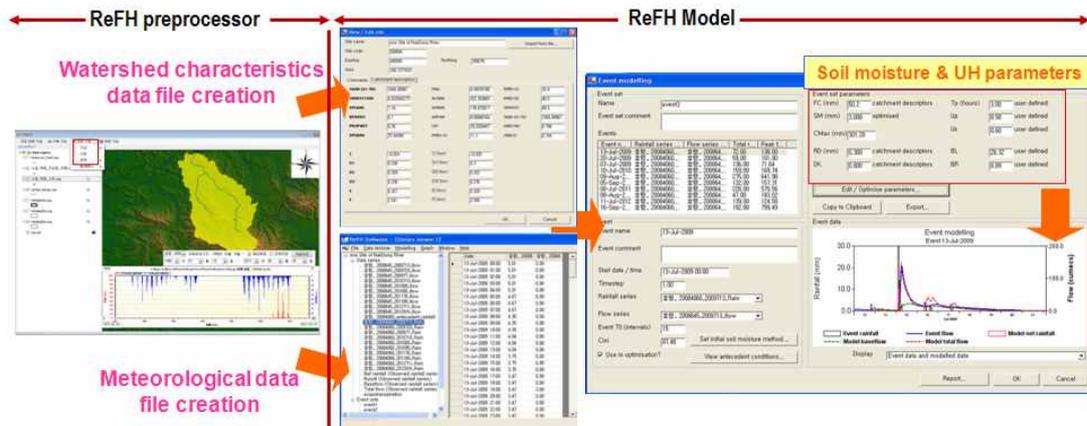


FIGURE 6. Preprocessor and ReFH model

2. 매개변수 민감도 분석

본 연구에서 침투는 손실모형 방법을 이용하여 유출량을 산정하고 Kinked Triangle 단위도법을 적용하여 직접유출량을, 선형저류함수모형을 적용하여 기저유출량을 산정하였다. 수문곡선의 대표적인 매개변수 중 민감하게 반응할 것으로 생각되는 최대토양함수 C_{max} , 침투시간 T_p , 기저유출 감수상수 BL 과 기저유출 충전량 BR 4개의 매개변수를 대상으로 민감도 분석을 실시하였다(그림 7). 매개변수의 초기값은 모형의 유역특성인자로부터 추정된 default 값을 채택하였으며 분석방법은 다른 매개변수 값을 고정한 후 대상 변수 값을 범위 내에서 변화시키면서 침투홍수량과 총유출량의 값을 산정하여 변수에 따른 영향을 비교하였다.

최대토양함수(C_{max})는 포장용수량(FC)과 토양깊이상수(SM)의 함수로서 유역특성인자로

부터 추정된 SM 초기값(3.60)의 25%(0.90)~175%(6.30)의 범위 내에서 침투유량의 범위가 322%(186.8mm)~52%(30.2mm)로 C_{max} 가 커짐에 따라 침투유량은 감소하였다. 침투시간(T_p)은 초기값(3.64)의 25%(0.91hr)~175%(6.37hr)의 범위 내에서 침투유량의 범위가 224%(129.9mm)~65%(37.7mm)로 T_p 가 커짐에 따라 침투유량은 감소하였다. 기저유출 감수상수 BL 은 초기값(36.20)의 25%(9.05)~175%(63.35)의 범위 내에서 침투유량의 범위가 126%(73.1mm)~65%(52.2mm)로 BL 이 커짐에 따라 침투유량은 감소하였다. 기저유출 충전량 BR 은 초기값(1.84)의 25%(0.46)~175%(3.22)의 범위 내에서 침투유량의 범위가 86%(49.9mm)~104%(60.3mm)로 BR 이 커짐에 따라 침투유량은 증가하여 SM 과 T_p 값이 유출 수문곡선의 침투유량에 많은 영향

TABLE 4. Watershed characteristics of study watershed

Parameter	Definition	Sensitivity	Value	Range		Process
				Min.	Max.	
SM	Mean soil moisture in depth	High	3.08	0.90	6.30	Loss Model
T_p	Unit hydrograph time to peak (hrs)	High	2.95	0.91	6.37	Routing Model
BL	Base flow recession constant (or lag) (hrs)	Low	28.32	9.05	63.41	Baseflow Model
BR	Base flow recharge (CMS)	Medium	0.89	0.46	3.24	Baseflow Model

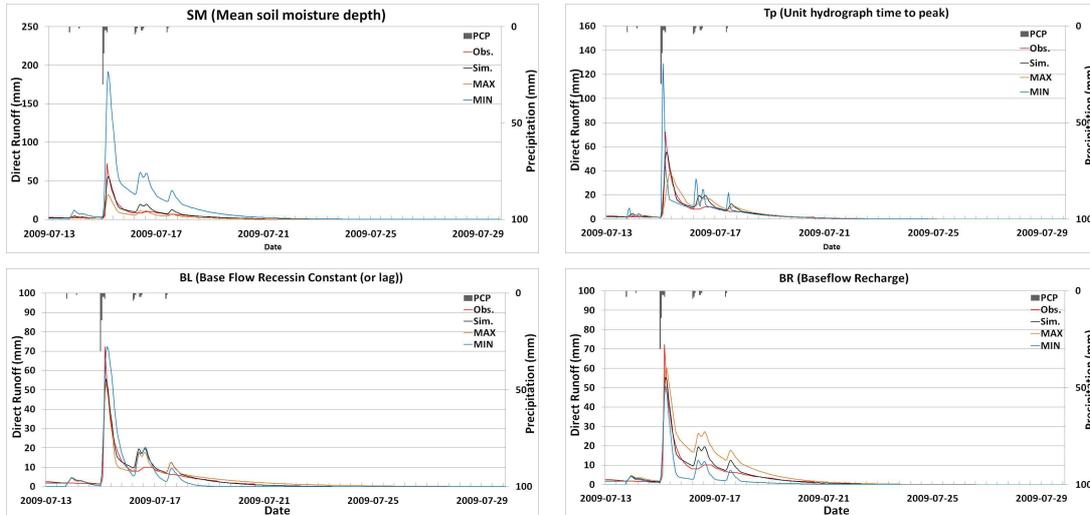


FIGURE 7. Parameter sensitivity analysis

을 미치는 것으로 나타났다.

3. ReFH 모형의 보정 및 유역 매개변수 추정

본 연구에서는 모형의 보정을 위하여 남천유역의 출구점에 인접한 효령 수위 및 유량 관측소 지점을 대상으로 ReFH에서 제공하는 최적화 기법을 이용하였다. ReFH 모형에서 강우-유출 자료를 통한 매개변수 최적화시 손실모형의 매개변수인 C_{max} , 홍수추적 모형의 매개변수인 T_p , 기저흐름 모형의 매개변수인 BL 및 BR을 고려한다. 이 중 BL과 BR은 홍수사상으로부터 산정하기 위하여 baseflow recession model을 적용하여 최적화한다. C_{max} 와 T_p 는 ReFH 최적화 모형에 의해 산정되었다(표 4). ReFH의 최적화에서 목적함수는 RMSE(Root Mean Square Error) 방법을 이용하고, 목적함수를 최소화하고 최적의 매개변수 값을 찾아내기 위한 방법으로 단일변량구배 방법을 적용하였다. 이 방법은 발산율이 적고 최적화되도록 선택된 여러 매개변수가 있을 때, 하나의 매개변수만 조정하고, 나머지 매개변수들은 고정시켜 놓고 계산한다. 또한 최적화시 단일 홍수사상별 최적화(local optimal value)가 아닌 가능한 모든 홍수사상(global optimal value)

을 이용하여 동시에 매개변수 최적화를 수행하였다. 표 5는 ReFH 모형의 유출량과 침투시간을 보정하여 모의한 결과와 실측치를 비교한 결과이고 그림 8은 보정 및 검정 후의 수문곡선을 보여주고 있다. 사용된 총 6개의 강우사상 중 2009년 7월 9일, 7월 15일, 7월 20일 3개의 강우사상을 이용하여 ReFH를 보정하였으며, 나머지 3개의 강우사상을 이용하여 검증을 실시하였다. 보정 및 검증의 분석항목으로는 해당 강우사상에 대한 총유량과 침투유량 및 침투시간의 실측치와 모의치를 비교하였으며 이 때 실측치와의 정확도 분석을 위해 총유출량에 대한 결정계수(R^2)와 평균제곱근오차(RMSE) 및 Nash Sutcliffe Efficiency(NSE)를 사용하였다. NSE는 식 (4)로 정의되며 일반화한 무차원인 목적함수로서 1에 가까우면 우수한 모의 성능을 나타낸다.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (o_i - p_i)^2}{\sum_{i=1}^N (o_i - \bar{o})^2} \quad (4)$$

여기서, p_i 는 i 시간단위(일)에 예측된 유량,

TABLE 5. Result of model calibration and hydrologic parameter assumption, (): Percent of runoff ratio

Storm Event		09-Jul-09	15-Jul-09	20-Jul-09	05-Sep-10	11-Jul-12	16-Sep-12
Rainfall (mm)		59.0	68.0	59.0	88.0	139.0	192.0
Duration (hrs)		8.0	13.0	18.0	19.0	39.0	36.0
Intensity (mm/hr)		7.4	5.2	3.3	4.6	3.6	5.3
Peak Flow (m3/sec)	Obs.	71.64	138.00	101.90	157.31	52.42	799.49
	Sim.	71.45	134.04	109.59	152.61	63.66	790.07
Peak Time (hrs)	Obs.	09Jul09	15Jul09	21Jul09	07Sep10	15Jul12	17Sep12
	Sim.	09:00	06:00	11:00	10:00	13:00	15:00
		08:00	04:00	10:00	15:00	02:00	13:00
Total Flow (mm)	Obs.	24.2 (41.1)	50.6 (74.5)	40.7 (69.0)	56.7 (64.5)	81.4 (58.6)	186.1 (86.9)
	Sim.	25.2 (42.8)	52.2 (76.8)	37.4 (63.5)	58.9 (67.0)	80.0 (57.6)	179.6 (83.5)
R2		0.82	0.74	0.75	0.83	0.58	0.77
RMSE (mm)		0.2	0.4	0.5	0.9	0.3	1.7
NSE		0.71	0.77	0.60	0.81	0.54	0.99

o_i 는 i 시간단위(일)에 관측된 유량이다.

분석 결과, 실측과 모의 첨두유량의 차이는 보정에서는 0.19~7.69m³/sec의 범위를, 검증에서는 4.70~11.24m³/sec의 범위를 나타냈다.

또한 총유량에 대한 실측과 모의차이는 보정에서는 1.00~3.30mm의 범위를, 검증에서는 1.40~6.50mm의 범위를 나타냈고 그에 따른 R²는 보정 및 검증 각각 0.74~0.82, 0.58~

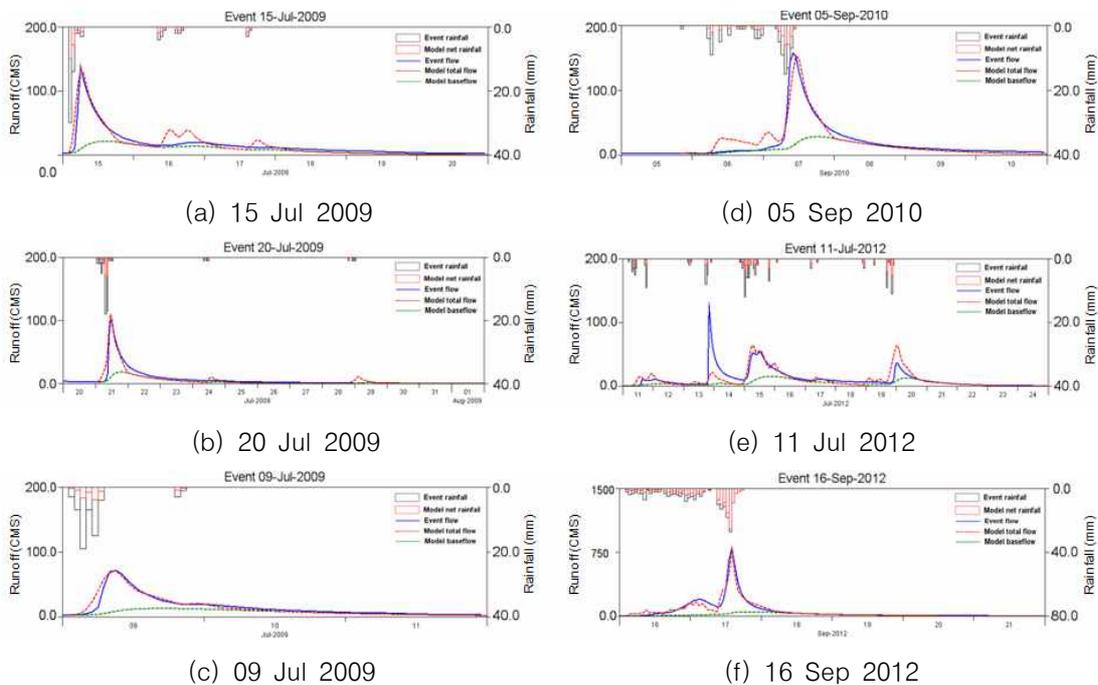


FIGURE 8. Comparison of observation and simulation hydrograph

0.83의 범위를, RMSE는 0.2~0.5, 0.3~1.7 mm의 범위를, NSE는 0.60~0.77, 0.54~0.99의 범위로 분석되었다. 여기서 총강우량이 59.0 mm로 동일하면서, 강우지속기간이 두배이상(8hrs→18hrs) 길고 강우강도가 훨씬 작은(7.4mm/hr→3.3mm/hr) 호우(7월 9일과 7월 20일 호우)가 침투홍수량이 1.5배이상(71.45 m³/s→109.59m³/s) 큰 결과로 해석된 결과는 7월 9일과 7월 20일 각 호우의 선행 강우일수(2일, 11일) 및 강우량(53mm, 205mm)의 차이에 기인한 것이다. 또한 보정 및 검증 호우사상의 침투유량 모의치와 실측유량과의 편차([실측유량-모의유량]/실측유량)를 보면 대부분 5.0% 내외의 양호한 결과를 나타내고 있는 반면에 7월 11일의 호우사상의 경우 그 편차가 최대 약 21.4%까지 차이가 나고 있는데, 이는 다른 호우사상이 단일 호우사상인 반면 7월 11일의 호우사상은 다중 호우사상으로 일반적으로 강우유출모형에서 지적되는 호우사이의 기간에 유역에서의 토양수분 재분배, 증발산 기작을 반영하지 못하기 때문으로 판단된다.

요약 및 결론

지리정보시스템(Geographic Information System)과 영국의 설계홍수량 산정모형(ReFH)이 결합된 모형을 남천유역에 적용하여 유역의 수문곡선과 강우-유출관계 분석을 통한 유출량 산정 및 예측에 대한 모형의 적정성을 검토한 결과를 요약하면 다음과 같다.

ReFH모형의 보정 평가를 위하여 총유량, 침투유량과 침투시간에 대한 통계변량 분석을 실시하였다. 그 결과 실측과 모의 침투유량의 차이는 0.19~11.24m³/sec의 범위를 나타냈고, 총유량에 대한 R²는 0.58~0.82의 범위를, RMSE는 0.2~1.7mm의 범위를, NSE는 0.71~0.99의 범위로 분석되어 실측치를 잘 반영하는 것으로 나타났다. ReFH의 최적화 기법을 이용하여 유역유출에 가장 큰 영향을 미치는 SM과 Tp값을 산정하였는데, 각각의 평균유역유출 매개변수는 각각 3.08, 2.95hr로 나타났다.

우리나라에서 홍수량 산정시 일반적으로 사용하고 있는 SCS-CN방법은 세 가지 조건의 선행토양수분조건(AMC)을 적용하여 실측치와의 비교를 시도하는 반면에, 영국의 ReFH 홍수량 산정모형은 유역의 일반적인 수문조건과 강우전의 토양수분 그리고 유역에 저수지가 존재할 경우에는 이들에 대한 홍수저감을 고려하는 매개변수들이 도입되어 있다. 본 연구에서 적용한 결과를 보면, 전반적으로 홍수를 잘 모의하는 것으로 평가되었으며, 다중 호우사상의 경우에는 호우사이의 기간에 발생하는 유역 토양수분의 재분배 그리고 토양의 투수계수, 지하침투량 등의 불확실성에 기인하여 다소 오차가 발생하는 것으로 추정된다. 이에 대한 타 유역들을 대상으로 한 ReFH모형의 보다 많은 검토와 더불어 필요하다면 이들 요소를 고려할 수 있는 매개변수들의 도입도 필요하다고 생각된다. 그러나 단일 홍수사상에 대해 보정 과정을 거친 ReFH 모형은 빈도별 설계홍수량 산정에 충분히 이용가능한 결과를 보였다. 향후 이 모형을 이용한 설계홍수량의 안정적인 산정을 위해서는 다양한 규모 및 특성의 유역을 대상으로, 주요 매개변수들의 불확실성을 줄이기 위한 모형의 적용 연구가 이루어져야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 물관리연구사업의 연구비지원(11기술혁신C06)에 의해 수행되었습니다. [KAGIS](#)

참고문헌

- Calver, A., S. Crooks, D.A. Jones, A. Kay, T. Kjeldsen and N. Reynard. 2005. National river catchment flood frequency method using continuous simulation. Research Report to Defra. Centre for Ecology & Hydrology. Wallingford, U.K.

- Centre for Ecology & Hydrology. 1999. Flood Estimation Handbook. Wallingford, U.K.
- Choi, H.K., H.S. Baek and B.H. Jeong. 2002. A study on application of HEC-HMS model to the Naerinchon basin. Research Report the Institute of Industrial Technology 22(A):211-218 (최한규, 백효선, 정병하. 2002. 내린천 유역의 HEC-HMS 모형 적용에 관한 연구. 산업기술연구 22(A):211-218).
- Hong, S.M., I.G. Jeong, J.U. Lee and S.J. Kim. 2004. Analysis of hydraulic characteristics using SMS RMA2 and SED2D model in the downstream of Gyeongan-cheon. Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies 7(1):94-104 (홍성민, 정인균, 이준우, 김성준. 2004. SMS를 이용한 경안천 하류구간의 하천흐름 분석. 한국지리정보학회지 7(1):94-104).
- Joo, J.W. and H.S. Lee. 2011. Application of the FEH-ReFH at the Jeungpyeong catchment. Journal of the Institute of Constructional Technology 30(2):161-168 (주재원, 이효상. 2011. FEH-ReFH 모형의 적용성 평가-증평유역. 충북대학교 건설기술연구소논문집 30(2):161-168).
- Kjeldsen, T.R. 2006. Flood Estimation Handbook-Supplementary Report No.1. Centre for Ecology & Hydrology.
- Kim, S.H. 2006. Development of flood map using geographic information system. Master Thesis, Hankyong National University, 60-79pp (김상호. 2006. GIS기반 홍수예측지도의 개발. 환경대학교 대학원 석사학위논문. 60-79쪽).
- Kim, S.H., M.J. Park, S.M. Kang and S.J. Kim. 2006. Modeling rainfall-runoff simulation system of Jinwie watershed using GIS based HEC-HMS model. Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies 9(4):119-128 (김상호, 박민지, 강수만, 김성준. 2006. GIS 기반의 HEC-HMS를 이용한 진위천 유역의 강우-유출모형 구성. 한국지리정보학회지 9(4):119-128).
- Kim, S.S. C.G. Jung, J.Y. Park, S.W. Jung and S.J. Kim. 2013. Parameter estimation of VfloTM distributed rainfall-runoff model by areal rainfall calculation methods -for Dongchon watershed of Geumho river-. Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers 55(1):9-15 (김시수, 정충길, 박종윤, 정성원, 김성준. 2013. 유역 공간 강우 산정 방법에 따른 VfloTM 분포형 강우-유출 모형의 매개변수 평가 -금호강 동촌 유역을 대상으로 -. 한국농공학회논문집 55(1):9-15).
- Kwon, H.J. and S.J. Kim. 2003. Flood runoff analysis using TOPMODEL linked with Muskingum method-Anseong-cheon watershed-. Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies 6(1):1-11 (권형중, 김성준. 2003. TOPMODEL과 Muskingum 기법을 연계한 안성천유역의 홍수유출 분석. 한국지리정보학회지 6(1):1-11).
- Lamb, R. 1999. Calibration of a conceptual rainfall-runoff model for flood frequency estimation by continuous simulation. Water Resources Research 35(10):3103-3114.
- Lee, J.U., H.J. Kwon, S.C. Shin and S.J. Kim. 2003. Assessment of hydrological impact by long-term land cover change using WMS HEC-1 model in Gyeongan-

- cheon watershed. Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies 6(1):107-118 (이준우, 권형중, 신사철, 김성준. 2003. WMS HEC-1 모형을 이용한 경안천 유역의 경년 수문변화 분석. 한국지리정보학회지 6(1): 107-118).
- Moore, R.J. 1985. The probability: distributed principle and runoff production at point and basin scales. Hydrological Sciences Journal 30(2) 273-297.
- Moore, R.J. 1999. Real-time flood forecasting systems: perspectives and prospects. In: R. Casale and C. Margottini(ed.). Floods and Landslides: Integrated Risk Assessment. Springer, pp.147-189.
- NERC. 1975. Flood Studies Report. Natural Environment Research Council, London.
- Park, J.I., H.W. Shin, B.C. Jo and Y.T. Jang. 2000. The applicability of HEC-HMS model in the Nam river dam basin. Journal of Research Institute of Industrial Technology 16(1):161-167 (박준일, 신형우, 조봉철, 장영태. 2000. 남강댐 유역에서의 HEC-HMS 모형의 적용성. 생산기술연구소논문집 16(1):161-167).
- Park, J.M. 2003. Development of GIS based farmland flooding damage simulation system. Ph.D. Thesis, Seoul National University, Korea, 109-122pp (박종민. 2003. GIS를 이용한 농경지 침수 모의시스템 개발. 서울대학교 대학원 박사학위논문. 109-122쪽).
- Prudhomme, C., D. Jakob and C. Svensson. 2003. Uncertainty and climate change impact on the flood regime of small UK catchments. Journal of Hydrology 277(1):1-23. **KAGIS**