

격자기반의 운동파 강우유출모형 KIMSTORM의 개선

Modified grid-based KInEMatic wave STOrm Runoff Model (ModKIMSTORM)

정인균*·신형진**·박진혁***·김성준****

Jung, In Kyun·Shin, Hyung Jin·Park, Jin Hyeog·Kim, Seong Joon

요 지

본 연구는 격자기반 운동파 강우유출모형 KIMSTORM(grid-based KInEMatic wave STOrm Runoff Model)의 기능을 개선하고 적용성을 평가하는 것이다. KIMSTORM은 김성준(1998)이 개발한 분포형 강우유출모형으로 포화상태의 지표흐름 및 토양수분상태의 시공간적인 분포를 파악할 수 있다. UNIX C++ 언어로 개발되었으며, GRASS 형태의 ASCII Grid를 입출력하도록 구성되어 있는 모형으로 UNIX 운영체제에서 구동이 가능하다. 그러나 UNIX와 GRASS는 최근에 많이 이용되지 않는 추세로 KIMSTORM 모형을 이용한 홍수유출해석이 적극적으로 활용되는데 주요 제약사항이 되어 왔다. 본 연구에서는 KIMSTORM을 윈도우즈 환경에서 운영될 수 있도록 FORTRAN 90을 이용하여 재개발하였으며 주요개선 사항으로, ESRI ASCII Grid 형태의 GIS(geographic information system) 자료 입력, 물리적 침투모의 방법인 GAML (Green-Ampt and Mein-Larson) 적용, 공간강우 입력가능, 정렬 알고리즘을 이용한 계산속도의 개선, 모형 자료입력 등 전처리 기능개선, 계산결과의 자동평가 및 분포도출력 등 후처리 방식개선으로 요약할 수 있다. 개선된 모형 GAML에 의한 침투방법을 적용하여, 남강댐유역(2,293 km²)의 6개 강우사상을 대상으로 결정계수, Nash & Sutcliffe 모형효율계수, 용적편차, 침투유량의 상대오차, 침투시간의 절대오차를 이용하여 적용성을 평가하였으며, 민감도분석결과 초기토양수분조건과 하천조도계수가 가장 큰 민감도를 나타내었다.

핵심용어 : kinematic wave, distributed rainfall-runoff model, grid-based water balance, GAML

1. 서 론

수문모형은 수문순환과정을 형성하는 수문학적 요소들의 이동과정을 모형화한 것으로 모형들은 각각 다른 형태와 목적으로 개발되어 왔으며, 수자원 계획 및 평가 등 다양한 목적을 해결하는 방법으로 수문모형을 이용하고 있다. 수문모형은 수문학자에 따라 분류하는 기준이 서로 다르지만 V.P. Singh (1995)에 의하면 과정을 묘사하는 방법, 시공간적인 규모, 해석기법에 따라 모형을 분류하고 있다. 이러한 수문모형의 분류 중 과정을 묘사하는 방법에 따라 집중형과 분포형으로 구분할 수 있는데, 최근 컴퓨터 성능의 향상뿐만 아니라 국가차원의 GIS 구축 및 정보시스템 운영, GIS 자료의 정확도 향상, 다양한 자료원으로 부터의 GIS 자료 확보가능성, GIS 소프트웨어의 기능향상은 분포형모형에 필요한 처리능력을 충족시키는 한편 더욱 정밀한 공간자료를 더욱 쉽게 구축할 수 있게 하였다. 또한 유역의 유출과정을 해석하는데 있어 보다 물리적인 해석을 요구하고

* 정회원·건국대학교 사회환경시스템공학과 박사수료·E-mail : nemoik@konkuk.ac.kr
** 정회원·건국대학교 사회환경시스템공학과 박사수료·E-mail : shjin@konkuk.ac.kr
*** 정회원·한국수자원공사 물관리센터 선임연구원·공학박사·E-mail : park5103@kwater.or.kr
**** 정회원·건국대학교 사회환경시스템공학과 교수·E-mail : kimsj@konkuk.ac.kr

있는 상황에서 분포형모형에 대한 관심과 기대는 더욱 증가하고 있으며, 여러 수문학자들에 의하여 새로운 분포형모형의 개발과 적용이 지속적으로 시도되고 있는 상황이다. 최근 국내에서의 분포형 강우유출모형의 개발사례로는 신철균 등(2004)이 저류함수 기법을 이용하여 격자기반의 강우-유출 모형을 개발하여 합천댐 유역을 대상으로 적용한 바 있고, 최연상 등(2004)은 GIS와 불확실도 해석기법을 이용하여 분포형 강우-유출 모형을 개발하고 적용하였으며, 김문모 등(2005)은 격자기반의 분포형 도시유출해석모형을 개발하였다. 한편 김성준(1998)은 격자물수지기법(cell-based water balance)을 적용하여 격자기반 운동과 강우유출모형 KIMSTORM을 개발하여 연천댐유역(1,875km²), 용담댐유역(930km²), 홍보간척지유역(218km²), 화옹간척지유역(162km²), 이평교유역(76km²) 등의 강우유출모의에 적용하였으며, 최근에는 도시지역의 홍수유출을 모의하기 위하여 평택시(12km²)를 대상으로 적용가능성을 평가한바 있다. 그러나 KIMSTORM에서는 경험식에 의하여 침투과정을 모의하고, Unix C++ 언어로 개발되어 구동환경이 UNIX에 제한되어 있으며, 현재 많이 이용하는 Windows 시스템의 다양한 GIS 처리 소프트웨어를 활용할 수 없어 모형의 전후처리가 다소 불편하다. 또한 매개변수 및 입력강우자료의 변경이 필요한 경우 프로그램의 소스코드를 직접 수정하여 특정유역에 맞도록 재구성해야하는 등 모형에 대한 제약사항의 개선이 요구되어왔다. 따라서 본 연구에서는 모형의 이론과 기능을 개선하고, 남강댐유역(2,293km²)에 적용함으로써 개선된 모형의 적용가능성을 평가하고자 하였다.

2. 모형의 개선 및 적용

2.1 모형의 개요 및 개선사항

KIMSTORM은 격자물수지기법을 적용한 격자기반 운동과 강우유출 모형으로 보다 자세한 이론적인 내용은 “격자기반의 운동과 강우유출모형 개발(I)-이론 및 모형”(김성준, 1998)을 참고할 수 있다. 본 연구를 통하여 개선된 모형은 윈도우즈 운영체제에서 구동할 수 있도록 FORTRAN 90으로 재개발한 것으로서 주요 개선사항은 다음과 같다. 첫째, 모형의 이론과 관련하여, 물리적인 침투과정을 모의할 수 있도록 SWAT (soil water assesment tool)에 적용된 바 있는 GAML (Green-Ampt Mein-Larson)식을 채택하여 침투과정을 개선하였다. 단, 본 모형에서는 계산시간간격이 보통 1분 이하로 매우 짧게 설정되고 토양수분상태를 고려하여 침투를 결정하는 점을 고려하여 담수개시시간 계산과정은 고려하지 않는 것으로 설정하였다. 침투의 경우 기존모형에서는 토양수분이 포장용수량 이상일 경우에 대하여 일정 침투율로 배제되는 것으로 가정하였으나, Huggins 와 Monke (1968) 식을 적용하여 토양의 포화정도에 따라 종기 침투율 범위 내에서 침투가 결정되도록 하였으며, 하천방향으로 누적되어 하천격자에 유입되는 방식을 적용하여 유출곡선의 감수부를 조절할 수 있도록 하였다. 홍수기의 대부분의 논은 담수심을 유지하고 있는 상태임을 고려하여 토양수분은 항상 포화되어 있다고 가정하였고, 물꼬에 의하여 논에서의 유출이 달라지는 특성을 고려하여 담수심과 유출심의 관계에 따라 논의 조도계수가 감소함으로써 유출량을 조절하는 방식을 적용하였다. 둘째, 분포형 모형은 유역을 격자로 세분하여 각 셀마다의 유출량을 계산하게 되므로 입력되는 셀의 크기가 1/n배 감소하는 경우 경계조건을 판별하거나 수문량을 계산해야하는 셀의 개수는 n²배로 증가하게 된다. 이러한 문제점을 최대한 효율적으로 해결하기 위하여 전처리 과정에서 유역격자에 대한 흐름누적값을 셀정렬방법에 의해 계산순서를 미리 결정하는 방법을 적용함으로써 유역과 비유역격자를 판별하는 부분을 생략하고 유역 외곽부에서 하천방향으로 격자물수지를 계산할 수 있도록 개선하였다. 마지막으로 모형의 구동과 관련한 모든 입력

자료 및 매개변수는 모형의 프로젝트파일을 통하여 제어된다. 따라서 기존모형과 같이 매개변수 또는 강우자료를 변경하기 위하여 프로그램을 수정할 필요는 없다. 또한 모형의 전처리·실행·후처리를 설계하여 기본매개변수를 이용한 입력자료 구축 및 실행 후 결과의 파악이나 분포도의 확인이 간편하게 개선되었다. 특히 유출량자료가 있는 경우에 대하여 결과의 자동평가를 실시하여 모형의 매개변수 추정 또는 계산결과의 정확도를 파악하는 것에 편의성을 고려하였다.

2.2. 적용대상유역 및 입력자료 구축

본 개선모형의 적용성 평가는 GAML 침투방법을 적용하여 남강댐유역(2,293km²)을 대상으로 5개 태풍(2000년 사오마이, 2002년 루사, 2003년 매미, 2006년 에위니아, 2007년 나리)와 1개 호우사상을 대상으로 하였다. 입력 GIS자료로 유역도, 흐름방향도, 흐름누적도는 1:5,000 수치지도를 이용하여 생성한 DEM으로부터, 티센망도는 18개 강우관측소 위치정보로부터, 산정지점도는 수위관측소 위치정보로부터 생성하였으며, 토지피복도, 토심도, 토양종류도는 WAMIS(국가수자원관리종합정보시스템)으로부터 다운로드 하여 구축하였다. 토지피복도는 2000년 5월 8일 촬영된 Landsat ETM+ 영상으로부터 격자간격 30m로 제작된 것이며, 토심도와 토양종류도는 농업과학기술원의 1:50,000 개략토양도로부터 30m 간격의 격자자료로 구축된 것이다.

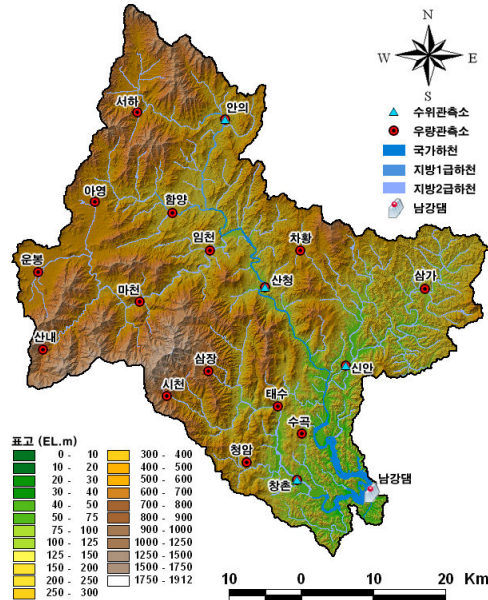


그림 1. 대상유역

이들 자료를 모형에 입력하기 위하여 500m의 격자(137열, 156행)으로 재배열 하여 구축하였으며, 특히 흐름방향도는 실제 하천의 모습을 최대한 반영할 수 있도록 Hellweger(1997)에 의해 제안된 Agree Burn 기법(정인균 등, 2003)을 적용하였다. 대상유역의 주요 토지피복은 산림이 77.76%, 논이 12.92%, 밭이 8.05%로 대부분이 산림으로 구성되어 있으며, 토양은 사양질 내지 식양질이 전체 면적의 64.14%를 차지하고 있는 지역이다. 수위관측소는 5개지점이 있으나, 모형의 검보정에 적합한 관측유량이 비교적 충분하지 않아 유역의 하구지점에 대해서만 모형의 검보정을 실시하는 것으로 하였다. 모형에 필요한 주요매개변수인 조도계수, 유효토심, 유효공극률, 포장용수량, 영구위조점, 포화투수계수, 유효투수계수, 습윤선흡인수두, 종기침투능 등은 Rawls 등(1982), Chow 등(1988), Vieux(2004)의 문헌을 참고하여 결정하였다.

2.3. 결과 및 고찰

분포형모형에서 가장 중요한 것은 초기토양수분 조건을 설정하는 것이며, 초기토양수분의 상태를 유역전체에 걸쳐 공간적으로 파악하는 것은 어려운 일이므로 용적의 편차가 0%에 근접하도록 초기 유량조건을 보정한 후 다른 매개변수를 보정하였다. 모형의 보정에는 3개의 강우사상을 적용하였으며, 보정에 의하여 결정된 매개변수의 평균값을 3개 강우사상에 적용하여 모형을 검정하였다. 모형의 검보정결과는 표1 및 그림2와 같다. 모형의 평가기준은 결정계수 R^2 , Nash-Sutcliffe 모형요율계수(1970) E , 결정지수 D (Willmott, 1981), 용적편차 D_v (ASCE Task Committe, 1993), 침투유량의 상대오차 EQ_p , 침투시간의 절대오차 ET_p 를 적용하였다. 모형의 보정결과 R^2 , E , D , D_v , EQ_p , ET_p 의 평균값이 각각 0.97, 0.97, 0.99, 3.58%, -0.02, 0.40hr로 평가되어 모의결과가 관측

값을 대체로 잘 반영하고 있는 것으로 검토되었다. 그러나, 루사와 매미의 경우 유출감소구간에서 모형에 의한 유출량이 실측 유출량보다 작게 모의되었는데, 이는 토양의 물리적인 매개변수를 임의로 가정함으로써 지표하흐름에서 발생하는 오차, 격자내에서 발생하는 실제흐름과 모형에서 가정한 흐름의 차이, 토지피복의 격자크기를 변경하면서 발생하는 오차 등으로 생각된다. 모형의 검증에서는 R^2 , E , D , D_v , EQ_p , ET_p 의 평균값이 각각 0.89, 0.85, 0.96, 8.67%, -0.12, 1.19hr로 평가되어 보정과 같이 실측유량을 대체로 잘 반영하고 있는 것으로 나타났다. 그러나 모형의 보정과 검증결과에 차이가 나타나는 것은 유역격자크기에 따른 효과도 고려할 수 있겠지만, 보정을 위한 강우사상이 충분하지 않아 보다 많은 보정을 할 수 없는 것이 원인으로 판단된다. 모형의 민감도 분석은 초기토양수분조건, 하천조도계수, 지표조도계수, 유효토수계수, 습윤선흥인수두, 종기침투율에 대하여 -50%-50%범위에 대하여 25%씩 증감하여 침투유량과 총용적의 변화를 비교하였으며 그림3과 같다. 초기토양수분조건이 침투유량과 총용적에 가장 민감하게 반응하는 매개변수로 토양에 포화도에 따라 지표유출이 시작되는 시간을 조절하는 중요한 인자임을 확인할 수 있었다. 하천조도계수는 하천격자의 유량의 크기를 결정하는 주요매개변수로 침투유량에 매우 민감하였으나 총용적에는 민감하지 않았다. 지표조도계수는 침투유량에 민감도를 나타내었으며, GAML을 이용한 침투모의시 유효토수계수와 습윤선흥인수두는 침투량의 증감에 영향을 나타내는 주요 매개변수로서 침투유량과 총용적에 영향을 미치는 매개변수로 나타났다. 종기침투율은 침투되는 양을 결정하는 매개변수로 침투유량에 대한 민감도는 크지 않았으나, 침투수는 하천격자로 다시 유입되므로 총용적에 영향을 주는 것으로 확인되었다.

표 1. 모형의 검보정 결과

호우사상	총용적(10^3 m^3)		침투유량(m^3/s)		모형 평가					
	관측	모의	관측	모의	R^2	E	D	$D_v(\%)$	EQ_p	$ET_p(\text{hr})$
(보) 2000/09/12 태풍 사오마이	595,930.0	598,795.5	3,257.5	3,367.8	0.962	0.958	0.990	-0.48	-0.034	0.78
(보) 2002/08/30 태풍 루사	662,939.2	621,059.3	14,818.0	14,886.0	0.983	0.980	0.995	6.32	-0.005	0.13
(보) 2003/09/11 태풍 매미	508,905.5	484,018.7	12,081.7	12,302.5	0.963	0.958	0.990	4.89	-0.018	0.30
(검) 2006/08/08 태풍 예위니아	515,456.8	543,215.3	2,271.8	2,386.5	0.834	0.825	0.948	-5.39	-0.050	1.80
(검) 2006/07/14 호우사상	817,456.4	684,646.2	12,213.7	13,060.7	0.955	0.931	0.984	16.25	-0.069	0.86
(검) 2007/09/14 태풍 나리	582,969.6	494,720.8	8,791.9	10,822.8	0.881	0.781	0.955	15.14	-0.231	0.90

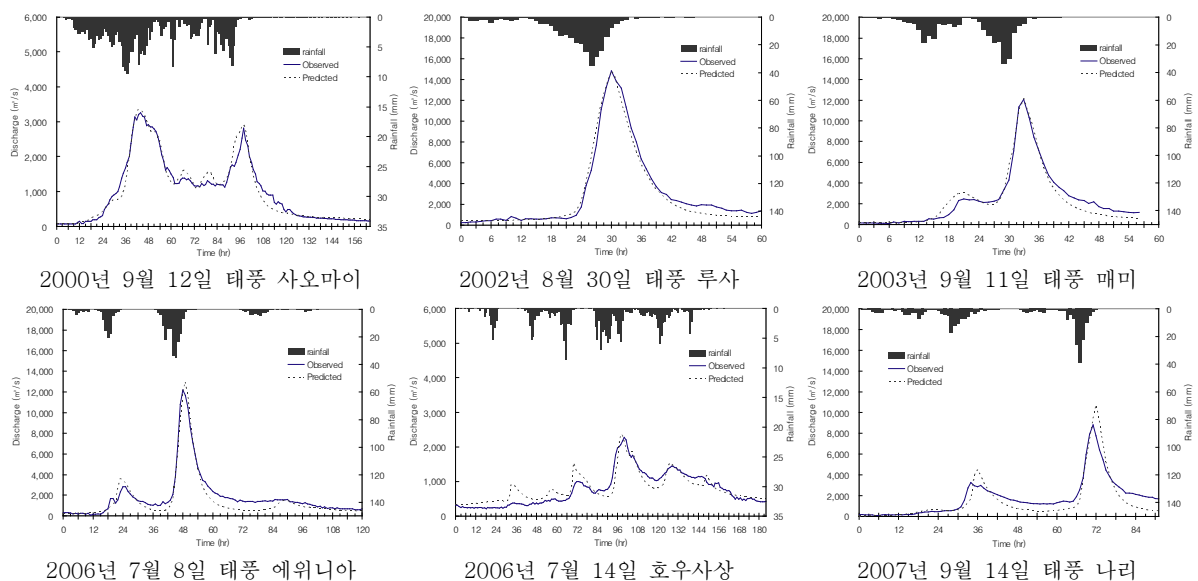


그림2. 모형의 검보정 결과

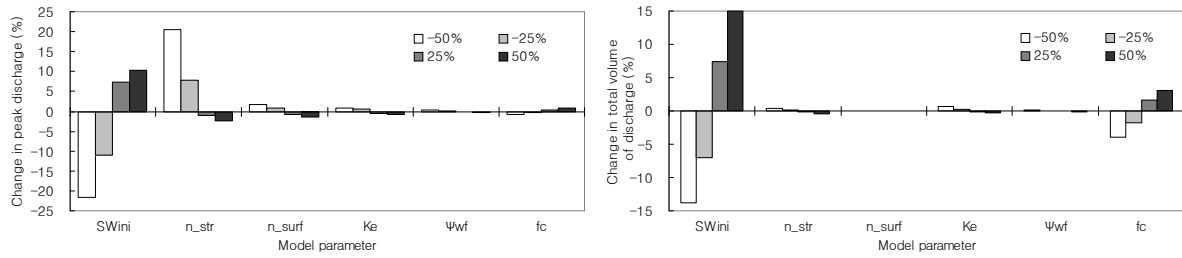


그림2. 주요 매개변수의 민감도 분석

3. 결 론

본 연구에서는 격자기반 운동과 강우유출모형 KIMSTORM을 개선하고 적용성을 평가하였다. 개선된 모형은 모형구동을 위한 입력자료 구축, 매개변수설정 및 조정, 계산시간, 분석결과의 평가가 기존모형에 비해 매우 향상되었음을 모형의 실제 적용을 통해 확인할 수 있었다. 모형의 보정 결과 모의된 유량이 실측유량의 침투유량 및 총용적을 비교적 정확히 반영하고 있음을 볼 때 홍수유출해석에 충분한 적용성이 있음을 확인할 수 있었다. 그러나 검증결과에서와 같이 대상유역에 적절한 매개변수를 결정하기 위해서는 보다 많은 강우사상을 적용하여 모형의 보정이 충분히 이루어져야 할 것이다. 모형의 민감도 분석에서는 초기토양수분조건이 침투유량과 총용적에 가장 큰 민감도를 나타내는 매개변수로 검토되었으며, 하천조도계수는 침투유량의 크기와 발생 시간에 영향을 주는 매개변수임을 확인할 수 있었다.

감 사 의 글

본 연구는 한국수자원공사의 남강댐하류유역 분포형 홍수분석모형 기본모듈개발 용역(50%)과 건설교통부 첨단도시기술개발사업-지능형국토정보기술혁신사업과제의 연구비지원(07국토정보C03, 50%)에 의하여 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. 김성준(1998). 격자기반의 운동과 강우유출모형 개발(I)-이론 및 모형, 한국수자원학회논문집, 제31권 제3호, pp. 303-308.
2. 박진혁, 강부식(2006). 댐유역 홍수예측을 위한 GIS기반의 분포형모형과 집중형모형의 유출해석비교, 한국지리정보학회지, 제9권 제3호, pp. 171-182.
3. 정인균, 김성준(2003). 효과적인 유역 및 하도망 추출을 위한 DEM전처리 방법의 비교, 대한토목학회논문집, 제23권 제3D호, pp. 393-400.
4. Chow, V. T., D. R. Maidment, and L. W. Mays. (1988), *Applied Hydrology*. New York.: McGrawHill.
5. Huggins, L. F. and E. J. Monke, (1968), A Mathematical Model for Simulating the Hydrologic Response of a Watershed. *Water Resour. Res.* 4(3), pp. 529-539.
6. Neitsch, S. L., J. G. Arnold, J. R. Kiniry, J. R. Williams and K.W. King. (2002), *Soil and water assessment tool theoretical documentation: version 2000*. GSWRL Report 02-01, BRC Report 02-05, and TWRI Report TR-191. College Station, TX.: Texas Water Resources Institute.
7. Rawls, W.J., Brakensiek D.L. and Saxton K.E. (1982) Estimation of soil water properties. *Transactions American Society of Agriculture Engineers*, Vol. 25, No. 5, pp. 1316-1320, 1328.
8. Singh, V. P. (1996) *Computer Models of Watershed Hydrology*. Colorado.: WRP.
9. Vieux, B. E. (2004) *Distributed Hydrologic Modeling Using GIS*. 2nd ed. The Netherlands: Kluwer Academic Publishers.