

다방향 흐름 분배와 실시간 보정 알고리즘을 이용한 분포형 강우-유출 모형 개발(II) - 적용 -

Development of Distributed Rainfall-Runoff Model Using Multi-Directional Flow Allocation and Real-Time Updating Algorithm (II) - Application -

김극수* / 한건연** / 김광섭***

Kim, Keuk Soo / Han, Kun Yeun / Kim, Gwangseob

Abstract

The applicability of the developed distributed rainfall runoff model using a multi-directional flow allocation algorithm and a real-time updating algorithm was evaluated. The rainfall runoff processes were simulated for the events of the Andong dam basin and the Namgang dam basin using raingauge network data and weather radar rainfall data, respectively. Model parameters of the basins were estimated using previous storm event then those parameters were applied to a current storm event. The physical propriety of the multi-directional flow allocation algorithm for flow routing was validated by presenting the result of flow grouping for the Andong dam basin. Results demonstrated that the developed model has efficiency of simulation time with maintaining accuracy by applying the multi-directional flow allocation algorithm and it can obtain more accurate results by applying the real-time updating algorithm. In this study, we demonstrated the applicability of a distributed rainfall runoff model for the advanced basin-wide flood management.

keywords : distributed rainfall-runoff model, multi-directional flow allocation algorithm, real-time updating algorithm

요 지

본 연구에서는 다방향 흐름 분배 알고리즘과 실시간 유출 보정 알고리즘을 이용하여 개발한 분포형 강우 유출 모형의 실제 유역에 대한 적용성을 평가하였다. 안동댐과 남강댐 유역에 대해 각각 우량계 관측자료와 레이더 관측 우량자료를 이용하여 분포형 강우-유출 모의를 수행하였다. 이전의 호우사상에 대한 유역 매개변수 보정 실시 후 보정된 매개변수를 이용하여 다른 호우사상에 대해 모형을 적용하였다. 안동댐 유역에 대해 흐름 군집화 결과를 제시함으로써 다방향 흐름 분배 알고리즘의 흐름추적에 대한 물리적 타당성을 입증하였다. 다방향 흐름 분배 알고리즘을 이용하여 정확도를 유지하면서 계산소요시간 단축이 이루어졌으며 실시간 유출 보정 알고리즘의 적용을 통해 좀 더 향상된 정확도를 갖는 결과가 도출되었다. 본 연구에서 개선된 유역 홍수관리를 위한 분포형 강우 유출 모형의 활용

* 교신저자, 한국건설기술연구원 하천해안항만연구실 박사후연구원

Corresponding Author, Post-doctor, River, Coastal and Harbor Research Division, Korea Institute of Construction Technology, Goyang-Si, Gyeonggi-Do, Korea
(e-mail: keuksookim@gmail.com)

** 경북대학교 공과대학 토목공학과 교수

Prof., Dept. of Civil Engrg., Kyungpook National Univ., Daegu 702-701, Korea

*** 경북대학교 공과대학 토목공학과 교수

Prof., Dept. of Civil Engrg., Kyungpook National Univ., Daegu 702-701, Korea

가능성을 제시하였다.

핵심용어 : 분포형 강우-유출 모형, 다방향 흐름 분배 알고리즘, 실시간 보정 알고리즘

1. 서 론

강우-유출 모형은 크게 집중형(lumped) 모형과 분포형(distributed) 모형으로 구분할 수 있으며, 집중형 모형은 유역을 하나의 단위로 처리하여 유역내 수문과정과 수문특성의 공간적 형태에 대한 고려 없이 강수와 유출량을 관련시키는 것이며, 분포형 모형은 유역내 수문 반응의 공간적 형태들을 표현하고자 하는 것으로 생각할 수 있다(Beven, 2001). 최근 GIS 기술의 획기적인 발전, 레이더 강우자료 활용성의 증대, 컴퓨터 계산 용량 및 속도의 급속한 발전과 더불어 분포형 강우-유출 모형의 적용성은 지속적으로 증대되고 있다.

현재까지 개발된 분포형 강우-유출 모형들을 살펴보면, Abbott *et al.*(1986)은 강우, 차단, 증발산, 침투를 고려하고 있으며 2차원 지표류 흐름추적, 지하수 유출을 포함하는 강우-유출 전과정을 포함하는 모형인 MIKE-SHE 모형을 개발하였다. 이 모형은 물리기반 분포형 매개변수를 이용하는 연속모형이며 현재 DHI(Danish Hydraulic Institute)에서 지속적으로 수정·보완하고 있는 모형이다. Julien and Saghafian (1991)은 2차원 유역 강우-유출 모형인 CASC2D 모형을 개발하였다. CASC2D 모형은 2차원 분포형 매개변수 모형으로 강수, 침투, 지표면 흐름, 하천 흐름을 고려하는 단기 유출 모형이다. 지표면 흐름은 인접 셀과 수면경사로 결정되며 직교 방향 4개 셀과의 유량교환을 고려하고 있으므로 4방향 흐름을 고려하고 있다. 이 모형은 Ogden(1997)에 의해 WMS(Watershed Modeling System) 모형의 지표면 흐름 해석 모듈로 개발된 바 있다. 그 후 Downer and Ogden(2002)에 의해 GSSHA(Gridded Surface-Subsurface Hydrologic Analysis) 모형으로 수정·보완되었으며, 같은 해 Rojas(2002)에 의해 유사(sediment) 부분이 추가되어 CASC2D-SED 모형으로 수정되었다. Downer and Ogden에 의해 개발된 GSSHA 모형은 강우, 융설, 차단, 침투, 증발산, 지표면 저류, 지표면 흐름, 하천 흐름, 지하수 흐름을 포함하여 확산과 방정식을 이용하여 유출을 모의하도록 구성되어 있다. 지표면 흐름의 고려는 CASC2D 모형과 동일하게 수행되고 있다. Vieux and Vieux (2002)에 의해 개발된 Vflo 모형은 분포형 매개변수를 이용하는 단기 유출 모형으로 공간적으로는 유

한요소법, 시간적으로는 유한차분법을 이용하고 있다. 특히 이 모형은 미리 결정된 흐름방향도에 의해 1차원 흐름 추적을 실시하는 점에서 앞서 언급한 모형들과 차별성을 가진다. 따라서 지표면 흐름은 최급구배 1방향으로 전파되는 알고리즘을 택하고 있다. 최근 국내에서도 Vflo 모형을 적용한 다수의 연구들이 수행된 바 있다(박진혁과 강부식, 2006; 홍준범 등, 2006; 박진혁 등, 2007). 국내의 경우 분포형 강우-유출 모형의 개발에 관한 몇몇 연구들이 1990년대부터 본격적으로 수행되어 왔으며 개발 및 적용을 위한 연구가 지속적으로 수행되고 있다. 국내 분포형 강우-유출 모형에 관한 연구들은 고덕구(1989), 김성준(1998), 김성준 등(1998), 신철균 등(2004), 최현상과 한건연(2004a, 2004b), 김문모 등(2007), 최윤석 등(2008)에 의해 수행된 바 있다. 고덕구(1989)는 산지 소유역에서 장기 유출 예측을 위해 확정론적 분포형 유역수문모형인 SNUA2 모형을 개발하여 실제유역에 대한 적용성을 입증한 바 있다. 김성준(1998)은 격자기반 물수지 기법을 이용하여 강우에 의한 지표면 흐름과 지표하 흐름의 시간적 변화와 공간적 분포를 모의할 수 있는 분포형 강우-유출 모형인 KIMSTORM 모형을 개발하였으며 UNIX 환경에서 구동되는 무료 GIS 소프트웨어인 GRASS를 이용하여 흐름방향도를 추출하여 흐름추적에 활용하였다. 또한 김성준 등(1998)은 개발된 모형을 연천댐 유역에 대해 적용하여 그 적용성을 평가한 바 있다. 최현상과 한건연(2004a, 2004b)은 불확실도 해석기법인 Monte Carlo 기법과 연계한 분포형 강우-유출 해석모형을 개발하여 설마천 유역과 동곡 유역에 관해 적용성을 평가한 바 있다. 신철균 등(2004)은 저류함수를 이용한 격자기반 분포형 강우-유출 모형을 개발하여 횡성다목적댐 유역과 합천댐 유역에 대해 적용성을 검토한 바 있다. 김문모 등(2007)은 도시유역의 지표면 유출 모의를 위해서 격자기반 지표면 유출모형을 개발하여 가상유역과 군자배수구역에 대해 모형을 적용하였으며, 최윤석 등(2008)은 유한체적법을 이용하여 격자기반의 분포형 강우-유출 모형을 개발하여 위천 유역에 적용한바 있다.

본 연구에서는 이전의 연구(I)에서 개발된 다방향 흐름 분배 알고리즘과 실시간 유출 보정 알고리즘을 이용한 분포형 강우-유출 모형을 안동댐 유역과 남강댐 유역에 대해 적용해 봄으로써 모형의 계산효율성과 정

확도에 대한 검토를 수행하고자 한다.

2. 흐름분배 알고리즘을 적용한 모의

흐름분배 알고리즘의 적용을 위해 선정된 대상유역은 안동댐 유역과 남강댐 유역이며 안동댐 유역의 경우 댐으로의 주 유입 경로가 직선적인 반면 남강댐 유역의 경우는 수지상인 특성을 가지고 있다. 강우 입력자료는 안동댐 유역의 경우 우량계 관측망에 의해 관측된 지점 우량을 활용하였으며, 남강댐 유역의 경우는 레이더 분포형 우량 자료를 활용하였다.

2.1 안동댐 유역에 대한 적용

2.1.1 대상유역

안동댐 유역은 낙동강 최상류에 위치한 유역으로써 본류의 수원은 강원도 태백산에서 발원하여 남류하면서 안동댐에 유입한 후 낙동강 국가하천 구간으로 유입된다. 유역의 연평균 유입량은 27.0m³/s, 연평균 강우량은 950mm를 갖는다. 안동댐 상류 낙동강 지방하천 구간내에 위치하고 있는 도산관측소에서 유역분할을 실시할 경우 유역면적은 약 1,160km²의 유역면적을 가진다. 유역의 표고는 유역의 북쪽 최상류 태백산 지역에서 약 EL. 1,570m에서 시작되어 도산 수위관측소가 위치한 유출구 지점에서 약 EL. 170m의 표고를 갖는다. 유역의 전체적인 지형은 산악지형으로 구성되어 있으며 유역 북서부와 유역 동부가 상대적으로 높은 고도를 가지며 남부와 남서부 지역이 상대적으로 낮은 고도를 가지고 있다. Fig. 1은 안동댐 유역, 도산관측소 상류유역의 지형, 하도, 관측소 정보를 제시하고 있다.

2.1.2 모형의 입력자료 구축

대상유역 DEM을 도출하기 위해서 1:25,000 수치지형도가 이용되었으며 이 수치지형도를 GIS 도구를 이용하여 등고선을 추출한 후 TIN으로의 변환과정을 거치고 나서, 얻어진 TIN 자료로부터 10m 해상도의 DEM을 도출하였다. 생성된 10m 해상도의 DEM을 기초로 하여 더 낮은 해상도를 갖는 DEM을 생성하였다. 생성된 10m 해상도 DEM을 이용하여 50m DEM과 1km DEM으로의 집단화(aggregation)가 이루어졌으며 대상유역을 구성하는데 이용되었다. 대상 유역에 대해 도출된 50m DEM, 1km DEM, 흐름방향, 하천망을 Fig. 2(a)~(d)에 제시하였다. 안동댐 유역 50m DEM에 의해 도출된 흐름방향 벡터의 경우는 해상도가 너무 높아 그림 상으로는 제시하지 않았다.

침투 및 조도 계수에 관련된 입력자료들은 국가 수자원관리 종합정보시스템 데이터베이스로부터 30m 해

상도로 이루어진, 18개의 토양군으로 분류된 토양종류별 토양 GRID와 Landsat 위성영상 자료로부터 8개의 피복군으로 분류된 2000년도 토지피복 GRID 자료를 활용하였다. 토지피복 GRID의 경우는 1975년부터 2000년까지의 GRID 자료들이 제공(<http://www.wamis.go.kr>) 되고 있으며 본 연구에서는 2000년도 GRID 자료가 이용되었다. 토양과 토지피복 정보를 이용하여 침투매개변수와 조도계수들을 산정하였으며 침투매개변수들의 경우는 Rawls *et al.*(1983)의 연구에서 제시된 결과를 이용하였고, 지표면 조도계수는 Vieux(2004)의 문헌에서 제시된 조도계수 분류를 이용하였다. Fig. 2(e)~(f)는 도출된 투수계수, 습윤전선 흡인수두, 유효공극률, 지표면 조도계수를 나타내고 있다.

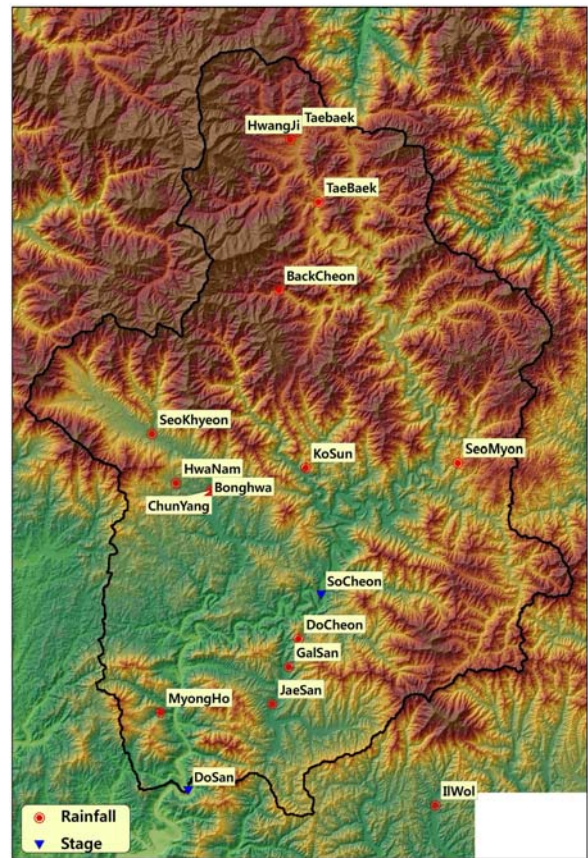


Fig. 1. Andong Dam Basin

2.1.3 흐름분배 알고리즘 적용

앞서 제시한 1km 해상도의 DEM 자료로부터 얻어진 흐름 방향 벡터와 상세 흐름 정보를 담고 있는 50m 해상도 흐름 방향 벡터들을 중첩하여 대상유역의 일부 지역에서 흐름의 분배 양상을 파악하고자 흐름방향 군집화 결과인 Fig. 10을 제시하였다. 적용유역의 표본 지역을 추출하여 1km 해상도의 셀들로 구성되는 3×3 영역을 구성하고 그들에 대한 주흐름 방향과 세부 셀들의

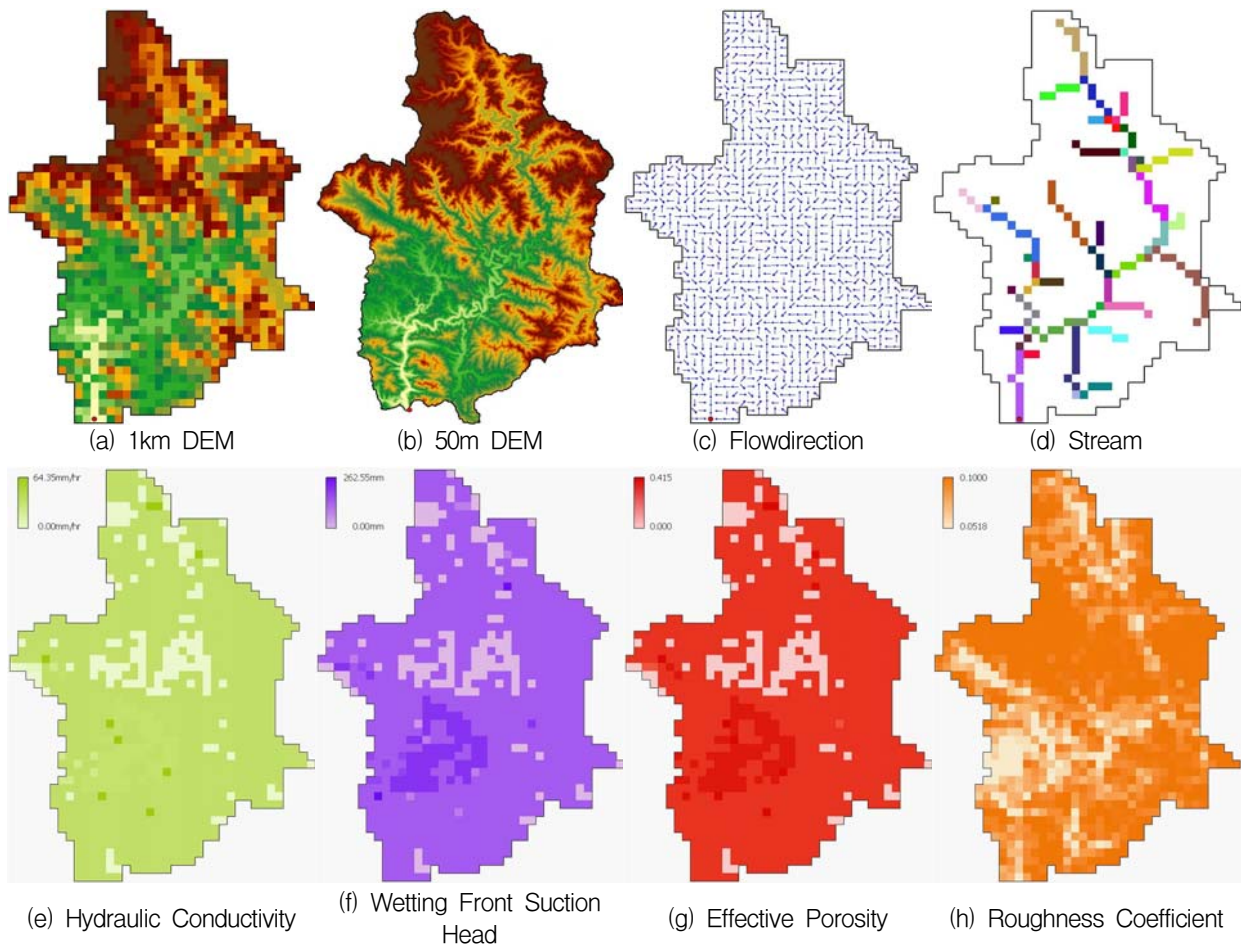


Fig. 2. Model's Input Data(Andong Dam Basin)

흐름 방향들을 표현하였다. 또한 대상유역에서 추출된 지역에 대한 흐름 분배 비율들을 각 셀의 좌표별로 Table 1에 제시하였다. 여기에서 좌표는 1km DEM에서 행과 열의 순서쌍으로 표현되며 좌측 상단 모서리의 좌표를 (1,1)로 하여 아래 방향과 오른쪽 방향으로 증가되는 방식의 좌표이다. 추출된 지역은 좌측 상단 셀의 좌표가 (15,22), 우측 하단 좌표가 (17,24)로 이루어진 3×3(행×열) 정사각형 지역이다. 표에서 음영으로 표현되어진 부분은 1km 해상도의 표고 자료로부터 얻어진 주 흐름 방향을 나타낸다. 고해상도 지형정보로부터 얻을 수 있는 흐름정보를 이용한 흐름 분배 알고리즘을 적용함으로써 일방향 최급구배 인접 셀로의 흐름이 다방향으로의 흐름으로 전이되고 있음을 확인할 수 있다. 심지어 셀 좌표 (15,22)와 (17,22)에 대해서는 저해상도 표고정보로부터 얻어진 주 흐름방향으로의 흐름이 발생하지 않음을 알 수 있다. 이는 저해상도 표고 정보만을 이용하여 흐름 추적을 실시할 경우 흐름 정보의 왜곡이 존재할 수 있다는 사실을 의미한다. 도출된 흐름 분배율을 이용하여 1km 격자에서 계산된 흐름방향으로의 전달유량에 대해 동(E), 남동(SE), 남(SS), 남서(SW),

서(WW), 북서(NW), 북(NN), 북동(NE) 방향에 대해 계산된 흐름 분배율이 곱해져서 각 방향별 유량이 배분된다.

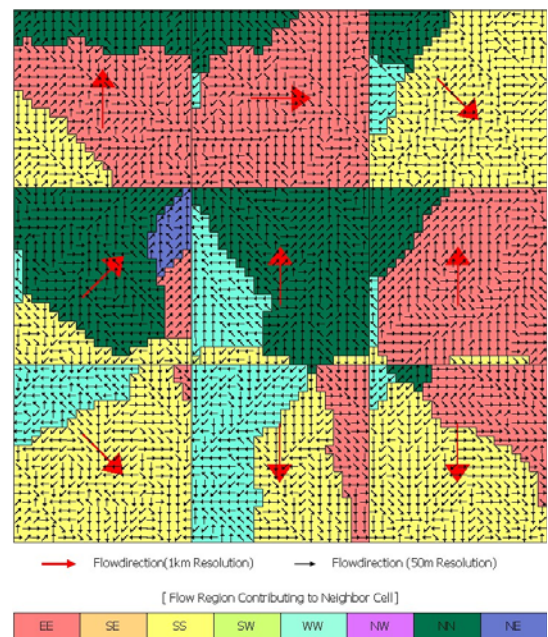


Fig. 3. Flow Grouping for Sampling Region

Table 1. Calculated Ratio of Flow Allocation for Sampling Region

(row, col)	Ratio of Flow Allocation								Sum
	EE	SE	SS	SW	WW	NW	NN	NE	
(15,22)	0.6025	0.0000	0.1875	0.0000	0.0000	0.0000	0.2100	0.0000	1.0
(15,23)	0.8650	0.0000	0.0000	0.0000	0.0100	0.0000	0.1250	0.0000	1.0
(15,24)	0.0000	0.0000	0.8275	0.0000	0.0625	0.0000	0.1100	0.0000	1.0
(16,22)	0.0700	0.0000	0.1925	0.0000	0.0150	0.0000	0.6450	0.0775	1.0
(16,23)	0.0000	0.0000	0.0525	0.0025	0.2275	0.0000	0.7175	0.0000	1.0
(16,24)	0.8125	0.0000	0.0300	0.0000	0.0200	0.0000	0.1375	0.0000	1.0
(17,22)	0.0150	0.0000	0.7850	0.0000	0.2000	0.0000	0.0000	0.0000	1.0
(17,23)	0.1900	0.0000	0.3675	0.0000	0.4400	0.0000	0.0025	0.0000	1.0
(17,24)	0.2975	0.0000	0.6525	0.0000	0.0250	0.0000	0.0250	0.0000	1.0

2.1.4 모형의 적용

전절에서 구축된 모형 입력 자료들을 기반으로 2004년 6월 19일 04시에서 2004년 6월 21일 12시 사이에 발생한 강우사상에 대하여 매개변수 보정을 실시하였다. 강우 입력자료는 안동댐 유역에 대해서 2004년 이용 가능한 우량계 관측자료를 이용하였다. 지점 우량자료들을 분포형 강우-유출 모형의 입력자료로 이용하기 위해서 역거리 제곱(RDS, Reciprocal Distance Squared) 방법을 적용하여 분포형 강우자료로 변환하였다. 매개변수 보정을 위하여 침투관련 매개변수와 지표면 조도계수를 시행착오법을 통해 적용하였다. Fig. 4는 도출된 유출수문곡선과 관측 결과를 비교한 것이다.

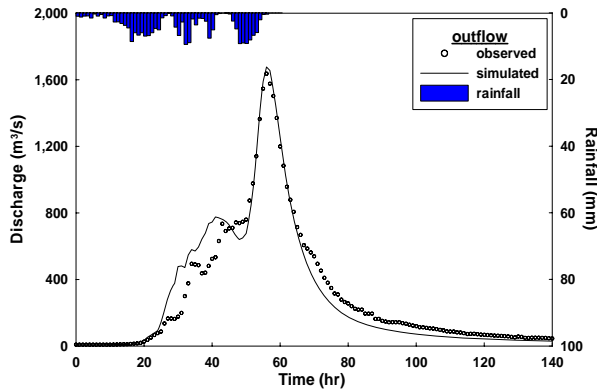


Fig. 4. Outflow Hydrograph(Event 2004.06)

2004년 6월 호우사상을 이용하여 보정된 매개변수들을 이용하여 2006년 7월 25일에서 2006년 7월 29일 사이에 발생한 호우사상에 모형을 적용하였다. 이용된 강우자료는 지점 우량계 자료이며 분포형 강우로의 변환을 위해 RDS 방법을 적용하였다. 모의결과를 관측결과와 비교하여 Fig. 5에 제시하였으며 수문곡선의 양상과 첨두가 매우 정확하게 모의되었음을 확인할 수 있었다.

관측결과에 대해 모의된 결과를 제시해보면 첨두유출량은 1,153m³/s(-5m³/s), 첨두 발생시각은 87hr(동일), 유량편차는 최대 -145m³/s, 평균 -5.60m³/s, RMSE(Root Mean Squared Error)는 32.08m³/s로 나타났다.

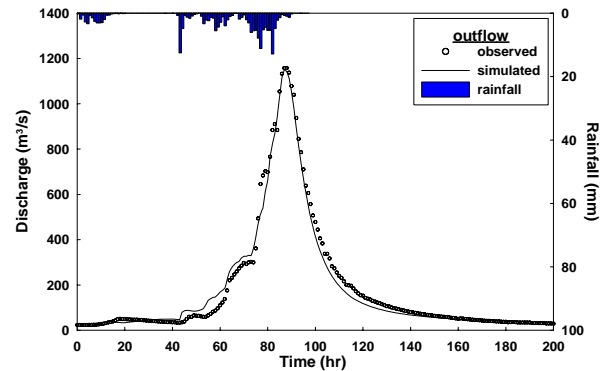


Fig. 5. Outflow Hydrograph(Event 2006.07)

2.2 남강댐 유역에 대한 적용

2.2.1 대상유역

남강댐 유역은 행정구역상 경상남도와 전라북도 일부를 포함하고 있으며 서쪽은 섬진강 수계와 인접해 있으며, 낙동강 하류부로 유입하는 남강 상류에 위치한 유역으로 유역 면적 약 2,293km², 유역 평균표고 EL. 426m, 유역평균경사 35.36%이며 연평균 강수량 1,417mm를 가지며 대부분 하계에 집중된다. Fig. 6은 남강댐 유역내에 위치한 강우와 수위 관측소의 위치를 나타내고 있으며 본 연구에서 개발한 모형을 적용한 남강댐 유역내 3개 소유역을 나타내고 있다. 3개 소유역의 분할 위치는 남강댐 유역 북서부를 포함하고 있는 산청관측소 지점, 동부의 신안수위관측소 지점, 남부의 창촌수위관측소 지점을 기준으로 하였으며, 각각의 관측소 기준 유역 면적은 산청관측소 1,133km², 신안관측소 412km², 창촌관측소 335km²이다.

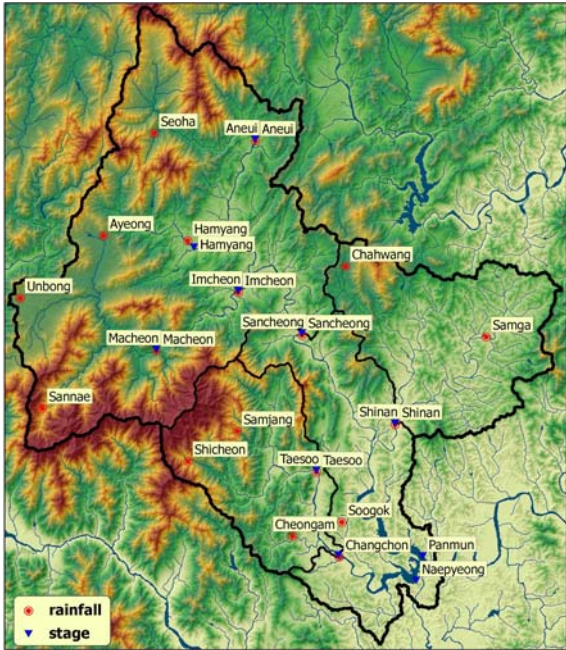


Fig. 6. Namgang Dam Basin

2.2.2 입력자료 구축

남강댐 유역에 대한 적용을 위해 안동댐 유역에 대한 적용과 같은 방법을 통하여 입력자료들이 구축되었으며 Fig. 7에 제시하였다.

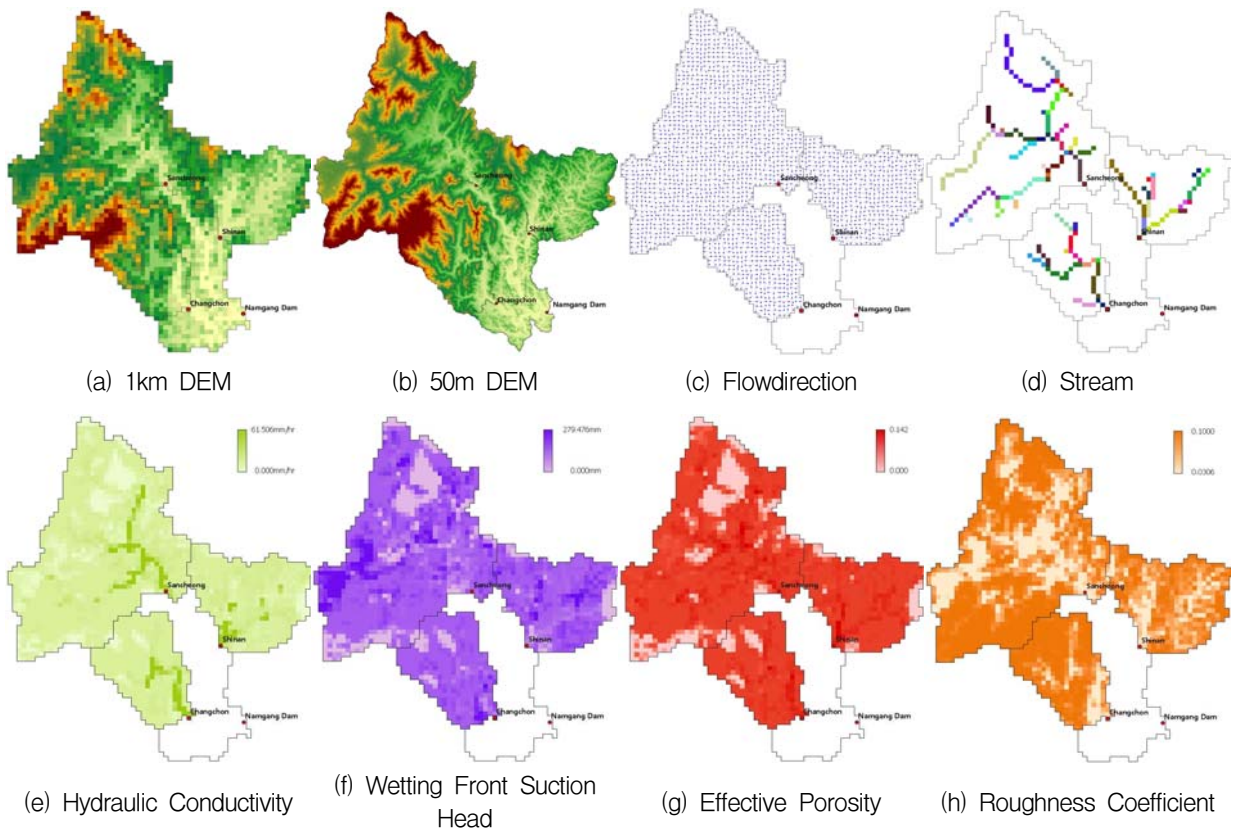


Fig. 7. Model's Input Data(Namgang Dam Basin)

2.2.3 모형의 적용

남강댐 유역에 대한 매개변수 보정을 위해 선정된 호우사상은 선정 호우 사상은 2002년 8월 30일 15:30시경 한반도에 상륙한 태풍 루사이며 당시 레이더 관측자료(1km 해상도)를 이용하였다. 산청관측소 지점의 경우 모의시작 후 31시간부터 관측자료에 이상치가 나타나 모의 전반부에 대해서만 보정이 수행되었다. 보정된 결과를 산청, 신안, 창춘관측소별로 관측과 비교하여 Fig. 8에 제시하였다.

태풍 루사(2002년)에 적용하여 보정된 매개변수들을 이용하여 태풍 매미(2003년)에 대해 모형을 적용하였다. 이용된 강우자료는 보정의 경우와 마찬가지로 분포형 레이더 관측 강우자료를 이용하였다. 모의 결과를 관측 유량수문곡선 비교하여 Fig. 9에 제시하였으며, 남강댐 유역 3개 관측지점에 대해 도출된 수문곡선이 유역 수문반응 양상을 양호하게 묘사하고 있음을 알 수 있다. 모의된 결과를 관측과 비교하여 제시해 보면, 산청관측소 지점의 경우, 첨두유출량은 $5,385\text{m}^3/\text{s} (+15\text{m}^3/\text{s})$, 첨두 발생시각은 24hr(동일), 유량 편차는 최대 $1,215\text{m}^3/\text{s}$, 평균 $-27.63\text{m}^3/\text{s}$, RMSE는 $305.39\text{m}^3/\text{s}$ 로 나타났다. 신안관측소 지점의 경우, 첨두유출량은 $2,448\text{m}^3/\text{s} (+3\text{m}^3/\text{s})$, 첨두 발생시각은 23hr(동일), 유량 편차는 최

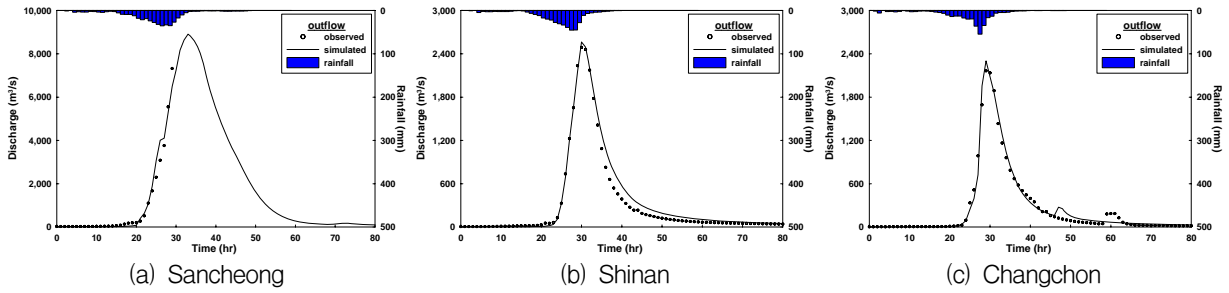


Fig. 8. Outflow Hydrograph(Typhoon Rusa, 2002)

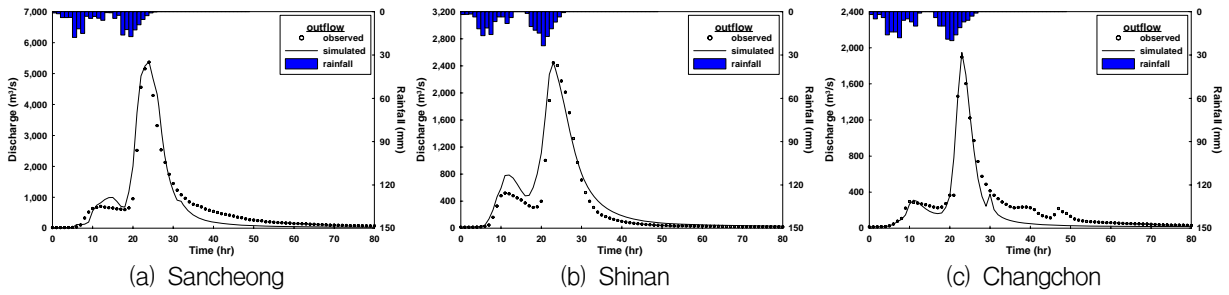


Fig. 9. Outflow Hydrograph(Typhoon Maemi, 2003)

대 $653\text{m}^3/\text{s}$, 평균 $70.63\text{m}^3/\text{s}$, RMSE는 $152.96\text{m}^3/\text{s}$ 로 나타났다. 창춘관측소 지점의 경우, 첨두유출량은 $1,948\text{m}^3/\text{s}(+50\text{m}^3/\text{s})$, 첨두 발생시각은 23hr(동일), 유량 편차는 최대 $413\text{m}^3/\text{s}$, 평균 $-56.09\text{m}^3/\text{s}$, RMSE는 $102.87\text{m}^3/\text{s}$ 로 나타났다.

3. 실시간 보정 알고리즘의 적용

앞서 흐름분배 알고리즘을 이용한 분포형 강우-유출 모형을 통해 검증된바 있는 안동댐 유역과 남강댐 유역(산청관측소 지점)에 대해 본 연구에서 개발한 실시간 보정 알고리즘을 적용하여 실시간 강우-유출 모의를 수행하였다. 기왕의 자료를 이용하고 있기 때문에 실시간이라는 용어의 사용에는 무리가 있으나 강우자료와 유량자료를 현재 실시간으로 획득하고 있다는 전제하에서

모의를 수행하였다. 이 때 실시간 보정 알고리즘 적용 시 두 유역 모두 허용 유량비는 1%, 허용 유량 차이는 $5\text{m}^3/\text{s}$ 로 설정하여 모의를 수행하였다.

Figs. 10 and 11은 실시간 보정 알고리즘을 적용하여 갱신된 유출수문곡선의 양상을 관측과 비교하여 제시한 것이다. 그림에서 제시된 바와 같이 모의된 결과가 관측과 매우 높은 합치도를 나타내고 있음을 알 수 있다. 실시간 보정 알고리즘의 적용 결과를 관측과 비교해 보면 안동댐 유역의 경우, 첨두유출량은 $1,169\text{m}^3/\text{s}(+11\text{m}^3/\text{s})$, 첨두발생시각은 87hr(동일), 유출량 편차는 최대 $-108\text{m}^3/\text{s}$, 평균 $-0.82\text{m}^3/\text{s}$, RMSE는 $16.73\text{m}^3/\text{s}$ 로 나타났다. 남강댐 유역(산청관측소 지점)의 경우, 첨두유출량은 $5,328\text{m}^3/\text{s}(-42\text{m}^3/\text{s})$, 첨두발생시각은 24hr(동일), 유출량 편차는 최대 $580\text{m}^3/\text{s}$, 평균 $0.92\text{m}^3/\text{s}$, RMSE는 $130.23\text{m}^3/\text{s}$ 로 나타났다.

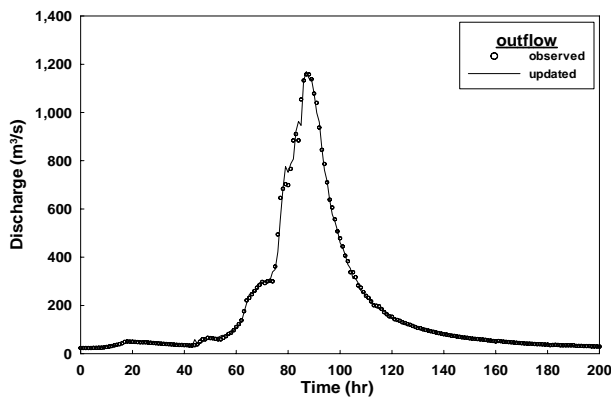


Fig. 10. Outflow Hydrograph(Dosan)

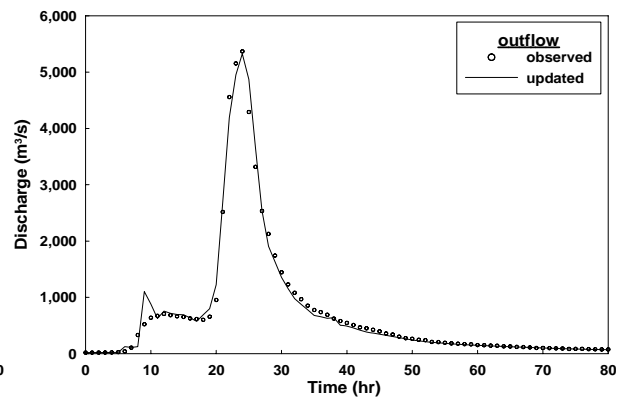


Fig. 11. Outflow Hydrograph(Sancheong)

4.1 다방향 흐름 분배 알고리즘의 적용성 고찰

4.1.1 정확성 검토

모형 수행의 정확도의 검토를 위해 다방향 흐름분배 알고리즘의 적용과 미적용 결과를 비교하였다. 비교 결과를 Fig. 12에 제시하였다(그림에서 MDFA는 다방향 흐름 분배 알고리즘을 나타낸다).

또한 알고리즘 적용·미적용 결과를 침투유출량, 침투 발생시각, 최대편차, 평균편차, RMSE에 대해 Table 2에 제시하였다. 표에 제시된 바와 같이 흐름분배 알고리즘을 적용하지 않은 결과가 침투유출량을 과대추정하고 있음을 알 수 있으며, 모형의 적합도 평가를 위해 제시된 최대편차, 평균편차, RMSE에서도 흐름분배 알고리즘을 적용한 경우 더 향상된 결과가 도출되었다. 침투발생 시각의 경우는 적용과 미적용 모두 동일한 결과가 도출됨이 확인되었다. 적합도의 평가에서 이용된 RMSE의 경우, 흐름분배 알고리즘 적용시 안동댐 유역 적용에서 41.01%, 산청유역에서 27.56%, 신안유역에서 36.26%, 장춘유역에서 24.60% 정도의 향상된 모의 수행 적합도를 도출하였다.

4.1.2 계산소요시간 검토

본 연구에서 개발한 흐름분배 알고리즘을 이용할 경우 계산 소요시간 단축을 검토하기 위해서 상세지형정

보를 직접 이용하여 모의할 경우와 계산 소요시간을 간접적으로 비교하였다. 계산기의 연산처리 및 기억장치 제한으로 고해상도 지형정보를 직접 이용하여 강우-유출 모의를 수행할 수 없었기 때문에 계산 소요시간 검토를 위한 방법론은 저해상도 지형정보를 이용하여 모의할 경우 소요시간에 대해 고해상도 지형정보를 이용할 경우 추가적인 계산회수를 반영하여 계산 소요시간을 도출하는 방식을 채택하였다.

강우-유출 모의에서 계산 소요시간은 모의반복 회수와 관련이 있으며 모의반복 회수는 전체모의기간을 계산시간간격으로 나눈 값으로 생각할 수 있다. 특히 분포형 강우-유출 모형의 경우에는 계산시간간격 내에서 계산이 수행될 격자의 수와 계산에 참여하는 수문과정의 수도 많은 영향을 받게 된다. 그리고 물리 기반 수학적식의 유한 차분 표현으로부터 유발되는 수치적 불안정성들을 방지하기 위해서, Courant 수는 1보다 같거나 작아야 한다(Fletcher, 1987). Courant 수는 dt/dx 의 함수로서 계산되기 때문에, dx 가 감소하면 dt 또한 감소가 필요하다. 여기서 dt 는 계산 시간간격을 의미하며 dx 는 그리드 셀 크기를 의미한다. 그러므로 고해상도 지형자료를 이용하게 될 경우 더 짧은 계산시간 간격이 요구된다.

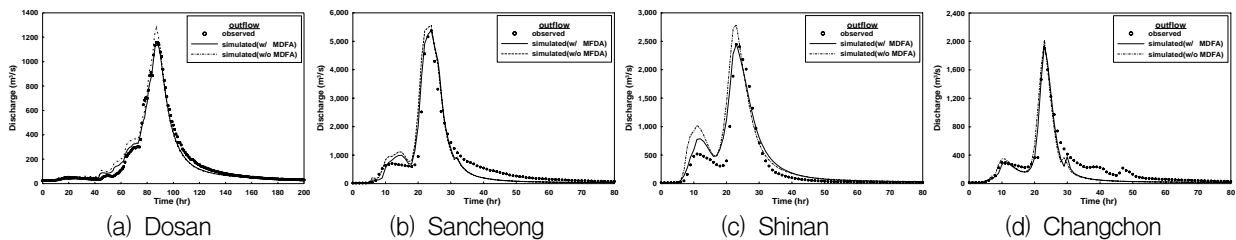


Fig. 12. Comparison of Results w/ and w/o MDFA

Table 2. Comparison of Results w/ and w/o MDFA

Classification		Peak Outflow (m ³ /s)	Time to Peak (hr)	Max. Deviation (m ³ /s)	Mean Deviation (m ³ /s)	RMSE (m ³ /s)
Dosan (2006.07)	Observation	1,158	87	-	-	-
	w/ MDFA	1,153	87	-145	-5.60	32.08
	w/o MDFA	1,273	87	156	6.37	45.25
Sancheong (Maemi)	Observation	5,370	24	-	-	-
	w/ MDFA	5,385	24	1,215	-27.63	305.39
	w/o MDFA	5,552	24	1,838	14.74	386.50
Shinan (Maemi)	Observation	2,445	23	-	-	-
	w/ MDFA	2,448	23	653	70.63	152.96
	w/o MDFA	2,791	23	1,101	107.67	249.08
Changchon (Maemi)	Observation	1,898	23	-	-	-
	w/ MDFA	1,948	23	413	-56.09	102.87
	w/o MDFA	2,021	23	698	-47.94	128.18

본 연구에서 흐름분배 알고리즘의 적용을 위해 이용된 입력자료의 해상도는 저해상도의 경우 1km, 고해상도의 경우 50m가 사용되었다. 단적으로 1km 해상도의 자료를 이용할 경우와 50m 해상도 자료를 이용할 경우 동일한 시간 간격 내에서 계산수행 회수는 50m 지형정보를 이용할 경우가 해상도의 측면에서만 볼 경우 400배(20×20)정도가 요구된다.

안동댐 유역의 적용에서는 계산시간간격을 60초로 설정하였으며 전체모의기간은 200hr이었다. 그러므로 전체모의를 위해서 계산시간만의 반복회수로 볼 때 12,000회의 반복이 이루어졌으며 매 회 계산되어야 할 계산 격자수가 1,100개였으므로 총 모의반복 회수는 12,000×1,100=13,200,000이다. 이 경우 계산 소요시간은 데스크탑 컴퓨터(Intel Core 2 Duo 6700 CPU 2.66 GHz)에서 19초가 소요되었다(흐름분배 알고리즘 미적용). 고해상도 지형정보를 그대로 이용할 경우 400배의 반복회수가 더 요구되기 때문에 계산 소요시간도 400배 정도가 더 소요될 것이며 단순 수치연산에 의해 400×19초=7,600초, 약 2.11시간(127분) 정도의 계산시간이 걸릴 것으로 판단된다. 도출된 계산 소요시간에는 계산격자의 해상도 증가에 의해 요구되는 수치안정성을 위한 계산시간간격의 감소는 고려하지 못하였다. 그러므로 도출된 소요시간보다 훨씬 더 증가된 계산 소요시간이 요구될 것으로 판단된다. 흐름분배 알고리즘을 적용하였을 경우에는 지표면 흐름 계산시 유량할당 과정이 포함되었기 때문에 31초의 계산시간이 소요되었다. 이를 컴퓨터 계산 소요시간 대 실제 시간의 비로 표현하면 흐름분배 알고리즘을 적용한 경우는

0.000043:1, 고해상도 지형정보를 그대로 이용할 경우는 1:0.01056로 확인한 차이를 보이고 있음을 알 수 있다. 그러나 이러한 결과는 입력자료 해상도의 비에 의해 계산된 시간일 뿐이며 수치 안정성확보를 위한 계산시간간격의 감소 및 계산이 필요한 수문과정의 수에 따라 더 증가된 계산 소요시간이 필요할 것으로 판단된다. 위에서 언급된 과정을 통해 50m 입력자료 이용시 계산 소요시간과 흐름분배알고리즘을 적용하였을 경우 추정된 계산 소요시간을 본 연구에서 적용한 유역에 대해 Table 3에 제시하였다.

4.2 실시간 보정 알고리즘의 적용성 고찰

개발된 실시간 유출 보정 알고리즘의 적용성 평가를 위해서 비교적 유역 면적이 넓은 안동댐 유역과 남강댐 유역의 산청유역에 대한 보정 전·후의 결과를 비교해 보았다. 실시간 유출 보정 알고리즘의 적용을 통한 모형의 적용성 검토를 위해 안동댐 유역과 남강댐 유역의 산청유역에 대한 실시간 보정 결과와 보정전 결과를 관측값과 함께 Fig. 13에 제시하였다.

그림에서 나타난 바와 같이 보정된 수문곡선이 관측 수문곡선에 향상된 합치도를 나타내고 있으며, 특히 보정전의 결과에서 유량수문곡선의 상승부와 하강부에서 관측을 재현할 수 없었던 문제점들이 대폭 개선되고 있음을 알 수 있었다.

Table 4는 실시간 보정 알고리즘의 적용 전·후의 결과를 첨두유출량, 첨두발생시각, 최대유출량편차, 평균 유출량편차, RMSE로 제시한 것이다. 수행 결과에서 제시된 바와 같이 실시간 유출 갱신 알고리즘의 수행의

Table 3. Total Simulation Time

Classification	Dosan	Sancheong	Shinan	Changchon
w/ MDFA(1km)	31sec	27sec	15sec	9sec
w/o MDFA(50m)	≥7,600sec	≥8,800sec	≥4,400sec	≥3,200sec

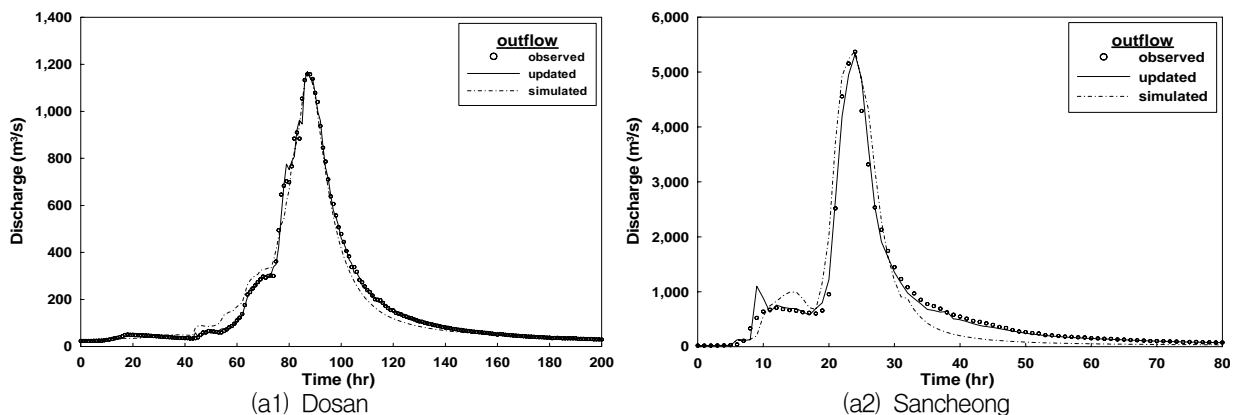


Fig. 13. Comparison of Results w/ and w/o Real-Time Updating Algorithm

Table 4. Comparison of Results w/ and w/o Real-Time Updating Algorithm

Classification		Peak Outflow (m ³ /s)	Time to Peak (hr)	Max. Devation (m ³ /s)	Mean Deviation (m ³ /s)	RMSE (m ³ /s)
Dosan (2006.07)	Observation	1,158	87	-	-	-
	w/ updating	1,169	87	-108	-0.82	16.73
	w/o updating	1,153	87	-145	-5.60	32.08
Sancheong (Maemi)	Observation	5,370	24	-	-	-
	w/ updating	5,328	24	579	0.92	130.23
	w/o updating	5,385	24	1,215	-27.63	305.39

적합도 측면에서 매우 향상된 결과가 도출되었다. 안동댐 유역의 적용의 경우, 침투유출량은 보정 전에 비해 6m³/s(보정전 : -5m³/s, 보정후 : +11m³/s)정도 더 큰 관측과의 편차를 보이고 있으며 침투발생시각은 동일한 결과가 도출되었다. 유출량의 최대 편차는 40m³/s로 감소되었고, 유출량 평균편차는 4.78m³/s만큼 감소되었다. 모형 수행의 적합도를 나타내는 RMSE는 15.35m³/s 감소되어 약 1.92배의 적합도 향상이 이루어졌다. 산청 유역의 경우, 침투값은 보정 전에 비해 27m³/s(보정전 : -15m³/s, 보정후 : +42m³/s) 정도 더 큰 차이를 보이고 있으며 발생시각은 24hr으로 동일하였다. 유출량의 최대 편차는 636m³/s 정도 감소되었고, 유출량 평균편차는 26.71m³/s만큼 감소되었다. 모형 수행의 적합도를 나타내는 RMSE는 130.23m³/s 감소되어 약 2.44배의 적합도 향상이 이루어졌다. 결과적으로 산청유역의 경우가 더 큰 적합도 향상을 보이고 있다. 이는 안동댐 유역의 적용에서는 보정전의 결과도 상당한 적합도를 나타내고 있기 때문인 것으로 판단되며, 산청유역의 경우 244% 정도의 적합도 향상은 이루어지고 있으나 초기 수문곡선 상승부에서 적절하지 못한 모의결과가 도출되었다. 그러므로 실시간 유출 보정 알고리즘의 적용을 통해 모형의 수행성을 좀 더 향상시키기 위해서는 유역 매개변수 보정의 개선이 선행되어야 할 것으로 판단된다.

4.3 모형의 적합도 평가

본 연구에서는 다방향 흐름분배 알고리즘과 실시간 보정 알고리즘을 이용한 분포형 강우-유출 모형을 개발하였다. 다방향 흐름분배 알고리즘을 개발하여 지표면 흐름 양상의 물리성 확보와 계산 소요시간 단축을 목표로 하였고 실시간 유출 보정 알고리즘을 개발하여 모형 정확도의 향상을 목표로 하였다. 유역으로의 모형 적용을 통해 강우-유출 반응의 향상된 재현이 이루어지고 있음이 확인되었으며 계산 소요시간에 대한 검토도 수행되었다. 본 절에서는 앞서 언급된 결과들을 종합적으로 정리하고 모형 수행의 적합도를 몇가지 모형수행 적

합도 산정 방법에 의해 정리하고자 한다.

정량적인 모형 적합도의 판정을 위해서 모형 적합도 판정에 널리 이용되는 값인 편의(BIAS), 평균절대오차(Mean Absoute Error, MAE), 제곱근 평균 제곱 오차(Root Mean Square Error, RMSE), 상관계수(Correlation Coefficient, CC), Nash-Sutcliffe 효율 계수(Nash-Sutcliffe Efficiency Coefficient, NSEC, Nash and Sutcliffe, 1970)를 Table 5에 제시하였다. 표에서는 모형의 적합도의 비교를 위해 일방향 흐름 해석에 의한 강우-유출 모의 결과를 추가적으로 제시하였다.

표에서 제시된 바와 같이 일방향 지표면 흐름 해석에 의한 경우보다 다방향 흐름분배 알고리즘을 적용한 경우가 제곱근 평균 제곱 오차가 감소하고 있음을 알 수 있으며, 상관계수 및 Nash-Sutcliffe 효율 계수는 증가하고 있음을 알 수 있다. 또한 실시간 유출 보정 알고리즘을 적용한 경우는 다방향 흐름 분배 알고리즘만을 적용한 경우보다 더 낮은 제곱근 평균 제곱오차와 더 높은 상관계수 및 더 높은 Nash-Sutcliffe 효율 계수를 나타내고 있음을 알 수 있다. 본 연구에서 개발된 모형은 관측과 모의간 상관계수는 약 0.97 이상으로 매우 높은 값을 보이고 있으며, Nash-Sutcliffe 효율 계수는 최소 0.91로 1에 매우 근접한 값을 보이고 있다. 모형의 결과가 관측에 매우 높은 상관도를 보이고 있음을 알 수 있으며 매우 정확한 예측이 이루어진 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구(II)에서는 이전의 연구(I)에서 개발된 다방향 흐름분배 알고리즘과 실시간 보정 알고리즘의 적용성 검토를 위해 안동댐 유역과 남강댐 유역에 대해 분포형 강우-유출 모의를 수행하였다. 다방향 흐름 분배 알고리즘의 적용을 위해서 기본 입력자료의 해상도는 1km, 상세 흐름 정보는 50m 해상도로 구성하였다. 강우자료는 안동댐 유역의 경우 2004년 7월과 2006년 6월

Table 5. Performance of Developed Algorithms

Station	Event	BIAS (m ³ /s)	MAE (m ³ /s)	RMSE (m ³ /s)	CC	NSEC
Multi-Directional Flow Allocation Algorithm(X) and Real-Time Updating Algorithm(X)						
Dosan	2006.07	6.37	31.47	45.25	0.9867	0.9709
Sancheong	Maemi	14.74	243.85	386.50	0.9660	0.8811
Shinan		107.67	137.14	249.08	0.9366	0.8075
Changchon		-47.94	83.77	128.18	0.9480	0.8617
Multi-Directional Flow Allocation Algorithm(O) and Real-Time Updating Algorithm(X)						
Dosan	2004.06	-4.37	57.01	82.94	0.9779	0.9511
	2006.07	-5.60	22.34	32.08	0.9935	0.9854
Sancheong	Rusa	-22.57	143.60	286.81	0.9869	0.9737
Shinan		39.65	49.46	78.71	0.9939	0.9820
Changchon		8.13	39.07	66.35	0.9915	0.9811
Sancheong	Maemi	-27.63	207.56	305.39	0.9771	0.9258
Shinan		70.63	94.26	152.96	0.9717	0.9274
Changchon		-56.09	72.19	102.87	0.9714	0.9109
Multi-Directional Flow Allocation Algorithm(O) and Real-Time Updating Algorithm(O)						
Dosan	2006.07	-0.82	6.30	16.73	0.9980	0.9960
Sancheong	Maemi	0.92	66.04	130.23	0.9934	0.9865

발생한 호우이며 남강댐 유역은 2002년 태풍 루사와 2003년 태풍 매미를 적용하였다. 본 연구의 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 다방향 분배 알고리즘과 실시간 보정 알고리즘을 적용하여 안동댐과 남강댐 유역에 대해 분포형 강우-유출 모의를 수행하였다. 보정된 매개변수를 이용한 모의를 통해 두 유역에서 모두 높은 재현성을 갖는 결과가 도출되었다.
- 2) 실시간 보정 알고리즘을 적용하여 안동댐과 남강댐 유역에 대해 실시간 유출 모의를 수행한 결과 다방향 흐름 분배 알고리즘만을 이용한 경우보다 진보된 재현성을 갖는 결과가 도출되었다.
- 3) 다방향 흐름 분배 알고리즘을 적용한 경우와 적용하지 않은 경우를 침투유출량, 침투발생시각, 최대편차, 평균편차, RMSE으로 비교해 봄으로써 향상된 정확도가 확인되었으며, 고해상도 DEM을 직접 이용하여 모의를 수행할 경우와의 간접적인 비교를 통해 계산효율성(계산소요시간)의 향상을 확인하였다.
- 4) 실시간 보정 알고리즘의 적용과 미적용 결과를 침투유출량, 침투발생시각, 최대편차, 평균편차, RMSE로 제시하여 비교함으로써 흐름 분배 알고리즘만을 적용한 경우 보다 진보된 정확성을 확인하였다.

5) 본 연구에서 개발한 모형의 수행도 검토를 위해 BIAS, RMSE, MAE, CC, NSEC를 제시하였으며 실제 유역수문반응과 매우 높은 상관도를 갖는 정확한 모형 수행이 이루어진 것으로 판단되었다.

본 연구에서 개발한 다방향 흐름 분배 알고리즘과 실시간 보정 알고리즘을 이용함으로써 신속하고 정확성을 갖는 물리적인 수문반응의 예측과 수문 운영 실무의 분포형 강우-유출 모형의 적용성이 향상될 것으로 판단된다. 추후 매개변수 평활화와 수문모형 자체의 기능 향상에 대한 연구가 추가되어야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 연구는 소방방재청 자연재해저감기술개발사업(과제명:내배수 침수재해 저감기술개발) 연구비 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고 문헌

- 고덕구 (1989). **소유역의 장기유출 예측을 위한 모의발생 수문모형의 개발**. 박사학위논문, 서울대학교.
- 김문모, 이정우, 이재웅 (2007). “격자기반의 도시유역 지표면 유출모형의 개발 및 적용.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제40권, 제1호,

- pp. 25-38.
- 김성준 (1998). "격자기반의 운동과 강우유출모형 개발(I) - 이론 및 모형 -." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제31권, 제3호, pp. 303-308.
- 김성준, 채효석, 신사철 (1998). "격자기반의 운동과 강우유출모형 개발(II) - 적용 예(연천댐 유역을 대상으로) -." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제31권, 제3호, pp. 309-315.
- 박진혁, 강부식 (2006). "댐 유역 홍수예측을 위한 GIS기반의 분포형 모형과 집중형 모형의 유출해석 비교." **한국지리정보학회지**, 한국지리정보학회, 제9권, 제3호, pp. 171-182.
- 박진혁, 강부식, 이근상, 이을래 (2007). "레이더강우와 Vflo모형을 이용한 남강댐 홍수유출해석." **한국지리정보학회지**, 한국지리정보학회, 10권, 3호, pp. 13-21.
- 신철균, 조효섭, 정관수, 김재한 (2004). "저류함수기법을 이용한 격자기반의 강우-유출 모형의 개발." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제37권, 제11호, pp. 969-978.
- 최윤석, 김경탁, 이진희 (2008). "유한체적법을 이용한 격자기반의 분포형 강우-유출 모형 개발." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제41권, 제9호, pp. 895-905.
- 최현상, 한건연 (2004a). "GIS와 불확실도 해석기법을 이용한 분포형 강우-유출 모형의 개발 (I) - 이론 및 모형의 개발 -." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제37권, 제4호, pp. 329-339.
- 최현상, 한건연 (2004b). "GIS와 불확실도 해석기법을 이용한 분포형 강우-유출 모형의 개발 (II) - 적용 및 분석 -." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제37권, 제4호, pp. 341-352.
- 홍준범, 김병식, 윤석영 (2006). "VfloTM 모형을 이용한 물리기반 분포형 수문모형의 정확성 평가." **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제26권, 제6B호, pp. 613-622.
- Abbott, M.B., Bathurst, J.C., Cunhem, J.A., O'Connell, P.E., and Rasmussen, J. (1986). "An introduction to European Hydrological System-Systeme Hydrologique Europeen, (SHE): Structure of a physically-based distributed modeling system." *Journal of Hydrology*, Vol. 87, pp. 61-77.
- Beven, K. (2001). *Rainfall-runoff modelling - The Primer*. Willey, Chichester.
- Downer, C.W. and Ogden, F.L. (2002). *GSSHA User's Manual, Gridded Surface-Subsurface Hydrologic Analysis, Version 1.43 for WMS 6.1*, EDRL Technical Report, Engineering Research and Development Center, U.S. Army Corps of Engineers, Vicksburg.
- Fletcher, C.A.L. (1987). *Computational techniques for fluid dynamics 1. Fundamental and general techniques*. from the Springer Series in Computational Physics, Slowinski, R., Holt, M., Hut, P., Keller, H.B., Killeen, J., Orszag, S.A., and Rusanow, V.V.(Eds.), Second Edition, Springer-Verlag.
- Julien, P.Y. and Saghafian, B. (1991). *CASC2D User's manual, a two-dimensional watershed rainfall-runoff model*. Center for Geosciences - Hydrologic Modeling Group, Colorado State University(CER90-91PYJ-BS-12).
- Nash, J.E. and Sutcliffe, J.V. (1970). "River flow forecasting through conceptual models. Part 1 - A discussion of principles." *Journal of Hydrology*, Vol. 10, pp. 282-290.
- Ogden, F.L. (1997). *Premier: Using WMS for CASC2D Data Development*. Brigham Young University, Provo, UT.
- Rawls, W.J., Brakensiek, D.L., and Miller, N. (1983). "Green-Ampt infiltration parameters from soils data." *J. Hydraul. Div.*, ASCE, Vol. 109, No. 1, pp. 62-70.
- Rojas, R. (2002). *GIS-based upland erosion modeling, geovisualization and grid size effects on erosion simulations with CASC2D-SED*. PhD thesis, Dept. of Civil Engineering, Colorado State University, Fort Collins, Colorado.
- Vieux, B.E. and Vieux, J.E. (2002). "VfloTM: a real-time distributed hydrologic model." *Proceedings of 2nd Federal Interagency Hydrologic Modeling Conference*(Parer on CD-ROM).
- Vieux, B.E. (2004). *Distributed Hydrologic Modeling Using GIS*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands.

(논문번호:08-92/접수:2008.08.22/심사완료:2009.03.02)