



## 남강댐유역 내 주요 하천관측지점의 홍수유출량 추정을 위한 단위도 모형 비교연구

### A Comparative Study of Unit Hydrograph Models for Flood Runoff Estimation for the Streamflow Stations in Namgang-Dam Watershed

김성민\* · 김성재\* · 김상민\*\*†

Kim, Sung Min · Kim, Sung Jae · Kim, Sang Min

#### ABSTRACT

In this study, three different unit hydrograph methods (NRCS, Snyder and Clark) in the HEC-HMS were compared to find better fit with the observed data in the Namgang-Dam watershed. The Sancheong, Shinan, and Changchon in Namgang-Dam watershed were selected as the study watersheds. The input data for HEC-HMS were calculated land use, digital elevation map, stream, and watershed map provided by WAter Management Information System (WAMIS). Sixty six storms from 2004 to 2011 were selected for model calibration and validation. Three unit hydrograph methods were compared with the observed data in terms of simulated runoff volume, and peak runoff for the selected storms. The results showed that the coefficient of determination ( $R^2$ ) for the peak runoff was 0.8295~0.9999 and root mean square error (RMSE) was 0.029~0.086 mm/day for calibration stages. In the model validation,  $R^2$  for the peak runoff was 0.9061~0.9916 and RMSE was 0.030~0.088 mm/day which were more accurate than calibrated data. Analysis of variance showed that there was no significant difference among the three unit hydrograph methods.

**Keywords:** HEC-HMS; Unit hydrograph; NRCS; Snyder; Clark

#### 1. 서 론

우리나라와 같은 몬순기후 지역에서는 연 강우량의 60~70%가 여름에 집중되는데 기후변화의 영향으로 강우의 계절적 변동성이 점차 증가하는 추세이며 강우일수는 감소함에도 강우강도는 증가함에 따라 강우량 증가로 인한 인명과 재산 피해가 급증하고 있다. 2006년 기상청은 집중호우의 발생빈도를 가늠하는 1시간 최대 강우량 50 mm 이상의 기록횟수를 분석하였는데 지난 30년간의 자료에 따르면 1977~1986년 143회, 1987~1996년 159회, 1997~2006년 254회로 최근 10년간 집중호우의 발생 횟수가 크게 증가하였다고 발표한 바 있다 (MLTM, 2008).

산림지역과 같이 유역의 경사가 급하고 하폭이 협소한 지역의 경우 집중호우로 인해 급격히 불어난 수량의 영향으로 큰 홍수

피해가 발생할 수 있다. 이러한 홍수피해를 줄이고, 수자원의 효율적인 배분을 위해서는 하천의 유역면적, 유역경사, 유역의 토지이용, 유량, 하폭, 하도의 길이, 토양의 성질 등 수문학적 인자와 이에 영향을 미치는 강우 등의 기상인자를 파악하여 유출특성을 정확히 예측하는 강우-유출관계의 규명이 선행되어야 한다 (Kim, 1999; Kim, 2001). 강우-유출관계에 영향을 미치는 여러 가지 수문학적 인자들은 시간적, 공간적으로 끊임없이 변화하고 있다. 변화하는 수문학적 인자들을 신속하고 정확하게 추출하기 위한 노력으로 최근 지리정보시스템 (Geographic Information System, GIS)을 수자원 분야에 이용한 많은 연구가 이루어지고 있다. 수문모형의 구동을 위해 GIS를 이용하게 되면 미세측지역이나 접근성이 좋지 않은 지역에 대한 입력 자료를 구축하기 위한 시간과 노력이 절감되며, 기존의 방법에 비해 보다 신속하고 정밀한 결과를 얻을 수 있다 (Seong, 2004). 최근 개발되고 있는 수문모형은 GIS와의 연계를 통해 사용자가 보다 쉽게 수문모형을 구동할 수 있도록 하고 있는데, 미 육군 공병단 (USACE)에서 유역의 홍수량 추정을 위해 개발한 HEC-HMS (Hydrologic Modeling System)모형 (USACE, 2009)은 기존의 HEC-1 모형에 사용자 편의 시스템과 다양한 기능을 추가한 것으로 국내에서는 수리구조물의 설계홍수량 추정을 위해 실무에서 많이 활용

\* 경상대학교 대학원 농공학과

\*\* 경상대학교 지역환경기반공학과(농업생명과학연구원) 부교수

† Corresponding author Tel.: +82-55-772-1931

Fax: +82-55-772-1939

E-mail: smkim@gnu.ac.kr

2012년 2월 3일 투고

2012년 5월 14일 심사완료

2012년 5월 14일 게재확정

하고 있는 모형이다 (Kim et al., 2010).

하천설계기준 (KWRA, 2005)에서는 중·소규모 이상의 자연하천유역에서 설계홍수량 산정 시 NRCS 단위도법, Snyder 단위도법, Clark 단위도법 등을 사용하여 직접유출을 모의할 것으로 규정하고 있다. 일반적으로 단위도의 특성에 대한 제어가 가장 우수하고 널리 추천되는 Clark 단위도법을 하천설계에서 직접유출 모의방법으로 채택하는 경우가 대부분이다. 하지만 대부분의 하천설계 시 실측유량자료가 부족하기 때문에 설계기준에서 제시하는 단위도 중 어떤 단위도가 가장 현실을 잘 반영하는지는 알 수 없는 경우가 대부분이다 (Seong et al., 2008). 과거 Seong et al. (2008)은 1996년부터 서울대학교 농업수자원연구실에서 수문관측을 실시하고 있는 발안 시험유역을 대상으로 홍수유출량 추정을 위한 단위도 모형 비교연구를 통해 농촌 소유역의 홍수량을 추정하는데 NRCS 단위도법, Snyder 단위도법, Clark 단위도법의 이용이 가능할 것이라는 평가를 하였다.

그러나 최근 발생하는 기상변화와 국지성 집중호우가 빈번하게 발생하는 국내 현황을 고려할 때 과거 중·소규모 이상의 자연하천유역에서 설계홍수량 산정 시 이용되었던 NRCS 단위도법, Snyder 단위도법, Clark 단위도법 등을 사용한 직접유출 모의에 대한 좀 더 정확한 판단이 필요하다. 많은 연구들이 대상 지역의 특성을 분석하여 홍수유출량을 추정하기 위한 단위도법을 선정하여 분석을 시행하였으나 지역특성을 고려하여 각각의 단위도법이 어떠한 차이를 나타내는 지에 대한 비교·평가는 실로 부족한 실정이다.

본 연구에서는 남강댐 유역의 주요 하천관측지점인 산청, 신안, 창촌 지점을 선정하여 2004년부터 2011년까지의 최근 8년간의 강우자료를 조사·수집하고 GIS를 이용하여 소유역을 구분하고 수문모형의 매개변수를 추출하였다. 추출한 매개변수를 HEC-HMS 모형의 입력 자료로 사용하였고, 대상유역에 적용하여 강우-유출 모의를 실시하여 적용성 평가를 실시하였다. 또한 하천설계기준에서 제시하는 대표적인 직접유출모의 방법인 NRCS 단위도법, Snyder 단위도법, Clark 단위도법을 대상유역에 적용하여 각 방법에 의한 홍수유출모의결과를 비교·평가 하고자 하였다.

## II. 재료 및 방법

### 1. 홍수량 산정방법

HEC-HMS 모형은 미 육군 공병단에서 개발된 강우-유출과 홍수추적 과정을 모의하는 프로그램으로 HEC-1 모형이 가지고 있던 기능의 개선과 분포형 모형 및 연속모의기능이 추가된 프로그램이다 (USACE, 2000). HEC-HMS 프로그램의 유출모의

과정에서는 보이지 않는 수문순환 성분들은 생략하거나 일괄처리하고 있다. 예를 들면 HEC-HMS는 물의 침투모형을 포함하고 있지만, 토양층 내에서의 물의 수직이동과 저류모형은 생략하였으며, 직접유출은 지표유출 (Overland flow)과 지표하유출 (Sub surface flow)을 결합하여 계산하도록 되어있다. 또한 중간유출이나 지하대수층 흐름을 세부적으로 모의하지 않는 대신에 이들 흐름을 결합하여 기저유출 (Base flow)로만 표현한다 (USACE, 2009). HEC-HMS 프로그램의 구성은 크게 유역모형 (Basin models), 기상학적 모델 (Meteorologic models), 통제사항 (Control specifications)과 유역모형이나 기상학적 모델에서의 매개변수와 경계조건으로 사용되는 시간별 자료 (Time-Series data), 순서쌍 자료 (Paired data), 격자망 자료 (Grid data)로 구성된다. 기상학적 모델에 입력된 값을 이용한 모의 (Simulation)를 통해 유역모형에서의 강우-유출 (Precipitation-Runoff) 반응을 통제사항의 시간주기 (Time period) 및 모의 실행의 시계열에 따라 계산하게 된다.

### 가. 유출량 산정

유출량은 총 강우량에서 지하침투, 차단, 증·발산, 지표저류 등을 제외한 값을 말하는데, HEC-HMS 모형에서는 유출량을 산정하기 위하여 부족일정률 (Deficit and constant), 지수 (Exponential), Green and Ampt, 초기 손실 및 일정 비율 손실 (Initial and constant-rate loss), NRCS (Natural Resources Conservation Service) 유출곡선지수 (Curve Number, CN), 토양함수조건 (Soil Moisture Accounting, SMA) 등의 손실량 모형을 지원한다. 본 연구에서는 유출량 산정을 위해 GIS 기술의 발달과 더불어 자료의 구득 및 적용의 편리성 등의 이유로 실무에서 많이 이용되고 Seong et al. (2008)의 연구에서도 적용된 바 있는 NRCS CN방법을 적용하였다.

### 나. 직접유출량 모의

1) NRCS 단위도 : NRCS 무차원 합성단위도법은 미국 중·서부 농업지대의 소규모 유역에서 수집한 자료를 이용하여 실제 단위도를 해석한 결과를 바탕으로 고안된 방법으로 유역의 특성에 큰 관계없이 적용 가능하다 (Seong et al., 2008).

2) Snyder 단위도 : Snyder 합성단위유량도 방법은 가장 널리 알려진 단위도 합성 방법 중 하나로 유역면적, 주 하천 길이, 유역중심에서 가장 가까운 하천지점에서 유역출구까지의 하천길이라는 세 가지 지형자료를 이용하여 해당 유역의 단위유량도를 작성하는 방법이다. HEC-HMS 모형을 이용하여 Snyder 합성단위유량도 방법의 유역 추적을 하는데 필요한 입력 변수로는 침투유량이 발생하는 시간을 결정하는 값인 유역지체시간 ( $t_p$ )와 침

두유량의 크기를 결정하는 값인 유역특성변수 ( $C_p$ )가 된다 (Sonu and Koh, 1986).

3) Clark 단위도 : Clark 단위도는 유역출구까지 유량의 전이와 유역출구지점에서 가상의 선형저수지에 의한 저류효과를 반영하는 방법으로 강우로 인한 유수의 전이 및 유역의 저류효과까지 고려가 가능하여 중규모의 자연하천유역에 많이 적용한다. Clark은 가상의 선형저수지는 유역 출구에 1개만 존재한다고 가정하였으며, 이 저수지는 저류량과 유출량이 선형관계를 갖는 선형 저수지라고 가정하여 나타내었다 (Seong et al., 2008). Clark 단위도를 HEC-HMS 모형에 적용하기 위해서는 집중시간 ( $t_c$ )과 저류상수 ( $K$ )가 입력 변수로 필요하며 저류상수 ( $K$ )의 경우 유역특성과 연관시키기 어려워 산정이 어려운 인자로서 집중시간과 저류상수의 관계를 고려하는 Russel 공식, Sabol 공식 등과 집중시간과 저류상수의 관계를 독립적이라 가정하는 Clark 공식, Linsley 공식 등으로 분류된다.

다. 기저유출량

HEC-HMS 모형에서 지원하는 기저유출량 모의방법으로는 월별 일정 기저유량 모형 (Constant, monthly-varying value model), 지수감수모형 (Exponential recession model), 선형 저수량 계산모형 (Linear-reservoir volume accounting model) 등이 있으며, 본 연구에서는 기존 발표된 연구에서 많이 사용한 지수감수모형을 사용하였다 (Kim et al., 2003).

라. 하도추적

HEC-HMS에서는 Kinematic wave, Lag, Modified plus, Muskingum 등과 같은 하도추적 모형을 지원하는데, 본 연구에서는 표면류 (Overland flow)나 하천흐름 (River channel flow)의 추적을 위해 미국 육군 공병단의 수문공학연구소 (Hydrologic Engineering Center, HEC)에서 다년간에 걸쳐 부정류의 해를 구하는데 적용할 수 있도록 개발된 Kinematic wave 모형을 적용하였다.

2. 대상 유역

본 연구의 대상 유역은 남강댐 유역 내에 위치한 3개의 주요 수문관측지점인 산청, 신안, 창춘으로 한국수자원공사에서 수문관측을 실시하고 있는 지점이다. 남강댐 유역은 유역면적 2,293  $km^2$ , 유역 평균표고 426 m, 유역 평균경사 35 %, 형상계수 0.42의 유역특성을 가지고 있으며, 유로연장은 110.84 km, 주하천 길이 22.96 km에 이른다. 남강댐은 낙동강 수계 최초의 다목적댐으로 1970년 7월 완공되어 계획 홍수량 초당 1만 570  $m^3$ 를 사천만 방류와 저수지 조절에 의하여 남강 본류에 2,000

$m^3$  이하만을 방류함으로써, 남강 하류 연안 토지 50,000 ha에 대한 홍수의 피해를 줄이고, 남강 하류의 7,500 ha와 낙동강 하류의 2,300 ha 농경지에 연간 6천만 $m^3$ 의 관개용수를 공급한다. 최근 10년간 집중호우의 발생 횟수가 크게 증가함에 따라 홍수 유출모의결과를 비교·평가를 하고자 남강댐 유역의 주요 하천 관측지점을 선정하고 HEC-HMS 모형을 사용하여 적용성 평가 및 하천설계기준에서 제시하는 대표적인 직접유출모의 방법 (NRCS 단위도법, Snyder 단위도법, Clark 단위도법)을 적용하였다. 현재 기상청에서 운영하는 기상관측소 1개소 (산청), 수자원공사에서 운영하고 있는 강우관측소 18개소 및 수위관측소 11개소, 국토해양부에서 운영하고 있는 기상관측소 6개소 및 수위관측소 1개소, 낙동강 유역환경청에서 운영하고 있는 하천수 수질측정망 9개소, 수자원공사에서 운영하고 있는 호소수 수질측정망 3개소 등의 기상, 수문, 수질 관측망을 운영하고 있다. 남강은 경상남도 거창군 서상면의 덕유산에서 발원하여 남쪽으로 흐르면서 함양군 함양읍 지점에서 함양위천, 산청군 신안면 지점에서 남강의 제 1지류인 양천과 합류하며, 이후 남쪽으로 흐르다가 덕천강과 합류한 후 남강댐에 유입된다. Fig. 1은 남강댐 유역내의 주요 하천과 본 연구의 대상지점인 산청, 신안, 창춘 지점의 유역경계를 나타내고 있다 (Kim et al., 2010).

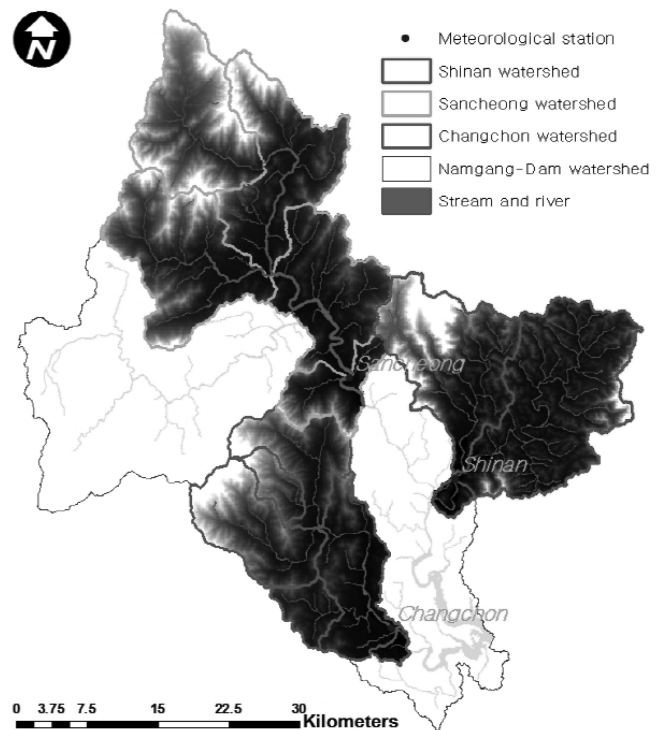


Fig. 1 Stream flow monitoring stations and sub-watersheds digital elevation map (DEM) within the Namgang-Dam watershed

**Table 1 Observed rainfall, runoff, and runoff ratio for Sancheong, Shinan, and Changchon**

Year	Sancheong			Shinan			Changchon		
	Rainfall (mm)	Runoff (mm)	Runoff ratio (%)	Rainfall (mm)	Runoff (mm)	Runoff ratio (%)	Rainfall (mm)	Runoff (mm)	Runoff ratio (%)
2004	1,874.0	1,212.6	64.7	1,813.0	1,027.0	56.6	1,964.0	1,605.6	81.7
2005	1,219.0	673.0	55.2	1,122.0	478.0	42.6	1,242.0	1,498.4	120.6
2006	1,509.0	1,388.4	92.0	1,480.0	846.0	57.2	2,048.0	1,416.5	69.2
2007	1,518.0	1,329.7	87.6	1,864.0	1,015.9	54.5	1,748.0	1,491.4	85.3
2008	755.0	620.4	82.2	918.0	331.3	36.1	891.0	758.7	85.2
2009	1,124.0	768.3	68.4	1,149.0	343.5	29.9	1,639.0	943.1	57.5
2010	1,969.0	1,274.6	64.7	1,761.0	603.6	34.3	1,911.0	1,589.1	83.2
2011	1,806.0	1,178.6	65.3	1,997.0	1158.3	58.0	2,095.0	1,803.8	86.1
Mean	1,471.8	1,055.7	72.5	1,513.0	725.4	46.2	1,692.3	1,388.3	83.6

### 3. 강우, 유량자료

모형의 적용을 위한 강우사상은 2004년부터 2011년까지 8년의 조사기간 강우자료 중 80 mm 이상의 단일강우사상을 중심으로 산청 22개, 신안 26개, 창촌 18개 총 66개의 강우사상을 선정하였다. 대상유역의 시별, 일별 강우 및 유량자료는 국토해양부가 각 관할기관에서 조사된 자료를 수집하여 제공하는 수자원관리 종합정보시스템 (<http://www.wamis.go.kr/>)의 각 지점별 관측소 값을 이용하였다. 수집된 2004년부터 2011년까지의 유량자료와 강우자료를 바탕으로 연간 유출량과 유출률을 산정하였으며, Table 1에서 각각의 대상유역에 대한 연 강우량과 연간 유출량 및 유출률을 산정한 결과를 보여주고 있다. 산청, 신안, 창촌 유역의 2004년부터 2011년까지 8년간의 연평균 유출률은 각각 72.5 %, 46.2 %, 83.6 %로 나타났으며, 유역별로는 창촌 유역의 유출률이 가장 높은 것으로 나타났고 연도별로는 산청 2006년, 신안 2011년, 창촌 2005년의 유출량이 가장 높은 것으로 나타났다. 창촌 유역의 경우 2005년 유출률이 120.6 %로 지나치게 크게 나타났는데 이는 실측값에 문제가 있는 것으로 추정된다. 연도별 유출량을 살펴보면 산청 2006년, 신안 2011년, 창촌 2011년의 유출량이 가장 크게 나타났고, 가장 낮은 유출량은 산청 2005년, 신안 2005년, 창촌 2008년임을 알 수 있다. 이는 다른 연도에 비해 2008년과 2005년의 연강우량이 적어 그에 따라 유출량이 낮게 나타난 것으로 판단된다.

### 4. 유역특정 인자

NRCS 단위도 방법을 이용한 유출량 산정을 위해 선행강우조건에 따른 유출곡선번호 (CN)를 추출하였다. 이를 위해 유역의 토양 자료와 토지이용자료를 이용하였으며 토양도는 WAMIS에서 제공하는 1/25,000 정밀토양도를 이용하여 유역에 대한 토양분류를 실시하였고, Heo and Woo. (1988)의 연구 결과를 토대로 수문학적 토양군을 분류하였다. 토지이용자료는 위성영상자

**Table 2 Average slope, area, land cover, and hydrologic soil group for sub-watershed**

Sub-watershed		Sancheong	Shinan	Changchon
Average slope (%)		29.7	27.3	38.2
Area (km <sup>2</sup> )		694.49	413.41	346.48
Percent of land cover (%)	Paddy area	13.7	16	8.3
	Upland	8.3	5.5	4.6
	Forest	71.6	73.1	82
	Residential area	1.7	1.7	1.3
	Other land use	4.7	3.7	3.8
Hydrologic soil group (AMC II) (%)	A	57.7	74.2	72.4
	B	18.9	7.7	14.9
	C	9.8	14.6	6.6
	D	13.7	3.5	6
CN values	CN (I)	46	46	44
	CN (II)	67	67	65
	CN (III)	82	82	81

료를 이용하여 토지이용분류를 실시하였고, 논에서의 CN값은 Im and Park. (1997)의 연구를 바탕으로 산정하였다. 각각의 대상유역에 대한 수문학적 토양군자료와 토지이용자료를 토지이용별 수문학적 토양군으로 분류하였으며 이를 토대로 선행토양함수조건 (Antecedent Soil Moisture Condition, AMC)에 따른 각 대상유역의 유출곡선번호를 추출하였다. 대상 유역 토지의 70 % 이상이 산림지역으로 조사됨에 따라 추출된 CN값은 Kim et al. (2010)의 연구결과를 인용하여 산림지역 최대잠재보유수량 90 %에 대해 추출하여 적용하였으며 Table 2는 각 유역의 특성 인자를 표로 나타낸 것이다.

## III. 결과 및 고찰

### 1. 모형의 보정

모형의 보정은 모형의 적용을 위해 모형의 초기조건과 매개

변수를 유역의 조건에 맞도록 일치시키는 과정으로서 모형에 의해 계산된 값과 실제 측정된 값이 가장 잘 일치할 때의 초기조건과 매개변수 값을 추정하는 것이다. 모형의 보정은 단순시행착오법과 최적화 기법을 이용하는 방법이 있다 (Seong et al., 2008).

본 연구에서는 2004년부터 2008년까지 31개 강우사상에 대해 HEC-HMS에서 제공하는 최적화 모듈을 이용하여 직접유출량에 대해서 가장 변위가 크게 나타나는 CN값과 초기 차단량을 대상으로 최적화를 실시하였다. HEC-HMS의 최적화 모듈에서 목적함수는 총 5가지가 제공되는데, 이 중 미 육군 공병단에서 제시한 Peak-Weighted RMSE (Peak-Weighted Root Mean Square Error)를 사용하였으며, Peak-Weighted RMSE는 식 (1)과 같이 계산한다.

$$\begin{aligned}
 & \text{Peak-Weighted RMSE} \quad (1) \\
 & = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^n (Q_0(t) - Q_s(t))^2 \frac{Q_0(t) + Q_A}{2Q_A}}{n}} \\
 & Q_A = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n Q_0
 \end{aligned}$$

여기서,  $Q_0(t)$ 는 실측값,  $Q_s(t)$ 는 모의값,  $Q_A$ 는 평균 실측값이다.

목적함수를 찾기 위한 최적화 기법으로 수행한 단일확률변수 기법은 나머지 매개변수들은 고정시키고, 가장 기여도가 큰 매개변수의 최적값을 찾아 나가면서 목적함수를 최소화하여, 최적화된 매개변수들의 값을 찾는 방법이다 (Seong, 2004). 반면 각각의 반복절차에 의해 모든 매개변수를 변화시키면서 최적화 과정을 수행하는 Nelder-Mead법은 단일확률변수기법보다 좀 더 뛰어난 결과를 얻을 수 있으나 수행법이 어렵고 계산시간이 많이 소요된다. 이에 Lee et al. (2008)의 연구를 참고하여 단일확률변수기법을 적용하였다. Table 3은 보정에 사용한 강우사상에 대한 5일 선행강우량, 일자, 강우량, 강우지속시간, 최대 시강우량을 나타낸 것이다.

가. 유출량

유출량에 대한 보정은 유출량에 대해 가장 큰 기여를 하는 CN 값을 대상으로 하였다. CN값은 선행토양함수조건 (Antecedent Soil Moisture Condition, AMC)에 따라 CN I, CN II, CN III로 분류되는데, 대상지역의 CN값은 각 지점별로 보정하여 최대 잠재보유수량이 90 %인 경우의 CN I, CN II, CN III는 산청 46,

Table 3 Total 5-day antecedent rainfall, Date, rainfall, rainfall duration, and Max. hourly rainfall for sub-watershed (Calibration)

Station	Total5-day antecedent rainfall (mm)	Date	Rainfall	Rainfall duration (mm)	Max. hourly rainfall (mm)
Sancheong	9	20040818	329	28	88
	61	20040618	236	38	23
	2	20040910	163	49	71
	62	20040821	117	37	12
	42	20060708	130	22	44
	131	20060710	223	15	49
	102	20070904	240	64	18
	131	20070916	144	21	44
	167	20070813	111	34	51
	0	20080617	129	31	15
Shinan	59	20040618	265	38	22
	38	20040817	243	32	45
	249	20040822	228	35	23
	94	20040707	83	13	19
	19	20050808	99	21	44
	51	20060708	223	21	19
	105	20060710	112	12	89
	25	20070806	370	51	66
	85	20070901	91	21	11
	1	20070630	95	27	16
Changchon	0	20070914	272	60	39
	0	20080628	90	35	10
	1	20040817	273	36	60
	8	20050808	225	38	31
	0	20060506	121	13	21
	104	20060708	102	21	23
	10	20070807	172	21	44
	2	20070630	83	20	10
	67	20070901	80	28	8
	0	20080617	132	28	14
0	20080628	84	24	12	

67, 82, 신안 46, 67, 82, 창춘 44, 65, 81로 나타났다. Fig. 2는 남강댐 주요 하천 관측지점의 HEC-HMS 모형을 이용한 유출량 모의결과와 실측치를 비교한 결과를 나타낸 것이다.

나. 직접유출

Snyder 단위도법에서는 유역특성변수 ( $C_p$ )에 대하여, Clark 단위도법은 저류상수 ( $K$ )에 대하여 보정을 실시하였다. Snyder 단위도법에서 유역특성변수 ( $C_p$ )는 0.56 ~ 0.69의 범위 내에서 보정을 실시하여 0.63을 적용하였다. Clark 단위도법에서 저류

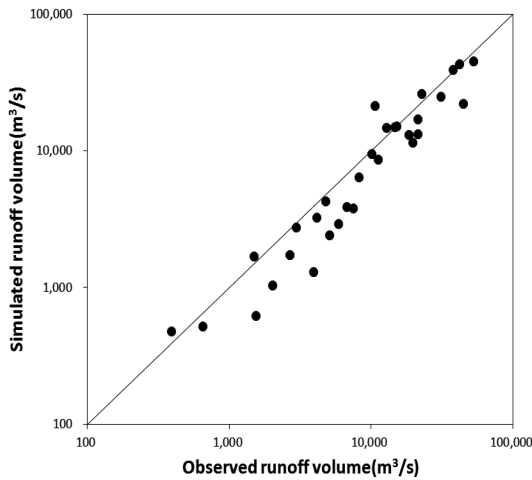


Fig. 2 Observed and simulated runoff volume within Namgang-Dam watershed

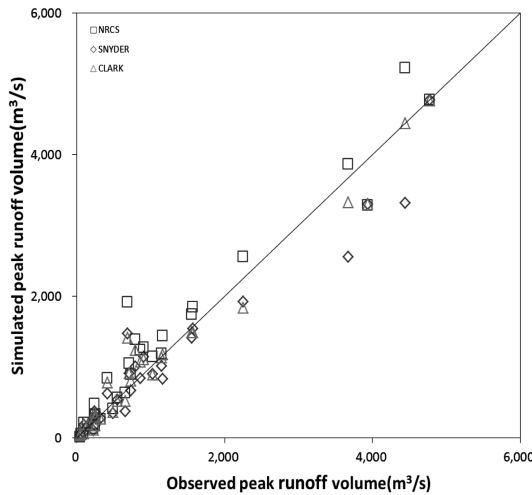


Fig. 3 Comparison peak runoff of simulation and observation within Namgang-Dam watershed

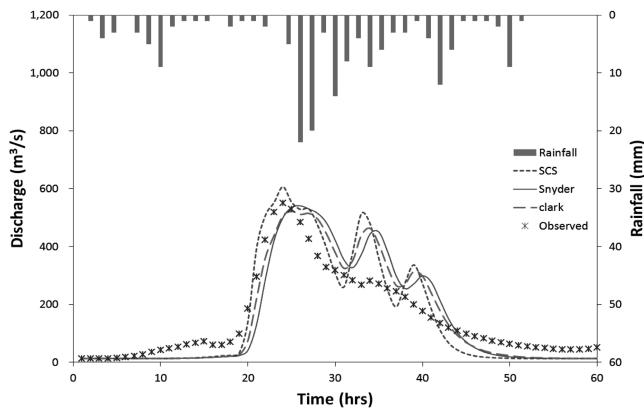


Fig. 4 Comparison between observed and simulated for 2004/06/18 at the Shinan

상수 (K)는 경험식 Clark 식, Linsley 식, Russel 식, Sabol 식을 적용한 결과 저류상수 (K)가 적용되는 범위 0.8~1.2 tc에 적절한 값을 갖는 Sabol 식을 선정하였다. 이때 Fig. 3은 모의치와 실측치의 지역별 강우사상의 침투유출량을 1:1 그래프로 나타낸 것으로 실측값을 잘 반영하는 것을 알 수 있으며 각 단위도법의 모의치도 비교적 일치하고 있는 것으로 나타났다.

Table 4 Total 5-day antecedent rainfall, Date, rainfall, rainfall duration, and Max. hourly rainfall for sub-watershed (Validation)

Station	Total 5-day antecedent rainfall (mm)	Date	Rainfall	Rainfall duration (mm)	Max. hourly rainfall (mm)
Sancheong	0	20090621	85	15	18
	33	20090707	90	15	14
	141	20100906	141	28	25
	127	20100901	132	14	41
	178	20100810	197	36	23
	3	20100710	136	26	28
	169	20100715	199	38	39
	40	20110625	283	35	46
	34	20110807	198	13	65
	20	20110709	348	46	24
	371	20110712	115	15	30
	21	20110801	39	5	13
Shinan	0	20090621	102	18	20
	12	20090521	86	12	14
	56	20090707	97	13	15
	1	20100710	138	25	19
	153	20100715	164	36	25
	13	20100810	187	36	20
	71	20100906	128	28	20
	0	20100825	84	10	44
	66	20110708	404	70	37
	109	20110801	133	28	16
	27	20110727	108	11	34
	97	20110624	191	38	15
21	20110807	163	12	40	
166	20110809	90	5	46	
Changchon	83	20090715	142	9	71
	5	20090707	173	14	20
	3	20090622	102	14	31
	102	20100911	80	21	22
	7	20100810	203	37	31
	72	20100906	102	32	30
	128	20110708	384	44	29
	78	20110801	121	27	18
91	20110625	187	31	17	

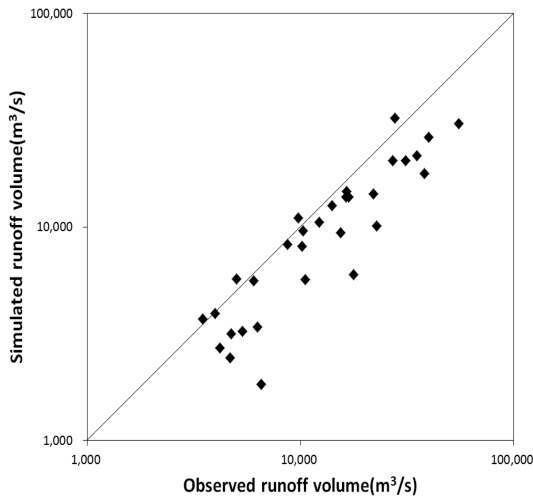


Fig. 5 Observed and simulated runoff volume within Namgang-Dam watershed

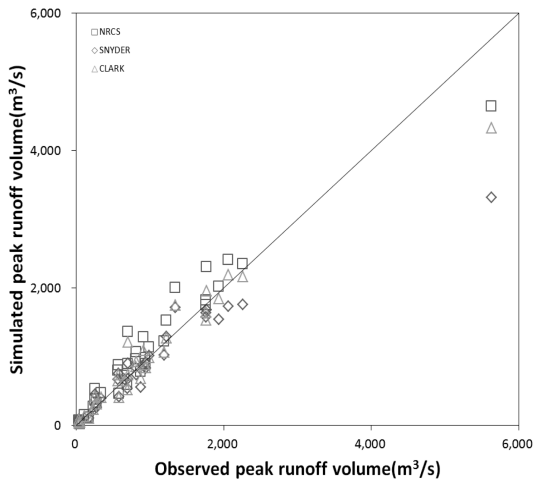


Fig. 6 Comparison peak runoff of simulation and observation within Namgang-Dam watershed

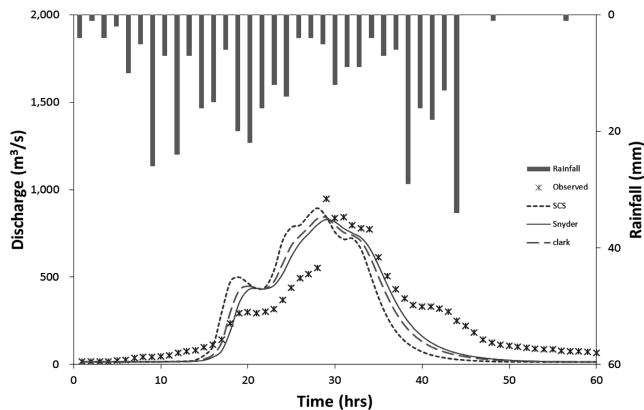


Fig. 7 Comparison between observed and simulated for 2011/07/08 at the Changchon

## 2. 모형의 검정

Table 4는 선정된 강우사상 중 모형의 보정에 이용되지 않은 2009년부터 2011년까지 3년간 총 35개의 사상에 대한 5일 선행강우량, 일자, 강우량, 강우지속시간, 최대 시강우량을 나타낸 것이다. Fig. 5와 Fig. 6은 남강댐 주요 하천 관측지점의 강우사상에 대한 유출량 및 첨두유량의 모의치와 실측치를 1:1 그래프로 도시한 것이며 유출량이 실측치보다 비교적 낮은 값을 보이나 첨두유량은 실측치와 모의치가 유사함을 알 수 있다.

## 3. 모형의 평가

모형의 보정과 검정에 대한 평가를 위하여 평균제곱근오차 (Root mean square error, RMSE)와 상대평균절대오차 (Relative mean absolute error, RMAE), 상대오차 (Relative bias, RB), 결정계수 ( $R^2$ ), Nash와 Sutcliffe (1970)가 제안한 COE (Coefficient of efficiency) 등의 통계적 변량을 사용하였으며, 각각의 통계 변량은 식 (2)~(5)와 같이 표현된다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [Q_f(i) - Q_o(i)]^2} \quad (2)$$

$$RMAE = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Q_f(i) - Q_o(i)|}{M_o} \quad (3)$$

$$RB = \frac{M_f - M_o}{M_o} \quad (4)$$

$$COE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_o(i) - Q_f(i))^2}{\sum_{i=1}^n (Q_o(i) - M_o)^2} \quad (5)$$

여기서,  $Q_o$ 는 실측값,  $Q_f$ 는 모의값,  $n$ 은 자료수,  $M_o$ 는 실측 유출량의 평균치,  $M_f$ 는 추정 유출량의 평균치이다.

Table 5와 Table 6은 단위도별 각 유역의 강우사상에 대한 유출량 및 첨두유량 모의 결과를 통계적인 변량으로 나타내고 있다. 모형의 보정과 검정에 대한 산청 유역 유출량의 RMSE를 살펴보면 모의치와 실측치 차의 범위가 0.64-1.96으로 나타났고 RMAE의 범위는 0.01-0.58이다. 결정계수  $R^2$ 는 산청, 신안, 창촌 순으로 보정의 경우 0.7739, 0.7742, 0.7740이고 검정은 0.8694, 0.8361, 0.8729로 나타났다. RB의 경우, 유출량과 첨두유량에

**Table 5 Calibrated results from HEC-HMS model simulation within Namgang-Dam watershed**

Item		Sancheong					Shinan					Changchon				
		R <sup>2</sup>	RMSE (mm/day)	RMAE	RB (%)	COE (-)	R <sup>2</sup>	RMSE (mm/day)	RMAE	RB (%)	COE (-)	R <sup>2</sup>	RMSE (mm/day)	RMAE	RB (%)	COE (-)
Runoff volume (m <sup>3</sup> /s)	NRCS	0.774	1.089	0.215	18.4	0.60	0.857	0.641	0.196	16.6	0.72	0.763	0.955	0.576	1.1	0.61
	SNYDER	0.774	1.092	0.215	18.6	0.60	0.857	0.643	0.197	16.8	0.72	0.767	0.940	0.569	1.9	0.61
	CLARK	0.774	1.091	0.215	18.5	0.60	0.857	0.643	0.197	16.8	0.72	0.766	0.944	0.569	1.5	0.61
Peak runoff volume (m <sup>3</sup> /s)	NRCS	0.977	0.047	0.005	15.1	0.95	0.831	0.086	0.358	32.9	0.73	0.100	0.059	0.187	6.5	0.95
	SNYDER	0.933	0.066	0.188	14.2	0.85	0.830	0.056	0.230	10.0	0.80	0.100	0.057	0.181	14.0	0.95
	CLARK	0.984	0.029	0.088	3.3	0.98	0.830	0.055	0.236	6.4	0.79	0.100	0.056	0.169	12.0	0.95

**Table 6 Validated results from HEC-HMS model simulation within Namgang-Dam watershed**

Item		Sancheong					Shinan					Changchon				
		R <sup>2</sup>	RMSE (mm/day)	RMAE	RB (%)	COE (-)	R <sup>2</sup>	RMSE (mm/day)	RMAE	RB (%)	COE (-)	R <sup>2</sup>	RMSE (mm/day)	RMAE	RB (%)	COE (-)
Runoff volume (m <sup>3</sup> /s)	NRCS	0.870	1.518	0.406	40.6	-1.05	0.907	0.839	0.241	20.4	0.48	0.949	1.009	0.219	12.2	0.91
	SNYDER	0.836	1.508	0.390	39.0	-1.12	0.908	0.840	0.242	20.5	0.48	0.949	1.002	0.218	12.2	0.91
	CLARK	0.873	1.522	0.408	40.8	-1.08	0.908	0.839	0.242	20.5	0.48	0.949	0.984	0.218	12.1	0.91
Peak runoff volume (m <sup>3</sup> /s)	NRCS	0.941	0.051	0.187	7.3	0.87	0.906	0.050	0.282	22.4	0.76	0.978	0.076	0.111	6.9	0.98
	SNYDER	0.933	0.088	0.231	21.0	0.29	0.922	0.030	0.161	7.8	0.89	0.992	0.079	0.119	8.6	0.97
	CLARK	0.955	0.053	0.161	3.7	0.84	0.915	0.031	0.161	6.3	0.88	0.989	0.078	0.102	4.6	0.98

**Table 7 ANOVA table of calibration result**

	SV	SS	df	MS	F <sub>S</sub>	F <sub>0.05</sub>
Runoff volume (m <sup>3</sup> /s)	Among group	134,092,397	3	44,697,466	0.265	2.680
	Within group	20,277,831,454	120	168,981,929		
	Total	20,411,923,851	123			
Peak runoff volume (m <sup>3</sup> /s)	Among group	1,064,931	3	354,977	0.221	2.680
	Within group	192,351,450	120	1,602,929		
	Total	193,416,381	123			

\* SV : source of variation, SS : sum of square, df : degree of freedom, MS : mean square

**Table 8 ANOVA table of validation result**

	SV	SS	df	MS	F <sub>S</sub>	F <sub>0.05</sub>
Runoff volume (m <sup>3</sup> /s)	Among group	516,323,811	3	172,107,937	1.751	2.671
	Within group	13,371,116,959	136	98,317,036		
	Total	13,887,440,770	139			
Peak runoff volume (m <sup>3</sup> /s)	Among group	823,184	3	274,395	0.346	2.671
	Within group	107,787,695	136	792,557		
	Total	108,610,878	139			

\* SV : source of variation, SS : sum of square, df : degree of freedom, MS : mean square

관하여 창촌이 상대오차가 가장 적으며 NRCS 단위도법은 유량에 대해서 비교적 상대오차가 적은 것으로 나타났고 Clark 단위도법은 첨두유량에 대해 상대오차가 가장 적은 것으로 판단된다. COE의 경우 보정기간 유량에 대해 각각 0.60, 0.72, 0.61, 첨두유량은 대체로 0.73-0.98의 범위를 갖는 것으로 확인되었다. 검

정기간의 경우는 창촌유역은 유량과 첨두유량 모두 COE가 0.91 이상의 값을 보여 모의치가 매우 양호하나 산청과 신안은 유량에 대한 COE가 비교적 양호하게 판단되는 0.80에 미치지 못하였다 (Jeong, 2007). 또한 첨두유량의 경우, 산청은 Snyder 단위도법이 0.29, 신안은 NRCS 단위도법이 0.76을 나타내어 다른



단위도법에 비교하여 낮은 정확성을 보였다. 이는 보·검정에 대한 대상구역의 모의치가 비교적 실측 데이터를 잘 반영하고 있으나  $R^2$ , RMSE, RMAE, RB, COE를 종합적으로 고려할 때 80 mm/day이상의 강우사상에 대한 선정과 선정된 강우사상 중 집중호우 등으로 인한 대규모 강우사상이 오차 범위에 영향을 미친 것으로 판단되며 검정기간은 보정기간보다 정확도가 낮게 산정됨을 알 수 있다.

실측값과 직접유출 모의를 수행하기 위해 적용한 NRCS 단위도법, Snyder 단위도법, Clark 단위도법들 간의 유의한 차이를 알아보기 위해 일원 분산분석 (Analysis of Variance, ANOVA) 을 모형의 보정과 검정에 대한 유출량 및 침투유량에 대하여 실시하였다. Table 7와 Table 8은 모형의 보정과 검정에 대한 결과의 분산분석표이다. 표의 내용에서 볼 수 있듯이 강우사상의 유출량에 대한 FS가 유의수준 5 %에 대한 F0.05값보다 작으므로 귀무가설을 기각할 수 없다. 따라서 각 단위도 방법 간의 유의적 차이는 없는 것으로 나타났다. 창촌의 경우는 CN값을 구함에 있어 차이를 나타내어 유의적 차이를 나타낼 것으로 추측하였으나 모의치와 실측치를 비교 분석한 결과 산청, 신안과 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 이는 대상지역으로 선정된 3개의 구역이 서로 인접해 있으며 지형적 특성과 기후적 특징이 유사하여 큰 차이를 보이지 않는 것으로 판단된다.

#### IV. 요약 및 결론

본 연구에서는 남강댐 구역의 주요 하천관측지점인 산청, 신안, 창촌 지점을 선정하여 GIS를 이용하여 유역을 구분하고 수문모형의 매개변수를 추출하였다. 추출한 매개변수를 HEC-HMS 모형의 입력 자료로 사용하였고, 대상구역에 적용하여 강우-유출 모의를 실시하여 적용성을 평가하였으며 하천설계기준에서 제시하는 대표적인 직접유출모의 방법인 NRCS 단위도법, Snyder 단위도법, Clark 단위도법을 대상구역에 적용하여 각 방법에 의한 홍수유출량 모의결과를 비교·평가 하고자 하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. HEC-HMS를 이용하여 대상 구역의 2004년부터 2011년까지의 주요한 66개의 호우사상에 대하여 수문곡선을 모의하였으며, 모의된 유출량과 침투유량을 수위-유량 곡선을 이용하여 선정된 실측 유량과 비교하였다.

2. 모형의 보정 결과 NRCS 단위도법, Snyder 단위도법, Clark 단위도법을 이용한 강우-유출 모의방법에 대하여 강우사상별 유출량에 대한  $R^2$ 와 RMSE가 0.7626~0.8573, 0.641~1.092 mm/day로 나타나 비교적 실측치를 잘 반영하는 것으로 나타났으며 침투유량에 대한  $R^2$ 와 RMSE가 각각 0.8295~0.9999, 0.029~0.086 mm/day로 거의 일치하는 것으로 나타났다.

3. 모형의 검정 결과 NRCS 단위도법, Snyder 단위도법, Clark 단위도법을 이용한 강우-유출 모의방법에 대하여 강우사상별 유출량에 대한  $R^2$ 와 RMSE가 0.8361~0.9493, 0.839~1.522 mm/day로 나타났으며 침투유량에 대한  $R^2$ 와 RMSE가 각각 0.9061~0.9916, 0.030~0.088 mm/day로 비교적 실측치를 반영하는 것으로 조사되었다.

4. NRCS 단위도법, Snyder 단위도법, Clark 단위도법을 적용한 결과 3가지 방법 모두 비슷한 적용성을 나타냈으며 각각의 단위도법에 대하여 유의적 차이를 알아보기 위해 일원 분산분석을 실시한 결과 각 방법 간에는 유의적 차이를 보이지 않았다.

#### REFERENCES

1. Heo, K. S., and J. H. Woo. 1988. Hydrologic soil group classification for Korea soil and its application. *Agricultural Engineering Technology* 4호: 48-60 (in Korean).
2. Im, S. J., and S. W. Park. 1997. Estimating Runoff Curve Numbers for Paddy Fields. *Journal of Korea Water Resources Association* 30(4): 379-387 (in Korean).
3. Jeong, J. Y., 2007. Continuous Streamflow Simulation Using Baseflow Separation and Nash's Instantaneous Unit Hydrograph. Master's Thesis, Dankook University, Gyeonggi-do, Korean (in Korean).
4. Kim, C. G., 1999. Estimating Peak Flow Considering the Runoff Characteristics in Paddies from Small Agricultural Watersheds. Master's Thesis, Seoul University, Seoul, Korean (in Korean).
5. Kim, H. J., 2001. Development of two-parametric hyperbolic model for daily streamflow simulation. Ph.D. Dissertation, Seoul University, Seoul, Korean (in Korean).
6. Kim, S. J., T. Y. Park, M. W. Jang, and S. M. Kim, 2010. Flood Runoff Estimation for the Streamflow Stations in Nangang-Dam Watershed Considering Forest Runoff Characteristics. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 52(6): 85-94 (in Korean).
7. Kim, S. M., S. C. Hyeon, and S. W. Prak, 2003. Flood Runoff Analysis for Agricultural Small Watershed Using HEC-HMS Model and HEC-GeoHMS Module. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 45(6): 119-127 (in Korean).
8. KWRA, 2005. Stream design standard. Korea Water Resources Association. p.310 (in Korean).

9. Lee, J. H., and C. S. Yoo. 2011. Decision of basin representative concentration time and storage coefficient considering antecedent moisture conditions. *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation* 11(5): 255-264 (in Korean).
10. Lee, S. H., and D. Y. Kim, S. J. Ahn, H. S. Ma, and S. J. Im, 2008. Inundation Simulation of the Dalgung Watershed, Jirisan National Park, using HEC-HMS and HEC-RAS. *Journal of Agriculture & Life Science* 42(2): 21-29 (in Korean).
11. MLTM, 2008. Planning Research of Flood Defence Technology for Next Generation. Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs.
12. Seong, C. H., 2004. A Comparative Study of Unit Hydrograph Models using HEC-HMS at a small watershed. Master's Thesis, Seoul University, Seoul, Korean (in Korean).
13. Seong, C. H., S. M. Kim, and S. W. Park, 2008. A Comparative Study of Unit Hydrograph Models for Flood Runoff Simulation at a Small Watershed. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 50(3): 17-27 (in Korean).
14. Sonu, J. H., and Y. C. Koh, 1986. Revision of Snyder's Coefficient for Synthesizing Unit Hydrograph. *Journal of Korean Association of Hydrological Sciences* 19(1): 57-63 (in Korean).
15. USACE, 2000. Hydrologic Modeling System HEC-HMS, Technical Reference Manual. U. S. Army Corps of Engineers.
16. USACE, 2009. HEC-HMS (version 3.4): Hydrologic Modeling System, User's Manual. U. S. Army Corps of Engineers.