

댐 하류 지점에 대한 분포형 모형의 적용성 평가

Evaluation of the Applicability of a Distributed Model at the Downstream of Dam

최 윤 석* / 김 경 탁** / 심 명 필***

Choi, Yun Seok / Kim, Kyung Tak / Shim, Myung Pil

Abstract

Dam has very important roles in both water use and flood control. Dam release and runoff from rainfall affect directly to the flood control at the downstream of dam during heavy storm especially. This study evaluates the applicability of a distributed model by applying the GRM (Grid based Rainfall-runoff Model) based on HyGIS (Hydro Geographic Information System) environment to runoff modeling at the downstream of dam where the discharge from dam and rainfall affect simultaneously. In order to do this, Yeosu watershed in Han River basin is selected. Rainfall data and discharge from Chungju regulation dam and Hoengseong dam are applied to runoff simulation. The modeling results are verified with Yeosu water level station, and they show good agreement with observed hydrographs. And this study shows that GRM is able to simulate appropriately the effect of dam discharge and rainfall on watershed runoff.

keywords : GRM, dam, rainfall, runoff, HyGIS, distributed model

요 지

유역에서의 댐은 이수와 치수 측면에서 매우 큰 역할을 담당하고 있으며, 특히 집중호우 기간 동안의 댐 방류는 강우에 의해서 발생하는 유출과 더불어 댐 하류의 홍수조절에 직접적인 영향을 미치고 있다. 본 연구에서는 댐 방류와 강우에 의한 유출의 영향을 동시에 받는 댐 하류 지점에 대한 유출모의를 위해서 HyGIS (Hydro Geographic Information System) 환경에서 운영되는 분포형 강우-유출 모형인 GRM (Grid based Rainfall-runoff Model)을 적용하고 이에 대한 적용성을 평가하고자 한다. 대상 유역은 한강 수계의 여주 수위관측소 상류로 선정하였으며, 충주 조정지댐과 횡성댐의 방류량 및 강우의 영향을 반영하여 유출모의를 수행하고, 이를 여주 수위관측소에 대해서 검증하였다. 모형의 적용결과 모의된 유출 수문곡선은 관측 수문곡선을 잘 재현하였으며, 이를 통해서 GRM 모형은 댐 방류와 강우가 유역유출에 미치는 영향을 적절히 모의할 수 있는 것으로 나타났다.

핵심용어 : GRM, 댐, 강우, 유출, HyGIS, 분포형 모형

* 교신저자, 한국건설기술연구원 수자원연구실 연구원

Corresponding Author, Researcher, Water Resources Research Div., Korea Institute of Construction Technology, Goyang-Si, Gyeonggi-Do 411-712, Korea
(e-mail: yschoi51@kict.re.kr)

** 한국건설기술연구원 수자원연구실 책임연구원

Research Fellow, Water Resources Research Div., Korea Institute of Construction Technology, Goyang-Si, Gyeonggi-Do 411-712, Korea

*** 인하대학교 사회기반시스템공학부 교수

Prof., Dept. of Civil Engineering, Inha Univ., Incheon 402-751, Korea

1. 서론

여름철에 강수량이 집중되어 있는 우리나라의 경우 댐의 저류량과 방류량은 홍수조절에 매우 중요한 역할을 하고 있다. 특히 집중호우 기간에서의 댐 방류량과 강우에 의해서 발생하는 직접유출량은 댐 하류 유역의 홍수발생 여부에 직접적인 영향을 미치고 있다. 따라서 집중호우시에 댐 하류 지점의 유출량을 모의하기 위해서는 강우와 댐 방류량이 유출에 미치는 영향을 함께 모의할 수 있어야 한다.

댐 하류 하천의 수위변화를 모의하기 위해서는 댐 방류량과 조위자료 및 댐 하류 구간에서 유입되는 지류에서의 실측유량을 경계조건으로 하여 수리학적 홍수추적을 하거나(한건연 등, 2005), 지류에서의 실측유량이 없을 경우 유역유출 모의를 통해서 지류유입량을 산정하고 이를 경계조건으로 적용 하여야 한다(이을래 등, 2006; 이을래 등, 2008; 지병걸 등, 2005). 그러나 이와 같은 수리학적 홍수추적을 통해서 하도에서의 수위를 모의하기 위해서는 하도의 지형자료 및 경계조건의 구축과 입력에 많은 노력이 필요하게 된다.

하도 전체 구간에 대한 수위변동의 모의가 아닌 특정 지점의 유출량을 모의하기 위해서는 유역유출모형을 적용할 수 있다. 국내에서 적용되고 있는 홍수에보 모형의 경우 유역유출과 하도유출을 모의하고 있으며, 댐 하류에 위치한 예보지점의 유량은 댐 방류량을 상류 유입조건으로 하는 하도홍수추적과 댐 하류 유역에 대한 유역유출모의를 소유역별로 수행한 결과를 적용하게 된다(건설교통부, 2000; 건설교통부, 2005a). 또한 HEC-HMS 모형에서는 하도상에 있는 저수지에서의 유출을 반영한 유출모의를 수행할 수 있다. 그러나 이러한 총괄형 유역유출모형에서는 댐 하류 하도구간에서의 횡방향 유입량을 계산하기 위해서 많은 소유역 분할 및 각 소유역에 대한 매개변수 보정과 유출량 추정 과정이 선행되어야 한다.

이와 같은 기존의 유역유출모형의 복잡한 유역 모형화 과정을 거치지 않고 댐 방류량과 지류에서의 유입을 종합적으로 모의하기 위해서는 물리적 기반의 분포형 모형을 적용할 수 있다. 물리적 기반의 분포형 모형에서는 총괄형 모형에서 필요한 소유역 분할 및 각 소유역별 수문학적 매개변수에 대한 보정과정 필요하지 않으며, 특정 지점에 대해 최적화된 매개변수를 이용하여 지표면 유출 및 하도유출을 종합적으로 모의할 수 있다. Takahiro *et al.* (2005)은 댐 운영을 고려한 분포형 강우-유출 모형의 개발과 이를 이용해서 댐 운영이 홍수에 미치는 영향을 평가한 바 있으며, 댐이 포함된

유역에 대해서 실시간 분포형 유출모의 시스템을 구축한 바 있다(Yasuto *et al.*, 2007). 또한 분포형 강우-유출 모형인 VfloTM(Vieux, 2004)에서는 댐 운영과 유역 유출을 동시에 모의할 수 있는 것으로 알려져 있으나, 국내에서는 아직 이에 대한 적용성 및 효율성에 대한 평가가 충분히 이루어지지 않은 상태이다.

본 연구에서는 물리적 기반의 분포형 강우-유출 모형인 GRM (Grid based Rainfall-runoff Model)(최윤석 등, 2008)을 이용하여 댐 하류 지점에 대해서 댐 방류량과 강우에 의한 유출량을 종합적으로 모의하고, 모형의 적용성을 평가하고자 한다. GRM 모형에서는 댐 및 저수지의 운영을 고려하여 유역유출모의를 수행할 수 있을 뿐만 아니라, 특정 지점에 대해서 미리 결정되어 있는 유출수문곡선을 이용하여 상류부와 하류부를 분리해서 모의하거나, 상류부를 제외하고 유출모의를 수행할 수 있다. 본 연구에서는 모의결과의 검증 지점으로 여주 수위관측소를 선정하였으며, 따라서 여주 수위관측소와 이에 직접적인 영향을 미치는 횡성댐과 충주조정지댐 사이의 유역을 모의 대상 유역으로 설정하였다. 모의 대상 유역에 대한 과거의 강우-유출 사상 및 이와 동일한 기간에 대한 횡성댐과 충주조정지댐의 방류량을 이용하여 유출모의를 수행하였으며, 여주 수위관측소 지점에 대해서 모의결과를 검증함으로써 모형의 적용성을 평가하고자 한다.

2. GRM 모형의 개요

GRM 모형은 유역에서의 단기간의 강우-유출 현상을 모의하는 것을 주요 목적으로 하고 있으며, 이를 위해서 지표면 유출, 하도 유출, 침투, 지표하 유출을 모의하고 있다. 또한 본 연구에서 주로 다루게 될 Flow control 모듈에서는 유역에서의 저수지 효과, 댐 운영에 의한 유출량 조절 및 유역내 임의 지점에서의 유량의 추가 혹은 배제 등을 모의할 수 있다. GRM 모형은 격자기반의 완전 분포형 모형으로, 유역의 평균강우 뿐만 아니라, 지점강우의 공간보간 및 레이더 등을 통해서 획득한 격자 형태의 분포형 강우자료를 이용할 수 있으며(박정술 등, 2009a; 박정술 등, 2009b), 사용되는 모든 지형자료는 그리드 레이어를 이용한다.

2.1 지배방정식

GRM에서는 지표흐름의 모의를 위해서 1차원 운동과 방정식을 이용하고 있으며, 지표면 흐름과 하도 흐름의 연속방정식은 각각 Eq. (1) and (2)와 같다. 또한 운동량 방정식은 Eq. (3)을 적용하고, Eq. (4)의 Manning의 유

속공식에서 마찰경사 대신에 지면의 바닥경사를 적용함으로써 유속을 계산하게 된다. GRM에서는 유한체적법을 이용해서 지배방정식을 이산화하고 있으며, 격자로 모형화된 유역내 각 검사체적 요소에 대해서 유출을 모의한다(최윤석 등, 2008).

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = Pr - IFr \quad (1)$$

$$\frac{\partial A_x}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = Prdy + q_L \quad (2)$$

$$S_0 = S_f \quad (3)$$

$$u = \frac{R^{2/3} S_0^{1/2}}{n} \quad (4)$$

여기서 q : 단위폭당 유량(= uh), h : 수심, u : 유속, A_x : x 방향에 직각인 단면적, Q : 유량, q_L : 측방유입량, S_0 : 바닥 경사, S_f : 마찰경사, Pr : 강우강도, IFr : 침투율, t : 시간, n : 조도계수, R : 동수반경

2.2 Flow control 모듈

GRM에서는 강우에 의한 직접유출과 같은 자연유하의 모의와 함께 Flow control 모듈을 이용해서 유역내에서 발생하는 유량 조건의 변동을 반영할 수 있다. Flow control 모듈을 이용해서 모의할 수 있는 유량 조건은 “Reservoir outflow”, “Inlet”, “Reservoir operation”, “Sink flow”, “Source flow” 이며, GRM에서 각 조건의 모의를 위한 흐름도는 Fig. 1과 같다.

“Reservoir outflow”는 저수지로 지정된 격자를 기준으로 유역을 분리해서 유출모의를 수행하며, 저수지 운영을 고려하지 않는다. 저수지 상류에서의 유출모의 결과는 저수지 하류의 유출모의에 영향을 미치지 않고, 저수지의 하류는 사용자에게 의해서 입력된 저수지 유출수문곡선의 영향을 받는다. “Inlet”은 Inlet으로 지정된 격자의 상류는 유출모의를 수행하지 않는다. 이 또한 저수지 운영을 고려하지 않으며, 사용자에게 의해서 입력된 Inlet 격자에서의 유출수문곡선을 이용해서 Inlet의 하류 유역을 모의한다.

“Reservoir operation”은 저수지로 지정된 격자에 대해서 ROM(Reservoir Operation Method)을 적용하며, 초기저류량, 최대저류량, 최대저류율, 일정방류량, 수위-저류량 및 수위-방류량 등의 조건을 부여할 수 있다. 저수지에서의 유출량은 주어진 ROM에 의해서 자동으

로 모의되며, 유역에서의 저수지 및 ROM의 영향을 동적으로 반영할 수 있다. “Sink flow”와 “Source flow”는 임의 격자에 대해서 모의된 직접유출량의 일부가 배제 혹은 추가되는 조건이 있을 경우, 이에 대한 수문곡선을 반영하여 유출모의를 수행하며, “Reservoir operation” 기능을 동시에 적용할 수 있다.

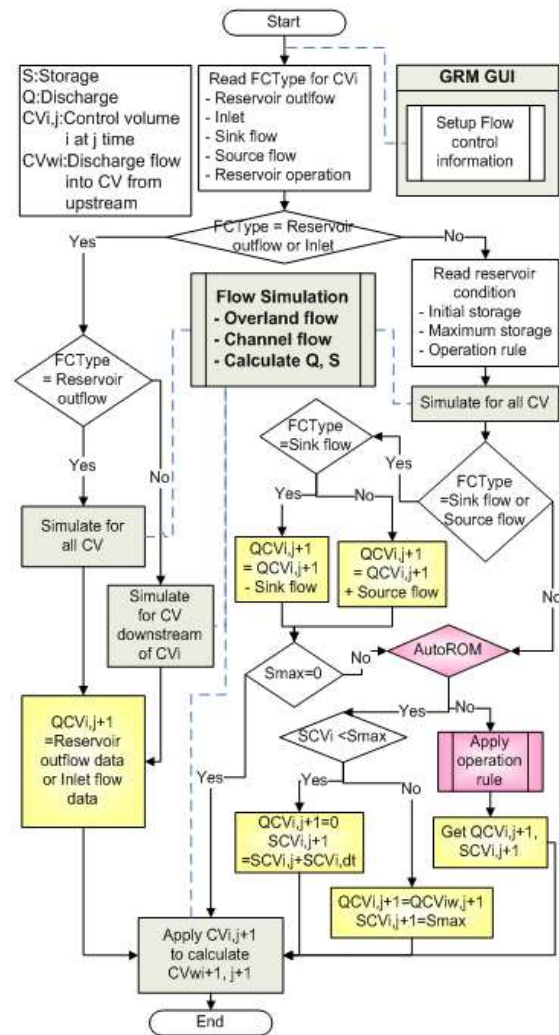


Fig. 1. Flow Control Module Process

이와 같은 Flow control 모듈은 하도 흐름특성 및 지표면 흐름특성을 가지는 격자에 대해서 모두 적용할 수 있으며, 각각의 기능을 복합적으로 적용함으로써 강우에 의한 직접유출량과 함께 강우기간에 발생하는 다양한 유량조건의 변동을 종합적으로 반영하여 유출모의를 수행할 수 있다.

본 연구에서는 강우기간에 발생된 충주조정지댐과 횡성댐의 방류량이 강우에 의해 발생하는 유출량과 함께 댐 하류 지점에 미치는 영향을 모의하는 것을 주요 내용으로 하고 있다. 따라서 Inlet 기능만을 이용하였으며, 횡성댐과 충주조정지댐의 방류량을 Inlet 격

자에서의 유출 수문곡선으로 입력하여 유출모의를 수행하였다.

본 연구에서와 같이 대유역의 하류에 위치한 일부 유역에 대해서만 유출모의를 수행하고자 할 경우에는 Inlet 기능을 이용할 수 있다. 이 경우에는 Inlet으로 지정된 지점의 상류 유역에 대한 모형의 입력자료를 구축하지 않아도 되는 장점이 있으며, 이에 따라서 모의 대상 영역이 작아짐으로써 GRM 모형에서의 격자의 개수를 줄일 수 있게 된다. 따라서 대유역에 대해서 유출모의를 수행하고자 할 경우에도 유역전체를 모의할 경우에 비해서 격자의 크기를 작게 구성할 수 있으며, 이에 따라서 격자크기가 커짐에 따라서 발생할 수 있는 공간 정보의 오차를 줄일 수 있게 된다.

2.3 모형의 운용

GRM은 GIS와 통합된 모형으로 HyGIS (Hydro Geographic Information System)(한국건설기술연구원, 2007) 시스템 환경에서 구동할 수 있으며, 이를 HyGIS-GRM이라고 한다(Choi and Kim, 2008). HyGIS-GRM은 HyGIS의 구동결과로 생성되는 지형공간 그리드 레이어를 포맷변환 없이 직접 이용하고 있으며, 레이더 혹은 수치예보자료로부터 생성된 분포형 강우그리드 레이어 및 GRMTools를 이용해서 지점강우를 공간보간하여 생성된 분포형 강우그리드 레이어를 이용할 수 있다. Fig. 2는 HyGIS-GRM의 구동절차를 나타낸 것이고, Fig. 3은 HyGIS-GRM의 구동화면 중 Flow control 정보를 설정하는 화면을 나타낸 것이다.

3. 대상 유역의 설정 및 공간자료 구축

3.1 대상 유역의 설정

본 연구에서는 강우기간 중에 댐에서의 방류가 있을

경우 댐 하류 지점에서의 유출량을 모의하고자 하며, 대상 유역은 남한강의 여주 수위관측소 상류로 선정하였다. 여주 수위관측소 상류에는 횡성댐, 충주댐, 충주조정지댐, 괴산댐이 있으며, 이중 여주 수위관측소의 유량에 직접적인 영향을 미치는 것은 횡성댐과 충주조정지댐의 방류량이다. 따라서 본 연구에서는 여주 수위관측소와 충주조정지댐 및 횡성댐 사이의 영역을 대상으로 유출모의를 수행하였다. 여주 수위관측소는 경기도 여주군의 여주대교에 위치하고 있으며, 상류로 충주조정지댐까지의 하천상 거리는 약 49 km이고 횡성댐까지의 하천상 거리는 약 97 km 이다.

본 연구에서는 충주조정지댐과 횡성댐이 위치한 격자를 Inlet으로 설정하였으므로, 각 댐의 상류 유역은 유출모의에 관여하지 않게 된다. 따라서 실제 여주 유역은 11,104 km²이나 본 연구에서는 여주 수위관측소와 충주조정지댐, 횡성댐 사이의 약 2,536 km²의 유역을 포함하는 사각형 영역에 대해서 지형자료 및 분포형 강우 그리드 레이어를 생성하고, 이를 이용해서 유출모의를 수행하였다. Fig. 4는 본 연구에서 적용한 여주 유역의 모의대상 영역을 나타낸 것이다.

3.2 공간자료 구축

GRM 모형은 DEM으로부터 생성된 그리드 형태의 지형정보를 입력자료로 이용한다. 본 연구에서는 여주 유역의 1/25,000 수치지도의 고도 자료를 기반으로 생성한 500 m × 500 m 크기의 DEM을 이용하였다. 이와 같이 생성된 DEM을 HyGIS의 DEM 분석기능을 이용해서 DEM에 있는 sink와 flat area와 같은 오류를 보정한 후, 흐름방향, 흐름누적수, 하천망, 경사, 유역영역 레이어를 500 m × 500 m 크기의 격자로 생성하였다.

침투과정을 모의하기 위한 토양 자료는 여주 유역의

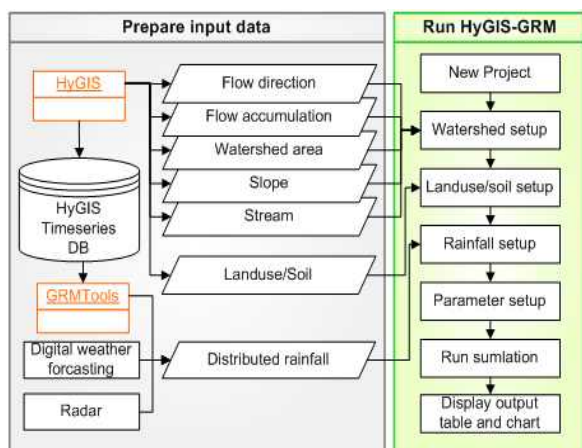


Fig. 2. HyGIS-GRM Process

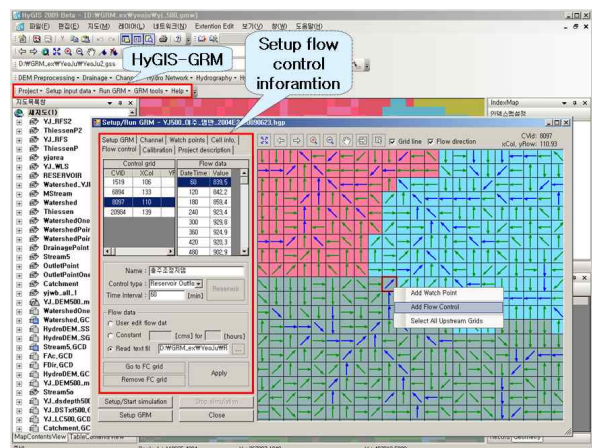


Fig. 3. Setup Flow Control Information

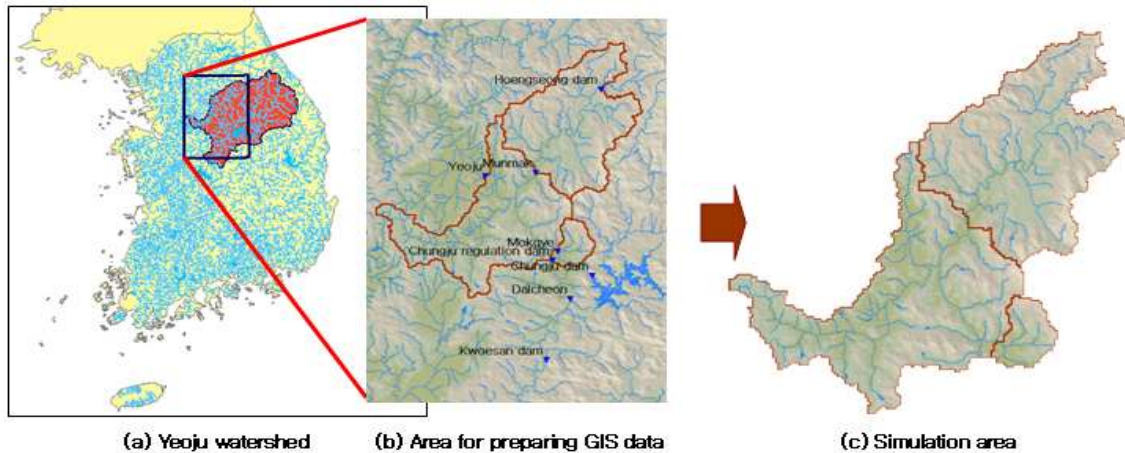


Fig. 4. Study Area

정밀토양도를 이용하여 토성 레이어와 유효토심 레이어를 생성하였다. 이때 토성별 Green-Ampt 매개변수는 Chow *et al.* (1988)에 의해서 제안된 값을 적용하였으며, 유효토심 레이어의 깊이 값은 한국토양총설(농업기술연구소, 1992)을 참고하여 설정하였다. 또한 토지피복도는 환경부의 토지피복도 대분류를 이용하였다. 본 연구에서 적용한 GRM 모형의 입력 공간자료를 정리하면 Table 1과 같다.

4. 수문자료 선정

본 연구에서는 여주 유역에 영향을 미치는 19개 강우관측소(간현, 노천, 목계, 문막, 부론, 삼죽, 생극, 서곡, 설성, 양성, 양동, 여주, 우항, 음성, 주덕, 주암, 충주, 횡성, 홍양)와 여주 수위관측소 및 횡성댐과 충주조성지댐의 방류량 자료를 이용하여 GRM에 적용할 수문사상을 선정하였다.

수문사상은 한강홍수통제소(<http://www.hrfco.go.kr/>)의 실시간수문자료에서 획득하였으며, 2004년~2006년 사이에 발생한 유출 중 첨두유출량이 2000 m³/s를 초과

하는 사상 중 강우-유출 사상의 추출이 명확한 것으로 9개를 선정하였다. 또한 각 강우-유출 사상의 모의기간

Table 1. Geographical Input Data of GRM

Input Data	Description
DEM	Created from 1/25,000 digital map and preprocessed by HyGIS
Flow Direction	From HyGIS using D8- method (O'Callaghan and Mark, 1984)
Flow Accumulation	From HyGIS
Stream	From HyGIS applying flow accumulation 5
Slope	From HyGIS using D-8 method
Green-Ampt Soil Texture	Classified by National institute of agricultural science and technology (1992) by using detailed soil map
Soil Depth	
Land Cover	Classified into 7 classes by using land cover map from Ministry of environment

Table 2. Hydrologic Events

Event Number	Rainfall Period	Total Rainfall [mm]	Time Interval [min]	Peak Discharge [m ³ /s]
Event 1	2004/06/19/00:00 - 06/22/23:30	223.86	30	5,955
Event 2	2004/07/11/17:00 - 07/14/19:00	108.17	30	2,447
Event 3	2004/07/14/21:00 - 07/17/15:30	189.92	30	6,628
Event 4	2004/08/16/17:00 - 08/20/09:00	204.24	30	2,652
Event 5	2005/07/01/00:00 - 07/04/11:00	142.18	30	3,359
Event 6	2005/07/11/02:00 - 07/12/12:00	76.26	30	3,734
Event 7	2005/08/10/09:00 - 08/12/12:00	116.22	30	2,409
Event 8	2006/07/14/14:00 - 07/19/06:30	360.94	30	12,199
Event 9	2006/07/25/23:00 - 07/29/17:30	267.34	30	7,407

에 해당하는 황성댐과 충주조정지댐의 방류량 자료를 WAMIS (<http://www.wamis.go.kr/>)에서 획득하여 각 지점에서의 Inlet flow로 적용하였다. 본 연구에서 적용한 수문사상은 Table 2와 같다.

GRM에서는 그리드 형태의 분포형 강우 레이어를 입력자료로 적용할 수 있다. 본 연구에서는 선정된 19개 강우관측소와 여주 지역의 유역경계 폴리곤 영역을 이용해서 티센망을 생성하였으며, 각 티센 폴리곤 영역에 해당하는 강우 관측소의 강우량을 해당 영역에서 발생하는 강우량으로 하여 강우 그리드 레이어 시계열 자료를 생성하고 이를 모형의 입력자료로 적용하였다. Fig. 5는 강우 그리드 레이어를 생성하기 위해 적용한 티센 폴리곤 영역을 나타낸 것이다.

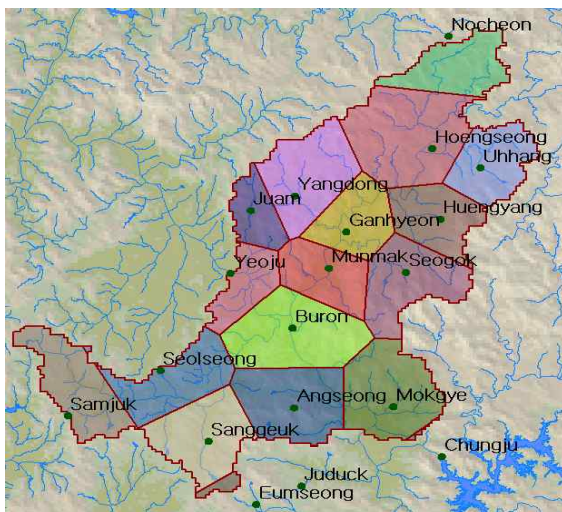


Fig. 5. Thiessen Polygon Area for Making Rainfall Grid Layers

5. 모형의 적용 및 결과

5.1 매개변수 보정

Table 2에서의 강우사상 중 강우기간이 비교적 짧고, 강우의 시간분포 경향이 비교적 단순한 “Event 6”을 이용해서 매개변수의 보정을 수행하였다. GRM 모형은 레이어로 입력되는 지형특성 외에 토양과 토지피복 및 하도에 대한 매개변수를 필요로 하고 있으며, 이에 대한 설정 방법은 최윤석 등(2008) 및 한국건설기술연구원 등(2009)을 참고할 수 있다.

토지피복의 특성에 따라서 설정되는 지표면 조도계수와 불투수율 및 토양 특성에 따라서 설정되는 Green-Ampt 침투 매개변수와 유효토심과 같은 물리적 매개변수는 GRM에서 제안하고 있는 기본 값을 적용할 수 있다. 하도의 폭은 건설교통부(2005b) 및 오경두(2009)

에서 제안하고 있는 중소하천에서의 계획하폭 공식이 적용된 하폭 자동산정 기능을 이용하거나, 사용자에게 의해서 지정된 최대하폭을 이용하여 흐름누적수를 기준으로 보간된 하폭을 이용할 수 있다. 본 연구에서는 국토해양부(2008)에서 제안하고 있는 여주 수위관측소 지점의 하폭인 502 m를 최대하폭으로 입력하고, 흐름누적수를 기준으로 보간된 값을 하도 격자에서의 하폭으로 적용하였다.

사용자에게 의한 주요 보정대상 매개변수로는 하도의 조도계수와 선행강우에 따라서 변화하는 토양의 초기포화도이다. GRM에서는 하도의 조도계수는 Chow (1959)와 Chaudhry (1993)에 의해서 제안된 하도에서의 조도계수 범위인 0.04~0.05의 평균값인 0.045를 기본 값으로 제안하고 있으며, 초기포화도는 GRM 모형이 홍수시를 주요 모의 대상으로 하고 있으므로 1을 기본 값으로 설정하고 있다.

본 연구에서는 “Event 6”에 대해서 매개변수를 보정하지 않고 모의한 후 그 결과를 실측 수문곡선과 비교함으로써 일차적으로 매개변수를 보정하였다. 또한 이와 같이 “Event 6”을 이용해서 보정된 매개변수 중 강우조건에 따라서 변화하는 초기포화도를 제외한 모든 매개변수를 그대로 다른 8개의 수문사상에 동일하게 적용하고, 그 결과를 실측 수문곡선과 비교함으로써 매개변수 보정의 타당성 및 모형의 적용성을 평가하였다.

“Event 6”에 대해서 매개변수를 보정하지 않고 모의한 결과는 Fig. 6과 같다. Fig. 6에서 모의결과는 실측 수문곡선의 침투시간은 유사하게 모의하고 있으나, 수문곡선의 상승부가 전체적으로 크게 모의되는 것으로 나타났다. 따라서 총유출량과 수문곡선 상승부의 유출량에 직접적으로 영향을 미치는 초기포화도를 0.2로 낮게 보정하였으며, 초기포화도만을 보정한 모의결과는 Fig. 7과 같다.

Fig. 7에서 모의결과는 실측 수문곡선의 침투유량과 침투유량의 발생시간을 적절히 모의하고 있으며, “Event 6”에 대해서 매개변수 보정전과 매개변수 보정 후에 대한 수문곡선의 특성은 Table 3과 같다. Table 3에서 매개변수의 보정과정을 거친 모의결과와 관측 유량을 비교한 결과 총유출량과 침투유량에서 각각 4.5 %와 7.8 %의 상대오차를 보이고 있으며, 침투시간은 2.3 %의 상대오차를 보이고 있다. 이에 따라서 보정된 모의결과는 관측유량을 잘 모의하고 있는 것으로 나타났으며, “Event 6”을 제외한 나머지 8개 강우사상에 대해서도 초기포화도만을 추정하여 유출모의를 수행하였다.

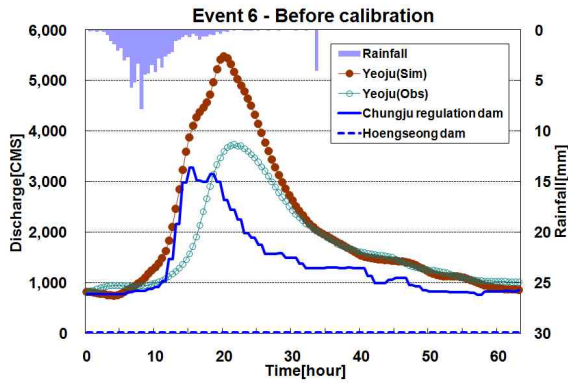


Fig. 6. Before Calibration - Event 6

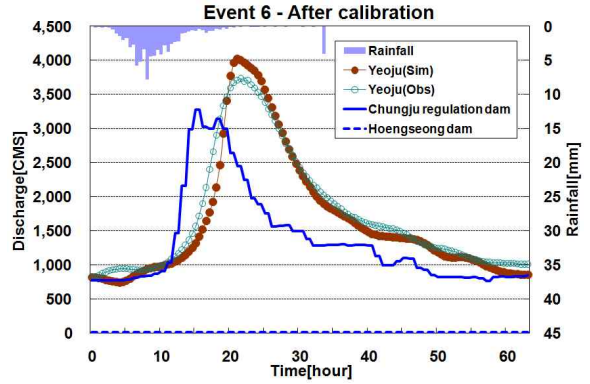


Fig. 7. After Calibration - Event 6

Table 3. Simulation Results for Parameter Calibration(Event 6)

Calibration	Sim. Duration [hour]	Initial Saturation	Total Discharge			Peak Discharge			Peak Time		
			Obs. [m ³]	Sim. [m ³]	Rel. Error [%]	Obs. [m ³ /s]	Sim. [m ³ /s]	Rel. Error [%]	Obs. [hr]	Sim. [hr]	Rel. Error [%]
Before Calibration	64	1.0	218,452	264,500	21.1	3,734	5,482	46.8	21.5	20.0	7.0
After Calibration	64	0.2	218,452	208,638	4.5	3,734	4,025	7.8	21.5	21.0	2.3

5.2 모의결과

Table 2에서의 9개 강우사상 중 “Event 6”을 이용하여 수행한 매개변수 보정결과에 의해서 초기포화도를 제외한 모든 매개변수에 대해서 GRM 모형에서 제안하고 있는 기본 값을 이용하여 나머지 8개 강우사상에 대한 유출모의를 수행하였다. 이때 초기함수율은 수문사상별로 달라지는 매개변수 이므로, 각 사상별로 다시 최적 값을 도출하는 과정이 필요하다.

Figs. 8~15 and Table 4는 “Event 6”을 제외한 나머지 8개 강우사상에 대한 모의결과를 나타낸 것이다. Figs. 8~15는 여주 수위관측소에서의 관측 수문곡선과 모의 수문곡선 및 충주조정지댐과 횡성댐에서의 방류량을 나타낸 것으로, 모의 수문곡선은 강우와 댐의 방류에 적절히 반응하는 것으로 나타났다. 홍수기에서의 충주조정지댐의 방류량은 매우 큰 값을 보이고 있으며, 이에 따라서 여주 수위관측소의 수문곡선의 형태에 직접적인 영향을 미치고 있는 것으로 나타났다. 그러나 횡성댐의 방류량은 상대적으로 작은 값을 나타내고 있으며, 이는 여주 수위관측소의 수문곡선의 형태에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 한편, “Event 8”의 경우에 있어서는 모의유량과 관측유량의 차이가 발생하는 10,000 m³/s 이상의 구간은 수심이 9 m가 넘는 구간으로 건설교통부(2006)에 제안된 수위-유량 관계곡선식에서 외삽 구간에 해당하며, 이로 인해 관측 수문

곡선이 충주조정지댐의 방류량 보다 작은 유량을 보이고 있는 것으로 판단된다. 또한 Table 4에서는 8개의 수문사상에 대한 모의결과를 관측값과 비교하였을 때 총유출량은 0.9 %~12.2 %, 첨두유출량은 0.1 %~23.3 %의 상대오차를 보이고 있으며, 첨두시간은 1.0 %~13.2 %의 상대오차를 나타냄으로써 관측 수문곡선을 잘 재현하고 있는 것으로 나타났다.

따라서 본 연구에서 적용한 수문사상에 대해서 GRM 모형을 적용하였을 때, 댐 방류와 강우에 대한 유출 응답이 적절한 것으로 나타났으며, 총유출량과 첨두유량 및 첨두유량의 발생시간 또한 매우 잘 재현하고 있는 것으로 판단된다.

5.3 홍수파의 도달시간

본 연구에서는 충주조정지댐과 횡성댐의 방류량을 하도 홍수추적시 상류측의 경계조건으로 적용하였으며, 이 때 최상류에 입력된 댐 방류량에 의한 홍수파가 여주 수위관측소에 도달하는 시간을 검토하고자 한다. 본 연구에서는 댐 방류의 홍수추적과 강우에 의한 유출량을 동시에 모의하고 있다. 그러므로 강우에 의한 유량 증가 요인이 없는 시간에서의 수문곡선의 상승은 댐 방류에 의한 것이라고 할 수 있다. 본 연구에서 적용한 9개의 수문사상의 유출모의 결과에 따르면, 횡성댐의 방류량은 충주조정지댐의 방류량에 비해 아주 작으며, 따

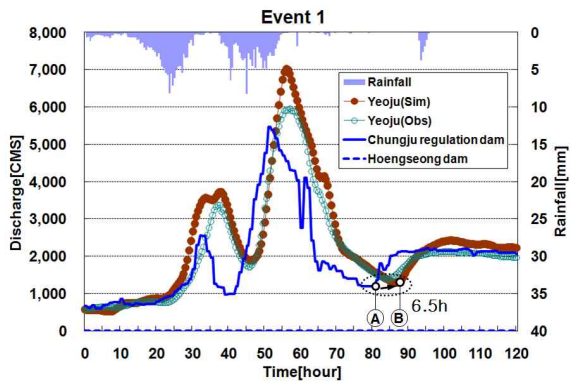


Fig. 8. Simulation Result - Event 1

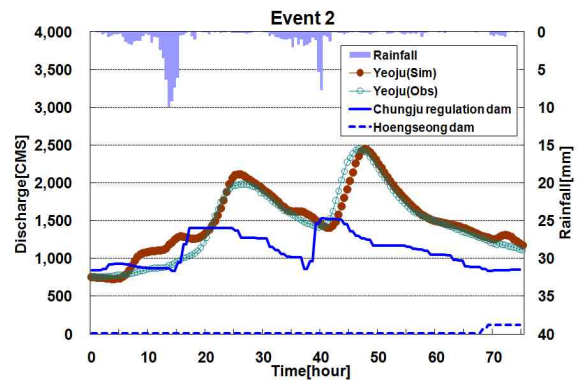


Fig. 9. Simulation Result - Event 2

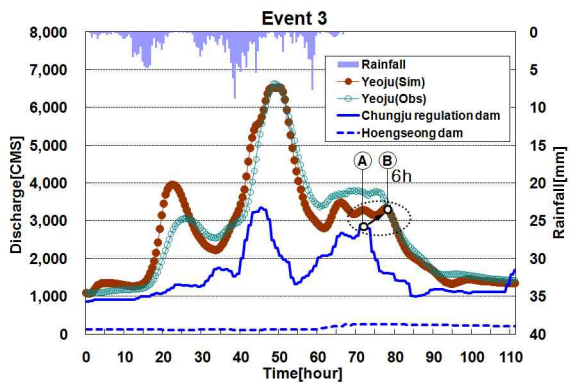


Fig. 10. Simulation Result - Event 3

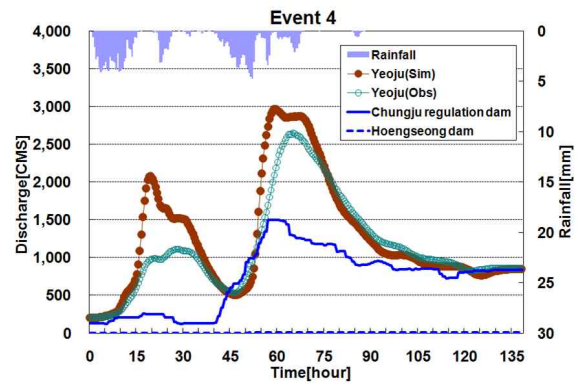


Fig. 11. Simulation Result - Event 4

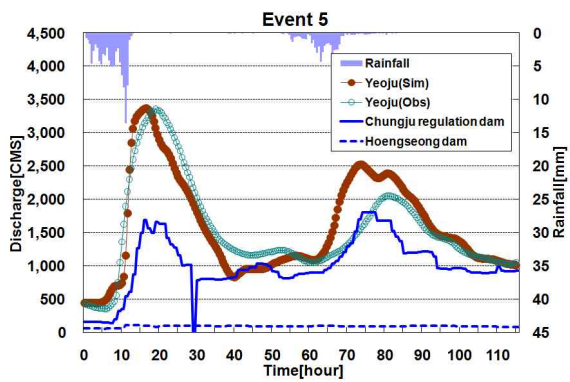


Fig. 12. Simulation Result - Event 5

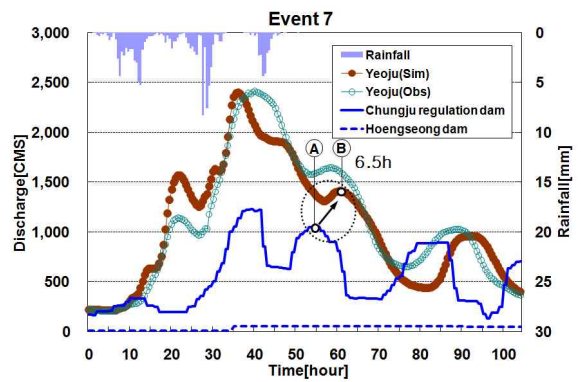


Fig. 13. Simulation Result - Event 7

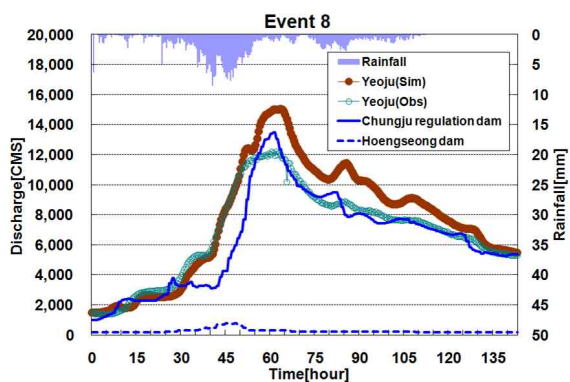


Fig. 14. Simulation Result - Event 8

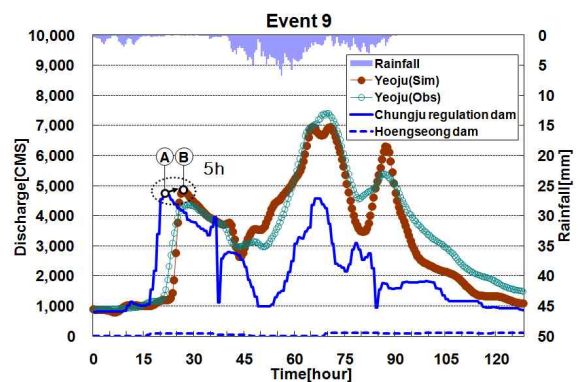


Fig. 15. Simulation Result - Event 9

Table 4. Simulation Results

Event Number	Sim. Duration [hour]	Initial Saturation	Total Discharge			Peak Discharge			Peak Time		
			Obs. [m ³]	Sim. [m ³]	Rel. Error [%]	Obs. [m ³ /s]	Sim. [m ³ /s]	Rel. Error [%]	Obs. [hr]	Sim. [hr]	Rel. Error [%]
Event 1	120	0.00	518,727	573,913	10.6	5,955	7,023	17.9	57.0	56.0	1.8
Event 2	75	0.30	219,756	227,823	3.7	2,447	2,445	0.1	47.0	47.5	1.1
Event 3	111	0.93	611,697	606,048	0.9	6,628	6,518	1.7	48.5	48.0	1.0
Event 4	138	0.00	316,178	349,529	10.5	2,652	2,960	11.6	65.5	59.0	9.9
Event 5	115	0.75	354,693	365,395	3.0	3,359	3,363	1.0	19.0	16.5	13.2
Event 7	104	0.68	227,841	223,575	1.9	2,410	2,395	0.6	40.5	36.0	11.1
Event 8	143	0.35	1,959,373	2,197,998	12.2	12,176	15,012	23.3	60.5	61.5	1.7
Event 9	128	0.55	880,981	819,813	6.9	7,407	6,952	6.1	69.5	70.5	1.4

라서 여주 수위관측소의 수문곡선을 확연히 상승시키는 유량은 강우 및 충주조정지댐의 방류에 의해서 발생되고 있다. 따라서 홍수와 도달시간의 검토는 충주조정지댐에서 방류된 유량에 대해서 수행하였다.

한강홍수통제소(<http://www.hrfco.go.kr/>)에서는 한강 유역에서의 주요 지점간 도달시간을 명시하고 있으며, 여주 수위관측소와 충주댐 사이의 구간에서는 1,000 m³/s 이상의 유량에 대해서 유량별 도달시간을 제시하고 있다. 한강홍수통제소에 의하면 여주 수위관측소와 충주댐 사이의 하천상 거리는 약 61.7 km이다. 그런데 본 연구에서 적용한 여주 수위관측소와 충주조정지댐 사이의 거리는 약 49 km이며, 이는 충주댐까지의 거리의 약 79 %에 해당한다. 따라서 본 연구에서는 한강홍수통제소에서 제시하고 있는 충주댐과 여주 수위관측소간 홍수파의 도달시간의 79 %에 해당하는 값을 충주조정지댐과 여주 수위관측소 사이의 도달시간으로 설정하고, 유량별 홍수파의 도달시간을 검토하였다.

본 연구에서 적용된 9개의 수문사상 중 1,000 m³/s 이상의 충주조정지댐의 방류량에 의해서 무강우 기간에

수문곡선의 상승 현상을 보이는 사상은 “Event 1”, “Event 3”, “Event 7”, “Event 9”이며, 이를 대상으로 홍수파의 도달시간을 검토하고자 한다. Fig. 8, 10, 13 and 15에서 ㉠로 표시된 지점은 홍수와 도달시간을 검토하기 위한 유량의 충주조정지댐에서의 시점이며, ㉡로 표시된 지점은 충주조정지댐에서 시작된 유량이 여주 수위관측소에 도달한 것으로 판단되는 지점을 나타낸 것이다. 각 사상에 대해서 홍수파의 도달시간을 검토한 결과는 Table 5와 같다.

Table 5에서 각 사상에 대해서 기준으로 채택한 도달시간(T1)은 ㉠ 지점의 유량과 가장 가까운 유량에 대해서 한강홍수통제소에서 제시한 충주댐과 여주 수위관측소 사이의 도달시간이며, 각 도달시간의 79 %에 해당하는 시간(T2)을 충주조정지댐과 여주 수위관측소 사이의 도달시간으로 설정하였다. Table 5에서는 이와 같이 설정된 충주조정지댐과 여주 수위관측소 사이의 도달시간과 본 연구에서 모의된 도달시간의 상대오차가 최대 7.8 %이며, 따라서 한강홍수통제소에서 제시하고 있는 도달시간을 잘 재현하고 있는 것으로 나타났다.

Table 5. Travel Time of Flood Wave

Event Number	Discharge at Point ㉠ [m ³ /s]	T1	T2	T3	Rel. Error (T2 and T3) [%]
		Time from Chungju Dam (Han River Flood Control Office) [hr]	Time from Chungju Regulation Dam (T1×0.79) [hr]	Time from Chungju Regulation Dam(Simulated) [hr]	
Event 1	1187	8.33 (for 1,000 m ³ /s)	6.58	6.5	1.2
Event 3	2889	7.00 (for 3,000 m ³ /s)	5.53	6.0	7.8
Event 7	1048	8.33 (for 1,000 m ³ /s)	6.58	6.5	1.2
Event 9	4821	6.00 (for 5,000 m ³ /s)	4.74	5.0	5.2

6. 결 론

본 연구에서는 강우로 인해 발생하는 유출과 댐의 방류가 댐 하류 지점에 미치는 영향을 종합적으로 분석하기 위하여 횡성댐과 충주조정지댐의 방류에 직접적인 영향을 받는 여주 수위관측소 유역을 대상으로 물리적 기반의 분포형 강우-유출 모형인 GRM을 적용하였다. 유출모의 결과의 검증은 위해서 2004년~2006년에 발생된 9개의 수문사상을 추출하였으며, 유출모의 기간 동안의 횡성댐과 충주조정지댐의 방류량을 모형에 적용하였다.

댐의 방류량은 GRM 모형의 Flow control 모듈을 이용해서 유출모의에 적용하였으며, 횡성댐과 충주조정지댐이 위치한 격자를 Inlet으로 지정함으로써 모형입력을 위한 자료구축 영역과 모의 대상 영역을 여주 수위관측소와 횡성댐 그리고 충주조정지댐 사이의 유역으로 국한시켜 유출모의를 수행할 수 있었다.

GRM 모형의 적용을 위한 매개변수 보정은 초기포화도만을 대상으로 수행하였다. 초기포화도를 보정한 여주 유역의 9개 수문사상의 모의결과를 관측값과 비교하였을 때 총유출량은 0.9%~12.2%, 첨두유출량은 0.1%~23.3%의 상대오차를 보이고 있으며, 첨두시간은 1.0%~13.2%의 상대오차를 나타냄으로써 관측 수문곡선을 잘 재현하고 있는 것으로 나타났다. 이는 최소한의 매개변수의 보정만으로도 양호한 유출모의 결과를 얻을 수 있는 물리적 기반의 분포형 모형에서의 장점이 잘 나타난 결과라고 할 수 있다.

GRM 모형은 강우와 댐 방류가 댐 하류 지점의 유출에 미치는 영향을 잘 모의하는 것으로 나타났다. 상대적으로 유량이 작은 횡성댐의 방류량은 여주 수위관측소의 유량에 미치는 영향이 작았으며, 상대적으로 유량이 큰 충주조정지댐의 방류량은 여주 수위관측소의 유출 수문곡선에 직접적인 영향을 미치는 것으로 나타났다. 또한 강우 발생시의 유출 수문곡선은 댐 방류량과 강우에 의한 유출의 영향이 함께 모의되었으며, 강우가 발생하지 않은 기간에서는 댐 방류량만이 유출 수문곡선에 영향을 미치는 현상이 잘 모의되었다.

충주조정지댐의 방류량을 이용해서 홍수파의 도달시간을 검토하였다. 강우에 의한 유량 증가가 없는 시간 구간에 대해서 댐의 방류량이 여주 수위관측소에 도달하는 시간을 검토한 결과 한강홍수통제소에서 제시하고 있는 유량별 도달시간을 잘 재현하는 것으로 나타났다. 따라서 GRM 모형의 Flow control 모듈에서는 댐 방류량의 홍수추적을 적합하게 모의하는 것으로 나타났다.

본 연구에서는 댐 하류의 특정 지점의 유출량 모의

를 위해서 총괄모형을 적용해 오던 기존의 방법 대신에 물리적 기반의 분포형 모형인 GRM을 적용하였다. 이에 따라서 총괄모형 적용시 필요한 소유역 분할 및 각 소유역별 매개변수 보정의 과정이 필요하지 않으며, 모의 대상 지점에 대해 보정된 매개변수를 일괄적용하고 초기포화도의 추정만으로도 적합한 유출모의 결과를 얻을 수 있었다.

GRM 모형은 강우와 댐 방류가 댐 하류 지점에 미치는 영향을 종합적으로 모의할 때 실측 수문곡선을 잘 재현하였을 뿐만 아니라, 댐이 포함 된 대유역에 대해서도 관심 영역을 모의하기 위한 다양한 기능을 제공함으로써 댐 하류지점의 유출모의에 효과적으로 적용될 수 있는 것으로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발 사업단(과제번호:1-2-3)과 국토해양부 첨단도시3기술평가사업-지능형국토정보기술혁신 사업과제(과제번호:07국토정보C03)의 연구비지원에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- 건설교통부 (2000). 통합 홍수예경보시스템 개발 보고서. 건설교통부 한강홍수통제소, pp. 3.3-3.83.
- 건설교통부 (2005a). **주요지천 홍수예보프로그램 개선**. 건설교통부 한강홍수통제소, pp. 145-254.
- 건설교통부 (2005b). 하천설계기준·해설, pp. 262-265.
- 건설교통부 (2006). **한국수문조사연보(유량편)**.
- 국토해양부 (2008). 2007년도 유량조사 보고서 - III.한강 유량측정, pp. 61-65.
- 농업기술연구소 (1992). **중보 한국토양총설**, 토양조사 자료 13, 농촌진흥청, pp. 283-290.
- 박정술, 김경탁, 최윤석 (2009a). “레이더 강우와 GRM을 이용한 임진강 유역의 홍수 유출모의.” **2009년 한국수자원학회 학술발표회 논문집**, 한국수자원학회, pp. 1047-1051.
- 박정술, 최윤석, 김경탁, 이승기 (2009b). “기상레이더와 분포형 수문모형을 이용한 내린천 유역의 강우-유출 분석.” **2009년 대한원격탐사학회 춘계학술대회 논문집**, 대한원격탐사학회, pp. 291-295.
- 오경두 (2009). “분포형 모형 VfloTM에 의한 수문해석.” **제20회 수공학 워킹 교재**, 한국수자원학회, pp. 109-113.
- 이올래, 신철균, 김상호 (2006). “댐방류량에 따른 낙동

강수계 수리학적 흐름특성 분석.” **2006년 한국수자원학회 학술발표회 논문집**, 한국수자원학회, pp. 1701-1705.

이을래, 신철균, 박진혁, 고덕구 (2008). “댐방류량과 연계한 섬진강 수계 하도추적모형 구축.” **2008년 한국수자원학회 학술발표회 논문집**, 한국수자원학회, pp. 1619-1623.

지병걸, 노정환, 전경수, 이재형 (2005). “홍수시 영산강 수계 댐 군의 연계운영에 관한 연구.” **2005년 한국수자원학회 학술발표회 논문집**, 한국수자원학회, pp. 1466-1470.

최윤석, 김경탁, 이진희 (2008). “유한체적법을 이용한 격자기반의 분포형 강우-유출 모형 개발.” **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제41권, 제9호, pp. 895-905.

한건연, 최규현, 김원, 김동현 (2005). “한강수계에서의 댐의 영향을 고려한 홍수추적.” **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제38권, 제9호, pp. 747-760.

한국건설기술연구원 (2007). **HyGIS 개발**, 과학기술부.

한국건설기술연구원, (주)지오메니아, (주)로커스솔루션 (2009). **HyGIS Tutorial - 제5·6회 HyGIS Workshop 실습**, pp. 184-194.

Chaudhry, M.H. (1993). *Open-channel Flow*. Prentice-Hall, pp. 82-86.

Choi, Y.S. and Kim, K.T. (2008). “Introduction to grid based distributed rainfall-runoff model with HyGIS frame.” *Papers and Proceedings of the Geographic Information Systems Association*, Tokyo, Japan, Vol. 17, pp. 217-220.

Chow, V.T. (1959). *Open-channel hydraulics*. McGraw-Hill, pp. 101-123.

Chow, V.T., Maidment, D.R., and Mays, L.W. (1988). *Applied hydrology*. McGraw-Hill, pp. 110-147.

O’Callaghan, J.F. and Mark D.M. (1984). “The extraction of drainage networks from digital elevation data.” *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, Vol. 28, pp. 324-344.

Takahiro Sayama, Yasuto Tachikawa, Kaoru Takara, and Yutaka Ichikawa (2005). “Development of a distributed rainfall-runoff prediction system and assessment of the flood control ability of dams.” *土木學會論文集*, No. 803, pp. 13 - 27.

Vieux, B.E.(2004). *Distributed hydrologic modeling using GIS*. Kluwer Academic Publishers.

Yasuto Tachikawa, Takahiro Sayama, Kaoru Takara, Hideki Matsuura, Tomoya Yamazaki, Akihiko Yamaji, and Yuri Michihiro (2007). “Development of a real-time runoff forecasting system using a physically-based distributed hydrologic model and its application to Yodo River basin.” *Journal of Japan Society for Natural Disaster Science*, 26-2, pp. 189 - 201.

<http://www.hrfco.go.kr/>

<http://www.wamis.go.kr/>

논문번호: 09-075	접수: 2009.06.29
수정일자: 2009.07.16/07.17	심사완료: 2009.07.17