

홍수예측을 위한 분포형모형과 집중형모형의 유출해석 비교

Comparison of Runoff Analysis Between Distributed Model and Lumped Model for Flood Forecast

박진혁*, 이을래**, 김태국***, 고익환****

Jin-Hyeog Park, Eul-Rae LEE, Tae-Kook KIM, Ik-Hwan KO

요 지

본 연구에서는 격자기반의 레이더강우 등과 같은 향후 제공될 분포형 강수를 활용하기 위해 국내 유역에서 GIS와 연계한 물리적 기반의 수문학적 분포형모형의 적용성을 검토하고, 향후 저수지 유입량 예측을 위해 수자원공사 현업에서 실시간 물관리에 사용하고 있는 개념적기반의 집중형모형인 Kwater홍수분석모형과 실시간 홍수조절을 목적으로 미국 오클라호마대학의 백스터교 수측에서 개발된 물리적기반의 분포형모형인 Vflo모형을 이용하여 낙동강권역의 남강댐유역을 대상으로 유출해석을 수행하여 양 모형의 구조적인 장단점 등을 비교분석하였다.

입력이 되는 분포형 강우는 지상관측강우, 레이더추정강우를 적용하였고, GIS수문매개변수를 ArcGIS 및 ArcView를 활용하여 DEM, 토지피복도, 토양도 등의 기본 GIS자료들로 부터 추출, 물리적기반의 분포형모형(Vflo)의 입력인자로 사용하여 모형의 초기설정을 향상시켰다. 모형에서 계산된 방법이 물리성을 구비하여 타당한 매개변수의 값으로 현실의 유출량을 재현할 수 있는지를 실제 유역 규모의 스케일로 검증하고자 하였으며 홍수기 댐유역의 유출모의를 위한 모형의 장단점을 파악하고 분포형모형의 향후 실용화 가능성을 검토하였다.

모형 수행 결과, 모형보정은 물리적기반의 분포형모형인 Vflo모형이 집중형모형인 Kwater모형에 비하여 GIS를 이용하여 지형공간 자료와 토양, 토지피복과 같은 물리적 특성을 사용한 모형의 초기 설정을 향상시킴에 따라 평균적으로 첨두유량에서 ±254 cms, 유출량에서 ±14 mm, 첨두도달시간차에서 ±15분 이내의 정확도 향상을 가져왔다. 물리적 기반의 분포형모형인 Vflo모형은 남강댐유역 대다수 관측소에서 별다른 매개변수의 보정없이도 합리적이고 유용한 결과를 보여주었다. 이러한 결과는 GIS와 연계한 물리적기반의 분포형모형이 향후 돌발홍수나 계릴라성 집중호우 등의 악기상에 대응하여 레이더 등의 정확하고 신뢰할만한 강우예측이 입력자료로 생성되었을 때 다목적댐 저수지 운영에 있어서 리드타임을 충분히 확보하여 안정적이고 예측가능한 홍수조절을 수행할 수 있는 가능성을 보여주었다고 사료된다.

핵심용어 : 분포형모형, 집중형모형, 물리적기반, 레이더추정강우, GIS

1. 서 론

홍수기 다목적댐의 운영을 위해서는 홍수조절용량을 확보하는 것은 물론 홍수시 댐유역 상하류 및 저수지 수문상황을 신속히 파악하고 예측하여 댐의 수문조작 의사결정을 내리는데 필요한 정

* 정회원 · 한국수자원공사 물관리센터 선임연구원 · E-mail : park5103@kwater.or.kr

** 정회원 · 한국수자원공사 물관리센터 선임연구원 · E-mail : erlee@kwater.or.kr

*** 정회원 · 한국수자원공사 물관리센터 선임위원 · E-mail : tkim@kwater.or.kr

**** 정회원 · 한국수자원공사 수자원연구원 소장 · E-mail : ihko@kwater.or.kr

보가 필요하다. 홍수조절을 위한 댐방류량의 결정은 댐 상류 유입량을 산정하여 이에 따른 댐 저수지 수위를 예측하고, 저수지 운영수위별 댐하류 지류유입에 따른 댐 수계 본류의 수위변화 등을 고려하여 이루어지기 때문에 이들에 대한 정보를 취득하기 위해서는 이를 추정할 수 있는 모형의 도입이 필요하다. 현재 다목적댐 운영을 맡고 있는 수자원공사에서는 댐 방류량의 조절을 위한 상류 유입량 예측 및 방류량 결정은 주로 집중형 수문모형인 저류함수모형 분석결과를 이용해 상류 유역을 중심으로 이루어져 왔다. 한편, 전 세계적으로 DEM(Digital Elevation Model) 등 디지털정보의 구축이 진행되어 오고 있고, GIS 및 인공위성 영상기법의 발달로 유역에 대한 정확하고 상세한 각종 수문매개변수의 수집이 가능하여 유출과정의 공간적인 분포나 변동을 유역 혹은 소유역단위로 평균화해서 취급하는 개념적기반의 집중형 수문모형 보다 공간적인 비균질성을 고려하여 유출과정에서 운동역학적인 이론을 기반으로 물의 흐름을 수리학적으로 추적해 나가는 물리적 기반의 분포형 유출모형의 활용도가 높아지고 있다.

우리가 강우-유출해석에 있어서 분포형 모형을 사용하는 주된 목적으로는 첫째 실제 복잡한 유역에서의 유출과정 또는 물질의 수문순환과정을 잘 이해하기 위해서이고, 두 번째 어떤 유역의 토지이용형태의 변화가 초래하는 영향과 효과를 사전에 예측하기 위해서이다. 마지막으로 신뢰성 있는 과거의 수문자료가 없거나 부족한 유역에서의 유출계산을 위해서이다. 이러한 목적에 맞게 실제 적용분야는 홍수예측분야 이외에도 설계홍수량 산정을 위한 강우 유출모의 및 사전재해 영향성을 평가한다던지, 유역의 개발 등 유역 특성의 변화에 따른 수문변화를 모의해 본다던지, 유역 종합 치수계획이나 하천정비 기본계획을 수립하는 등 여러 방면에서 활용할 수 있을 것이다. 이러한 분포형 수문모형에 의해 유역의 임의의 지점에서 유량, 오타부하량 등을 추정할 수 있고, 그 프로세스를 물리적으로 추적하고 있기 때문에 유역내의 인간 활동이나 자연조건 변화 등의 공간적인 분포특성을 계산에 반영시킬 수 있다는 장점이 있다. 이처럼 시공간적으로 변화하는 기상과 유역이라는 동적이고 복잡한 시스템을 대상으로 그 물리적 특성을 있는 그대로 반영하여 수문학적인 모의를 수행하는 것이 필요한 시점이다.

본 연구는 집중형모형으로서 저류함수법을 근간으로 수자원공사 협업에서 실시간 물관리에 사용하고 있는 Kwater홍수분석모형을, 물리적 기반의 분포형모형으로는 실시간 홍수조절을 목적으로 미국 Oklahoma대학에서 개발된 Vflo모형을 이용하여 낙동강권역의 남강댐유역($2,293\text{km}^2$)을 대상으로 유출해석을 수행하여 양 모형의 구조적인 장단점 등을 비교분석하였다.

2. Kwater홍수분석모형 이론

Kwater 홍수분석모형은 유출계산에 있어서 저류함수법을 근간으로 하는데 이 기법은 유역과 하도에서의 유출량과 저류량의 관계를 표시하는 저류함수를 홍수파의 운동방정식에 대입하여 홍수파의 연속방정식을 계산함으로써 홍수유출량을 결정하는 방법이다. 저류함수모형에서 소유역이라 할 수 있는 격자단위의 유출을 모의하기 위한 개념도는 그림 1과 같다. 여기서 R은 강우량, A_r 은 유출역, A_p 는 침투역, R_{sa} 는 침투역의 포화우량, L은 하도의 길이, S은 하도저류량, Q_i 는 하도유입량(소유역 유출량), Q_o 는 하도의 유출량이다. 하도구간은 아래로 경사져 있으며 유역 전체에 강우량 R이 발생하고, 소유역 A에서의 초과강우량에 유출계수(f_1)를 적용하여 얻어지는 유출량은 하천에 유입(Q_i)된 후, 하도 형상에 따른 저류과정을 거쳐 출구로 배출된다고 가정한다.

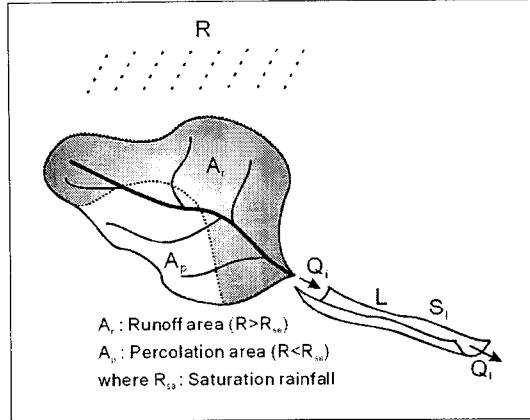


그림 1. 저류함수모형의 개념도

본 연구의 유역 유출계산은 유역저류와 유출에 관한 단위를 강우량단위(mm/hr)와 같이 단위저류고(mm), 단위유출고(mm/hr)로 사용한다. 이에 따라 유역의 저류함수식은 식1 및 식2로 표시한다(한국수자원공사, 2000).

$$R_e(t) - Q_i(t) = \frac{dS_l(t)}{dt} \quad (1)$$

$$S_l(t) = k Q_i(t)^p \quad (2)$$

여기서, t 시간의 유역출구에서의 유출량 $Q_i(t)$ 는 $Q_i(t - \Delta t)$ 의 개념이며, R_e : 유효강우($\text{mm}/\Delta t$), k : 저류상수($\text{mm}^{(1-p)}/\Delta t^{(-p)}$), p : 저류상수(무차원), S_l : (하도)저류고(mm), Q_i : 하도유출고($\text{mm}/\Delta t$), Q_i : 하도유입고($\text{mm}/\Delta t$), Δt : 계산단위시간

하도에서의 저류함수식은

$$S_l(t) = k Q_i(t)^p - T_l Q_i \quad (3)$$

여기서, T_l : 지체시간(hr)으로 표현된다.

KOWACO모형은 홍수유출예측량을 계산하기 위한 입력 자료로 예상강우량, 예상강우분포형, 지속시간, 예측강우 시작일시를 설정하도록 되어 있다. KOWACO홍수분석 모형에서 면적 평균강우량 산정의 경우는 산술 평균법, 티센분할법, 삼각형법, 등우선법, 크리깅법 등의 5가지를 고려할 수 있으며, 결측강우의 보완은 산술 평균에 의한 방법, 상관 관계법, RDS방법, 연평균강우량에 의한 가중 평균법의 4가지 중에서 주로 RDS 방법을 사용하고 있다(한국수자원공사, 2004).

3. Vflo모형 개요 및 이론

본 연구에서는 유출해석을 위한 물리적기반의 분포형 유출모형으로서 Java언어로 개발된 Vflo 모형을 사용하였다. Vflo모형(Vieux,B.E, 2002)은 레이더강우를 이용한 홍수예측분야의 세계적인 권위자인 오클라호마 대학의 Dr. Vieux에 의해서 최근에 개발된 물리적기반의 분포형 모형으로 강우사상기반의 유출모의 및 연속유출모의가 모두 가능하며, 강력한 사용자 인터페이스와 레이더와 지상관측 자료를 이용한 초단시간 강우예측 모듈 등의 전처리과정 등을 갖추고 있다. 현재 수치예보 및 Vflo 모형의 연계는 대만 기상청 등에서 현업모형으로 활용되고 있다. Vflo모형의 적용

분야는 강우레이더 자료와 연계한 실시간 홍수예측 분야 뿐만 아니라 설계홍수량 산정을 위한 강우유출모의나 사전재해영향성 평가, 하천정비기본계획수립, 유역종합치수계획 수립 등 다양한 분야에서 적용이 가능하며, 특히 유역의 개발 등 유역 특성의 변화에 따른 수문변화를 모의하는데 적합하다고 사료된다. Vflo모형은 지표면 유출에 운동파방정식(Kinematic Wave Equation)을 사용하며, 수치해를 구하기 위하여 공간적으로는 유한요소법을 사용(Vieux, 2004)하며, 해의 안정화를 위해서 시간적으로는 유한차분 음해법을 사용한다.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(vh)}{\partial x} = R - I \quad (4)$$

$$v = \frac{1}{n} h^{2/3} S^{1/2} \quad (5)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{S_o^{1/2}}{n} \frac{\partial h^{5/3}}{\partial x} = R - I \quad (6)$$

여기서, x :상류단으로부터의 거리(m), h :수심(m), v :유속(m/s), R :강우량(mm), I :침투량(mm)으로 표현된다.

이 모형의 일반적인 특징으로는 먼저 DEM을 이용하여 격자기반으로 지형정보를 수치화 하여 유역경사, 유하방향, 하상경사, 하도폭, 하도조도계수 등의 유출계산을 위한 입력매개변수를 추출하고 운동방정식과 연속방정식을 이용하여 물의 흐름을 수리학적으로 추적해서 유출량을 계산하고 있다. 또한, GIS 및 위성영상을 이용하여 토지피복도로부터 토지피복별 조도계수와 토양도로 부터 토심과 Green-Ampt매개변수 등을 추출하여 공극을 통한 침투과정을 모의할 수 있도록 하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 집중형모형으로서 저류함수법을 근간으로 수자원공사 현업에서 실시간 물관리에 사용하고 있는 Kwater홍수분석모형을, 물리적 기반의 분포형모형으로는 실시간 홍수조절을 목적으로 미국 Oklahoma대학에서 개발된 Vflo모형을 이용하여 낙동강권역의 남강댐유역(2,293km²)을 대상으로 유출해석을 수행하여 양 모형의 구조적인 장단점 등을 비교분석하였다. 모형 수행 결과, 분포형 모형의 초기결과는 산청, 신안, 창촌 지점에서 매개변수 보정이 없는 경우에도 적절한 성능을 보여주었다. Kwater모형은 그동안 현업에서 충분히 검증된 저류함수법을 이용하여 계산을 수행하기 때문에 홍수시 첨두유량과 첨두시기를 실시간으로 예측하는데도 효과적일 것이라고 판단되지만 물리적 기반의 분포형모형에 비하여 강우사상이 도래하기 전 단계에서 수문학적 유량예측을 수행하는데 있어서는 몇 가지 단점을 지니고 있다.

첫째로, 집중형 수문모형은 대체로 단위도 계열의 유출모형으로서 모형의 매개변수가 강우사상에 따라 변화가 심한 경향이 있다. 따라서, 강우가 직접 도래하여 관측수문곡선을 보기 전에는 최적 매개변수값을 추정하기가 어렵고 매개변수의 검보정 과정에서 객관적 기준보다는 사용자의 주관적 판단이 작용할 여지가 많다. 즉, 첨두홍수가 오기 직전까지 그 시점과 크기를 정확히 알 수 없고, 매개변수도 강우사상의 진행과 더불어 변화한다. 또 강우사상에 지나치게 의존적이고 실측 값에 의한 유역특성의 매개변수 추정이 어렵다. 또한 유역의 복잡 다양한 특성이 몇 개의 매개변수에 의해 반영됨으로써, 분석기간이 긴 경우에는 물리적인 요소가 불명확하게 되어 유출계산정도를 떨어뜨리게 된다.

둘째로, 집중형 수문모형은 수문곡선을 검보정하는데 있어서 과거 강우 및 유량관측자료에 대

한 의존도가 높은 것이 특징이다. 강우와 하천유량의 신뢰도가 높은 지역에서는 효과적이지만, 결측지역이나 관측자료의 신뢰가 높지 않은 지역에서는 적용하기 쉽지 않다.

셋째로, 대부분의 유출모형이 댐에서의 조절방류를 고려하고 있지 않거나 자연월류방식으로 처리하고 있다. 따라서 댐상류 유입량 예측이나 댐하류 주요지점에서의 자연유출예측모의를 시도할 때는 물리적기반의 분포형 수문모형이 상당히 유력할 수 있다고 생각된다.

Kwater홍수분석모형은 신속한 홍수분석능력 및 의사결정을 위해 단일 호우사상에 대한 집중형 모형으로 구성되어서 각 분석 단계별로 지속적으로 상황에 맞는 분석정보를 재생산하여야 하는 이유로 비교적 단순하며, 사용자의 매개변수 조정이 최소화된 모형을 채택하고 있으나 향후에는 시간 및 공간적으로 분석이 가능한 분포형 모형을 구축하여 실용화할 필요성이 있을 것으로 사료된다.

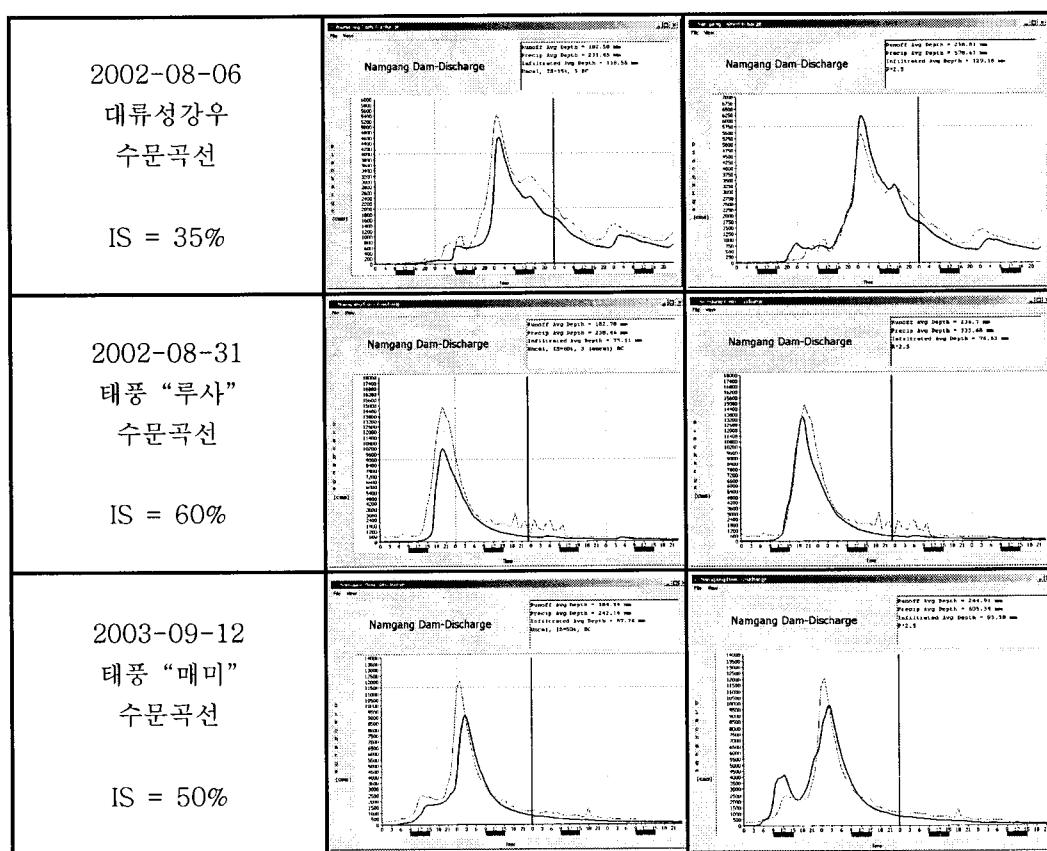


그림 2. 남강댐지점 매개변수 보정전후 수문곡선 결과(Vflo모형)

참 고 문 헌

1. 한국수자원공사(2004). 정량적 강우예측을 이용한 실시간 저수지유입예보시스템 개발. 보고서.
2. 한국수자원공사(2000). KOWACO홍수분석 모형 개발, 연구보고서, pp.30-33.
3. Vieux, B.E(2004). Distributed Hydrologic Modeling Using GIS, ISBN: 1-4020-2459-2, Kluwer Academic Publishers, The Netherlands.