

기상레이더와 분포형 모형을 이용한 실시간 유출해석 시스템 개발 및 평가

최 윤 석* / 김 경 탁** / 김 주 훈***

Development and Evaluation of a Real Time Runoff Modelling System using Weather Radar and Distributed Model

Yun seok Choi** / Kyung tak Kim** / Joo hun Kim***

요약 : 격자 기반의 물리적 분포형 모형은 유역의 물리적 매개변수와 격자 형식의 공간 및 수문자료를 이용해서 유출해석을 수행한다. 본 연구에서는 격자 기반의 물리적 분포형 강우-유출 모형인 GRM(Grid based Rainfall-runoff Model)의 실시간 유출해석 모듈인 GRM RT(Real Time)를 이용해서 실시간 유출해석 시스템을 개발하였다. 실시간으로 수신되는 기상레이더 자료를 기상청의 실시간 AWS 자료를 이용하여 보정한 후 유출해석에 적용하며, 수위관측소 자료로부터 생성되는 유량자료를 이용해서 유출모형을 실시간 보정한다. 본 연구에서는 실시간 유출해석 시스템 구축을 위해서 필요한 데이터베이스를 설계 및 구현하였으며, 분포형 모형과 레이더 자료를 이용한 실시간 유출해석 절차를 정립하였다. 또한 개발된 시스템의 성능을 평가하고 실시간 모형보정에 대한 적용성을 평가하였다. 소양강댐 상류에 위치한 내린천 수위관측소 유역을 대상으로 실시간 유출해석 시스템을 적용하고 그 결과를 평가하였다.

핵심용어 : 실시간 유출해석, 분포형 모형, 레이더, GRM RT

Abstract : A grid based physically distributed model analyzes rainfall-runoff using physical parameters and grid-typed spatial and hydrological data. This study have developed a real time runoff modelling system using GRM RT(Grid based Rainfall-runoff Model Real Time) which is a real time flow analysis module in GRM, a grid based physically distributed rainfall-runoff model. Weather radar data received in real time are calibrated by using real time AWS from Korea Meteorological Administration(KMA), and they are applied to real time runoff modeling. And the runoff model is calibrated by using observed discharges from a water level gauge in real time. This study have designed and implemented the databases necessary to construct the real time runoff modelling system, and established the process of a real time runoff modelling. And the performances of the developed system have been evaluated. The system have been applied to Nerincheon watershed located in the upstream of Soyanggang Dam and the application results are evaluated.

Keywords : Real time runoff analysis, Distributed model, Radar, GRM RT

1. 서 론

실시간 강우-유출 해석을 위해서는 최소한의 매개변수 보정으로 현재 발생하고 있는 수문사상

을 해석 가능해야 하며, 이때 물리적 매개변수를 기반으로 하는 유출 모형은 보정대상 매개변수를 최소화 할 수 있는 장점이 있다. 또한 실시간으로 수신되는 레이더 강우자료는 격자형으로 제공되며,

+ Corresponding author : yschoi51@kict.re.kr

* 정희원 · 한국건설기술연구원 수자원연구실 수석연구원 · E-mail : yschoi51@kict.re.kr

** 정희원 · 한국건설기술연구원 수자원연구실 연구위원 · E-mail : ktkim1@kict.re.kr

*** 정희원 · 한국건설기술연구원 수자원연구실 수석연구원 · E-mail : jh-kim@kict.re.kr

격자 기반의 분포형 모형은 이러한 레이더 자료를 손쉽게 유출해석에 적용할 수 있다. 레이더 자료와 분포형 모형을 이용하여 실시간 유출해석 시스템을 구축하기 위해서는 레이더 자료와 강우관측소 강우량을 실시간으로 수신하고 레이더 자료를 보정할 수 있는 시스템이 필요하다. 또한 보정된 레이더 강우자료를 이용하여 실시간 유출해석을 할 수 있는 강우-유출 모델링 시스템이 필요하며, 유량 자료를 실시간으로 수신하고 이를 이용하여 유출해석 결과를 실시간으로 보정 및 검정할 수 있는 시스템이 필요하다.

홍수예보를 위한 분포형 모형의 개발은 강우의 공간분포를 알 수 있는 레이더 강우자료의 활용성이 증대되면서 활발히 진행되었으나(Garrote과 Bras, 1995; Bell과 Moore, 1998), 실시간 유출해석에 소요되는 시간문제에 인해서 기존의 홍수예보에는 집중형 모형이 주로 활용되었다. 그러나 컴퓨터 성능의 지속적 발전과 전산학적 기술의 발달로 인해서 실시간 홍수해석에서 분포형 모형의 적용성이 증대되었으며, 레이더 강우자료의 품질 향상과 공간 분포된 유역자료의 활용성이 증가되면서 레이더 자료와 분포형 모형을 이용한 실시간 유출해석의 타당성이 인식되었다(Jorgeson, 2005). 또한 레이더 자료를 활용한 실시간 유출해석을 위해서는 주로 1차원 운동과 모형을 이용한 분포형 강우-유출 모형이 적용되고 있다(Vieux 등, 2003; Kim 등, 2006; Unkrich 등 2010).

국내에서는 2000년대 중반부터 레이더 자료와 분포형 모형을 이용한 홍수예보시스템의 가능성에 대해서 연구되기 시작하였다. 박진혁과 강부식(2007) 및 김원일 등(2008)은 레이더 강우자료와 분포형 강우-유출 모형을 이용한 유출해석을 수행함으로써 홍수예보를 위한 레이더 자료와 분포형 모형의 적용 가능성을 검토하였으며, 건설교통부(2007)는 강우레이더에 의한 돌발홍수예보시스템에서 분포형 모형의 적용성을 검토하였다.

레이더 자료와 분포형 모형을 이용한 실시간 유출해석 시스템의 구축 및 활용은 주로 소방방재청과 국토해양부를 중심으로 이루어 졌다. 소방방

재청에서는 재해상황분석판단시스템(소방방재청, 2009), 산지특성을 고려한 GIS기반 돌발홍수예측 시스템(국립방재연구원, 2009), GIS 기반 소하천 홍수방재시스템(국립방재연구원, 2010) 등과 같은 홍수예측시스템에서 분포형 모형을 이용하여 홍수 유출해석을 수행하고 있다. 또한 최윤석 등(2010)은 한국건설기술연구원에서 개발된 분포형 강우-유출 모형인 GRM(Grid based Rainfall-runoff Model)의 실시간 유출해석 모듈인 GRM RT(Real Time)를 개발하였으며, 최윤석 등(2011)은 ‘하천 유역 모니터링 시스템’(한국건설기술연구원, 2012)에서의 GRM RT와 실시간 수문자료를 이용한 실시간 유출해석을 소개한 바 있다.

본 연구에서는 기상레이더와 분포형 강우-유출 모형을 이용한 실시간 유출해석 시스템의 개발에 대해서 수행되었다. 본 논문의 구성은 우선 시스템의 개발을 위한 데이터베이스 설계 및 각 요소의 연계를 통한 시스템 구현에 대해서 기술하였다. 또한 시험 유역인 내린천 유역에 대해서 유출 모형을 구축하고, 실시간 유출해석 과정의 성능을 평가하였다. 마지막으로 본 연구를 통해서 개발된 시스템을 이용하여 시험유역에 대해 실시간 유출해석을 수행한 사례를 제시하고 적용성을 평가하였다.

2. 실시간 분포형 강우-유출 모형

본 연구에서는 한국건설기술연구원에서 개발한 GRM 모형의 실시간 유출해석 모듈인 GRM RT를 이용하여 실시간 유출해석을 수행하였다. GRM은 물리적 분포형 강우-유출 모형으로 격자형으로 공간분포된 수문지형학적 입력자료와 강우자료를 이용하여 유출해석을 수행한다. GRM 모형은 1차원 운동과 방정식을 이용하고 있으며, 그림 1(한국건설기술연구원, 2011)은 GRM의 검사체적 유출 구조를 나타낸 것이다. 지표면 흐름과 하도 흐름에 대한 연속방정식은 식(1) 및 식(2)와 같고, 식(3)의 Manning의 식을 이용하여 유속을 계산한다(한국건설기술연구원, 2011).

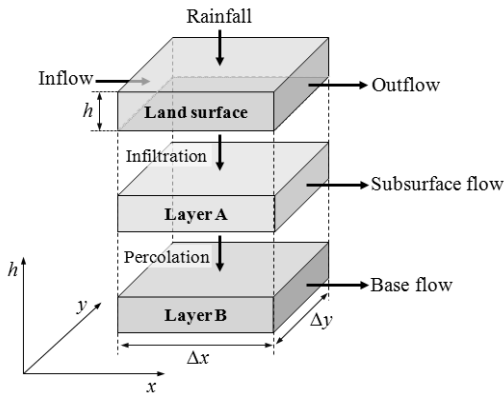


그림 1. GRM의 검사체적 유출 구조

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = r - f + \frac{q_r}{\Delta y} \quad (1)$$

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = r \Delta y + q_{ol} + q_{ss} + q_b \quad (2)$$

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

여기서 q 는 단위 폭당 유량($q = uh$), u 는 x 방향 유속, r 는 강우강도, f 는 침투율, A 는 하도 단면적, q_r 는 복귀류, A 는 x 방향에 직각인 단면적, Q 는 유량, h 는 수심, q_{ol} 은 지표면 흐름에 의한 측방유입, q_{ss} 는 하도로 유입되는 지표하 유출, q_b 는 기저유출, t 는 시간, n 은 조도계수, R 은 동수반경, Δy 는 검사체적의 y 방향 크기이다.

3. 실시간 유출해석 시스템 데이터베이스 설계

본 연구에서는 시험 유역인 내린천 수위관측소 지점을 기준으로 GRM RT를 보정하고, 보정된 초기 매개변수군과 실시간으로 수집되는 레이더 강우자료를 이용하여 실시간 유출해석을 수행한다. 실시간 유출해석을 수행하기 위해서는 레이더 강우자료와 이를 보정하기 위한 지상 관측 강우량

을 실시간으로 수신해야 하며, 유출모형의 실시간 보정을 위한 실측 유량자료가 필요하다. 본 연구에서는 이상의 레이더 강우자료, 지상 관측 강우자료 및 관측 유량자료의 3가지 수문자료를 이용하여 실시간 유출해석을 수행하며, 실시간 유출해석 시스템 구축을 위한 데이터베이스 및 각 데이터베이스간의 자료 흐름을 설계하였다.

3.1 레이더 자료의 전처리 절차

본 연구의 실시간 유출해석 시스템에서는 기상청으로부터 실시간으로 수신되는 원시 레이더 자료를 이용해서 실시간 유출해석을 수행한다. 실시간 유출해석 시스템에서 레이더 자료의 처리는 시스템 내에 포함되어 있는 기상레이더 처리모듈(한국건설기술연구원, 2012)에서 수행되며 그 절차는 그림 2와 같다. 원시 레이더 자료로부터 PPI를 생성하고, 이로부터 대상 유역의 격자 크기 및 영역과 일치되게 CAPPI를 생성한다(Mohr and Vaughan, 1979). CAPPI와 Z-R 관계식을 이용하여 강우량을 생성하고, 이를 AWS 관측 강우량을 이용하여 CM(Conditional Merging)(Ehet, 2002; Pegram, 2002; 김병식 등, 2007) 방법으로 보정한다. 이와 같은 전처리 과정을 거친 레이더 강우자료는 실시간 유출해석 시스템 서버에 저장된다.

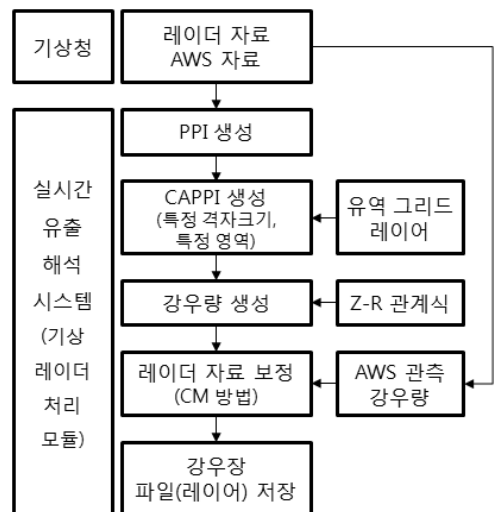


그림 2. 레이더 자료의 전처리 절차

3.2 레이더 자료의 저장 구조

실시간 유출 모형에서는 전처리된 레이더 강우 자료를 검색하여 유출해석을 수행하며, 이때 레이더 자료의 효과적 검색을 위한 자료의 저장 구조를 설계하였다. 레이더 자료는 10분 간격으로 파일형식으로 수신되며, 레이더 자료의 전처리 과정을 거친 후 유출모형에서 사용하기 위한 강우 그리드 레이더 파일로 변환된다. 따라서 레이더 자료를 하나의 폴더에 저장할 경우 매우 많은 파일이 동일 폴더에 저장된다(예를 들어, 10분 간격으로 수신되는 파일을 365일간 저장할 경우의 파일 개수는 52,560개). 이 경우 유출모형에서 모의 대상 강우자료를 검색하는데 많은 시간이 소요되며, 시스템 성능 저하에도 영향을 미친다. 그러므로 본 연구에서는 월단위로 레이더 자료를 저장하는 것으로 설계하였으며, 폴더 이름은 자료의 대상 연월을 이용하여 “yyyyMM(예, 2012년 6월 1일은 ‘20120601’)” 형식으로 부여하였다.

3.3 실시간 유출해석 데이터베이스

GRM RT에서는 GRM 모형의 프로젝트 데이터베이스(MDB 형식)에서 유출해석 결과의 출력지점인 watchpoint 별로 테이블을 생성하고 실시간 유출해석 결과를 저장하며, 실시간 유출해석 결과가 저장되는 테이블의 이름은 “RealTime_[Watchpoint 이름]”으로 부여한다. GRM RT에서 제공하는 유출해석 결과 테이블의 구조는 표 1과 같다. 실시간 유출해석 시스템에서는 GRM RT로부터 계산되는 실시간 유출해석 결과 중 [Time], [Rainfall],

표 1. 실시간 유출해석 결과 테이블 구조

필드	설명
DataNo	자료의 순서
Time	시간(yyyyMMddHHmm)
Rainfall	유역 평균강우량[mm]
Qsim	유량[m ³ /s]

[Qsim]을 SQL 서버로 저장한다. SQL 서버의 테이블 구조는 GRM RT의 MDB 테이블 구조를 그대로 활용하며, GRM RT의 실시간 유출해석 결과가 추가될 때 마다 이를 SQL 서버로 저장한다.

실시간 유출해석 시스템에서는 유출해석 결과가 저장된 SQL 서버 데이터베이스와 내린천 수위 관측소에 대해서 실시간으로 수신되는 유량자료를 함께 그래프로 제시하며, 이를 통해서 모형을 보정하고 유출해석 결과를 검증할 수 있는 환경을 제공한다. 실시간 유출해석 시스템에서의 데이터 흐름은 그림 3과 같다(한국건설기술연구원, 2012).

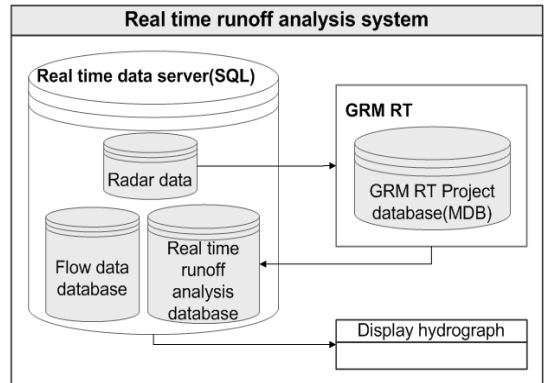


그림 3. 실시간 유출해석 시스템의 데이터베이스 및 데이터 흐름

4. 실시간 유출해석 실행모듈 개발

GRM RT는 지리정보시스템과 통합된 물리적 분포형 강우-유출 모형인 GRM에 포함되어 있는 실시간 유출해석 모듈이다. 그러므로 GRM RT를 이용하여 실시간 유출해석을 수행하기 위해서는 GRM 모형의 모델링 시스템인 HyGIS-GRM을 우선적으로 실행해야 한다(최윤석 등, 2010). 그러나 일반적으로 특정 유역의 실시간 유출해석은 홍수예보시스템과 같이 대상 유역에 대해 특정 목적에 맞게 구축된 시스템과 GUI에서 수행되어야 한다. 그러므로 본 연구에서는 HyGIS-GRM을 실행하지 않고도 GRM RT 모듈을 호출하여 실시간 유출해석을 수행할 수 있는 GRM RT 실행모듈

표 2. GRM RT Launcher의 설정 매개변수

매개변수	설명
지점명	GRM RT의 보정지점 이름
초기 포화도	유출해석 시작 시간에서의 토양 초기포화도. GRM 모형의 매개변수
초기 유량	모형 보정 지점에서의 초기유량. GRM 모형의 매개변수
하도 최소경사	하도의 최소 경사 값[m/m]. GRM 모형의 매개변수
유출해석 시작 시간	유출해석을 시작할 시간. 유출해석에 적용할 레이더 강우자료 선택에 적용. 10분 단위로 입력.
출력 시간 간격	유출해석 결과를 출력할 시간 간격.

(GRM RT Launcher)을 EXE 파일 형식으로 개발하였다.

표 2는 GRM RT Launcher에서 사용자에게 의해서 설정되는 매개변수를 나타낸 것이다. 사용자는

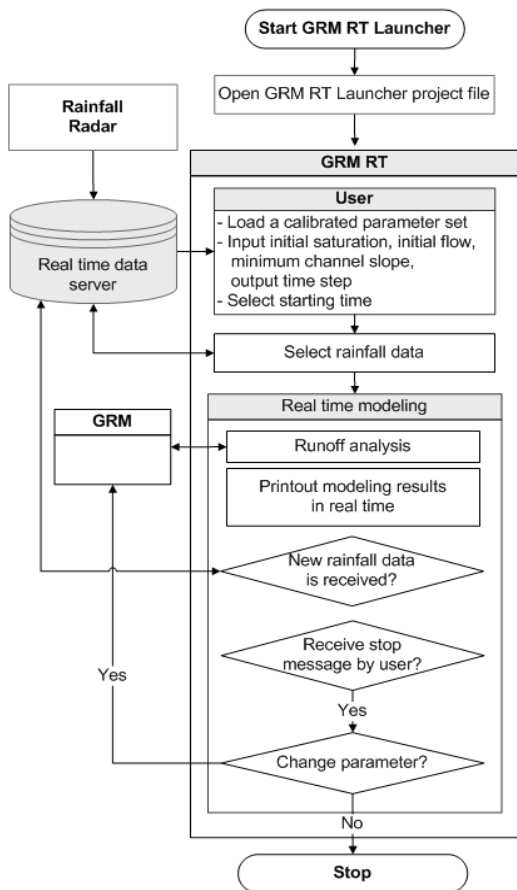


그림 4. GRM RT Launcher에 의한 실시간 유출 해석

GRM 모형의 매개변수 중 ‘초기포화도’와 ‘하천의 초기유량’ 및 ‘하도 최소경사’를 수정하면서 모형을 보정하고, 입출력 변수로는 유출해석 시작 시간과 결과의 출력 시간 간격을 지정할 수 있다. 그림 4은 GRM RT Launcher에 의한 실시간 유출해석 과정을 나타낸 것이다(한국건설기술연구원, 2012). GRM RT Launcher에서는 기존의 GRM RT와는 달리 GRM 모형을 구동하기 위한 GIS 플랫폼인 HyGIS를 실행할 필요가 없으며, 단지 GRM RT Launcher에 적용하기 위한 프로젝트파일을 열면 실시간 유출해석을 위한 모든 시스템 환경이 자동으로 설정된다.

5. 실시간 유출해석 모형 구축

5.1 대상 유역 및 공간자료 구축

본 연구에서는 시험유역인 내린천 유역에 대해서 GRM 모형의 입력에 이용되는 공간자료를 수집하였으며, HyGIS를 이용하여 지형분석을 하고, 토지피복 및 토양 입력자료를 구축하였다. 모든 공간자료는 100m×100m의 해상도로 구축하였다. 내린천 유역은 대부분 산악지역으로 면적은 약 1,037km²이며, 100m×100m의 해상도로 공간자료를 구축할 경우 유출해석 격자의 개수는 103,700개가 된다. 이와 같이 많은 격자로 구성된 유역은 유출해석에 소요되는 시간이 많이 소요된다. 그러나 본 연구에서는 산악 지형에 포함되어 있는 계곡에서 발생할 수 있는 홍수의 분석까지 가능하도록 하기 위해, 작은 면적의 계곡에서

도 지형분포를 어느 정도 잘 나타낼 수 있는 100m×100m의 해상도로 설정하였다. 본 연구에서는 분포형 모형을 이용한 실시간 유출해석에 관한 연구를 목적으로 모형을 구축하였으나, 실제의 홍수예보, 실시간 홍수해석 및 모니터링 시스템 구축과 실무 적용을 목적으로 유출모형을 구축할 경우에는 대상 유역 및 유출해석 목적에 적합한 해상도 평가가 선행되어야 한다(김연수 등, 2011).

본 연구에서는 기상청 AWS 강우자료를 이용해서 레이더 자료를 보정하고 있으며, 내린천 수위 관측소의 유량을 이용해서 실시간 유출해석시 모형을 보정한다. 레이더 자료의 보정에 사용된 AWS 관측소는 총 11개(구룡령, 기린, 내면, 봉평, 서림, 서석, 신남, 연곡, 오색, 원통, 진부) 이며, 그림 5는 대상 유역의 위치와 지형기복도 및 기상청 AWS 관측소와 수위관측소 현황을 나타낸 것이다.

표 3은 본 연구에서 적용한 공간자료를 나타낸 것이며, 그림 6~8은 대상 유역의 토지피복도, 토성도 및 토양심도의 공간분포를 나타낸 것이다.

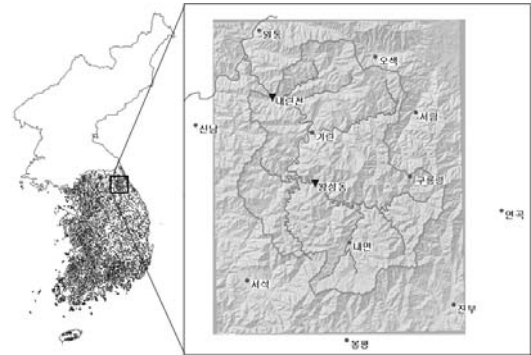


그림 5. 대상 유역의 유역도, 지형기복도, 수문관측소 위치

표 3. 실시간 유출 해석을 위한 GRM 모형 구축 공간자료

Input data	자료 설명	해상도
DEM	HyGIS를 이용해서 sink, flat area 전처리	100m × 100m
Flow direction	HyGIS D-8 method 이용	
Flow accumulation	HyGIS 지형분석 도구 이용	
Stream	HyGIS 지형분석 도구 이용	
Slope	HyGIS 지형분석 도구 이용	
Green-Ampt soil texture	한국농업과학기술원 정밀토양도에서 속성 추출 및 그리드 레이어로 변환	
Soil depth		
Land cover	환경부 대분류 토지피복도	

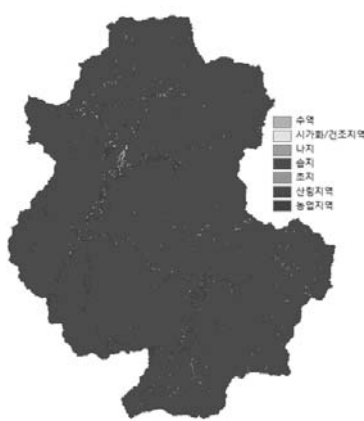


그림 6. 토지피복도

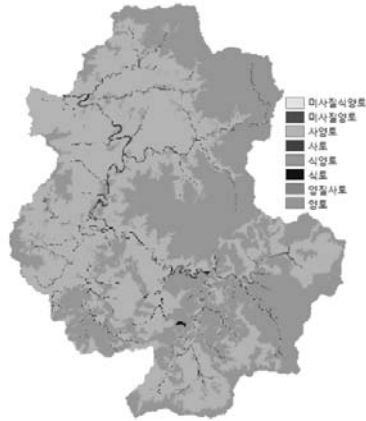


그림 7. 토성도

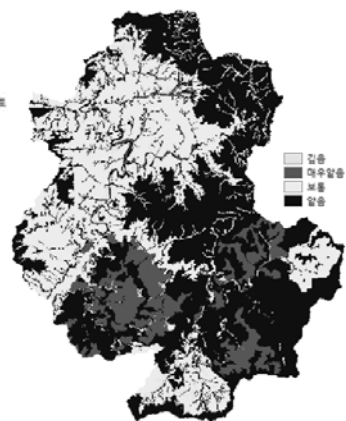


그림 8. 토양심도

5.2 실시간 강우자료 연계

본 연구의 실시간 유출해석 시스템에서는 기상청의 AWS 자료와 기상레이더 강우자료를 실시간으로 수신하며, AWS 자료를 이용하여 보정된 레이더 강우자료를 유출해석에 적용한다. 레이더 자료는 대상 유역인 내린천의 공간자료와 동일한 영역과 동일한 격자크기로 전처리되며, GRM에서 지원하고 있는 그리드 포맷인 RGD 파일 형식으로 서버에 저장된 후 유출해석에 이용된다. 그림 9는 실시간 유출해석을 위한 강우레이어의 검색 절차를 나타낸 것이다. 실시간 유출해석시 사용자는 유출해석 시작시간을 지정하며, 실시간 유출해석 모형에서는 모의 대상 시점에서의 강우자료에 해당하는 폴더와 강우레이어를 검색한다.

GRM에서는 분포형 강우자료로 그리드 레이어인 RGD 파일과 ASCII 텍스트 그리드 파일을 이용할 수 있다. RGD 파일을 이용할 경우 RGD 파일의 접근을 위한 그리드 레이어 connection에 시

간이 소요된다. 이는 현재 수신되는 강우레이어의 적용에는 문제가 없으나, 현재 시점의 이전에 저장된 많은 개수의 강우 레이어를 유출해석에 적용할 경우 ASCII 파일을 이용할 때보다 유출해석에 소요되는 시간이 길어지는 문제가 있을 수 있다. 그러나 ASCII 파일을 이용하기 위해서는 RGD 형식의 강우 레이어를 ASCII 파일로 변환해야 하는 절차가 선행되어야 한다.

5.3 실시간 유출해석 시스템 성능 평가

현재의 홍수사상에 대해서 보정된 모형을 이용하여 실시간 유출해석을 할 때 미래에 발생하는 강우는 일정한 시간 간격을 두고 수신되므로, 이에 대한 유출해석 소요시간은 일반적으로 크게 문제되지 않는다. 즉, 예를 들어 현재 레이어 강우자료를 하나 수신한 경우, 다음 순서에 해석할 레이더 강우자료가 10분 후에 수신이 된다면, 현재 수신한 강우자료를 해석하는 데는 일반적으로 10분 미만의 시간이 소요되므로 실시간 유출해석을 수행하는 데는 별 문제가 되지 않는다.

그러나 현재 발생되고 있는 홍수사상에 대해 모형이 아직 보정되지 않은 상태일 경우에는 신속한 모형보정이 필요하며, 이때는 유출해석에 소요되는 시간은 매우 중요한 요소로 작용한다. 현재 발생하고 있는 홍수사상을 실시간으로 해석하기 위해서는 홍수사상 발생 초기에 모형 보정을 위한 매개변수 수정과 유출해석 결과와 실측 유량의 비교검토 과정을 반복적으로 수행해야 한다. 이를 위해서 실시간 유출해석 시스템에서는 매개변수 수정 및 계산 유량을 관측 유량과 비교할 수 있는 GUI와 표 및 그래프를 제공한다(그림 11). 실시간으로 모형을 보정하기 위해서는 현재 진행 중인 홍수사상에 기여한 과거의 강우자료를 일괄적으로 적용한다. 본 연구에서는 이와 같이 실시간 모형 보정에 소요되는 홍수발생 초기의 상황을 가정하고 3일 간의 과거 강우자료를 이용하여 시스템의 성능을 평가하였다.

내린천 유역에 대해서 구축된 모형을 이용하여 실시간 유출해석 시스템의 성능을 평가하였으며, 성능평가 조건 및 결과는 표 4와 같다. 성능 평가

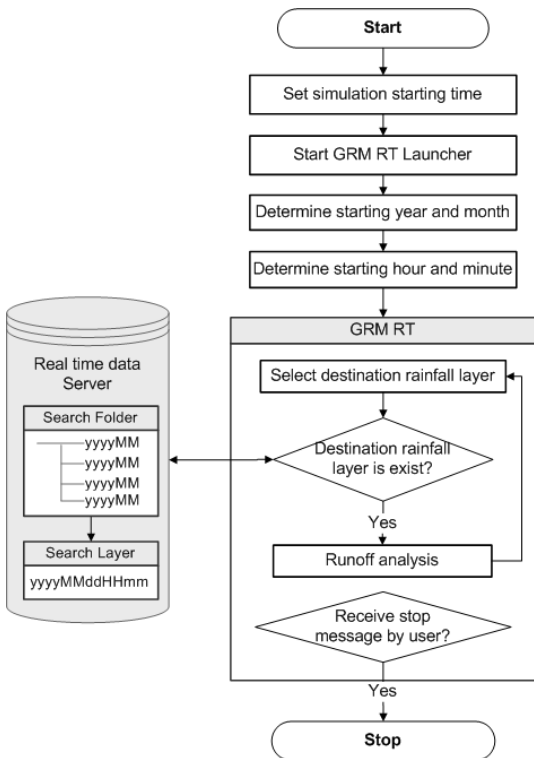


그림 9. 실시간 유출해석을 위한 강우레이어 검색

에서 적용한 유역 격자 설정은 두 가지 경우에 대해 검토되었다. 'CASE I'에서는 내린천 유역을 100m×100m 크기의 격자로 구성한 경우이며, 이때 유역내 격자의 개수는 103,690이고, 계산시간 간격은 120초로 설정하였다. 이때 격자의 크기를 크게 구성할 경우, 해석 대상 격자의 개수를 줄일 수 있을 뿐만 아니라 계산 시간간격 또한 더 크게 설정할 수 있으며, 이를 통해서 실시간 유출 해석에 소요되는 시간을 단축시킬 수 있다. 그러므로 'CASE II'에서는 내린천 유역을 200m×200m 크기의 격자로 구성하였고, 이때 유역내 격자의 개수는 25,925이며, 계산시간 간격은 'CASE I'과 동일하게 120초로 설정하였다.

시스템의 성능 평가에 사용된 강우 자료는 10분 간격으로 수신된 2011년 7월 1일 00시 00분에서 2011년 7월 3일 23시 50분까지의 3일간 432개의 레이더 영상을 이용하였다. 강우자료의 형식은 RGD 그리드 레이더 형식과 ASCII 텍스트 파일 형식 두 가지에 대해서 평가하였다. 본 연구에서 성능평가를 위해서 사용한 파일의 개수는 하나의 폴더에 432개의 강우파일을 배치한 상태에서 수행되었다.

실시간 유출해석 모듈의 구동결과 격자 개수가

103,690개인 'CASE I'에서는 10분 동안의 유출 해석에 소요되는 시간은 RGD 파일과 ASCII 파일 모두 평균 4.0초가 소요되었다. 또한 격자 개수가 25,925개인 'CASE II'에서는 10분 동안의 유출 해석에 소요되는 시간이 RGD 파일과 ASCII 파일 모두 평균 1.2 초가 소요되었다. 이때 성능평가 대상 파일의 개수가 하나의 폴더에 432개의 파일이 있을 경우에는 ASCII 파일과 RGD 파일에서 동일한 유출해석 시간이 소요되었다. 그러나 RGD 파일은 래스터 레이어의 참조를 위한 GIS 엔진 내부의 프로세스가 필요하기 때문에 대상 파일의 개수가 많아질 경우, 강우 파일을 참조하는데 좀 더 긴 시간이 소요될 가능성이 있다.

시스템의 성능 평가 결과 'CASE II'에서는 'CASE I'에 비하여 유출해석에 소요되는 시간이 1/4로 줄어들었으며, 이는 'CASE II'에서 격자의 개수가 1/4로 줄어들었기 때문이다. 본 연구에서 제시된 실시간 유출해석 시스템의 성능 평가 결과는 홍수사상 발생 초기에 필요한 모형의 보정시에도 충분히 적용성이 있을 것으로 판단되며, 특정 유역에 대해서 실시간 유출해석 시스템을 구축하고 실무에 적용하기 위해서는 대상 유역에 적합한 해상도 평가가 선행되어야 한다.

표 4. 실시간 유출해석 시스템 성능 평가

구분	설명			
컴퓨터 사양	<ul style="list-style-type: none"> ◦ CPU: Intel(R) Core(TM)2 Duo E8400, 3.00GHz ◦ 메모리: 4.00GB ◦ 운영체제: Windows 7 Enterprise K SP1, 32bit 			
적용 자료	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 강우자료의 시간간격: 10분 ◦ 유출해석 자료의 기간: 3일 ◦ 레이더 개수: 432개 			
격자 구성	CASE I		CASE II	
	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 격자 크기: 100m×100m ◦ 유역내 격자수: 103,690¹⁾ ◦ 계산 시간간격: 120초 		<ul style="list-style-type: none"> ◦ 격자 크기: 200m×200m ◦ 유역내 격자수: 25,925 ◦ 계산 시간간격: 120초 	
강우자료 형식	RGD 파일	ASCII 파일	RGD 파일	ASCII 파일
파일 크기 ²⁾	평균 574kb	평균 766kb	평균 75kb	평균 193kb
유출해석 소요시간	28.43분 (해석기간 10분에 대해 평균 계산시간 4.0초)	28.85분 (해석기간 10분에 대해 평균 계산시간 4.0초)	8.47분 (해석기간 10분에 대해 평균 계산시간 1.2초)	8.82분 (해석기간 10분에 대해 평균 계산시간 1.2초)

1) 103,690개의 격자 개수는 100m×100m 격자로 유역을 구성할 경우 내린천 유역 면적에 해당하며, 500m×500m 격자로 유역을 구성할 경우 약 행주대교 유역 면적(25,232km²)에 해당함.

2) 성능평가에 사용된 432개 파일의 전체 용량을 파일개수로 나눈 값.

6. 실시간 유출해석 시스템의 적용

본 연구에서는 2011년 6월 27일부터 8월 12일 사이에 발생한 대표적인 강우사상 5개를 대상으로 실시간 유출해석 시스템에서의 유출해석 결과를 제시하고자 한다. 본 연구에서의 검토대상 강우사상은 그림 10 및 표 5와 같다. 그림 10은 본 연구의 실시간 유출해석 시스템에서 강우 및 수위를 조회하기 위한 화면이다. 내린천 유역에 대해서 구축된 실시간 유출해석 시스템의 그림 10에서는 광덕산 레이더 강우와 MAPLE 자료 및 내린천 수위관측소 자료를 조회할 수 있다. 이때

MAPLE 자료는 현재 유출해석에는 적용되지 않고, 강우상황을 판단하기 위한 참고자료로 활용된다. 본 연구에서는 그림 10의 내린천 수위관측소 지점에 대한 과거의 수위를 조회하고, 수위의 상승이 있는 5개 사상을 선택하였으며, 표 5는 5개 수문사상의 현황을 나타낸 것이다.

유출해석은 표 6에서와 같이 GRM 모형의 주요 매개변수를 설정해서 수행하였으며, 초기포화도는 수문사상별로 추정하고, 초기유량은 관측값을 적용하였다. 최소하폭과 하도최소경사 및 하도조도계수는 모든 수문사상에서 동일한 값을 적용하였다.

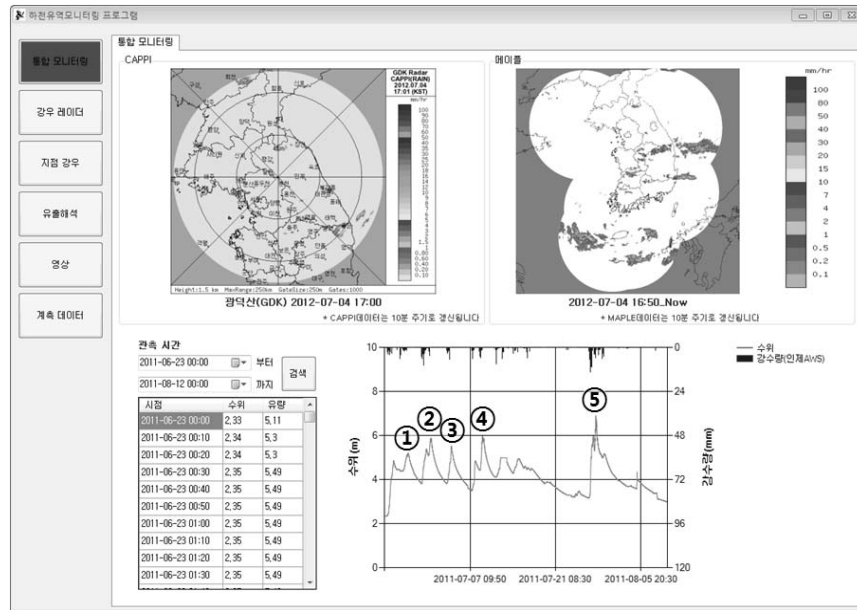


그림 10. 내린천 수위관측소의 수위 조회

표 5. 수문사상

사상	강우 시작 일시	첨두유량 (m³/s)
사상1	2011.06.26 00:00	515
사상2	2011.06.29 02:00	876
사상3	2011.07.03 08:00	664.16
사상4	2011.07.07 12:00	945
사상5	2011.07.26 16:00	1794

표 6. 매개변수 설정

수문 사상	초기 유량 (m³/s)	초기 포화도	최소 하폭 (m)	하도 최소 경사	하도 조도 계수
사상1	231	0.84	5	0.015	0.035
사상2	122	0.58	5	0.015	0.035
사상3	121	0.45	5	0.015	0.035
사상4	79	0.25	5	0.015	0.035
사상5	46	0.71	5	0.015	0.035

본 연구의 실시간 유출해석 시스템에서 수행된 각 수문사상에 대한 유출해석 결과는 그림 11~15 및 표 7과 같다. 실시간 유출해석을 위한 화면 구성은 그림 11에서와 같이 유출모형의 매개변수를 설정하는 부분과 대상 유역의 유역도 개개변수를 설정하는 부분과 대상 유역의 유역도 개항을 나타내는 부분 및 유출해석 결과를 나타내는

부분으로 구성된다.

그림 11~15에서 유출해석 결과를 관측값과 비교했을 때 수문곡선의 상승부와 하강부를 잘 모의하고 있으며, 첨두유량과 첨두시간 또한 잘 재현하고 있는 것으로 나타났다. 또한 표 7에서는 '사상3'을 제외한 모든 수문사상에서 첨두유량이

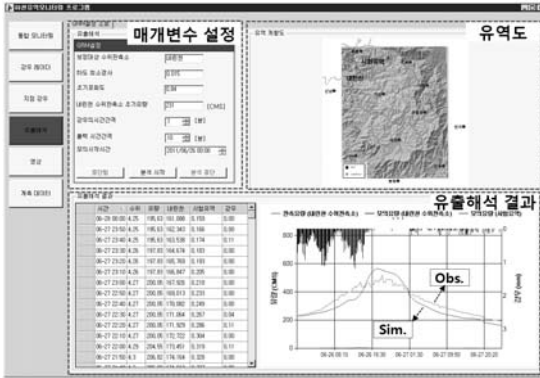


그림 11. 유출해석 결과(사상1)

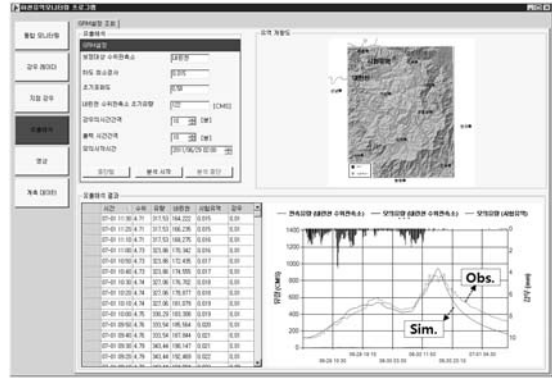


그림 12. 유출해석 결과(사상2)

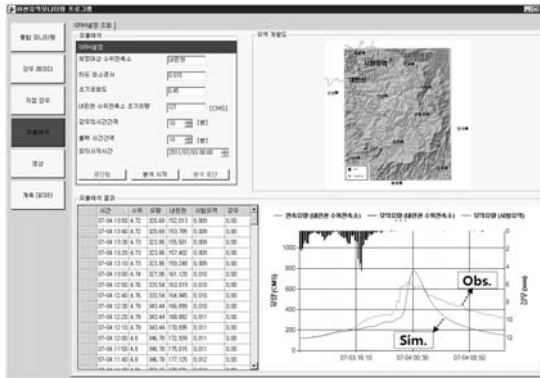


그림 13. 유출해석 결과(사상3)

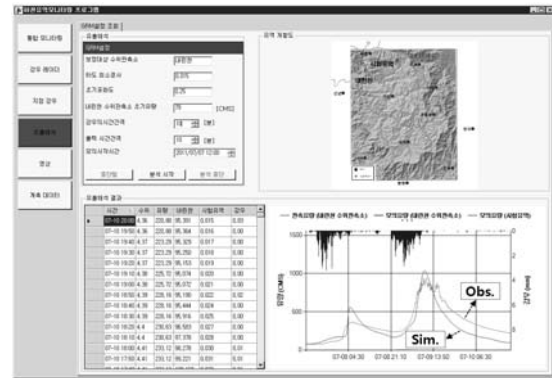


그림 14. 유출해석 결과(사상4)

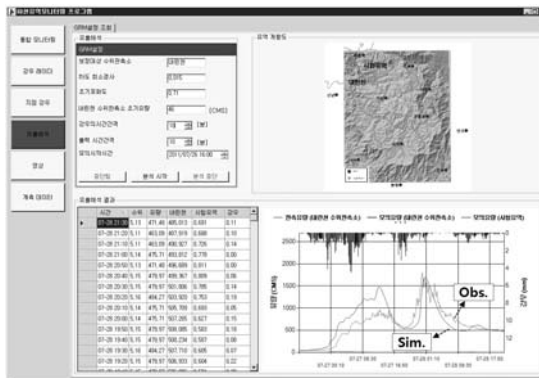


그림 15. 유출해석 결과(사상5)

표 7. 유출해석 결과

수문 사상	총유량			침투유량			침투시간		
	관측 (1000×m ³)	모의 (1000×m ³)	상대 오차 (%)	관측 (m ³ /s)	모의 (m ³ /s)	상대 오차 (%)	관측 (hr)	모의 (hr)	오차 (min)
사상1	54,433	51,606	5.2%	515	564	9.4%	18.7	17.7	60
사상2	95,834	87,111	9.1%	876	944	7.7%	39.0	37.5	90
사상3	38,724	30,202	22.0%	664	775	16.8%	15.7	16.7	60
사상4	101,602	85,447	15.9%	945	1,038	9.8%	45.8	46.3	30
사상5	123,140	136,259	10.7%	1,795	1,682	6.3%	32.2	32.8	40

10% 이내의 상대오차를 보이고 있으며, 모든 수문사상에서 침투시간은 최대 90분, 총유출량은 최대 22%의 오차를 나타냄으로써 관측 수문곡선을 매우 잘 재현할 수 있는 것으로 나타났다. 그러나 그림 13의 '사상3'에서 침투유량 부분과 그림 15의 '사상5'에서 첫 번째 수문곡선 상승부에서는 계산 유량이 관측 유량보다 크게 산정되었다. 이때 800m³/s 부근의 유량에서 관측 유량이 진동을 하고 있으며, 이러한 관측값이 발생한 원인에 대해서는 추가적인 검토가 필요하다.

특정 유역의 실시간 유출해석 시스템의 구축을 위해서는 사용되는 공간자료 평가와 해상도 평가 및 최적 매개변수 평가와 관측 수문자료의 품질 평가 등 다양한 요소에 대한 평가 및 최적 모형 구축이 선행되어야 한다. 본 연구에서는 내린천 유역에 대해서 레이더 자료와 분포형 수문모형을 이용하여 시험적으로 실시간 유출해석 시스템을 구축하였다. 내린천 유역에서 2011년 여름에 발생한 5개의 수문사상에 대한 유출해석 결과를 제시하였으며, 연구결과 실시간 유출해석 시스템은 초기포화도만을 수정하여 5개의 강우-유출 사상을 잘 재현하였다. 그러므로 향후 레이더 강우자료와 분포형 모형을 이용한 실시간 유출해석 실무를 위한 시스템 구축시, 본 연구의 실시간 유출해석 시스템은 기반 기술로 활용 가능할 것으로 사료된다.

7. 결 론

본 연구에서는 물리적 분포형 강우-유출 모형인 GRM의 실시간 유출해석 모듈인 GRM RT와 기상레이더를 이용한 실시간 유출해석 시스템을 개발하고 평가하였다. 본 연구의 결론을 정리하면 다음과 같다.

- (1) 실시간 유출해석 시스템 개발을 위한 데이터베이스를 설계하고, 각 데이터베이스 간의 관계를 설정하였다. 실시간으로 수신되는 레이더 자료의 저장 구조와 유출해석 결과를 저장하기 위한 데이터베이스를 설계 및 구현하였다. 연구결과 레이더 자료를 효과적으로 저장하고 유출해석에 적용할 수 있었으며, 실시간으로 수신되는 관측유량과 유출해석 결과를 저장 및 가시화 할 수 있었다.
- (2) 실시간 유출해석을 위해 GRM RT의 외부 실행모듈인 GRM RT Launcher를 개발하였다. GRM RT Launcher는 HyGIS-GRM을 실행하지 않고, GRM 모형에 포함된 GRM RT 모듈을 호출하여 실시간 유출해석을 수행할 수 있다. 또한 실시간으로 수신되는 강우자료와 유량자료를 이용하여 매개변수를 수정할 수 있으며, 이를 통해서 모형을 보정할 수 있다. 본 연구를 통해서 레이더 자료와 분포형 강우-유출 모형을 이

용한 실시간 유출해석 절차를 정립하였다.

- (3) 시험 유역인 내린천 유역에 대해서 모형을 구축하고, 실시간 유출해석 시스템의 성능을 평가하였다. 성능 평가 결과 해석 대상 격자의 개수가 많아질 경우 모형 보정에 필요한 유출해석 시간이 길어질 수 있는 것으로 나타났다. 그러나 103,690개의 격자에서 해석시간 10분에 대해 계산시간은 평균 4.0초가 소요되었고, 25,925개의 격자에서는 평균 1.2초가 소요되었으며, 이는 실시간 모형 보정에 충분한 적용성이 있을 것으로 판단된다. 또한 특정 유역에 대해서 실시간 유출해석 시스템을 구축할 경우, 최적 해상도 평가가 필요하다.
- (4) 본 연구의 실시간 유출해석 시스템을 이용하여 내린천 유역에서 발생한 5개의 수문사상에 대한 유출해석 결과를 제시하였으며, 초기포화도만을 수정하여 5개의 강우-유출사상을 잘 재현하였다. 본 연구의 결과는 향후 레이더 강우자료와 분포형 모형을 이용한 실시간 유출해석 실무를 위한 시스템 구축시 기반 기술로 활용 가능할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 첨단도시기술개발사업 - 지능형국토정보기술혁신 사업과제(과제번호 06국토정보B01)과 기초기술연구회의 일반사업인 위성자료 활용지원 운영사업(과제명-위성영상을 이용한 하천정보 생산 및 활용에 관한 연구)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참고 문헌

교육과학기술부. 2011. HyGIS 개발 및 적용.
 국립방재연구소. 2009. 산지특성을 고려한 GIS기반 돌발홍수예측시스템 프로토타입 개발.

국립방재연구소. 2010. GIS 기반의 소하천 홍수방재시스템 프로토타입 개발.
 김병식, 홍준범, 김형수, 최규현. 2007. 조건부 합성방법을 이용한 레이더 강우와 지상 강우자료의 조합. 대한토목학회논문집 27(3B): 255-265.
 김연수, 장권희, 김병식, 김형수. 2011. 레이더 자료의 해상도를 고려한 분포형 강우-유출 모형의 GIS 자료 최적 격자의 결정. 한국습지학회지 13(1): 105-116.
 김원일, 오경두, 안원식, 전병호. 2008. 레이더 강우자료에 의한 홍수 예보 시스템 연구. 한국수자원학회논문집 41(11): 1153-1162.
 박진혁, 강부식. 2007. 레이더 및 강우수치예보자료를 이용한 초단기강우-유출예측시스템 개발. 한국수자원학회 '07 학술발표회 논문집. pp 281-285.
 소방방재청. 2009. 재해상황분석판단시스템 요약 보고서.
 최윤석, 김경탁, 박정술. 2010. GRM 모형의 실시간 유출해석 모듈(GRM RT). 2010년 대한토목학회 정기학술대회 발표논문 초록집. pp 230-233.
 최윤석, 박정술, 김주훈, 김경탁. 2011. 분포형 모형과 레이더 강우자료를 이용한 실시간 유출해석. 2011년 대한토목학회 정기학술대회 발표논문 초록집. 1568-1570쪽.
 한국건설기술연구원. 2007. 강우레이더에 의한 돌발홍수예보시스템 개발(3차년도). 건설교통부.
 한국건설기술연구원. 2012. 지능형국토정보기술혁신사업 - 하천유역 모니터링 지원시스템 개발 최종보고서. 국토해양부.
 Bell, V.A. and R.J. Moore. 1998. A grid-based distributed flood forecasting model for use with weather radar data: Part 2. Case studies. Hydrology and Earth System Sciences 2(3): 283-298.
 Ehet, U. 2002. Rainfall and flood nowcasting in small catchments using weather radar.

- Ph. D thesis, University of Stuttgart.
- Garrote Luis and Rafael L. Bras. 1995. A distributed model for real-time flood forecasting using digital elevation models. *Journal of Hydrology* 167: 279-306.
- Jorgeson, J. 2005. Peak flow forecasting with radar precipitation and the distributed model CASC2D. *Water International* 30(1): 40-49.
- KIM, Sunmin, Yasuto TACHIKAWA and Kaoru TAKARA. 2006. Flood Forecasting System Using Weather Radar and a Distributed Hydrologic Model. *Annuals of Disas. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ.* 49B: 55-65.
- Mohr, C.G. and R.L. Vaughan. 1979. An economical procedure for Cartesian interpolation and display of reflectivity factor data in three-dimensional space. *Journal of Applied Meteorology* 18(5): 661-670.
- Pegram, G.G.S. 2002. Spatial interpolation and mapping of rainfall: 3, Progress report to the Water Research Commission, for the period April 2001 to March 2002.
- Unkrich, C.L., M. Schaffner, C. Kahler, D.C. Goodrich, P. Troch, H. Gupta, T. Wagener and S. Yatheendradas. Real-time flash flood forecasting using weather radar and a distributed rainfall-runoff model. 2nd Joint Federal Interagency Conference, Las Vegas, NV, Jun. 27- Jul. 1, 2010. pp 1-11.
- Vieux, B.E., C. Chen, J.E. Vieux and K.W. Howard. 2003. Operational Deployment of a Physics-based Distributed Rainfall-runoff Model for Flood Forecasting in Taiwan. *International Symposium on Information from Weather Radar and Distributed Hydrological Modeling*. Sapporo, Japan, Jul. 7-8, 2003. pp 1-7.
- 논문접수일 : 2012년 07월 11일
 - 심사의뢰일 : 2012년 07월 18일
 - 심사완료일 : 2012년 08월 28일