

수리학적 모형을 이용한 실시간 홍수예측 시스템의 개발

김 원*, 김 양 수**, 우 효 섭***

1. 서론

홍수추적은 시간에 따라 변화하는 홍수파가 하도를 따라 전파되면서 크기, 속도, 형태 등이 어떻게 변하는가를 추적하는 수학적 과정으로서 수리학적 모형과 수문학적 모형으로 구분된다. 수문학적 방법은 하도의 특정 한 지점에 대한 흐름을 유입량, 유출량, 저류량의 관계에 의해 계산하는 방법이고 수리학적 방법은 연속방정식과 운동량방정식에 의해 하도의 여러 지점에서 동시에 흐름을 계산하는 방법이다. 수문학적 방법은 수리학적 방법에 비해 계산이 간단하다는 장점이 있는 반면 배수영향을 고려하지 못하고 완만한 경사의 하도에서 급격하게 상승하는 홍수파를 해석하는 경우에는 정확도가 부족하다는 단점이 있다. 수리학적 방법은 계산이 복잡하고 많은 양의 자료를 필요로 하는 단점이 있지만 유량, 유속, 수심의 공간적 변화를 하도 단면, 마찰계수 등의 하도 특성에 의해 해석하기 때문에 부정류 흐름을 물리적으로 가장 정확하게 표현할 수 있다.

한강 하류부(팔당댐 하류)의 하상경사는 매우 완만한 편이며 중소규모의 여러 지류가 합류되고 있다. 또 이 구간은 조석에 의해 배수영향이 발생하는 구간이고 많은 교량과 잠실수중보, 신곡수중보 등의 하천구조물이 설치되어 있어서 흐름의 양상이 매우 복잡하다. 따라서 이러한 구간의 흐름을 수문학적 방법에 의해 해석하면 많은 한계가 따르게 된다. 또 이 구간의 사회적 중요성을 고려하면 한 지점에 대한 흐름 뿐만 아니라 전 하도구간에 대한 시간별 유량, 수위, 그리고 유속의 변화를 예측하는 것이 필요하다.

수리학적 홍수추적 모형은 두 가지 목적으로 사용될 수 있는데, 하나는 과거 홍수사상에 대한 모의(simulation)이며 또 하나는 실시간 홍수예측(forecasting)이다. 모의 모형에서는 과거 홍수사상이 대상이기 때문에 수리학적 홍수추적 모형만 필요하지만 예측 모형에서는 수리학적 홍수추적 모형과 더불어 실시간으로 수위, 유량 등의 자료를 전송 받을 수 있는 「자료 전송 시스템」, 상류 경계를 예측할 수 있는 「상류 경계 예측 모형」, 하류 경계를 예측할 수 있는 「하류 경계 예측 모형」, 지류 유입량을 예측할 수 있는 「지류 유입량 예측 모형」, 예측결과를 분석할 수 있는 「결

* 한국건설기술연구원 수자원연구실, 연구원

** 한국건설기술연구원 수자원연구실, 선임연구원

*** 한국건설기술연구원 수자원연구실장

과 출력 장치」 등이 필요하고, 또 이들 모형을 종합적으로 운영할 수 있는 「사용자 편의 시스템」도 필요하다.

본 연구에서는 팔당댐-행주대교 구간에 대해서 수리학적 홍수추적 모형의 특성을 분석하여 실시간 홍수예측에 적용할 수 있는 모형을 선정하고 상·하류 경계 예측 모형, 지류 유입량 예측 모형, 사용자 편의 시스템 등을 개발하여 수리학적 홍수추적 모형에 의한 실시간 홍수 예측 시스템을 구축하였다.

2. 홍수예측을 위한 수리학적 홍수추적 모형의 선정

지금까지 홍수추적을 위해 많은 모형들이 개발되어서 다양한 목적에 이용되고 있다. 이들 각 모형은 지배방정식의 형태와 해석기법, 모의할 수 있는 하천구조물의 형태, 이용가능한 경계조건 형태, 적용범위 등에서 서로 다른 특징을 가지고 있으므로 기존에 개발되어 있는 모형을 이용하기 위해서는 대상 하도의 특성과 이용목적 등을 정확히 분석하여 가장 적합한 모형을 선정해야 한다. 본 연구에서는 한강 하류부에 대한 홍수추적모형으로 미국 국립기상청(NWS)에서 개발되어 실제 홍수예경보에 이용되고 있는 NETWORK 모형을 선정하였다.

3. 지류 유출 모형의 개발

지류 유입량이 본류 흐름에 미치는 영향이 큰 경우에는 지류 유입량을 고려하여 흐름을 해석해야 한다. 유역의 유출량 산정을 위한 많은 모형들이 개발되어 있으나 본 연구에서는 유역면적의 크기, 계산의 간편성 등을 고려하여 단위도 방법을 채택하였다. 팔당댐 하류 유역 가운데 유역면적이 200km^2 이상이고 우량관측소와 수위관측소가 있으며 수위-유량 관계곡선이 개발되어 있는 안양천, 탄천, 왕숙천 유역에서 단위도를 유도하고 이를 검증하여 유역유출계산에 이용하였다.

4. 조도계수의 산정

수리학적 홍수추적모형을 적용하여 흐름을 해석할 때에 가장 중요한 변수는 하도의 조도계수이다. 조도계수를 산정하기 위한 방법에는 여러 가지가 있으나 본 연구에서는 NETWORK 모형에서 제공되는 과거 홍수자료를 이용하여 최적의 조도계수를 구하는 방법을 사용하였다(Fread, 1978). 조도계수를 결정하기 위해 4개의 과거 홍수사상을 이용하였으며 전체 하도구간을 팔당-광장, 광장-잠수교, 잠수교-인도교 등의 3구간으로, 유량 규모를 12개 구간으로 구분하였다. 본 연구에서는 잠실수중보를 고려하지 않은 상태에서 3개의 구간중 팔당-광장, 잠수교-인도교 구간의 최적 조도계수를 구하고 광장-잠수교 사이의 조도계수는 잠수교-인도교 구간의 조도계수와 동일한 것으로 가정하였다. 또한 인도교와 행주대교 사이의 조도계수도 행주대교 지점의 수위자료 부

족으로 최적 조도계수를 구할 수 없으므로 잠수교-인도교 구간의 조도계수와 동일한 것으로 가정하였다. 본 연구에서 결정된 팔당댐 하류 구간의 조도계수를 이전 연구결과와 비교하여 보면 그림 1과 같다.

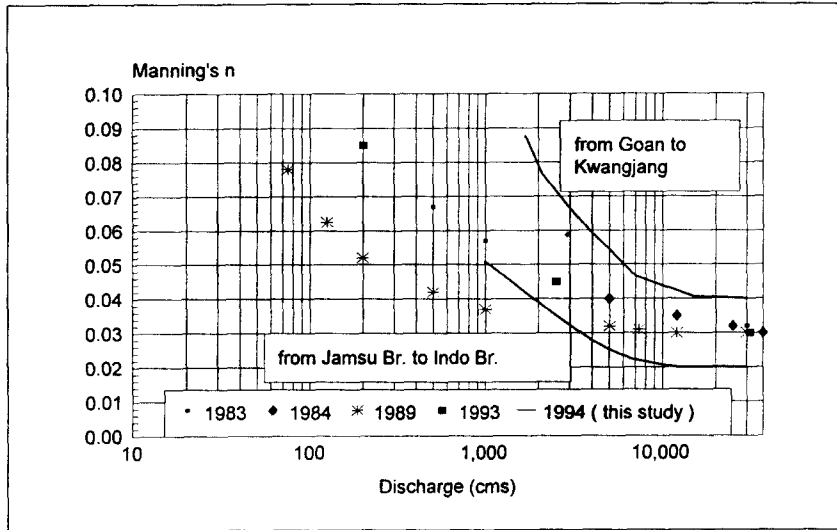


그림 1 한강하류부의 조도계수 비교

5. 모형의 검증

본 절에서는 앞에서 계산한 지류 유입량, 하도 단면, 조도계수, 그리고 기타 입력자료들을 과거 홍수사상에 대해 적용하여 NETWORK 모형을 검증하였다. NETWORK 모형의 적용을 위해서 1987년에서 1991년 사이에 발생한 17개의 홍수사상을 선정하였다.

5.1 잠실수중보의 흐름 모의

본 연구에서는 잠실수중보를 모의하기 위해 수위-유량 관계곡선을 개발하였다. 수중보 지점의 흐름을 해석하기 위해 1990년 이후의 잠실수중보 수위자료를 서울특별시 한강관리사업소(1990, 1991, 1992, 1993)로부터 입수하여 해석에 이용하였다. 해석결과 90/06/23, 90/07/17, 90/09/08/31 등의 홍수사상에서는 평방자승근(rms : root mean square) 오차가 각각 0.120m, 0.234m, 0.137m, 0.277m로 매우 작게 나타났다. 그러나 90/06/20, 90/09/09, 91/07/24 등의 홍수사상에서 평방자승근 오차가 각각 0.560m, 0.361m, 0.376m로 조금 크게 나타났다. 이렇게 몇 홍수사상에서 오차가 상대적으로 크게 나타나는 것은 수문조작과 관련된 것으로 판단된다.

5.2 NETWORK 모형의 적용

본 절에서는 앞에서 구성된 NETWORK 모형의 고정 입력자료를 과거 홍수사상자료에 적

용하여 검증하였다. 먼저 고안 지점과 인도교 사이의 흐름 양상을 분석하기 위해 고안 지점의 수위를 상류 경계조건으로 하고 인도교 지점의 수위를 하류 경계조건으로 설정하여 모형을 적용하였다. 이중 대표적인 결과를 그림 2에 나타내었다.

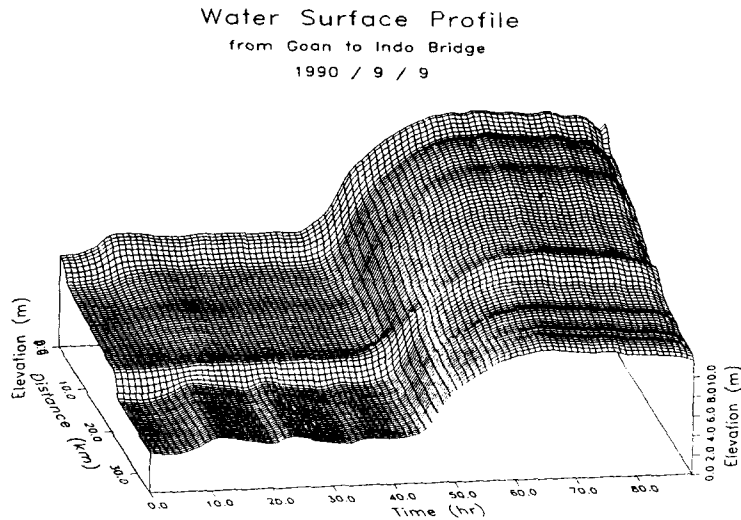


그림 2 고안과 인도교 사이의 수위종단도 (90/09/09 홍수사상)

본 연구에서는 모형을 실시간 홍수예측에 이용하는 것이 목적이기 때문에 하류 경계조건으로 인도교 지점 수위-유량 관계곡선과 행주대교 지점의 가정된 수위-유량 관계곡선을 설정하여 17개 홍수사상에 대해 다시 모의를 실시하였다. 그 결과 대부분 전체적인 수문곡선의 형태는 잘 재현했으나 각 홍수사상별로 오차의 크기가 많이 다르게 나타났다. 또 조위의 영향이 심하게 발생하는 홍수사상에서도 조위의 영향이 발생하지 않는 홍수사상보다 더 큰 오차가 발생하였으며 행주대교 지점을 하류경계조건으로 한 경우가 인도교를 하류경계조건으로 한 경우보다 더 큰 오차를 나타내었다.

6. 실시간 홍수예측 시스템의 개발

6.1 상류경계조건

상류경계조건은 상류 유역의 유출량을 예측할 수 있는 별도의 모형에 의해 계산되어야 하지만 본 연구에서는 상류 경계조건인 고안 수위를 다음과 같이 단순하게 가정하였다(선행 예보시

간을 5시간으로 했을 경우).

- 수문곡선의 상승부 : 현재 시각의 수위 상승 기울기를 2시간 이후까지 연장하고 그 다음 3시간 동안 수위가 일정한 것으로 가정
- 수문곡선의 하강부 : 현재 시각의 수위가 5시간 이후까지 일정한 것으로 가정

6.2 하류경계조건의 실시간 설정방법

본 연구에서는 실시간 홍수예측에서 요구되는 정확도의 확보를 위해 수위-유량 관계의 변화를 고려할 수 있는 새로운 하류경계조건의 설정방법을 개발하였다.

새로운 하류경계조건의 설정방법은 수리학적 모형에서 계산되는 수위-유량 관계를 실시간으로 이용하는 방법이다. 홍수시작 시각부터 현재 시각까지의 고안 지점의 수위(또는 팔당댐 방류량)와 인도교 지점의 수위를 각각 상·하류 경계조건으로 이용하여 NETWORK 모형에서 인도교 지점의 수위-유량 관계를 계산하고 이 관계를 현재 시각 이후의 예측을 위한 하류경계조건으로 이용하는 것이다. 즉 NETWORK 모형에 현재 시각까지의 자료를 입력하여 모형을 실행한 후, 계산된 인도교의 수위-유량 관계를 예측을 위한 수위-유량 관계로 이용함으로써 단순화된 수위-유량 관계식으로 인해 발생하는 오차를 최소화시키고자 하는 것이다.

6.3 실시간 홍수예측시스템

예보를 위한 모든 과정은 수위, 유량, 방류량만 입력하면 프로그램 내에서 자동적으로 처리된다. 실시간 홍수예측시스템에 의한 예측 결과는 현재까지의 모든 계산상황을 한눈에 알아볼 수 있도록 여러 가지 그림으로 나타난다. 첫번째는 수문곡선 그림으로 고안에서 행주대교 사이에서 원하는 모든 지점의 수문곡선을 그릴 수 있다. 둘째 그림은 구간내의 수위 종단도로, 계산된 매 시각의 수위 종단도를 확인할 수 있다. 세번째 그림은 현재 시각까지의 전 구간에 대한 수위 종단도이다.

6.4 수리학적 홍수예측 시스템의 적용

개발된 수리학적 홍수예측 시스템을 표 3에 나타낸 과거 17개 홍수사상에 실제 홍수시와 동일하게 적용하였다.

예측 결과를 살펴보면 3시간의 선행 예보시간에 대한 평방자승근 오차가 17개 홍수사상중 13개 홍수사상에서는 0.17-0.30m로서 만족할만한 결과를 나타내고 있다. 특히 수문곡선의 변화가 심하지 않은 홍수사상에서는 정확하게 잠수교의 수위를 예측하고 있다.

오차의 원인은 두가지로 구분된다. 먼저 상류경계조건인 고안지점의 수위상승 정도이다. 대부분의 홍수사상에서는 단순히 가정된 상류경계조건으로도 만족할만한 결과를 얻을 수 있지만 상류경계조건인 고안지점의 수위가 급격하게 상승하는 두개의 홍수사상에서는 단순히 가정된 상류경계조건이 실제 수위의 변동을 반영하지 못하기 때문에 오차가 크게 발생하였다. 이와 같이 급격하게 상승하는 홍수사상에서는 별도의 모형에 의해 상류경계조건을 예측해야 한다.

오차의 두번째 원인은 하류경계인 인도교 지점에 대한 조석의 영향이다. 인도교 지점에 대

한 조석의 영향이 심하지 않은 대부분의 홍수사상에서는 본 연구에서 제안한 하류경계조건의 설정방법에 의해서 조석의 영향을 고려할 수 있지만 조석의 영향이 크게 미치는 두개의 홍수사상에서는 수위의 변동폭이 매우 크기 때문에 그 영향을 고려하지 못하고 있다. 이와 같이 조석의 영향이 심한 경우에 정확도 높은 홍수예측을 하기 위해서는 하류경계로 인도교 지점이 아니라 조위의 예측이 가능한 하구부를 사용하는 것이 바람직하다.

고안-인도교 구간의 87개 단면에 대한 모형의 평균 실행시간은 계산시간당 0.623초이고 100시간의 계산시간에 대한 모형의 실행시간은 69.02초로 나타났다. 또 고안-행주대교 구간의 112개 단면에 대한 모형의 평균 실행시간은 계산시간당 0.728초이고 100시간의 계산시간에 대한 모형의 실행시간은 88.59초로 나타났다. 본 연구에서 구축한 실시간 홍수예측 시스템에서는 매시간 홍수예측을 위해 두 번 NETWORK 모형을 실행하게 되는데 이러한 점을 감안하더라도 한 번의 홍수예측을 위해 필요한 전체 시스템의 실행시간은 5분 이내일 것으로 판단된다. 이러한 NETWORK 모형의 빠른 실행시간은 홍수예측을 위해 충분한 것으로 판단된다.

잠수교의 침수·부상을 예측한 결과 상승부(잠수교 침수시)에서는 15개 홍수사상 중에서 11개 홍수사상이 3시간의 선행 예보시간에 대해 30cm 정도의 오차를 나타내었다. 네개의 홍수사상에서 오차가 크게 나타나는 원인은 상류 경계조건의 예측방법이 부적절하기 때문이다. 이 오차는 다른 모형에서 예측된 상류 경계조건을 사용하면 그 범위가 많이 줄어들어 다른 홍수사상과 유사할 것으로 판단된다. 하강부(잠수교 부상시)를 살펴보면 3시간의 선행 예보시간에 대해 전 홍수사상이 30cm 이내의 오차를 나타내고 4시간의 선행 예보시간에 대해서도 대부분 30cm 정도의 오차를 나타내고 있다. 따라서 잠수교의 침수·부상시각은 3-4시간의 선행 예보시간에 대해 오차범위 30cm 정도로 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

7. 참고문헌

1. 서울특별시 한강관리사업소, 1990, 1991, 1992, 1993, 수중보 운영일지
2. 건설부 한강홍수통제소, 1994, 홍수자료관리시스템 구축
3. Fread, D.L., and G.F. Smith, 1978, "Calibration Technique for 1-D Unsteady Flow Models," J. Hydraul. Eng., vol.104, no.HY7, pp.1027-1044
4. Fread, D.L., 1989, "Flood Routing and the Manning n," in B.C. Yen, ed., Proc. of International Conference for Centennial of Manning's Formula and Kuichling's Ration Formula, Charlottesville, Va., pp.699-708
5. Fread, D.L., 1993, "Flow Routing," in D.R. Maidment, Handbook of Hydrology McGraw-Hill Inc., New York, chap.10, pp.10.1-10.36
6. Mays, L.W., O. Unver, and K. Lansey, 1986, Real-Time Flood Management Model for Lower Colorado River-Highland Lake System, The University of Texas at Austin, Texas