

부정류 모형을 이용한 남한강 구간의 확률 홍수량 및 홍수위 산정

Estimation of Probable Flood Discharge and Flood Level Using

Unsteady flow model in South Han River

김진수*, 전경수**

Hye Jin Ku, Kyung Soo Jun

요 지

본 연구에서는 부정류 계산 모형을 이용한 확률 홍수량 및 홍수위 산정 방법을 개발하고, 이를 한강 살리기 사업이 진행 중인 남한강 구간에 적용하였다. 우선 한강 살리기 사업 전과 후의 하도에 대하여 부정류 계산 모형을 각각 수립하였으며, 과거 발생한 홍수사상을 조사하였다. 사업 전 모형과 최근에 발생한 홍수사상을 이용하여 모형의 보정 및 검증 실시하고, 추정된 매개변수를 사업 후의 하도에 대한 모형에 적용하였다. 대상 유역에 과거 발생한 홍수사상을 사업 후 모형으로 모의하여 각 홍수사상 별로 최대 홍수량 및 홍수위를 계산하였다. 이때 최대 홍수량 모의 결과들을 빈도해석 대상 자료군으로 사용하여, 연최대치 계열이나 부분 시계열에 대하여 빈도해석을 통하여 확률 홍수량을 산정할 수 있다. 본 연구에서는 장기간의 관측자료의 확보가 어려운 국내의 현실을 고려하여, 부분 시계열의 빈도해석 방법을 사용하여 확률 홍수량을 산정하였다. 다음으로 부정류 계산모형의 모의 결과인 최대 홍수량 및 홍수위 자료를 회귀분석하여 수위-유량 관계식을 유도하고, 각 빈도별 확률 홍수량을 관계식에 대입하여 확률 홍수량에 대응하는 확률 홍수위를 산정하였다.

핵심용어 : 한강 살리기 사업, 부정류 계산모형, 확률 홍수량, 확률 홍수위, 부분 시계열 빈도 해석, 수위-유량 관계식

1. 서론

현재 하천 실무에서 주로 사용하는 확률 홍수위 산정 과정은 크게 확률 홍수량 산정 및 그에 따른 하천 확률 홍수위 산정 과정으로 구분할 수 있다. 확률 홍수량은 강우빈도해석을 통하여 확률 강우량을 추정하고, 이를 유역유출모형에 적용하여 최대 유출량을 계산함으로써 결정된다(건설교통부, 2005). 유역에 대한 홍수량이 결정되면, 이를 입력자료로 사용하여 대상 하천에 대하여 수립된 수리학적 홍추적 모형을 통하여 빈도별 홍수위를 결정하게 된다. 이때 국내 실무에서는 주로 1차원 흐름 계산 모형인 HEC-RAS 모형(HEC, 2010)을 이용한 정상 부등류 모의를 통하여, 빈도별 홍수위를 계산하는 것이 일반적이다.

강우-유출 모형을 이용한 유역의 확률 홍수량 산정에 영향을 미치는 요소들은 확률 강우량 산정을 위한 확률분포형, 확률 강우의 지속시간, 강우의 시간 및 공간 분포, 유효우량 산정 방법, 도달시간 산정식, 유출 모형 및 모형의 매개변수 등으로 매우 다양하다. 이러한 확률 홍수량 산정 방법은 소유역의 분할, 강우 지속시간, 유출 모형의 결정 및 매개변수 선정 등에 있어서 엔지니어의 주관적인 견해가 개입되어 많은 불확실성이 내포되어 있다. 특히 유역 면적이 큰 대하천 유역의 경우에는 강우의 시간 및 공간 분포와 더불어 면적감소계수 등과 같은 유역특성인자의 결정에 의하여 확률 홍수량 산정 과정에서 포함되는 불확실성은 더욱 커지게 된다. 또한 정상 부등류 모의를 통한 설계 홍수위의 산정 방법은 하천, 특히 대하천의 홍수와 감쇄효과를 반영하지 못하므로 홍수위를 과대평가하는 경향이 있을 뿐만 아니라, 강변저류지 등의 효과를

* 정희원 · 성균관대학교 공과대학 건설환경시스템공학과 박사후연구원 · E-mail : sue0851@skku.edu

** 정희원 · 성균관대학교 공과대학 사회환경시스템공학과 교수 · E-mail : ksjun@skku.edu

적절히 모의하기 어렵다는 문제점을 포함하고 있다(전경수 등, 2005).

본 연구에서는 강우-유출 모형을 이용한 빈도해석 방법에 비하여 상대적으로 빈도해석에 영향을 미치는 요소가 적은 부정류 계산모형을 이용한 하천의 확률 홍수량 및 홍수위 산정 방법을 개발하였다. 이를 한강 수계의 남한강 구간에 대하여 적용하여, 한강 살리기 사업이 완료된 이후의 주요 관심 대상 지점인 여주 지점에서의 다양한 빈도에 대한 확률 홍수량과 홍수위를 산정하였다.

2. 연구의 방법론

본 연구에서 사용한 부정류 계산 모형을 이용한 확률 홍수량 및 홍수위 산정 방법은 다음과 같이 크게 3가지 단계로 구성된다.

1) 1차원 흐름 계산모형의 수립 및 입력자료를 구축한다. 대상 하천 구간에 대하여 부정류 계산모형을 수립하고, 과거 발생한 홍수사상 자료를 수집한다. 수집된 홍수사상 자료를 이용하여 부정류 계산 모형의 보정 및 검증을 실시한다.

2) 과거 홍수사상을 모의하여, 빈도해석 자료군을 생성한다. 이 단계에서는 수집된 홍수사상들을 모의하여, 각 홍수사상의 모의 기간 내의 최대 홍수량 및 홍수위를 계산한다. 따라서 모형의 각 계산점에서 전체 홍수사상의 개수만큼의 최대 홍수량 및 홍수위 자료가 생성된다.

3) 모의계산에 의하여 생성된 최대 홍수량 자료들을 빈도해석의 대상 자료군으로 이용하여, 확률 홍수량을 산정한다. 이때 홍수사상이 조사된 전체 기간의 연한이 작아 연 최대치 계열의 빈도해석 방법을 적용할 수 없는 경우에는, 부분 시계열 빈도해석 방법을 사용하도록 한다. 다음으로 대상 지점에서 부정류 계산 모형의 수행 결과들을 이용하여 수위-유량 관계식을 유도한 후, 이를 이용하여 각 빈도별로 산정된 확률 홍수량에 대응하는 확률 홍수위를 계산한다.

본 연구에서 제시한 확률 홍수량 및 홍수위 산정방법은 과거 발생한 홍수사상을 부정류 계산모형으로 모의한 결과에 대하여 빈도 해석하므로, 기존의 강우-유출 모형을 이용하는 방법에서의 확률 강수량 산정 및 유출모의계산 과정에서 내포되는 불확실성을 배제할 수 있다. 또한 홍수위 모의에서 부정류 계산모형을 사용함으로써, 기존의 HEC-RAS 모형을 사용한 정상 부동류 모의에 비하여 정확한 하천 흐름을 모의할 수 있다. 따라서 기존의 정상 부동류 모의에 의하여 산정되는 홍수위에 비하여 신뢰도 높은 흐름 계산 결과를 제공할 수 있으며, 강변 저류지 등의 효과를 확률 홍수량 및 홍수위 산정에 반영할 수 있다.

3. 1차원 흐름 계산 모형의 수립 및 적용

3.1 흐름 계산 모형의 수립

본 연구에서 사용한 모형은 동역학적 하도 추적 모형인 폐합형 수계모형이다. 폐합형 수계 모형은 지천 유입지점, 월류형 수공구조물에서 발생하는 다양한 형태의 흐름을 간편하게 처리할 수 있는 장점이 있다(전경수, 1996). 현재 4대강에 건설 중 혹은 완공된 다기능 보는 어도와 교각, 고수부지 및 가동보와 고정보를 포함한 보로서, 이러한 다기능 보가 건설된 지점에서의 홍수 시 하천 흐름은 가동보와 고정보 측에서 발생하는 월류 흐름과 고수부지 측에서 발생하는 하도형 흐름이 합쳐진 복합 흐름이 된다. 이를 모의하기 위하여 다기능 보가 위치한 지점의 상·하류단에 절점을 추가하였으며, 두 절점사이의 가동보와 고정보 양측 모두에서 월류 흐름이 발생하는 복합위어흐름(composite weir flow) 및 고수부지에서의 하도형 흐름을 각각 모의하도록 수로로 연결하였다.

모형의 적용 대상구간은 팔당댐에서 충주 조정지댐의 남한강 구간으로, 청평댐에서 남북한강 합류점까지는 상당한 거리가 있기 때문에 수리학적 계산을 수행하였다. 이에 따른 사업 후의 모형의 모식도는 그림 1과 같다. 상류단 경계조건은 충주 조정지댐과 청평댐 방류량이며, 하류단 경계조건은 팔당댐 관리 수위인 EL. 25.0 m로 일정하게 부여하였다. 주요 지천으로는 섬강, 청미천, 양화천, 복화천, 흑천 및 경안천을 모형

에 포함하였다. 지천 유입량은 각 지천에서의 관측지점의 수위자료를 수위-유량 관계식을 사용하여 유량으로 환산하여 본류에 유입되도록 하였다. 관측 지점이 없는 경우에는 인접 지천과의 유역 면적 비를 사용하여 유량을 산정하였다. 지천을 제외한 모형에서 고려하지 못한 나머지 잔유역의 유입유량은 한강하천정비기본계획(국토해양부, 2009) 상의 각 소유역(단위유역)별 유역면적 자료를 이용하여 각 소유역에 대하여 유역면적을 계산한 후, 이를 인접한 지천의 유역 면적비를 이용하여 유입유량으로 환산하여 지천 유입유량에 포함하여 본류로 유입되도록 모형에 적용하였다.



그림 1. 한강 살리기 사업 후의 하도에 대한 계산모형의 모식도

3.2 홍수사상의 조사

대상 하천 구간의 빈도해석 자료군의 일관성을 위하여 충주 조정지댐 완공 이후인 1987년부터 2010년까지의 24개년에 대하여 홍수사상을 조사하였다. 홍수사상의 선정 기준은 대상 하천 구간의 상류단 경계 조건인 충주 조정지댐 최대 방류량으로서 방류량이 1,000 m³/s 이상인 경우에 홍수가 발생하였다고 판단하였다.

홍수사상의 선정에서 자료의 독립성을 검토하였다. 대상 하천 유역에 과거 발생한 홍수사상은 부정류 계산모형의 입력자료로 사용되며, 각 홍수사상의 모의 결과는 이후의 빈도해석의 대상 자료군이 된다. 따라서 홍수사상마다 계산되는 최대 홍수량 자료가 빈도해석에서 사용되기 위해서는 모든 홍수사상이 서로 독립적이어야 한다. 이에 대한 검토를 위하여 2개 이상의 침투치가 연속적으로 발생한 경우에는 홍수사상이 발생한 당시의 강우 자료를 조사하였다. 연속된 2개 이상의 침투치가 별개의 강우에 의하여 발생한 경우에는 독립적인 홍수사상으로 간주하여 모두 홍수사상으로 채택하고, 그렇지 않고 연속된 강우로 인하여 발생한 경우에는 하나의 사상으로 채택하였다(Kottogoda, 1980). 이와 같은 방법으로 조사된 홍수사상 중에서 자료가 양호한 76개의 홍수사상을 최종적으로 선정하여 부정류 계산 모형의 입력자료로 사용하였다.

모형의 보정을 위하여 수집된 홍수사상과 사업 전 하도에 대한 계산모형을 이용하여 조도계수를 추정하였다. 현재의 하도에 대한 매개변수 추정을 위해 2000년 이후에 발생한 10개의 홍수사상을 선정하였으며, 목적함수로는 여주 지점에서의 매 시각 수위 관측치와 계산치간의 오차 제곱합이 최소화되도록 하는 최적화 기법을 사용하였다. 조도계수는 유량과 조도계수의 함수관계로서 멱함수를 적용하도록 하는 가변 조도계수 모형을 구성하였으며, 추정된 매개변수의 값을 사업 후의 하도에 대하여 수립된 계산모형에 동일하게 적용하였다.

4. 확률 홍수량 및 홍수위 산정

본 연구에서 개발한 확률 홍수량 및 홍수위 산정 방법은 부정류 계산모형의 모의 결과를 이용하는 방법이다. 이때의 빈도해석 방법으로는 연 최대치(annual maximum) 계열과 부분 시계열(partial duration series)에 대하여 빈도해석을 실시하여 확률 홍수량을 산정할 수 있다. 본 연구에서는 연 최대치 계열에 대

한 빈도해석의 신뢰도를 얻기에는 대상 하천 구간의 홍수사상의 관측 연한이 부족하다고 판단하여, POT (peaks over threshold) 계열의 부분 시계열에 대하여 빈도 해석을 실시하였다.

연구 대상 구간인 남한강의 홍수사상의 조사 연수는 24년이며, 홍수사상의 개수는 76개이다. 따라서 이때에 적용 가능한 연평균 침투치의 발생횟수는 1~3회이다. 또한 일반적으로 빈도해석의 신뢰도를 고려한 연평균 침투치의 발생횟수는 3~5회인 점을 고려하여, 남한강 구간의 빈도해석에서는 연평균 침투치의 발생횟수 3회에 대하여 POT 사상을 선정하였다. 각 홍수사상에 대한 여주 지점의 흐름 계산모형의 최대 홍수량 및 홍수위 모의 결과를 크기순으로 정리하고, 이 중에서 연평균 침투치 발생 횟수 3회에 해당하는 72개의 모의 결과를 POT 사상으로 선정하였다(그림 2 참조).

빈도해석 대상지점인 여주에서 모형의 모의 결과로서 산정된 최대 홍수량 자료에 대하여 부분 시계열 빈도해석을 실시하여 확률 홍수량을 산정하였다. 또한 확률 홍수량에 대응하는 확률 홍수위 산정을 위해 흐름 계산 모형의 모의 결과로서 계산된 최대 홍수량과 홍수위를 도시하고, 이에 대한 회귀분석으로부터 여주 지점에 대한 수위-유량 관계식을 추정하였다(그림 3 참조). 모의 결과와 회귀분석식 사이의 RMS 오차 및 결정계수는 각각 0.0414 m와 0.9991로 계산되어, 상당히 양호한 회귀분석 결과를 나타내고 있다. 또한 최대 홍수량 자료에 대한 POT 사상의 최대값은 약 19,000 m³/s이며(그림 2 참조), 200년 빈도의 확률 홍수량의 모의 결과 값은 약 19,500 m³/s이다(표 1 참조). 따라서 두 값의 차이가 약 500 m³/s로 그다지 크지 않고, 수위와 유량의 상관성이 상당히 큰 것으로 회귀분석 결과에서 나타났으므로, 200년 빈도까지 수위-유량 관계식을 사용하여 확률 홍수위를 산정하여도 크게 무리가 없을 것으로 판단하였다. 이와 같은 과정을 통하여 산정된 빈도해석 결과를 표 1에 정리하여 나타내었다.

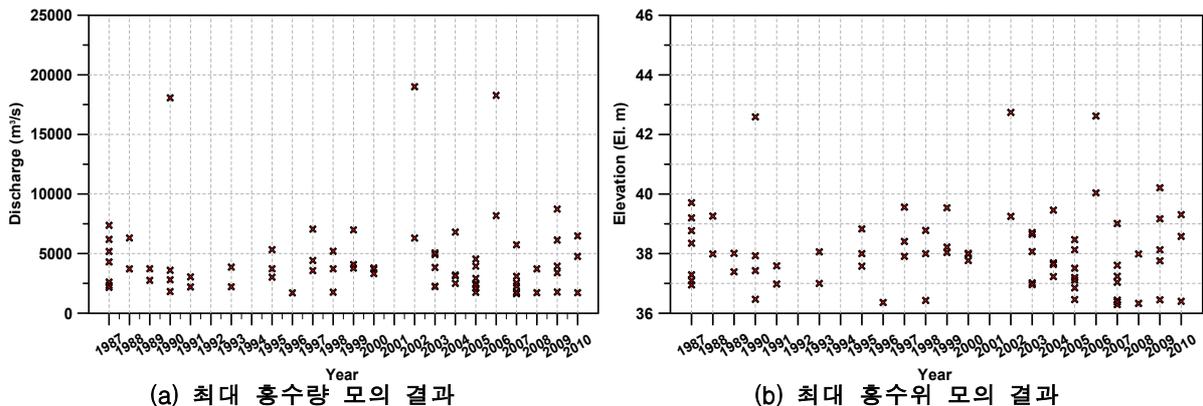


그림 2. 빈도해석에 사용된 여주 지점의 POT 홍수사상

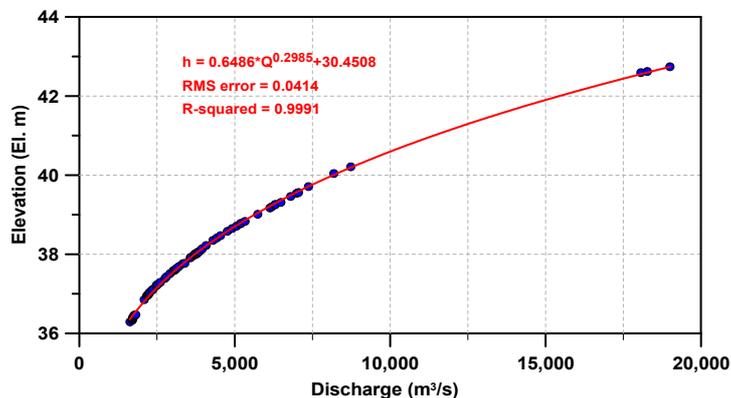


그림 3. 여주 지점의 수위-유량 관계식

표 1. 여주 지점의 빈도해석 결과

빈도	5	10	20	30	50	80	100	150	200
확률 홍수량 (m ³ /s)	9,179	11,121	13,062	14,198	15,629	16,945	17,570	18,706	19,512
확률 홍수위 (El. m)	40.33	40.92	41.43	41.71	42.03	42.32	42.45	42.67	42.83

5. 결론

본 연구에서는 기존의 설계 강수량 산정 과정을 생략하고, 상대적으로 빈도해석에 영향을 미치는 요소가 적은 흐름 계산모형을 이용한 하천의 확률 홍수량 및 홍수위 산정 방법을 개발하였으며, 이를 남한강 구간에 적용하여 주요 관심 지점인 여주 지점에 대하여 다양한 빈도의 확률 홍수량 및 홍수위를 산정하여 제시하였다.

본 연구에서 제시한 방법은 과거 홍수사상을 이용하여 빈도해석의 자료군을 생성하게 된다. 빈도해석의 초기 과정에서 대상 하천 구간에 대하여 1차원 흐름 계산모형을 수립하고, 자료가 양호한 홍수사상을 선정한 이후에는, 매년 새롭게 발생한 홍수사상들만을 추가하여 손쉽게 확률 홍수량 및 홍수위를 갱신할 수 있다. 따라서 기존의 하천정비기본계획 사업에서 필요한 빈도별 홍수량 및 홍수위를 산정하는데 들이는 수고가 크게 줄어들 것으로 예상된다. 또한 계산모형의 모든 계산점에서 지점별 홍수량 혹은 홍수위의 빈도 및 크기를 제시할 수 있으므로, 수공구조물의 계획 설계 등에 기준을 제공하여 하천 실무에서 유용하게 사용할 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁 시행한 건설기술혁신사업(08기술혁신 F01)에 의한 차세대 홍수방어 기술개발 연구단의 연구비 지원에 의해 일부 수행되었으며, 이에 사의를 표한다.

참고 문헌

1. 건설교통부 (2005). 유역종합치수계획수립용역 홍수량산정지침서.
2. 국토해양부 (2009). 한강하천기본계획(보완).
3. 전경수 (1996). “월류흐름을 포함한 부정류 계산모형에 관한 연구.” 한국수자원학회지, 제29권, 제2호, pp. 153-165.
4. 전경수, 김진수, 김호진 (2005). “하천 설계 홍수위 산정에 관한 연구.” 대한토목학회 2005년도 정기 학술대회 논문집, 대한토목학회, pp. 2904-2916.
5. HEC (2010). *HEC-RAS River analysis system: User's manual, version 4.1*. Hydrologic Engineering Center, US Army Corps of Engineers, Davis, Calif.
6. Kottogoda, N.T. (1980). *Stochastic water resources technology*. THE MACMILLAN PRESS LTD, London and Basingstoke.