

기상레이더와 지형정보시스템을 이용한 분포형 강우-유출 유역모형의 개발과 검정

Distributed GIS-Based Watershed Rainfall-Runoff Model Development and Its Calibration using Weather Radar

Brian E. Skahill* / 최 우 희** / 김 민 환*** / 김 성 균**** / Lynn E. Johnson*****

Brian E. Skail / Choi, Woo Hee / Kim, Min Hwan / Kim, Sung Kyun / Lynn E. Johnson

Abstract

An event-based, kinematic, infiltration-excess, and distributed rainfall-runoff model using weather radar and Geographic Information System(GIS) was developed to acknowledge and account for the spatial variability and uncertainty of several parameters relevant to storm surface runoff and surface flow. The developed model is compatible with raster GIS and spatially and temporally varied rainfall data. To calibrate the model, Monte Carlo simulation and a likelihood measure are utilized; allowing for a range of possible system responses from the calibrated model. Using rain gauge adjusted radar-rainfall estimates, the developed model was applied and evaluated to a limited number of historical events for the Ralston Creek and Goldsmith Gulch basins within the Denver Urban Drainage and Flood Control District (UDFCD) that contain mixed land use classifications. While based on a limited number of Monte Carlo simulations and considered flood events, Nash and Sutcliffe efficiency score ranges of $-0.19 \sim 0.95$ / $-0.75 \sim 0.81$ were obtained from the calibrated models for the Ralston Creek and Goldsmith Gulch basins, based on a comparison of observed and simulated hydrographs. For the Ralston Creek and Goldsmith Gulch basins, Nash and Sutcliffe efficiency scores of 0.88/0.10, 0.14/0.71, and 0.99/0.95 for runoff volume, peak discharge, and time to peak, respectively, were obtained from the model.

Key words : rainfall-runoff, GIS, Monte Carlo, surface runoff, radar-rainfall, hydrograph

요 지

기상레이더와 지형정보 시스템을 이용한 홍수사상에 기초하고, 운동역학적이며, 초과강우가 고려된 분포형 강우-

* Senior Researcher, Coastal and Hydraulics Laboratory, 3909 Halls Ferry Road, Vicksburg, MS 39180, U.S.A. (E-mail: Brian.E.Skahill@erdc.usace.army.mil)

** 연구교수, San Diego State University Foundation, 5250 Campanile Dr., San Diego, CA 92182, U.S.A..

*** 호남대학교 토목환경공학과 교수

Professor, Dept. of Civil & Environmental Eng., Honam Univ., Gwangju, 506-714, Korea

**** 기상사무관, 기상청

Korea Meteorological Administration, Sindaebang dong Dongjak-gu Seoul, 156-720, Korea

***** Professor, Dept. of Civil Engineering, University of Colorado at Denver, Denver, CO 80217, U.S.A.

유출 유역모형이 개발되었다. 이 유역모형에서 강우로 인한 지표면 유출 및 지표면 흐름과 관련된 각종 변수의 공간적 변동성과 불확실성을 인식하고 설명한다. 개발된 모형은 래스터 지형정보시스템과 공간적·시간적으로 변하는 강우자료와 호환된다. 몬테칼로 모의와 우도값이 이 모형의 검정을 위하여 이용되었으며, 검정 모형으로부터 반응되는 시스템의 가능범위가 허용되었다. 레이더-강우 추정에 대한 보정으로 강우계가 이용되고, 복잡한 토지이용 상태인 미국 덴버시 도시배수홍수조절 구역내에 있는 두 개 유역들(Ralston Creek와 Goldsmith Gulch 유역)의 제한된 기왕 홍수사상에 이 모형이 적용되었다. 제한된 수의 몬테칼로 모의들과 고려된 홍수사상들을 근거로 관측수문곡선과 계산수문곡선을 비교하여, Nash와 Sutcliffe 효율점수의 범위를 얻게 되었으며, 그 범위는 Ralston Creek과 Goldsmith Gulch 유역에 대한 검정모형들로부터 각각 $-0.19 \sim 0.95$ 와 $-0.75 \sim 0.81$ 이다. 또한, Ralston Creek과 Goldsmith Gulch 유역의 Nash와 Sutcliffe 효율점수는 유출용적에 대해 각각 0.88과 0.1, 첨두유량에 대해 0.14와 0.71, 첨두유량 도달시간에 대해 0.99와 0.95로 평가되었다.

핵심용어 : 강우-유출, 지형정보시스템, 몬테칼로 모의, 지표면 유출, 레이더-강우, 수문곡선

1. 서론

급속도로 발전하는 컴퓨터의 계산능력, 지형정보 시스템(GIS)의 발달, 래스터(raster)나 격자셀(grid cell) GIS 포맷으로 된 유역 데이터 베이스의 활용성 증가, 래스터 포맷의 기상레이더 강우추정 등으로 인하여 복합 분포형 강우-유출 유역모형에 대한 요구가 증대되고 있다. 복합 분포형 강우-유출 유역모형은 일반적으로 자료, 모형의 매개변수, 모형구조의 불확실성을 보정하기 위하여 관측된 홍수사상의 역사적 기록에 의해 검정되어야 한다. 복합 분포형 강우-유출 유역모형에는 공간적으로 변하는 많은 양의 자료가 포함된다. 셀에서 셀로 변할 수도 있는 많은 수의 모형 매개변수, 매개변수 관계식, 그리고 많은 양의 계산이 복합 분포형 강우-유출 유역모형 검정에 어려움을 주게 된다(Michaud, 1992; Michaud와 Sorooshian, 1994). 물리적 추론이 물리적 개념에 기초한 복합 분포형 강우-유출 유역모형을 검정하는데 도움이 될 수 있으며(Beven, 1989), 이 분포형 강우-유출 유역모형 검정에 현장 관측자료에만 의존하는 것은 문제가 되며(Binley 등, 1991), 모형검정이 분포형 강우-유출 유역모형의 개발을 위하여 여전히 장래에 해결되어야 할 과제이다(Bras, 1999).

특정한 복합 분포형 강우-유출 유역모형에 대해서 유일한 최적 매개변수의 조합은 없다(Binley 등, 1991; Beven와 Binley, 1992; Beven, 1995; Beven 등, 1995; Freer 등, 1996; Franks 등, 1998). 강우-유출 과정을 나타내는 모형구조내에는 많은 매개변수의 조합들이 존재할 수도 있게 된다. 만약 유일한 최적모형이 없다면, 예측한계를 추정할 수 있는 다른 방법이 모형

의 신뢰도 추정에 이용되어야 한다. GLUE(Generalized Likelihood Uncertainty Estimation) 방법이 강우-유출 유역모형의 검정과 불확실성 추정에 대한 방안으로 개발되었다(Beven과 Binley, 1992). GLUE 방법은 Bayesian 방법과 유사하며, 매개변수 값의 전 방분포(prior distribution)가 몬테칼로 모의를 이용하여 각 모형에 사용되는 무작위 매개변수 조합을 발생시키는 데 사용된다. GLUE 방법을 이용하여 유일한 최적해 조합을 찾아내지는 못하였지만, 몬테칼로 모의, 우도값(likelihood measure) 또는 우도값 집합, 그리고 채택/거부 조건을 유역응답의 척도로 발생시켜 강우-유출 모형을 평가하게 되었으며, 매개변수 집합을 채택 또는 거부할 것인지에 대해 사용됨으로써 수문모형에 이 GLUE 방법이 적용되었다(Beven과 Binley, 1992). 또한, 채택된 매개변수 집합에 대한 우도값이 모형 예측의 불확실성을 평가하는데 사용되었다. 강우-유출 유역모형에 대한 GLUE 방법의 적용에 관한 연구들이 수행되었다(Beven과 Binley, 1992; Beven 등, 1995; Freer 등, 1996; Franks 등, 1998). GLUE 방법에서 많은 수치계산이 수행되지만, 수치계산을 위한 제약조건도 물리적 개념에 기초한 분포형 강우-유출 유역모형을 성공적으로 검정하는데 제한된다. 분포형 강우-유출 유역모형의 적용이 용이하도록 자동검정 방법의 도입이 필요하다고 제안되었다(Michaud, 1992).

미국 기상청에서는 1980년대 후반에 변화가 매우 심한 기상과 홍수에 대하여 보다 신뢰할만한 탐지와 예보 능력 향상을 위한 여러 현대화 계획이 추진되었다. 이에 따라 기상레이더 시스템 WSR-88D (Weather Surveillance Radar-1988 Doppler)와 AWIPS-90

(Advanced Weather Interactive Processing System for the 1990's) 워크스테이션이 미국기상청 기상 예보국에 설치되었다. 이 현대화 계획에 의해 수집된 자료를 바탕으로 기상레이더를 이용한 강우량 추정에 관한 연구들이 발표되었다(Austin, 1987; Rasmussen 등, 1989; Smith와 Lipschutz, 1990; Fulton, 1999). 또한, 공간 및 시간 샘플링의 영향에 따른 유출에 초점을 맞춘 연구들이 진행되었다(Kouwen과 Garland, 1989; Ogden과 Julien, 1994; Michaud와 Soroo-shian, 1994; Faures 등, 1995; Winchell 등, 1998).

본 연구에서는 기상레이더와 지형정보시스템을 이용한 복합 분포형 강우-유출 유역모형이 개발되었다. 실제 유역의 기왕 홍수사상들에 적용되었으며, 개발된 모형이 기왕 홍수사상 자료를 이용하여 검증되었다. 수동 보정이 가능하도록 몬테칼로 모의가 이 모형검정과 불확실성 추정의 한 방법으로 이용되었다. 침투초과량 유출 메카니즘 가정아래 홍수사상에 기초한 지표류 또는 개수로 흐름으로 1차원 비정상 자유수면 흐름을 나타내는 방정식에 대한 운동과 가정이 지표면 및 수계망을 통한 초과강우를 추정하는데 이용되었다. 이 모형에서는 래스터 지형정보자료와 호환가능하고, 공간적 및 시간적으로 변하는 강우자료가 사용되었다. GLUE 방법

을 강우-유출 유역모형에 적용한 기존의 연구에서는 모형 매개변수의 수가 제한되었고 공간적 변동이 무시되었으나, 본 연구에서는 매개변수의 공간적 변화가 고려되었다. 혼합 토지이용으로 분류되는 미국 덴버시 도시 배수홍수조절 구역내에 있는 Ralston Creek과 Goldsmith Gulch 유역들에서 이 모형이 몇 개의 홍수사상들에 대하여 적용되었다. 각 유역의 유출용적, 침투유량, 침투유량 도달시간, 수문곡선에 대한 Nash와 Sutcliffe 효율지수를 계산함으로써 개발된 복합 분포형 강우-유출 유역모형의 평가가 시도되었다.

2. 모형의 개발

분포형 강우-유출 유역모형이 특정 단위해상도의 사각형 래스터 격자에 적용되었다. 주요 입력자료에는 유역 경계를 나타내는 래스터와 테이블 자료 집합, D-8 방법(Fairfield와 Leymarie, 1991)에 근거한 흐름방향, 경사, 간선 유역출구까지의 지표류 거리, 수계망, 연결 지형, 하도형상, 산림형태, 산림밀도, 토양분류, 토지이용 및 피복상태(LULC), 호수 표면적, 저수지 표면적, 공간적으로 변하는 조도계수, 초기 습윤도, 그리고 유역 내의 불투수 면적이 포함된다. 이 강우-유출 유역모형의 중요 구성요소에 공간적으로 변하는 차집(inter-

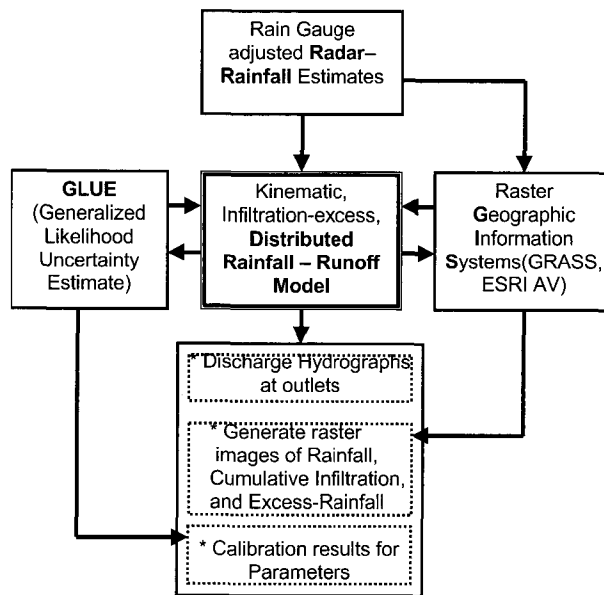


Fig. 1 Diagram for the Processes of the Distributed Rainfall-Runoff Model.

ception), 호수와 저수지에 내리는 강우 및 저수지로의 추적에 대한 계산, 공간적으로 변하는 침투, 운동과 지표류 추적, 하도손실, 그리고 운동과 하도흐름 추적이 포함된다. 이들 모형구성요소 중 몇 개는 작동되거나 작동되지 않을 수도 있다. 중요한 모형 출력으로는 유출용적, 각 소유역 및 간선유역 출구에서의 유량수문곡선, 여러 매개변수 즉, 누가침투와 초과강우에 대한 래스터 지도가 된다. 본 연구에서 개발된 모형에 대한 프로세스가 Fig. 1에 도시되었다.

개발된 모형을 이용하여, 모형 대상지역에 대한 강우와 누가침투 및 초과강우의 래스터 영상을 발생시키게 되며, 이 영상들은 사용자가 지정한 일정한 주기로 발생된다. 주어진 각각의 홍수사상에 대한 강우와 누가침투 및 초과강우의 공간적 및 시간적 특성이 제공되며 연속적으로 나타나게 된다. 즉, 홍수사상에 대한 강우와 누가침투 및 초과강우에 대해 지형정보시스템 소프트웨어인 GRASS (Geographic Resources Analysis Support System; USACERL, 1993)와 ESRI (Environmental Systems Research Institute) AV (Avenue)를 사용하여 연속영상을 나타낼 수 있다. 강우에 대한 영상은 입력자료인 레이더 강우추정으로부터 얻게 되고, 누가침투와 초과강우에 대해서는 본 연구에서 개발된 복합 분포형 강우-유출 유역모형을 통하여 발생시킬 수 있다.

강우량 손실과 지표류 추적에 대한 매개변수값은 입력 래스터와 테이블 자료 집합, 출간된 참고자료, 그리고 현장측정값을 근거로 계산되었다(Skahill과 Johnson, 2000). 필요한 자료와 매개변수 추정을 포함한 모형구성에 대해 간단히 기술하면 다음과 같다. 강우강도의 입력 방법에는 두 가지가 있다. 하나는 연속적인 래스터 아스키 파일이고, 또 하나는 특정기간동안 공간적으로 균일강도가 입력된다. 강우량은 호수, 저수지, 호수와 저수지의 일부분을 포함하는 격자셀내에 호수 또

는 저수지로 구분되며, 이 값은 지표면적을 근거로 한 것이다. 강우는 직접유출에 기여하지 않는다고 가정한다. 공간적으로 변하는 차집은 임산형태, 임산밀도 자료, 그리고 출간된 참고자료를 근거로 각 격자셀에서 차집 능력을 명시함으로써 모형화된다. 이 값은 만족될 때까지 초기 강우추정으로부터 선택된다. 모형내에서 공간적으로 변하는 침투율은 Green-Ampt 방정식을 이용하여 계산된다.

연속방정식과 운동방정식에 운동과 가정을 이용하여 지표류(overland flow)를 추적한다. 본 모형에서는 난류조건에서 Manning 방정식, 층류조건에서 Darcy-Weisbach 법칙이 사용되었다. 경사와 지표면 조도의 추정이 각 래스터 격자셀에서 지표류를 모형화하기 위하여 필요하다. 몬테칼로 모의가 주어진 홍수사상에 대해 수행된다면, 이 모형에서 만일 상대적으로 큰 공간 축척, 예를 들면 250m × 250m 격자에서 모의에 이용될 경우 3개 경사지도가 필요하게 된다. 이 경사지도는 각 래스터 격자셀 내에서의 최대 및 최소 경사의 지도 뿐만 아니라, 주어진 모형 격자셀 크기로부터 얻어지는 경사지도가 된다. 예를 들어 주어진 250m × 250m 격자에 대한 지표면 경사로부터 생성된 DEM(Digital Elevation Model)은 셀내에 포함된 모든 정보의 통합 체이므로, 이 셀은 세밀한 축척(예를 들어 30m × 30m)에서 DEM 정보를 얻을 수도 있다. 이 3개 층은 각 래스터 격자셀에서 경사에 대한 삼각형 분포를 개발하는데 이용되며, 주어진 모형 격자셀 크기에서 얻어진 경사값으로부터 가능한 값을 구하게 된다. 이 접근 방법은 큰 축척에서 작업하면서 세밀한 격자로부터 경사의 정보내용을 포함시키기 위한 것이다. 모형이 수동으로 검정된다면, 층류와 난류에 대한 수리저항계수의 래스터 지도가 필요하다. 그렇지 않으면 Manning의 조도계수값은 출간된 참고자료를 근거로 추정되며, Anderson Level II 토지이용 구분법을 근거로 LULC

Table 1. Classification of Urban Land Use (Level II Anderson Classification).

Code	Urban Land
11	Low density residential
12	Medium density residential
13	High density residential
14	Commercial
15	Industrial
16	Institutional
17	Extractive

(Land use/land cover) 자료가 재분류된다. 몬테칼로 모의가 주어진 홍수사상에 대해 수행된다면, 등무작위 추출(uniform random sampling)이 각 격자셀에서 Manning의 조도계수를 발생시키기 위하여 사용된다. 추출은 셀에서 셀, 또는 주어진 모의에 대하여 완전히 무작위가 되며, 등무작위 발생 값이 재분배 LULC 코드와 함께 모든 셀에 할당된다. 이 추출방법은 동일하게 Green-Ampt 침투변수의 무작위 발생에도 적용되지만, 추정은 토양구분에 근거를 둔다. 몬테칼로 모의가 주어진 홍수사상에 대해 수행된다면, 난류 지표면 흐름에 대해서는 삼각형 분포가 각 격자셀에서 수심-유량의 함수관계에서 지수를 추정하는데 사용되며, 대부분 이 값은 5/3이 사용된다(Chow, 1959). 불투수면의 비율은 Anderson Level II 토지이용 코드 11-17과 관련이 된다(Table 1). 코드 11에서 불투수면 비율은 20 ~ 65% 정도의 범위이다(Chow 등, 1988). 나머지 코드의 추정은 문헌(Reed와 Maidment, 1998)상에서 제시된 값에 의해 결정된다. 이 모형에서 유역내에 모든 래스터 격자셀내의 각 절점(node)에 대한 침투율과 누가침투가 계산된다. 이 값은 지표류 수심과 같이 셀내의 절점에서 절점으로 변환 수도 있게 된다. 이 모형은 래스터 격자셀내에서 단지 절점의 처음 (100-X)%에 대한 침투계산을 수행함으로써 불투수면 비율 X에 대한 추정이 수반되며, 계산은 흐름방향으로 수행된다. Anderson Level II 토지이용코드 11을 갖는 래스터 격자셀에서 몬테칼로 모의가 주어진 홍수사상에 대해 수행된다면, 등무작위 추출이 불투수면 비율에 대한 추

정을 발생시키는데 이용된다.

본 모형에서는 연속방정식과 운동방정식에 운동과 가정을 이용함으로써 하도흐름이 추적된다. 하도연결망의 부분으로 명시된 각 래스터 격자셀은 2개의 기여지표류(contributing overland flow) 평면과 셀의 중앙을 관통하는 하도로 구성된다. 이 격자셀은 근본적으로 하천에 대하여 대칭적인 V-형태의 유역으로 간주된다. 셀에 대한 입력값은 직접 하도에 적용되고, 또한 격자셀의 지표류 평면부분에도 적용된다. 지표류는 하도흐름방향에 직각으로 추적된다. 하도 격자셀내에 2개 기여지표류 평면의 경사는 승상수(multiplicative constant)를 셀 경사값에 곱함으로 결정된다. 이 값은 모형 사용자에게 의하여 명시되며, 수계망의 부분인 모든 래스터 격자셀에 균등하게 적용된다. 하지만 몬테칼로 모의가 주어진 홍수사상에 대해 수행된다면, 2개 기여지표류 평면에 대한 경사는 각각 셀내의 최소 및 최대 경사에서 최소, 최대 집합을 갖는 등무작위 추출을 근거로 수행된다. 하도단면을 비대칭 삼각형 또는 사각형으로 가정한다. 하도추적 계산을 수행하기 위한 계산단계는 하천차수(stream order)를 근거로 테이블 파일로부터 수행된다. 이 파일은 하도형상이 기술된 물리적 정보와 각각 하도 연결에 대한 Manning의 n값을 포함하여 변경된다. 1차 하천에 대한 상류 경계조건은 셀로 들어가는 지표류 흐름율에 근거를 둔다. 연속방정식이 하도 연결부분에서 경계조건으로 사용된다. 하천 흐름은 하도연결망을 따라 산재된 저수지로 추적된다. 몬테칼로 모의가 주어진 홍수사상에 대해 수행된다면, 각

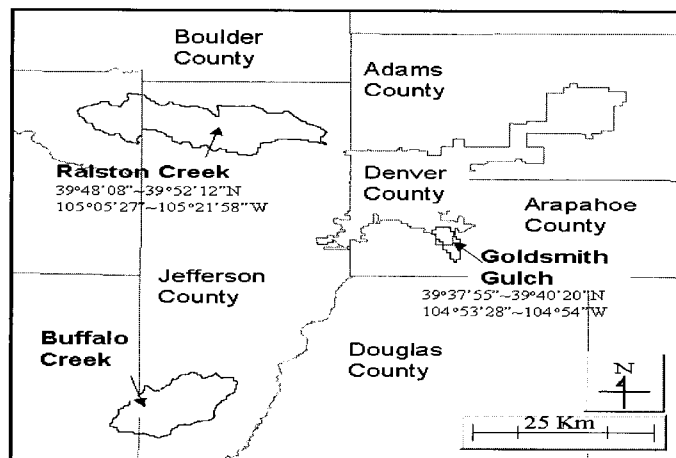


Fig. 2 Watershed Basins within Denver Urban Drainage and Flood Control District.

하도에 대한 Manning의 n 값은 삼각형 분포로부터 추정되며, 일반적으로 극치집합은 0.01과 0.1이다. 레이더 강우추정에 대한 내용은 다음 장에 기술되었다.

3. 모형의 적용

개발된 모형은 Fig. 2에 도시된 Ralston Creek과 Goldsmith Gulch 유역들로부터 강우로 인한 지표면 유출을 추적하는데 적용되었다. 이 유역들은 미국 덴버시 도시배수홍수조절 구역내에 위치하며, 유역면적은 각각 225km², 15km²이다. Ralston Creek 유역의 해발고도는 유역의 서쪽에서 약 3,138m로 가장 높고, 유역출구에서 1,622m로 가장 낮다. 이 유역은 물이 서쪽에서 동쪽으로 흐르고 있으며, 본류 하도길이는 약 42km이고, 평균하상경사는 2.8%이다. 이 유역의 상부지역은 Ralston 호수로 배수되고, 목축지역과 산림지역으로 구분되며, 로옴(loam)토양을 갖고 있다. 이 유역의 하부지역은 도시화가 되어가고 있고, 토양은 주로 실트로옴이다. Ralston 호수 아래로부터 Ralston Creek의 하도길이는 약 13.8km이고, 이 구간의 평균하상경사는 1.3%이다. Goldsmith Gulch 유역의 해발고도는 유역의 남쪽에서 가장 높은 1,770m이고, 유역의 출구에서 1,670m로 가장 낮다. 이 유역은 남동쪽에서 북쪽으로 물이 흐르며, 본류의 하도길이는 약 7km이고, 이 구간의 평균하상경사는 1%이며, 로옴토양을 갖고 있는 도시지역이다.

개발된 모형을 검증하기 위하여 Ralston Creek과 Goldsmith Gulch 유역들에 대하여 각각 8개와 6개의 홍수사상들이 선정되었으며, 이 유역들의 각 홍수사상들에 대한 실측된 침투유량 도달시간, 침투유량, 그리고 유출용적은 Fig. 3과 Fig. 4에 도시되었다. 개발된 모형의 적용과 평가를 위하여 NOAA(National Oceanic and Atmospheric Administration)의 강우자료, 덴버시 도시배수홍수조절 구역의 보고서들(Stewart, 1991; Stewart, 1995; Stewart, 1996; Stewart, 1997a,b), 레이더 반사율 자료, 그리고 우량계와 하천 유량 자료 등이 기왕 홍수사상의 확인을 위하여 이용되었다. 먼저 Ralston Creek 유역에 대하여 4개의 홍수사상이 모형의 검증, 그 나머지는 4개는 모형의 평가를 위하여 사용되었다. 그리고 Goldsmith Gulch 유역에서 3개의 홍수사상이 모형의 검증, 그 나머지는 3개는 모형의 평가를 위하여 사용되었다.

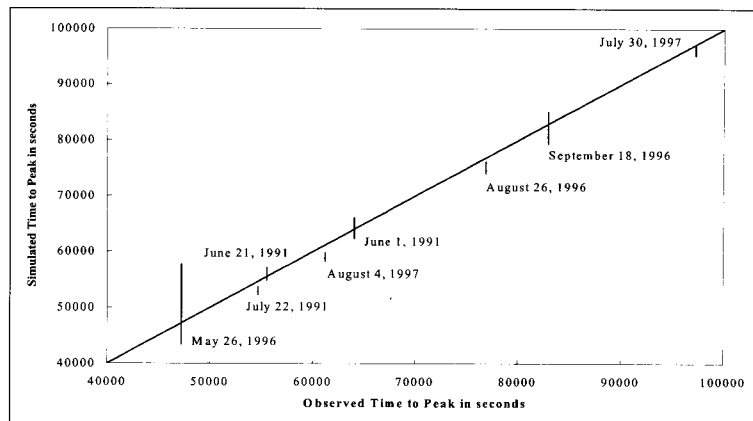
레이더 강우 리모트센싱 영상은 본 분포형 강우-유출 유역모형의 동적 입력자료가 된다. 레이더 반사율

자료의 격자 간격은 1991년 강우에 대해 1.25km × 1.25km, 1995년, 1996년, 그리고 1997년 강우에 대해 1km × 1km이다. 1995년, 1996년 및 1997년 홍수사상들에 대한 강우량 추정은 미국 덴버시에 있는 WSR-88D(Weather Surveillance Radar - 1988 Doppler) 레이더, 1991년 홍수사상에는 Mile High 레이더가 이용되었다. 이 두 개의 WSR-88D와 Mile High 레이더는 모두 10-cm 도플러 레이더로서 모두 NEXRAD(NEXt generation RADar)이다. 레이더 반사율 자료의 임시 해상도는 약 6분이다. 레이더 반사율과 강우강도사이의 멱승법칙 (power law) 관계는 다음과 같다.

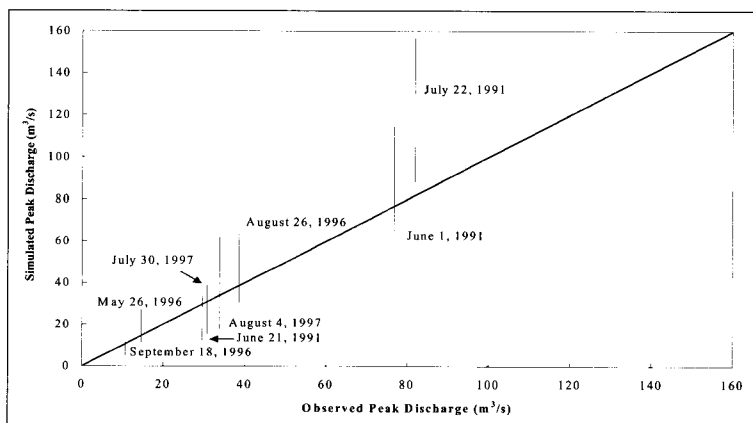
$$Z = a R^b \quad (1)$$

여기서 $Z(\text{mm}^6/\text{m}^3)$ 는 레이더 반사율(radar reflectivity), $R(\text{mm}/\text{hr})$ 은 강우강도, a 와 b 는 보정상수이며, 이 식은 레이더 반사율로부터 강우강도로 변환시키는데 이용된다. 이 $Z-R$ 관계식에서 보정상수($a=500, b=1.3$)가 각 사상별로 동일한 값이 사용되었고, 시간대별 즉, 강우발생 시작부터 종료시까지도 동일한 값이 사용되었다. 이 보정상수가 콜로라도주의 여름기후에 적용되어 많은 연구자로부터 좋은 결과를 얻었기 때문이다 (Smith와 Lipschutz, 1990; Sherman과 Johnson, 1992). 이 지역에서 흔히 사용되는 53dBZ의 한계반사율(reflectivity threshold)이 강우강도로 전환되기전에 적용되었다(Fulton 등 1998).

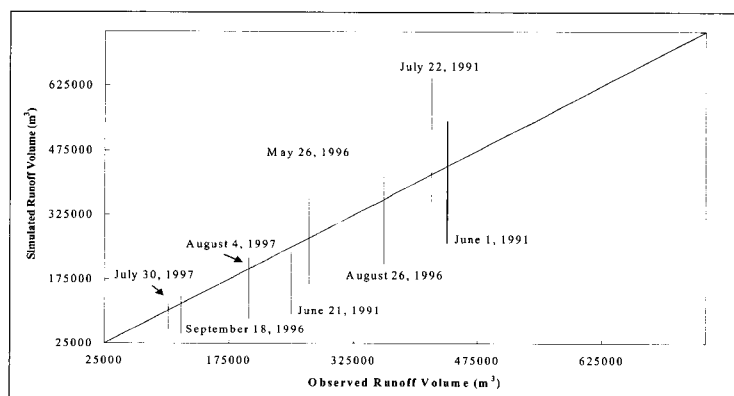
Ralston Creek 유역내와 인근에는 11개의 강우계가 있는데, 이것들이 편기보정계수(bias correction factor)를 구하는 데 이용되었고, Goldsmith Gulch 유역에는 한 개의 강우관측소가 있다. 편기보정계수(bias correction factor)가 우량계에 의하여 측정된 강우량과 레이더에 의하여 측정된 강우량의 비를 근거로 각각의 홍수사상에 대하여 계산되었다. 우량계로 보정된 레이더-강우량 추정은 원래 레이더-강우량 추정에 보정계수를 곱함으로써 결정된다. 계산된 편기보정계수는 Ralston Creek 또는 Goldsmith Gulch 유역을 포함하는 지역에 한정된 값이다. 주어진 홍수사상에서 이들 유역에 대한 덴버시 도시배수홍수조절 구역의 실시간 자동측정 우량계의 전부 또는 일부가 편기보정계수를 계산하는데 이용되었다. 편기보정계수를 레이더 강우량 추정에 사용하는 방법이 연구되었다(Winchell 등, 1998; Fulton, 1999).



(a)

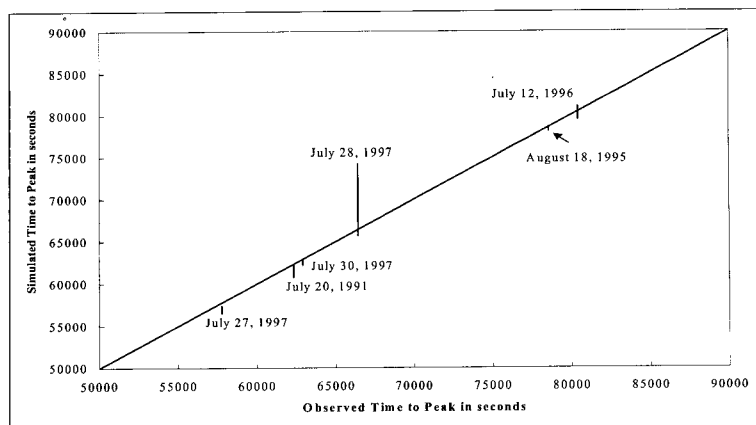


(b)

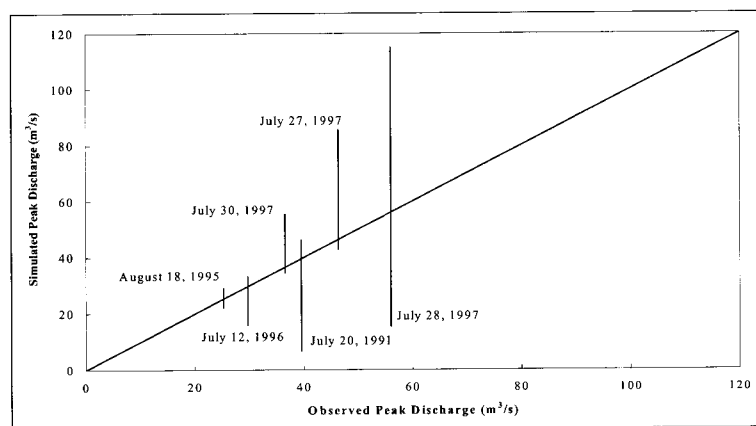


(c)

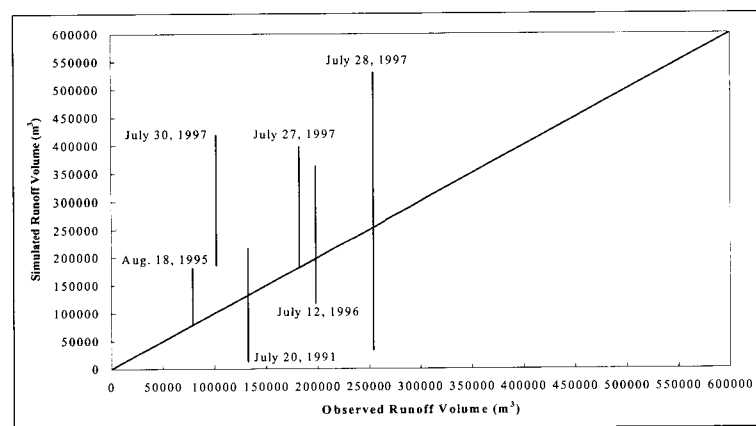
Fig. 3 Retained Model Ranges, and Comparison with Observed Values, for (a) Time to Peak, (b) Peak Discharge, and (c) Runoff Volume. (Ralston Creek Basin).



(a)



(b)



(c)

Fig. 4 Retained Model Ranges, and Comparison with Observed Values, for (a) Time to Peak, (b) Peak Discharge, and (c) Runoff Volume (Goldsmith Gulch Basin).

미국 농무성에서 개발된 GLEAMS(Groundwater Loading Effects of Agricultural Management Systems; Knisel 등, 1993) 모형의 수문부분이 강우-유출 유역모형 모의를 위한 초기토양 함수비를 추정하는 데 이용되었다. 이 방법은 Michaud(1992)와 Michaud와 Sorrosian(1994)에 의하여 사용된 방법과 매우 유사하다. GLEAMS 모형에서는 일일 시간간격으로 작동되며, Priestly-Taylor법, Penman-Monteith법을 이용하여 증발산능(potential evapotranspiration)이 계산된다. 평균일온도를 입력하기 위한 선택사양이 사용되었고, 증발산을 계산하기 위하여 Penman-Monteith법이 선택되었다. GLEAMS 모형의 산림 조건사양이 농업지역, 잎이 긴 침엽수림, 잎이 짧은 침엽수림 및 삼나무림, 그리고 활엽수 또는 혼합 소나무-활엽수림으로 나누어지며, 이 분류에 따라 선택된다. GLEAMS 모형의 수문구성과 관련된 매개변수값을 추정하기 위하여 고도, 수문토양그룹, 토지이용 및 피복상태, 진흙비율, 실트비율, 토양을 기술하는 래스터 GIS 자료층, 출간된 참고자료들이 이용되었다. 이슬점 온도, 태양광선, 바람의 거동에 대한 월평균값들은 GLEAMS 모형 데이터베이스로부터 제공된다. GLEAMS 모형이 1991년 1월 1일부터 1997년 12월 31일까지 수행되었다. 습윤도는 GRASS 모형을 이용하여 모형 격자셀에 내삽되어 있다.

Ralston Creek 유역에서 각각의 홍수사상에 대하여 250개 몬테칼로 모의, 그리고 Goldsmith Gulch 유역에서 각각의 홍수사상에 대하여 1000개 몬테칼로 모의들이 수행되었다. Green-Ampt 매개변수, 지표류 평면과 하도에 대한 Manning의 n 과 경사값, 난류 지표류 조건에 대한 β , 불투수면 비율의 추정이 몬테칼로 모의를 이용하여 각 모형의 래스터 격자셀에서 무작위적으로 발생되었다. 첫 번째 홍수사상에 대하여 발생한 매개변수 값은 계속해서 Ralston Creek과 Goldsmith Gulch 유역의 나머지 홍수사상에 사용된다. 이는 모형의 검정과 불확실성 추정을 위한 GLUE 방법을 이용하는 데 도움이 된다. 선택된 격자셀 간격이 Ralston Creek 유역에서 800m, Goldsmith Gulch 유역에서 500m로 모형화되었다. 차집, 침투, 지표류, 그리고 하도흐름이 모두 고려되었다. Ralston Creek 유역에 GLUE 방법을 적용함에 있어서 Nash와 Sutcliffe 효율기준이 우도값을 위해 사용되었고, 거부기준이 0.0으로 고정되었다. 이 효율기준의 범위는 $-\infty$ 부터 1까지이다. 음의 값은 모형의 예측능력이 관측값의 평균을 이

용한 것보다 더 나쁘다는 것을 나타낸다. 우도분포가 퍼지집합체를 이용하여 보정된다. 우도분포를 보정하는 퍼지집합체를 선택한 주된 이유는 Ralston Creek 유역의 각 홍수사상에 대해 수행된 몬테칼로 모의가 상대적으로 적기 때문이다. Nash와 Sutcliffe 효율기준을 계산하기 위한 공식은 다음과 같다.

$$ES = 1 - F^2 / F_o^2 \quad (2)$$

$$F^2 = \sum (q' - q)^2 \quad (3)$$

$$F_o^2 = \sum (q - \bar{q})^2 \quad (4)$$

여기서 q' 는 계산치, q 는 관측치, 그리고 \bar{q} 는 관측치(즉, 유량)의 평균값이다.

Goldsmith Gulch 유역에 대한 우도값 계산을 위하여 거부기준이 0.3으로 고정되었고, 우도분포가 Bayes 방정식에 의하여 보정되었다. 우도값이 선택된 이유는 보정우도값에 대해 Bayes 방정식을 적용하는데, 각 자료기간에 대한 오차편차가 동등하게 가중되는 특성을 갖고 있기 때문이다. 각 모형에 대한 우도값은 유역의 출구에 대해서 250개의 다른 시간간격에서 관측 및 계산 유량수문곡선을 비교함으로써 계산된다. 관측 유량수문곡선의 값은 계산된 값과 비교하기 위하여 3차 스플라인 함수를 이용하여 내삽되었다. 관측 유량수문곡선에서 기저흐름 분리를 위해 수평분리법(Chow 등 1988)이 이용되었다.

4. 결 과

먼저 각 홍수사상에 대한 편기보정계수는 기상레이더에 측정된 강수량에 대한 강우계로 측정된 강수량의 비에 근거하여 계산되었다. 강우계로 보정된 레이더-강우 추정은 원 레이더-강우 추정치에 편기보정계수를 곱함으로써 결정된다. 계산된 편기보정계수는 Ralston Creek과 Goldsmith Gulch 유역들에만 한정된 특별한 값들이다. 주어진 홍수사상에서 미국 덴버시 도시배수홍수조절 구역내의 실시간 자동측정 강우계들의 전체 또는 일부분이 편기보정계수를 계산하는 데 이용되었다. Ralston Creek과 Goldsmith Gulch 유역들에서 각 홍수사상에 대한 계산된 편기보정계수를 Table 2에 나타냈다.

검정된 복합 분포형 강우-유출 유역모형의 정확도가 각각의 홍수사상에서 얻어진 계산우도값들을 근거로 평가되었다. Table 3과 Table 4는 각각 Ralston Creek

Table 2. Bias Correction Factors Computed for Each Storm Event.

Basin	Storm Number	Storm Date	Bias Correction
Ralston Creek	1	1, June, 1991	0.46
	2	26, May, 1996	0.73
	3	4, August, 1997	0.92
	4	21, June, 1991	0.64
	5	22, July, 1991	0.64
	6	26, August, 1996	0.65
	7	18, September, 1996	0.49
	8	30, July, 1997	2.63
Goldsmith Gulch	1	28, July, 1997	0.89
	2	20, July, 1991	0.64
	3	12, July, 1996	0.40
	4	27, July, 1997	0.90
	5	18, August, 1995	0.65
	6	30, July, 1997	0.50

Table 3. Computed Likelihood Measure Values for Each Individual Event (Ralston Creek Basin).

Storm Number	Storm Date	Likelihood Measure		
		Minimum	Maximum	Average
1	1, June, 1991	0.25	0.95	0.79
2	26, May, 1996	0.56	0.95	0.87
3	4, August, 1997	-0.29	0.76	0.31
4	21, June, 1991	0.40	0.85	0.70
5	22, July, 1991	-0.12	0.89	0.51
6	26, August, 1996	-0.19	0.88	0.44
7	18, September, 1996	0.44	0.94	0.76
8	30, July, 1997	-0.04	0.95	0.52

Table 4. Computed Likelihood Measure Values for Each Individual Event (Goldsmith Gulch Basin).

Storm Number	Storm Date	Likelihood Measure		
		Minimum	Maximum	Average
1	28, July, 1997	0.56	0.83	0.71
2	20, July, 1991	0.36	0.81	0.57
3	12, July, 1996	0.32	0.67	0.45
4	27, July, 1997	0.28	0.83	0.52
5	18, August, 1995	0.22	0.91	0.65
6	30, July, 1997	0.11	0.90	0.52

Table 5. Updated Computed Likelihood Measure Values During Model Calibration (Ralston Creek Basin).

Storm Number	Storm Date	Updated Likelihood Measure		
		Minimum	Maximum	Average
1	1, June, 1991	0.25	0.95	0.79
2	26, May, 1996	0.59	0.95	0.88
3	4, August, 1997	0.59	0.95	0.88
4	21, June, 1991	0.70	0.95	0.88

Table 6. Updated Computed Likelihood Measure Values During Model Calibration (Goldsmith Gulch Basin).

Storm Number	Storm Date	Updated Likelihood Measure		
		Minimum	Maximum	Average
1	28, July, 1997	0.56	0.83	0.71
2	20, July, 1991	0.30	0.61	0.43
3	12, July, 1996	0.30	0.38	0.33

Table 7. Nash and Sutcliffe Efficiency Scores Obtained for the Validation Events on the Goldsmith Gulch Basin.

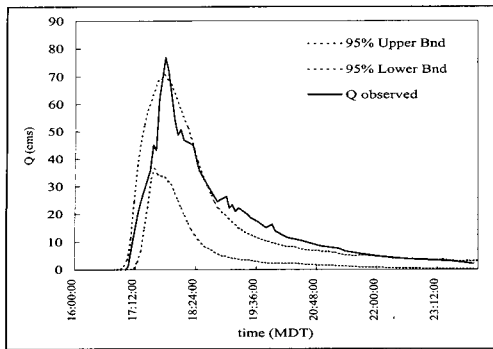
Storm Number	Storm Date	Nash and Sutcliffe Efficiency		
		Minimum	Maximum	Average
4	27, July, 1997	-0.02	0.81	0.44
5	18, August, 1995	-0.29	0.80	0.51
6	30, July, 1997	-0.75	0.69	0.13

Table 8. Model Calibration and Validation Nash & Sutcliffe Efficiency Scores for Runoff Volume, Peak Discharge, and Time to Peak(Ralston Creek Basin).

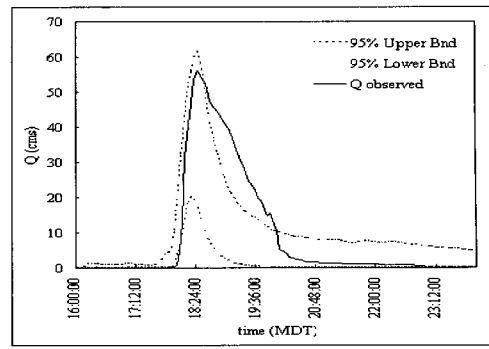
	Runoff Volume	Peak Discharge	Time to Peak
Calibration	0.55	0.95	0.93
Validation	0.88	0.14	0.99

Table 9. Model Calibration and Validation Nash & Sutcliffe Efficiency Scores for Runoff Volume, Peak Discharge, and Time to Peak(Goldsmith Gulch Basin).

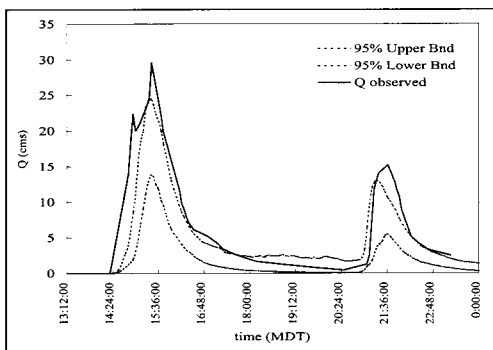
	Runoff Volume	Peak Discharge	Time to Peak
Calibration	-0.13	-0.38	0.96
Validation	0.10	0.71	0.95



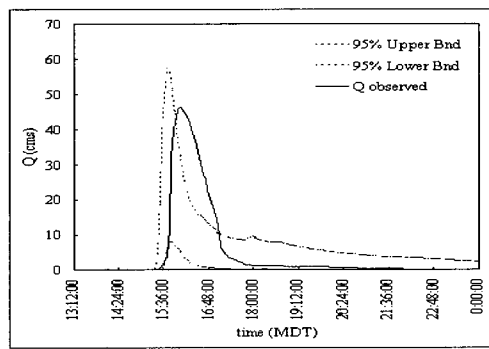
(a)



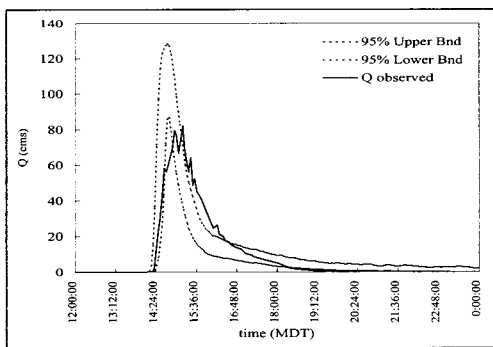
(a)



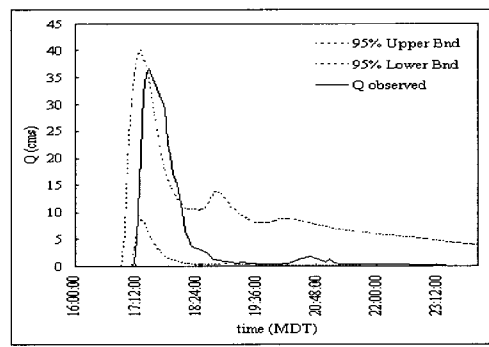
(b)



(b)



(c)



(c)

Fig. 5 Ninety-five Percent Uncertainty Bounds Obtained from the Model for the (a) 1, June, 1991, (b) 21, June, 1991, and (c) 22, July, 1991 Storms on the Ralston Creek Basin.

Fig. 6 Ninety-five Percent Uncertainty Bounds Obtained from the Model for the (a) 28, July, 1997, (b) 27, July, 1997, and (c) 30, July, 1997 Storms on the Goldsmith Gulch Basin.

Goldsmith Gulch 유역들에 대하여 모의된 각 홍수사상에 대한 최소, 최대 및 평균 계산우도값들이다. Table 3과 Table 4에 나타난 값들은 각각의 단일 홍수사상에 한정되었다. Table 4에 제시된 1997년 7월 28일, 1991년 7월 20일, 1996년 7월 12일 경우에 대하여 최소계산우도값(minimum computed likelihood measures)을 관찰하고, 거부조건 0.3을 고려하면, 보유모형의 숫자감소는 단지 보정방법인 Bayes 방정식의 함수에서 기인된다는 것을 알 수 있게 된다. 한편, 모형 검정과 모형 타당성 검토로부터 얻어진 보정우도값의 최소, 최대 및 평균값들이 Table 5와 Table 6에 제시되었다. Ralston Creek와 Goldsmith Gulch 유역들에서 각각 고려된 4개와 3개 홍수사상들로부터 얻어진 보정우도값들이 모형의 타당성 검토에도 이용되었다. 자료집합에서 우도값이 1이라는 것은 관측 및 계산된 직접유출 수문곡선이 동일하다는 것을 의미한다. 그러므로 우도값이 1에 근접하면 주어진 모형에서 침투유량 도달시간, 침투유량, 그리고 유출용적을 정확히 모의한다는 것을 의미한다. 홍수사상에 대한 모형예측범위를 얻는데 GLUE 방법과 일치되도록 보정우도값이 계산 유량값의 우도가중(likelihood weighted) 되기 전에 재조정되었다.

Ralston Creek 유역에 대한 두 번째 홍수사상을 고려한 후, Table 5에 제시된 것처럼 모형검정에 약간의 개선이 관측되었다. 이는 우도값을 보정하는 퍼지합집합을 선택하였기 때문이며, 퍼지합집합에 대한 관계식은 다음과 같다.

$$L_p(\theta_i|Y) = \max\{L_o(\theta_i), L(\theta_i|Y)\} \quad (5)$$

여기서 $L_p(\theta_i|Y)$ 는 i 번째 모형에 대한 후행우도(posterior likelihood), $L_o(\theta_i)$ 는 선행우도(prior likelihood), $L(\theta_i|Y)$ 는 현재 자료집단 Y 에 대한 계산된 우도이다. 이 방법이 Ralston Creek 유역에 대한 각각 홍수사상에 수행된 몬테칼로 모의의 숫자가 제한되어 선택되었는데, 이는 모형의 예측범위의 추정을 위한 충분한 수의 모형을 보유하기 위해 필요하다. 모든 모형은 일반적인 거부조건과 우도값 보정을 위해 선택된 방법 때문에 유지된다. 반면에 Goldsmith Gulch 유역에 대한 모형검정에서 보유모형(retained models)에 대한 숫자의 감소가 관찰되었다. 여기서 보유모형이란 임의로 선택된 최소허용모형(minimum acceptable model) 보다 더 큰 우도값을 갖는 모형이다.

계산 및 관측된 수문곡선을 비교하여 계산된 Goldsmith Gulch 유역에 대한 Nash와 Sutcliffe 예측효율이 Table 7에 제시되었다. 이 값은 검정모형으로부터 각각의 타당성 평가를 위해 홍수사상 번호 4, 5, 6에 대한 계산 및 관측된 수문곡선의 비교로부터 계산된 것이다. 모형의 적용을 설명하고 모형의 정도를 평가하기 위하여 수행된 수치실험은 제한된 수의 몬테칼로 모의로부터 수행되었다. Bayes 방법은 우도값을 1에 근접하는 많은 수의 보유모형을 발생시키기 위하여 많은 수의 수치모의가 필요하다. 그 결과 앞에서 언급된 Table 3과 Table 4에 나타난 최대우도값이 1에 근접한 값을 가지므로 모형의 갯수는 충분하다는 것을 나타낸다. 고려된 홍수사상으로부터 평균 입력강우의 99.99%는 호수 또는 저수지, 차집, 침투, 저수지로 유입된 초과강우, 그리고 유역에 남아있는 초과강우이거나 주유역(main basin)의 용적감소로 설명된다. Table 8과 Table 9에 Ralston Creek와 Goldsmith Gulch 유역들에 대한 검정과 타당성 조사를 위한 모형으로부터 얻어진 유출용적, 침투유량, 그리고 침투유량 도달시간에 대해 Nash와 Sutcliffe (1970)의 효율점수(efficiency scores)가 제시되었다.

Ralston Creek와 Goldsmith Gulch 유역들에 대한 주요 유역출구에서 몇 개의 홍수사상에 대하여 보유 모형으로부터 얻은 95% 불확실성 경계(uncertainty bounds)가 Fig. 5와 Fig. 6에 도시되었다. Fig. 5와 Fig. 6에서 침투유량 도달시간은 매우 우수하다는 것을 알 수 있으며, 수문곡선 형상이 양호하게 예측되었다. 대부분의 경우에 95% 불확실성 경계가 고려된 홍수사상에 대하여 유역출구에서 거의 모든 관측값의 범위내에 들었다. 이는 모형모의 범위가 상대적으로 작은 수의 몬테칼로 모의에 근거하였다는 것을 의미한다.

5. 결론 및 고찰

강우로 인한 지표면 유출 및 지표면 흐름과 관련된 각종 매개변수의 공간적 변동과 불확실성을 인식하고 설명하기 위해, 초과강우를 고려한 복합 분포형 강우-유출 유역모형이 개발되었다. 미국 덴버시 도시배수홍수조절 구역내에 있는 Ralston Creek와 Goldsmith Gulch 유역들에서 몇 개의 홍수사상들에 대하여 이 모형이 검정되었다. 이 모형의 검정과 불확실성의 추정을 위해 GLUE 방법이 채택되었고, 단일 홍수사상에 대하여 몬테칼로 모의가 포함되었다. Beven과 Binley (1992)가 GLUE 방법을 강우-유출 유역모형에 적용함

에 있어서 매개변수의 공간적 변동이 무시되었지만, 본 연구에서는 이 변동이 고려되었다.

제한된 수의 몬테칼로 모의와 고려된 홍수사상을 근거로, 관측수문곡선과 계산수문곡선들로부터 Nash와 Sutcliffe 효율점수가 계산되었다. 미국 덴버시 도시배수홍수조절 구역내에 위치한 Ralston Creek과 Goldsmith Gulch 유역들에 대한 검정모형들로부터 Nash와 Sutcliffe 효율점수의 범위는 각각의 유역에 대하여 -0.19~0.95와 -0.75~0.81이다. 또한, 이들 Ralston Creek과 Goldsmith Gulch 유역들에 대한 Nash와 Sutcliffe 효율점수는 이들 유역들에 대하여 유출용적의 경우에는 각각 0.88과 0.1, 침투유량에 대해서는 0.14와 0.71, 그리고 침투유량 도달시간에 대해서는 각각 0.99와 0.95로 계산되었다. 제한된 수의 몬테칼로 모의와 수행된 홍수사상에 대한 본 모형의 결과는 비록 레이더 강우 격자셀의 공간축적이 $1\text{km} \times 1\text{km}$ 또는 $1.25\text{km} \times 1.25\text{km}$ 로 비교적 큰 것이 사용되었음에도 불구하고, 위에 언급된 Nash와 Sutcliffe 효율점수에서 본 것 같이 좋은 결과를 얻게 되었다.

기상레이더를 이용한 강우량 추정과 이를 이용한 분포형 강우-유출모형의 적용에 대한 연구들은 미국에서도 1980년대 후반 미국 기상청의 현대화로 설치된 WSR-88D의 도입후부터 시작되었다. 기상레이더를 이용한 강우량 추정에 관한 연구는 미국 NOAA에서 많이 수행되고 있으며, 분포형 강우-유출에 대한 연구는 미국 기상청에서 미국 전지역에서 돌발홍수에 대한 예경보 시스템의 구축을 위하여 많이 연구되고 있다. 지난 2001년 미국 보스턴에서 개최된 미국지구물리학회(AGU) 춘계학술발표회에서 한 분과는 분포형과 Lumped 강우-유출 유역모형의 비교에 관한 논문에 대한 것만으로 진행되었다. 한편, 기상레이더를 이용한 강우량 추정과 이를 이용한 분포형 강우-유출 유역모형의 국내에 대한 적용은 현재 수행되고 있는 국내 기상청의 현대화 계획에 따라 NEXRAD(NEXT generation RADer)가 많이 설치되고, 적용유역에 대한 래스터 지형정보시스템이 갖추어진다면 가능해지리라 생각된다. 국내 실정에 맞는 분포형 강우-유출 유역모형의 개발로 인하여, 좀더 정확한 홍수예경보 시스템의 개발이 가능해 진다면 매년 되풀이되는 홍수피해로부터 많은 인명과 재산을 보호할 수 있게 되리라 기대된다.

참 고 문 헌

- Austin, P., (1987). "Relation between measured radar reflectivity and surface rainfall." *Monthly Weather Review*, 115, 1053-1070.
- Beven, K., (1989). "Changing ideas in hydrology-The case of physically-based models." *Journal of Hydrology*, Vol. 105, pp. 157-172.
- Beven, K., and Binley, A.M., (1992). "The future of distributed models: Model calibration and uncertainty prediction." *Hydrological Processes*, Vol. 6, pp. 279-298.
- Beven, K., (1995). "A discussion of distributed hydrological modelling." *Distributed hydrological modelling*, edited by M.B. Abbott and J.C. Refsgaard, Chapter 13A, Kluwer Academic Publishers, Netherlands.
- Beven, K., Lamb, R., Romanowicz, R., and Freer, J., (1995). "Topmodel. computer models of watershed hydrology," edited by V.P. Singh, Water Resources Publications, Highlands Ranch, Colorado, 627-668.
- Binley, A.M., Beven, K.J., Calver, A., and Watts, G., (1991), "Changing responses in hydrology: Assessing the uncertainty in physically based model predictions." *Water Resources Research*, 27(6), 1253-1261.
- Bras, R.L., (1999). "A brief history of hydrology." *The Robert E. Horton Lecture, 79th AMS Annual Meeting*, Bulletin of the American Meteorological Society, Vol. 80, No. 6, 1151-1164.
- Chow, V.T., (1959). *Open channel hydraulics*. McGraw-Hill, New York.
- Chow, V.T., Maidment, D.R., and Mays, L.W., (1988). *Applied hydrology*. McGraw-Hill, Inc., New York.
- Fairfield, J., and Leymarie, P., (1991). "Drainage networks from grid digital elevation models." *Water Resources Research*, 30(6), 1681-1692.
- Faures, J.M., Goodrich, D.C., Woolhiser, D.A., and Sorooshian, Soroosh. (1995). "Impact of small-scale spatial rainfall variability on

- runoff modeling." *Journal of Hydrology*, Vol. 173, 309-326.
- Franks, S.W., Gineste, P., Beven, K.J., and Merot, P., (1998), "On constraining the predictions of a distributed model: The incorporation of fuzzy estimates of saturated areas into the calibration process." *Water Resources Research*, 34(4), 787-797.
- Freer, J., Beven, K., and Ambroise, B., (1996). "Bayesian estimation of uncertainty in runoff prediction and the value of data: An application of the GLUE approach," *Water Resources Research*, 32(7), 2161-2173.
- Fulton, R.A., Breidenbach, J.P., Seo, D.-J., and Miller, D.A., (1998). "The WSR-88D Rainfall Algorithm." *Weather and Forecasting*, 13, 377-395.
- Fulton, R.A., (1999). "Sensitivity of WSR-88D Rainfall estimates to the rain-rate threshold and rain gauge adjustment: A flash flood case study." *Weather and Forecasting*, 14, 604-624.
- Knisel, W.G., Leonard, R.A., Davis, F.M., and Nicks, A.D., (1993). *GLEAMS Version 2.10. Part III. User Manual*. U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service, Conservation Research Report series, 205 pp.
- Kouwen, N. and Garland, G., (1989), "Resolution considerations in using radar rainfall data for flood forecasting." *Can. J. Civ. Eng.*, 16, 279-289.
- Michaud, J.D., (1992). *Distributed rainfall-runoff modeling of thunderstorm-generated floods: A case study in a mid-size, semi-arid watershed in Arizona*. Ph.D. dissertation, University of Arizona, Tucson.
- Michaud, J.D. and Sorooshian, S., (1994). "Comparison of simple versus complex distributed runoff models on a midsized, semiarid watershed." *Water Resources Research*, 30(3), 593-605.
- Nash, J.E. and Sutcliffe, J.V., (1970). "River flow forecasting through conceptual models. Part 1 - A Discussion of principles." *Journal of Hydrology*, 10, 282-290.
- Ogden, F.L. and Julien, P.Y., (1994). "Runoff model sensitivity to radar rainfall resolution." *Journal of Hydrology*, Vol. 158, 1-18.
- Rasmussen, E.N., Smith, J.K., Pratte, J.F., and Lipschutz, R.C., (1989). "Real time precipitation accumulation estimation using the NCAR CP-2 Doppler radar." *Twenty-fourth Conference on Radar Meteorology*, Tallahassee, Florida, American Meteorological Society, 236-239.
- Reed, S.M., and Maidment, D.R. (1998). Use of digital soil maps in a rainfall-runoff model, CRWR Online Report 98-8.
- Sherman, U. D. and Johnson, L.E., (1992). *Accuracy of mean areal precipitation estimates using calibrated radar*. Civil Engineering Report, Department of Civil Engineering, University of Colorado, Denver, Colorado.
- Skahill, B.E., and Johnson, L.E., (2000). *F2D - A kinematic distributed watershed rainfall-runoff model*, NOAA Technical Memorandum OAR-FSL-24. Forecast Systems Laboratory, Boulder, Colorado. March.
- Smith, J.K. and Lipschutz, R.C., (1990). "Performance of the NEXRAD precipitation algorithms in Colorado during 1989." *Eighth Conference on Hydrometeorology*, American Meteorological Society. Kananaskis Park, Alta., Canada, October 22-26.
- Stewart, K.G., (1991). *Flash flood prediction program & related activities*. Flood Hazard News, Denver Urban Drainage and Flood Control District, 21(1), 14-18.
- Stewart, K.G., (1995). *Flood warning & preparedness*. Flood Hazard News, Denver Urban Drainage and Flood Control District, 25(1), 21-23.
- Stewart, K.G., (1996). *Flood warning & preparedness*. Flood Hazard News, Denver Urban Drainage and Flood Control District,

- 26(1), 10.
- Stewart, K.G., (1997a). *The 1997 floods in the district*. Flood Hazard News, Denver Urban Drainage and Flood Control District, 27(1), 1,18-19.
- Stewart, K.G., (1997b). *Flood warning & preparedness*. Flood Hazard News, Denver Urban Drainage and Flood Control District, 27(1), 22.
- USACERL (U.S. Army Corps of Engineers Construction Engineering Research Laboratory), (1993). *Geographic resources analysis support system*, Version 4.1. User's Reference Manual, U.S. Army, Champaign, Illinois.
- Winchell, M., Gupta, H.V., and Sorooshian, S., (1998). "On the simulation of infiltration- and saturation-excess runoff using radar-based estimates: Effects of algorithm uncertainty and pixel aggregation." *Water Resources Research*, 34(10), 2655-2670.
- (논문번호:02-59/접수:2002.08.24/심사완료:2003.03.25)