

한강하류부 신곡수중보의 수리학적 영향분석

Analysis of Hydraulic Effects of Singok Submerged Weir in the Lower Han River

김 상 호* / 김 원** / 이 을 래*** / 최 규 현****

Kim, Sang Ho / Kim, Won / Lee, Eul Rae / Choi, Kyu Hyun

Abstract

This study analyzed the hydraulic effects of Singok submerged weir in the lower Han River. 1-D hydraulic flood routing model was used and calibration and verification were performed using 8 flood or nonflood events. Flow characteristics were analyzed using various outflows of Paldang Dam and tidal data of the Yellow Sea. Water level increase effects by establishment of Singok submerged weir were as following, when maximum flood tidal was 2.4m, highest water level increased about 0.65m, and lowest water level increased about 1.25m in the downstream of Jamsil submerged weir. In Hangang Bridge, due to the Singok submerged weir, when maximum flood tidal was 2.4m, tidal range was 0.07m and decrement of tidal range was about 90%. And when maximum flood tidal was 5.5m, tidal range was 1.6m and decrement of tidal range was about 35%. When the outflow of Paldang Dam was over 20,000cms, tidal range was below about 0.06m, and tidal effect did not appear hardly.

keywords : Han River, hydraulic model, flood analysis, Singok submerged weir, tide, tidal effect

요 지

본 연구에서는 한강 하류부에 위치한 신곡수중보의 수리학적인 영향을 분석하였다. 이를 위해 1차원 수리학적 홍수추적모형을 이용하였으며, 과거 8개 홍수기 및 비홍수기 사상에 대해 모형의 보정과 검증을 실시하였다. 팔당댐에서의 다양한 방류조건과 서해안의 조위조건을 이용하여 흐름특성을 분석하였다. 신곡수중보의 설치로 인한 수위상승 효과는 최대 만조위가 2.4m일 때 잠실수중보 직하류부에서 최고 수위는 약 0.65m, 최저 수위는 약 1.25m 정도 상승하는 것으로 나타났다. 또한 조차의 감소는 한강대교에서 최대 만조위가 2.4m일 때 조차가 0.07m로 나타나 약 90%의 조차감소율을 나타내었으며, 최대 만조위가 5.5m일 때 조차는 1.6m로 약 35%의 감소율을 나타내었다. 한강대교 지점의 경우 팔당댐 방류량이 20,000cms 이상이 되면 약 0.06m 이하의 조차가 나타나 조석의 영향이 거의 나타나지 않는 것으로 나타났다.

핵심용어 : 한강, 수리학적 모형, 홍수해석, 신곡수중보, 조석, 조위영향

* 정희원, 상지대학교 이공과대학 건설시스템공학과 조교수
Assistant Prof., Dept. of Civil Eng., Sangji Univ., Wonju 220-702, Korea
(e-mail: kimsh@sangji.ac.kr)

** 정희원, 한국건설기술연구원 수자원연구부 수석연구원
Research Fellow, Water Resource Research Dept., KICT, Koyang, Kyeonggi, 411-712, Korea

*** 정희원, 한국수자원공사 물관리센터 선임연구원
Senior Researcher, Water Resources Operations Center, KOWACO, Daejeon, 306-711, Korea

**** 정희원, 건설교통부 한강홍수통제소 하천정보센터 토목연구사
Researcher, River Information Center, Han River Flood Central Office, MOCT, Seoul, 137-649, Korea

1. 서 론

한강은 우리나라 하천의 특성상 유량의 계절적 변화가 큰 편이나 상류부와 중류부에 건설된 여러 댐의 홍수조절능력으로 상시유량의 확보와 함께 홍수범람에 대한 피해가 크게 줄어들었다. 하지만 최근 기상이변으로 인한 집중호우의 발생양상을 고려해 보면 하천 홍수범람에 대한 대비가 더욱 절실한 상황이다.

하천에서 홍수피해방지를 위해서는 흐름특성에 대한 수리학적 분석이 필수적이며, 이를 통한 홍수예정보시스템의 구축이 필요하다. 과거 홍수예보를 위해 저류함수법이 많이 이용되어 왔으나, 실제 하천의 흐름양상을 보다 정확하게 반영하고 재현하기 위해서 수리학적 모형을 보다 많이 이용하고 있는 실정이다. 특히, 한강의 하류부는 팔당댐의 방류량과 함께 서해안의 조석의 영향이 미치고 있으며, 임진강을 비롯한 여러 지류에서 홍수량이 유입되고 있고 교량이나 수중보와 같은 인위적인 구조물이 많이 설치되어 있어 하천의 흐름이 매우 복잡한 양상을 나타내고 있기 때문에 수리학적 해석에 대한 필요성은 더욱 절실하다.

한강 하류부에서 하천 흐름에 많은 영향을 미치는 요인은 서해안의 조위와 함께 교량과 수중보와 같은 수공구조물일 것이다. 한강 본류구간에는 20여개 이상의 많은 교량이 존재하고 있지만, 홍수시에만 그 영향이 미치며 범위 또한 국부적으로 작게 나타나기 때문에 긴 구간의 흐름특성 분석시에는 일반적으로 교량의 영향을 무시한다. 이정규 등(2003)은 한강의 교량 중 경간장이 가장 짧은 교량에 대한 흐름분석을 통해 홍수위 상승효과가 매우 적음을 확인하였다. 하지만, 수중보의 경우는 흐름 전반에 걸쳐 영향이 크게 나타나며 하천의 흐름특성을 지배하기 때문에 이에 대한 보다 정확한 해석이 필요하다.

한강 하류부에는 잠실수중보와 신곡수중보가 있으며, 수위상승을 통한 취수수심과 주운수심 확보 등과 같은 목적을 위한 잠실수중보와는 달리 신곡수중보는 서해안의 조위와 한강 본류의 흐름으로 인한 복합적인 양상이 나타나고 있다. 신곡수중보는 1987년에 설치되었으며, 883m의 고정보와 124m의 가동보로 구성되어 있고 보의 높이는 EL. 2.4m로서 일반적인 보와는 달리 조석에 따라 흐름의 방향이 바뀌면서 상류와 하류의 수위, 유속, 유량, 조석 등에 큰 영향을 미치고 있다(서울특별시, 1986). 신곡수중보의 설치는 한강의 개발로 인해 발생하는 수위저하를 방지하고 조석의 영향으로 인한 염수의 침입을 방지하기 위해 설치되었다. 하지만 한강 하류부에서는 서해안 만조위의 크기에 따라 신곡수중보

상류로 조위의 영향이 나타나고 있으며 이는 팔당댐의 방류량에 따라 크게 다른 양상을 나타내고 있다.

최근 한강에서의 수리학적 모형의 구축을 통한 흐름해석에 대한 연구는 비교적 활발하게 진행되고 있는데, 이종태 등(1993)이 1차원 하도추적모형인 DWOPER 모형을 이용한 한강본류에 대한 조위영향 분석을 실시한 이후, 안익장 등(1994)이 한강 하구부의 흐름특성을 분석하기 위한 흐름해석 모형을 개발한 바 있으며, 김원 등(1995, 1996)은 1차원 부정류 모형을 이용하여 한강 하류부의 홍수류 특성을 분석하였다. 황의준과 전경수(1997)은 가변형 매개변수 모형을 이용한 폐합형 부정류 계산모형을 수립한 바 있으며, 윤태훈 등(2000)은 한강 하류부에 대해서 수위 및 유량 자료를 Hec-2와 Network, SMS 등을 이용하여 모의 결과를 실측수위와 비교하였으며, 김원 등(2001)은 한강 본류에서 신곡수중보와 조석운동을 고려한 흐름특성에 관한 연구를 수행하였다. 김동구 등(2001)은 UNET 모형을 이용하여 한강 하류부에서의 흐름해석을 실시하였고, 김상호와 김원(2002)은 감조지역에서 실측한 조위자료와 최근 하천측량성공과를 이용하여 수리학적 모형을 구축하였다. 이정규와 이창현(2003), 이정규와 전세호(2004)는 수리학적 모형을 이용하여 한강하류부의 조도계수 산정을 위한 연구를 수행하였으며, 김상호 등(2003)은 서해안의 조위가 한강과 임진강에 미치는 영향을 수리학적 모형을 이용하여 분석한 바 있다. 유명관과 전경수(2004)는 댐 운영방안을 수리학적 모형의 내부경계로 포함하는 수리학적 모형을 개발하여 한강수계에 적용하였다.

이와 같이 최근 서해안의 조석의 영향에 관한 연구와 한강의 수중보를 고려한 수리학적 모형의 구축에 관한 연구가 활발히 진행되고 있지만, 신곡수중보가 한강의 흐름에 미치는 수리학적인 영향을 서해안 조석을 고려하여 체계적으로 분석한 연구는 미비한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 신곡수중보의 설치로 인한 한강 하류부 흐름의 변화를 살펴보기 위해 한강 하류부에 대한 수리학적 홍수추적 모형을 구축하고 신곡수중보가 한강 본류흐름에 미치는 영향을 팔당댐에서 방류되는 홍수량의 규모와 서해안 조위의 규모별로 정량적인 분석을 수행하고자 한다.

2. 수리학적 흐름해석 모형

한강 하류부에서 수중보를 고려한 수리학적 흐름특성을 분석하기 위해 본 연구에서는 1차원 동수역학적 홍수추적모형인 FLDWAV 모형을 이용하여 흐름해석

을 실시하고자 한다. FLDWAV 모형(Fread와 Lewis, 1998)은 기존의 일차원 흐름해석모형으로 많이 사용되고 있는 DWOPER 모형(Fread, 1987)을 댐 붕괴에 대한 모의기능과 댐 붕괴로 인한 하도에서의 급격한 홍수파를 추적할 수 있는 홍수파해석 모의기능이 있는 DAMBRK 모형(Fread, 1988)과 통합하여 미국 기상청(NWS, National Weather Service)의 Fread가 개발한 범용프로그램으로 단일형이나 가지형 수로에서의 1차원 부정류 해석을 위한 동수역학적 모형의 일반형태를 가지고 있다.

2.1 기본방정식

FLDWAV 모형은 동역학적 부정류 흐름방정식을 4점 음해기법(four-point implicit method)에 의한 유한차분해석을 실시하여 그 해를 구한다. 홍수파 해석을 위한 Saint-Venant 식은 식 (1)~(2)와 같은 질량보존의 식과 운동량 보존의 식으로 구성된다.

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial(A+A_0)}{\partial t} - q = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(Q^2/A)}{\partial x} + gA \left(\frac{\partial h}{\partial x} + S_f + S_e \right) \quad (2)$$

$$+ L + W_f B = 0$$

여기서

$$S_f = \frac{n^2 |Q| Q}{A^2 R^{4/3}} = \frac{|Q| Q}{K_c^2} \quad (3)$$

$$S_e = \frac{K_e \partial(Q/A)^2}{2g\partial x} \quad (4)$$

$$W_f = C_w |V_r| V_r \quad (5)$$

또한, x 는 하천 흐름방향의 거리[L], t 는 시간[T], Q 는 유량[L³T⁻¹], A , A_0 는 각각 흐름단면적[L²]과 저류단면적[L²], h 는 수위[L], q 는 제방을 통한 범람량[L²T⁻¹], L 은 범람량에 의한 운동량의 영향으로서 $L = -q_L V_L$ [L³T⁻²]로 표시되며 V_L 은 범람량의 유속[L T⁻¹]이다. S_f , S_e 는 각각 마찰경사와 단면변화에 따른 손실경사의 항이며, W_f 는 흐름표면에 저항하는 바람의 효과[L²T⁻²]를 나타내며 B 는 수면높이 h 에 대한 흐름의 폭[L]을 의미하고 있다. 이제 식 (1), (2)의 수치해를 구하기 위해서 유한차분기법 중 시간가중치 θ 를 도입하게 되는데, 가중

치 θ 가 0.5일 경우는 box 기법, 1.0일 경우는 완전음해 기법이다. Fread(1974)에 의하면 무조건적인 수치안정성과 좋은 정확도를 제공받기 위해서는 θ 가 0.5에 가까운 값을 사용할 것을 추천한 바 있다. 정확도는 θ 가 0.5에서 1.0으로 가까워질수록 감소되는데 이러한 영향은 시간간격의 크기를 증대시킴에 따라 더욱 명백하게 나타난다. FLDWAV 모형에서는 θ 가 입력자료로 사용되는데 일반적으로 0.55~0.60의 값이 0.5를 사용하였을 때 나타나는 불안정성의 문제를 해결하고 정확도의 손실을 최소화할 수 있어 자주 사용된다.

2.2 계산 알고리즘

식 (1), (2)의 비선형 대수방정식의 해를 구하기 위해서 유한차분기법 중 음해적으로 해석하는 Preissmann 기법을 적용하면 비선형 방정식이 유도되며, 이때 구성되는 비선형 대수방정식의 해를 구하기 위하여 반복 계산법의 하나인 Newton-Raphson 방법을 적용하여 해석한다. Newton-Raphson 방법은 2차항 및 고차항의 모든 항들을 무시하는 비선형 함수의 Taylor 급수 전개 이론에서 유도되며, 그 결과로 나타난 계산 알고리즘은 식 (6)과 같다.

$$J(x^k) \Delta x = -f(x^k) \quad (6)$$

여기서 $x = (Q_1, h_1, \dots, Q_N, h_N)$ 으로 표시되는 미지의 벡터량, k 는 계산 반복횟수, $J(x^k)$ 는 x^k 값에 대한 편미분치로 구성되는 Jacobian 매트릭스, $f(x^k)$ 는 x^k 값에 대한 비선형방정식, x^k 는 초기 가정값이며, 미지값 ΔX 에 대한 식 (6)의 해는 Gauss 소거법과 같은 적절한 역행렬 계산기법 등으로 구할 수 있다. 실제로 ΔX 벡터는 식 (7)과 같은 초기 추정치와 개량된 추정치간의 차이를 나타내게 되며, 미지의 유량(Q_i^{j+1}, Q_{i+1}^{j+1})과 수위(h_i^{j+1}, h_{i+1}^{j+1}) 항을 포함하는 Δx 가 허용한계보다 작을 때까지 계산을 반복하게 된다.

$$\Delta X = X^{k+1} - X^k \quad (7)$$

여기서 k = 반복횟수, X^k = 초기추정치, X^{k+1} = 개량된 추정치를 나타낸다.

3. 수리학적 모형의 구축

3.1 대상구간

한강 하류부에서 팔당댐의 방류량과 서해안 조위를

고려한 신곡수중보의 영향을 살펴보기 위해 한강의 팔당댐에서 하구부인 월곶 지점까지 91km를 대상구간으로 선정하였으며, 왕숙천, 탄천, 중랑천, 안양천, 임진강 등 주요 지류들을 모두 고려하였다. 그림 1은 한강 하류부에 대한 유역도를 나타내고 있으며, 대상구간에 대한 하도단면자료는 2000년에 실시한 단면측량자료를 이용하였고, 한강 하류부에서는 226개의 하도단면자료로 구성하였다. 그 외의 작은 규모의 1차 및 2차 지류들은 전체 시스템에 미치는 영향과 자료입수의 어려움으로 인해 대상구간에 포함하지 않았다.

그림 2에는 한강에서 측정된 단면자료들을 이용하여 하도에서의 최심하상고를 나타내고 있는데, 그림에서 보는 바와 같이 전체적인 하상경사가 대체로 매우 완만하면서도 변화정도가 매우 심한 양상을 나타내고 있었다. 또한 한강 하류부에는 팔당댐으로부터 22km와 55km 지점에 잠실수중보와 신곡수중보가 위치해 있는데, 잠실수중보는 수리학적 모형에 적용하기 위해 잠실수중보상의 흐름을 한계류가 발생하는 수위와 발생하지 않는 수위로 구분한 후 한계류 계산과 과거 홍수자료를 이용하여

개발된 수위-유량관계곡선(해양수산부, 2001)을 이용하여 고려하였다. 하지만 신곡수중보에서는 조석의 영향으로 인해 흐름이 단일형태가 아니라 루프형 수위-유량관계곡선으로 나타나기 때문에 수위-유량관계곡선을 이용한 모형의 적용은 어려움이 있어 보가 있는 위치에서 실제 보의 형상에 관한 지형자료를 입력자료로 사용하여 단면이 축소되는 것으로 모형에 고려하였으며, 신곡수중보가 설치되기 전의 경우는 보의 전과 후 단면을 평균하여 신곡수중보의 단면으로 가정하였다.

3.2 모형의 보정 및 검증

수리학적 홍수추적모형에 대한 적용성과 정확도를 분석하기 위해 모형에 대한 보정과 검증을 실시하였다. 먼저 대상구간에 대한 경계조건을 살펴보면 상류단인 팔당댐에서는 홍수사상에 대한 실제 방류량을 사용하였으며, 왕숙천을 비롯한 주요 지류에서는 각 지류의 상류에 위치한 수위관측소의 수위관측자료를 유량자료로 환산하여 모형에 사용하였다. 하류단 경계조건은 월곶 지점의 조위자료를 경계조건으로 사용하였는데, 2000년에 직

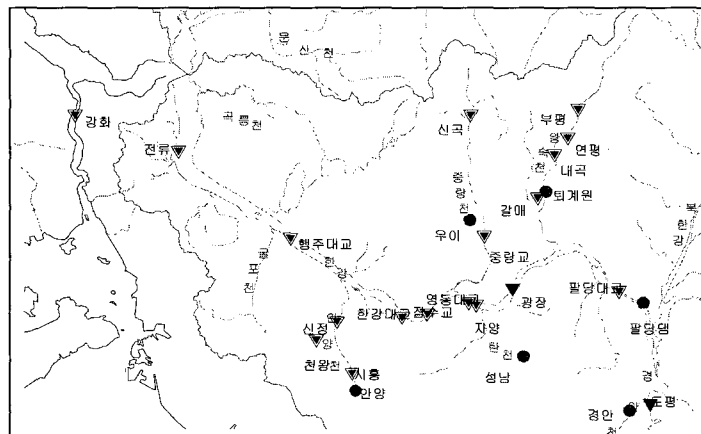


그림 1. 한강 하류부의 대상유역도

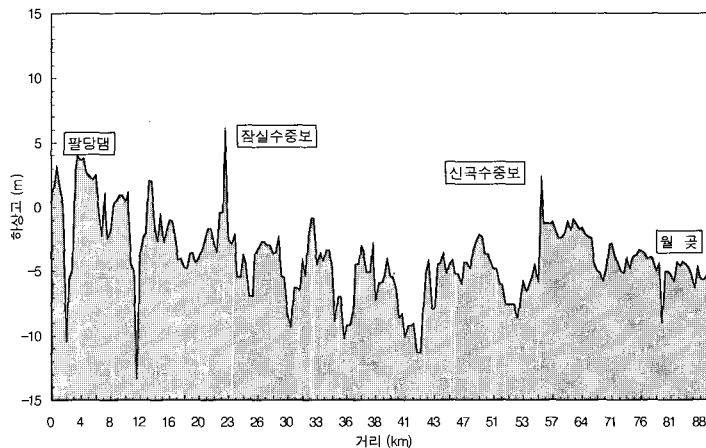


그림 2. 대상구간의 최심하상고

접 관측한 조위자료(해양수산부, 2001)와 2000년도 이전에 인천항의 조위측정자료를 조화분석을 통해 변환한 예측조위자료를 이용하여 모형에 적용하였다.

본 연구에서 사용되는 수리학적 홍수추적 모형인 FLDWAV 모형은 계산수위를 구간별 Manning의 조도계수를 이용한 조절이 가능하며 이를 통해 전반적인 모형의 정확성을 높일 수 있다. 따라서 본 연구에서는 과거 조도계수 산정을 위해 시행된 실험결과(국립건설시험소, 1983, 1984)와 부등류 모형을 이용한 결과(한국수자원공사, 1989; 한강관리사업소, 1993) 그리고 한강홍수통제소(1994)와 해양수산부(2001)에서 산정된 조도계수를 토대로 과거 홍수사상의 관측수위를 가장 잘 재현해내도록 조도계수를 한강 하류부 11개 구간별 및 12개 유량 등급별로 수정하는 방법을 사용하여 모형의 보정을 실시하였다. 대상기간은 해양수산부에서 관측한 조위자료가 있는 2000년 7월에서 9월까지 발생한 홍수사상 2개와 비홍수기에 해당하는 2개 사상에 대해 실시하였으며, 신곡수중보 상류구간에서는 0.020-0.065 범위의 값들을 사용하였으며, 신곡수중보 하류구간에서는 0.015~0.025 범위의 값들을 사용하였다(김상호와 김원, 2002).

표 1에는 이들 4개 사상이 발생한 기간동안 팔당댐

에서 방류된 최대 방류량과 한강대교에서 관측된 최대 수위를 나타내고 있으며, 그림 3에서는 팔당댐에서 각 사상기간 동안 방류한 시간별 유량을 도시하였다. 표와 그림에서 보는 바와 같이 홍수기의 두 사상은 최대 방류량이 5,000~8,000cms 규모의 홍수량이 팔당댐을 통해 한강 본류로 유입되고 있으며, 비홍수기 사상은 팔당댐의 방류량이 전반적으로 200~800cms 정도를 유지하고 있는 작은 유량이 유입되고 있는 사상으로 평수위에 대한 모형의 정확도 판단에 적용될 것이다. 검증에 위한 홍수사상은 과거 홍수사상 중 수위 관측자료가 비교적 양호한 1990년, 1995년, 1996년 그리고 1999년에 발생한 4개 홍수사상을 선정하였다. 표 2는 이들 사상에 대한 팔당댐의 최대 방류량과 한강대교에서 관측된 최대 홍수위를 나타내고 있으며, 그림 4는 각 사상의 팔당댐 방류량을 도시하고 있다.

이와 같은 사상들을 이용하여 수리학적 모형에 대한 보정과 검증을 실시하였는데, 그림 5과 6에서는 적용된 사상의 모의결과 중 신곡수중보의 직상류와 직하류 지점에 대한 모의결과를 나타내고 있으며, 표 3에서는 주요 지점별 모의결과를 관측자료와 비교한 RMS 오차를 나타내고 있다. 표와 그림에서 보는 바와 같이 보정을

표 1. 모형의 보정을 위한 홍수사상

대상 기간	팔당댐 최대 방류량(cms)	한강대교 최대수위(m)
2000년 7월 21일~25일	5,190	5.22
2000년 8월 25일~30일	8,080	6.72
2000년 8월 8일~10일	820	3.46
2000년 8월 21일~23일	1,890	4.47

표 2. 모형의 검증을 위한 홍수사상

대상 기간	팔당댐 최대 방류량(cms)	한강대교 최대수위(m)
1990년 9월 9일~13일	31,300	13.22
1995년 8월 22일~28일	24,960	11.95
1996년 7월 26일~29일	12,590	8.75
1999년 7월 30일~8월4일	18,750	10.40

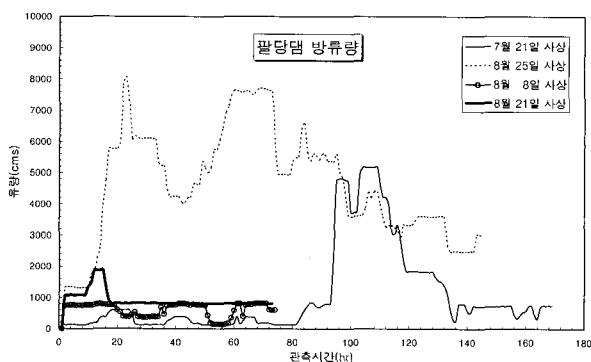


그림 3. 모형의 보정을 위한 팔당댐 방류량

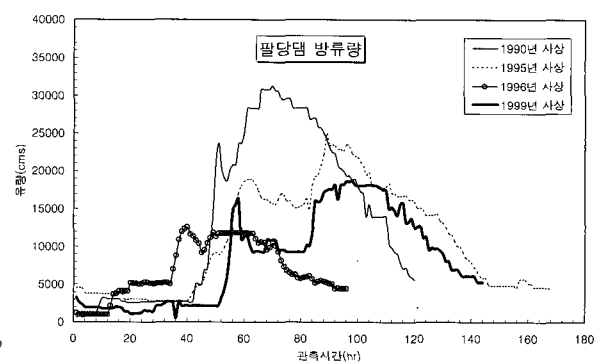
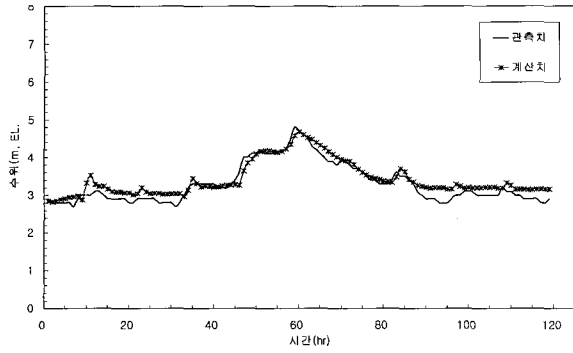
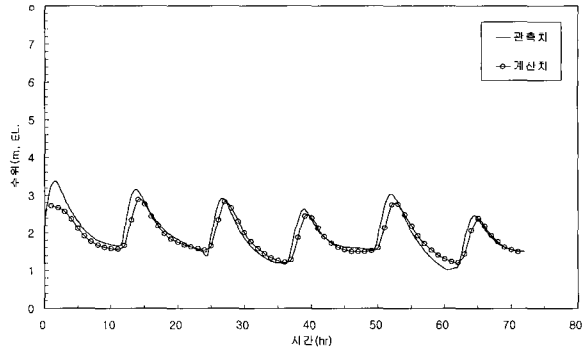


그림 4. 모형의 검증을 위한 팔당댐 방류량

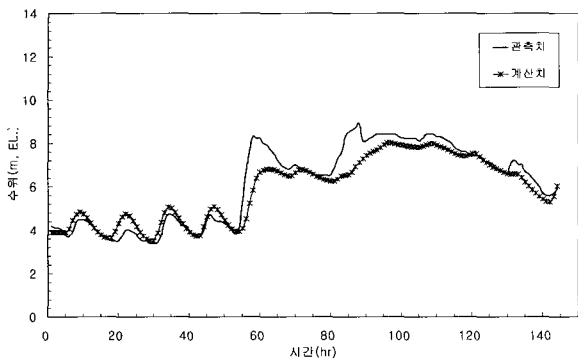


(a) 00년 7월 21일 신곡수중보(상) 지점

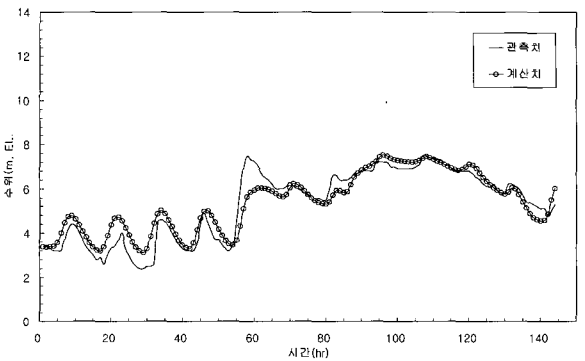


(b) 00년 8월 8일 신곡수중보(하) 지점

그림 5. 모형의 보정결과



(a) 99년 7월 30일 신곡수중보(상) 지점



(b) 99년 7월 30일 신곡수중보(하) 지점

그림 6. 모형의 검증결과

표 3. 모형의 보정 및 검증 결과

홍수사상	지점명	최대수위 (m)	RMS 오차(m)	비고	홍수사상	지점명	최대수위 (m)	RMS 오차(m)	비고	
보정결과	2000년 7월 21일 사상	잠수교	5.50	0.18		1990년 9월 9일 사상	잠수교	13.70	0.89	
		한강대교	5.24	0.26			한강대교	13.22	0.88	
		신곡수중보 상	4.73	0.18			신곡수중보 상	-	-	결측
		신곡수중보 하	4.63	0.34			신곡수중보 하	-	-	결측
	전류	4.49	0.48		전류	5.19	1.41			
	2000년 8월 25일 사상	잠수교	6.89	0.57		1995년 8월 22일 사상	잠수교	12.61	0.61	
		한강대교	6.58	0.38			한강대교	11.95	0.43	
		신곡수중보 상	6.04	0.35			신곡수중보 상	-	-	결측
		신곡수중보 하	5.36	0.76			신곡수중보 하	-	-	결측
	전류	-	-	결측	전류	5.63	0.61			
	2000년 8월 8일 사상	잠수교	3.43	0.12		1996년 7월 26일 사상	잠수교	9.10	0.46	
		한강대교	3.24	0.20			한강대교	8.75	0.39	
		신곡수중보 상	3.40	0.12			신곡수중보 상	-	-	결측
		신곡수중보 하	3.37	0.22			신곡수중보 하	-	-	결측
	전류	3.12	0.60		전류	4.46	0.73			
	2000년 8월 21일 사상	잠수교	4.56	0.29		1999년 7월 30일 사상	잠수교	10.90	0.38	
		한강대교	4.36	0.18			한강대교	10.40	0.44	
		신곡수중보 상	4.08	0.26			신곡수중보 상	8.90	0.67	
		신곡수중보 하	4.09	0.34			신곡수중보 하	7.50	0.57	
	전류	-	-	결측	전류	7.06	0.91			

위한 모의결과에서는 RMS 오차가 전반적으로 작게 나타나고 있었으며 신곡수중보에서의 정확도도 비교적 높게 나타나고 있었지만, 검증 결과에서는 전체적으로 약간 크게 나타나고 있었다. 이와 같은 검증결과는 월곶 지점의 조위자료가 실측한 조위자료가 아닌 조화분석을 통해 예측한 조위자료이며 실제 발생한 조위변화를 정확하게 재현하지 못하였기 때문에 나타나는 결과로 판단된다.

4. 신곡수중보의 영향분석

본 절에서는 1차원 수리학적 홍수추적 모형을 이용하여 신곡수중보가 팔당댐의 방류량과 서해안 조석의 영향으로 인해 형성되는 한강 본류의 흐름에 미치는 영향을 수중보가 건설되지 않았을 경우와 비교하고자 한다. 이를 위해 한강의 상류단인 팔당댐의 방류량을 평수기 유량인 300cms와 계획홍수량인 37,000cms 두 경우를 고려하였다. 팔당댐에서의 시간별 방류량은 방류량의 형태에 따라 하류부에서 다양한 흐름특성이 나타나기 때문에 하류부에서 발생하는 조위의 영향이 한강 본류에서 규칙적으로 나타나게 하기 위해 일정한 양이 지속적으로 방류되는 것으로 가정하였다. 다만 계획홍수량의 경우 처음에 1,000cms부터 방류를 시작하여 선형으로 증가하다가 15시간 후에 목표 방류량에 도달하여 계속 유지되는 것으로 가정하였다. 이 때 대상구간 내에 월곶 지점에서 발생하는 조위는 한국해양연구원에서 관측한 실제 관측자료 중 만조위와 간조위의 수위차

인 조차를 여러 규모로 나누어서 조차가 최대인 경우(만조위:5.5m)와 최소인 경우(만조위:2.4m)에 해당하는 24시간 동안의 조석자료를 반복하여 하루단 경계조건으로 그림 7과 같이 이용하였다.

4.1 평수시에 대한 영향분석

팔당댐의 방류량이 평수기 유량인 300cms이고 월곶 지점의 최대 만조위가 2.4m 규모의 조위가 발생할 경우 신곡수중보의 유무에 따라 한강 본류부에서는 흐름양상이 매우 다르게 나타나고 있었는데, 잠실수중보를 중심으로 상류쪽으로는 조위의 영향이 미치지 않아 모의결과에서 차이가 거의 없지만 잠실수중보 직하류부에서부터 신곡수중보까지는 비교적 차이가 크게 나타나고 있었다.

이러한 특성을 자세히 살펴보기 위해 한강 본류부 내에 있는 주요 수위관측점의 시간별 수위변화를 살펴 보았다. 그림 8은 신곡수중보의 유무에 따라 한강 하류부의 잠수교, 한강대교, 신곡수중보 상·하 그리고 전류 지점에서의 시간별 수위를 나타내고 있다. 그림에서 만조위와 간조위의 차인 조차를 살펴보면 신곡수중보가 있는 경우 신곡수중보 직하류 지점에서는 1.79m, 전류 지점에서는 2.96m로 크게 나타나고 있지만 신곡수중보 상류에 위치한 한강대교에서는 0.07m로 아주 작게 나타나고 있었다. 하지만 신곡수중보가 없는 경우 전류 지점에서 2.60m의 조차를 나타냈으며, 그 외의 신곡수중보 상·하 지점을 포함한 잠수교, 한강대교에서는 약 0.70m 정도의 조차가 나타났다.

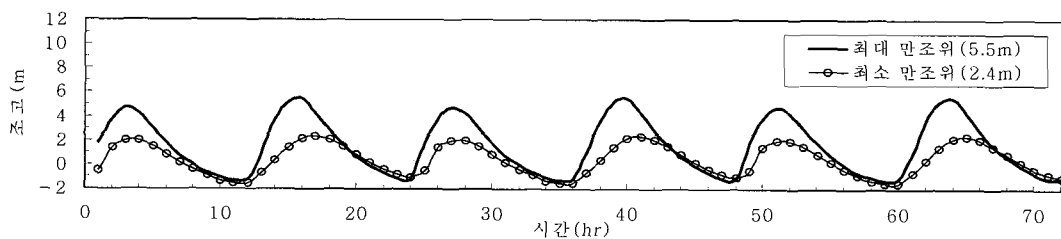
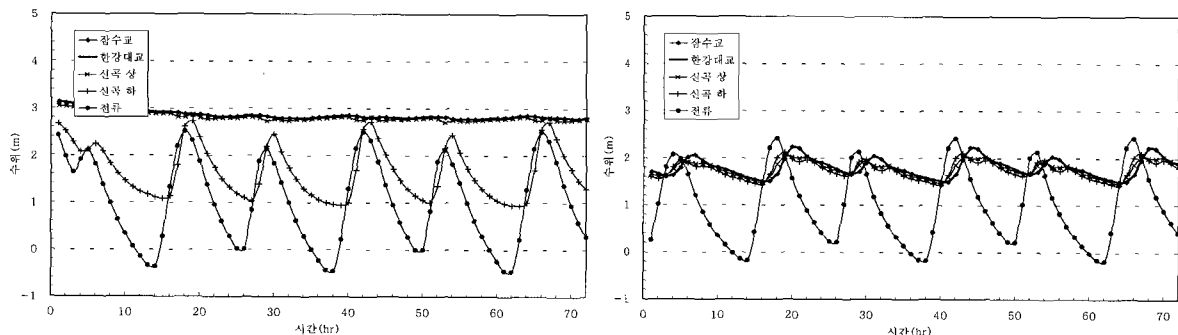


그림 7. 월곶 지점의 하루단 경계조건



(a) 신곡수중보 유

(b) 신곡수중보 무

그림 8. 신곡수중보에 대한 흐름분석 결과(홍수량:300cms, 만조위:2.4m)

결국, 신곡수중보가 없을 경우 전류 지점에서 2.60m 정도로 나타나는 조차는 상류로 전파되면서 전류와 신곡수중보 사이의 하상고 영향으로 조차가 감소된 후 잠실수중보까지 거의 동일한 조위의 영향이 나타나고 있었다. 그러나 신곡수중보의 설치로 인해 전류 지점의 조차는 약 14% 정도 크게 나타났으며, 이러한 조위의 영향은 상류로 전파되면서 신곡수중보를 만나 거의 소멸되고 약 1/10 정도로 작게 나타나고 있었는데, 이와 같은 결과는 그림 10(a, b)에서와 같이 지점별로 비교한 그림에서도 확인할 수 있다.

이제 팔당댐의 방류량은 300cms를 유지하면서 월곶 지점에서 발생하는 만조위가 5.5m로 가장 높은 조고가 발생할 경우에 대해 살펴보았다. 만조위가 2.4m일 경우와는 많이 다른 양상을 나타내고 있었는데, 서해안의 만조위가 높아짐으로 인해 조차도 커지고 조위의 영향이 한강 본류부에서도 크게 나타났다. 즉, 월곶 지점에서 발생하는 최대 조고가 5.5m까지 상승함으로 인해 한강 본류부에서는 신곡수중보의 유무에 상관없이 하도 전반적으로 만조시 수위상승은 유사하게 나타났다. 그러나 간조시 수위를 살펴보면 수중보 하류에서는 보가 존재할 경우가 더 낮게 나타나고 있었으며, 보 상류에서는 수중보가 있을 경우 하천 수위가 보 높이 이하로는 낮아지지 않아 보가 없을 경우보다 더 높게 나타났다.

그림 9는 한강 본류내 주요 지점에 대한 시간별 수위 변화를 나타내고 있는데, 신곡수중보가 있을 경우 전류 지점에서는 조차가 4.8m, 신곡수중보 직하류 지점에서는 3.38m로 크게 나타나다가 신곡수중보 상류쪽으로는 약 1.60m 정도로 조차가 크게 감소하였다. 하지만 신곡수중보가 없을 경우 조차는 전류 지점에서 4.34m로 보가 있을 경우보다 오히려 작게 나타나고 있으며 신곡수중보와 한강대교를 비롯한 본류부에서는 약 2.45m 정도로 보가 있을 경우보다 더 크게 나타났다.

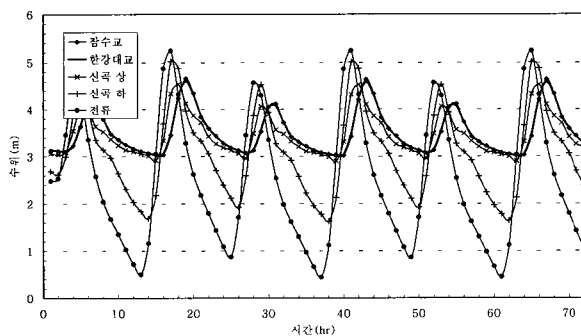
조차에 대한 이러한 결과는 그림 10(c, d)와 같이 지

점별 수위를 비교함으로써도 확인할 수 있는데, 한강대교에서는 신곡수중보의 설치로 인해 만조시 수위가 0.13m 낮아졌으며 간조시에는 0.79m가 높게 나타났다. 그리고 신곡수중보 직하류 지점에서는 만조시 0.38m 높아졌으며 간조시에는 0.57m 정도 수위가 낮아짐을 확인할 수 있었다.

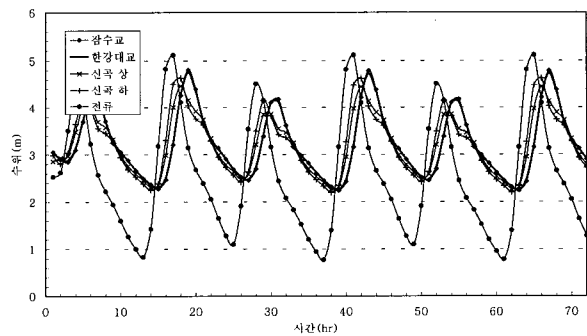
4.2 홍수시에 대한 영향분석

팔당댐에서 계획홍수량인 37,000cms가 방류되고 있을 때 서해안의 조고에 따른 신곡수중보의 영향을 살펴 보았다. 한강 본류부에서 평수량 규모의 유량이 흐르고 있을 때와는 달리 계획홍수량이 팔당댐에서 방류될 때 대상구간 대부분에서는 유하하는 홍수파의 지배를 받게 되어 서해안 조석의 영향이 한강 본류부에 미치는 범위가 상당히 작게 나타났다.

그림 11은 한강대교 지점과 신곡수중보 하류에 있는 전류 지점에서 신곡수중보의 유무에 따른 홍수위의 모의결과를 나타내고 있다. 한강대교 지점에서는 월곶 지점의 만조위가 2.4m에서 5.5m로 증가함에 따라 홍수위는 홍수파의 영향으로 인해 변함이 없는 것으로 나타났다. 그러나 신곡수중보가 있을 경우는 보가 없는 경우보다 홍수위가 약 0.13m 정도 증가하는 것으로 나타나 신곡수중보의 상류쪽에 미약하게나마 수위 상승효과가 있는 것으로 나타났다. 신곡수중보의 하류에 위치한 전류 지점에서는 신곡수중보의 유무에 따른 영향이 전혀 나타나지 않았으며, 다만 월곶 지점의 조고가 2.4m일 경우는 조위의 영향이 전혀 나타나지 않다가 조고가 5.5m로 커질 경우 그림 11(b)에서 보는 바와 같이 약 0.26m 정도의 조차가 발생하였다. 따라서 팔당댐의 방류량이 37,000cms 정도의 큰 규모일 경우 한강 하류부에서는 신곡수중보가 있는 경우와 없는 경우에 대한 수위차는 거의 없는 것으로 나타났으며 조위의 영향도 거의 나타나지 않음을 확인할 수 있었다.

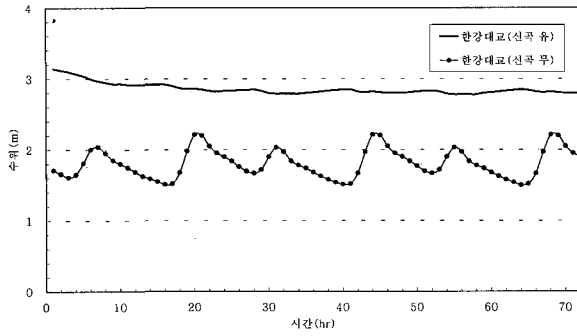


(a) 신곡수중보 유

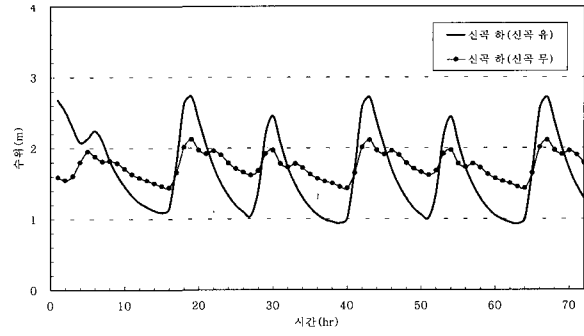


(b) 신곡수중보 무

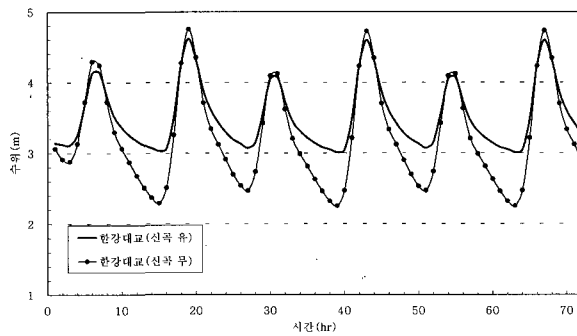
그림 9. 신곡수중보에 대한 흐름분석 결과(홍수량:300cms, 만조위:5.5m)



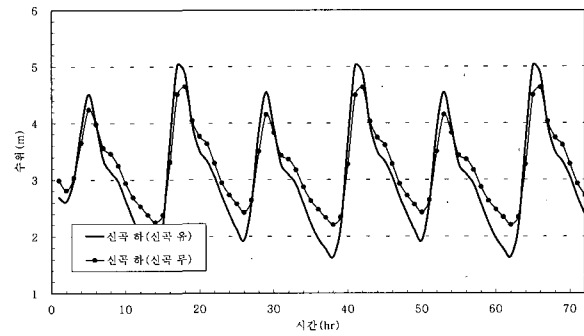
(a) 한강대교(만조위:2.4m)



(b) 신곡수중보 하(만조위:2.4m)

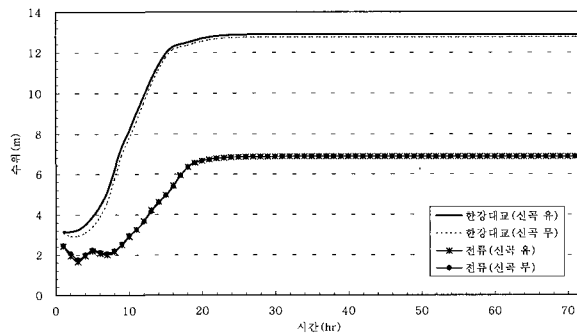


(c) 한강대교(만조위:5.5m)

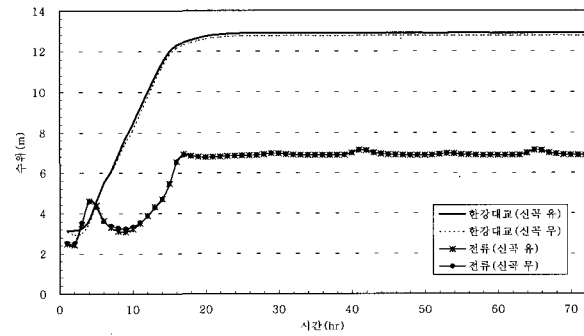


(d) 신곡수중보 하(만조위:5.5m)

그림 10. 주요 지점에 대한 수위변화 비교(홍수량:300cms)



(a) 만조위:2.4m

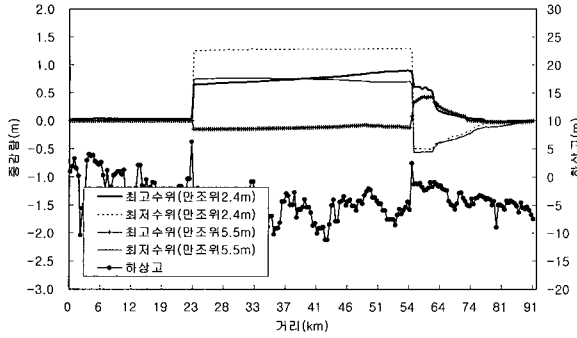


(b) 만조위:5.5m

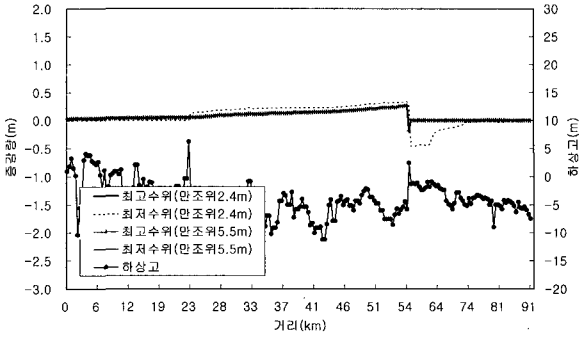
그림 11. 주요 지점에 대한 수위변화 비교(홍수량:37,000cms)

그림 12에서는 한강 하류부에서 신곡수중보의 설치로 인한 최고 홍수위와 최저 홍수위의 증감량을 두 경계조건에 대해 비교하였다. 그림 12(a)는 팔당댐의 방류량이 300cms일 경우인데, 서해안의 만조위가 2.4m일 때 신곡수중보 설치로 인해 최고 홍수위는 잠실수중보 직하류부에서는 약 0.65m, 신곡수중보 직상류부에서는 약 0.90m 정도 상승한 것으로 나타났으며, 최저 홍수위는 잠실수중보 직하류부에서는 1.25m, 신곡수중보 직상류부에서는 1.30m 정도로 나타나 갈수기시 수위상승효과가 크게 나타났다. 하지만, 만조위가 5.5m로 가장 높은 조위를 형성할 경우 잠실수중보와 신곡수중보 사이

의 최고 홍수위는 신곡수중보로 인한 역류효과로 인해 약 0.13-0.15m 정도 낮아지는 것으로 나타났으며, 최저 홍수위는 약 0.71-0.75m 정도 높아지는 것으로 나타났다. 신곡수중보 하류부에서는 조위의 크기와는 상관없이 최고 홍수위는 높아진 반면 최저 홍수위는 더 낮아지는 것으로 나타났다. 그림 12(b)는 팔당댐 방류량이 37,000cms일 경우인데, 신곡수중보의 상류쪽은 직상류부에서 약 0.30m 정도 나타나면서 상류쪽으로 갈수록 홍수파의 영향으로 인해 점차 약해지는 경향을 나타냈으며, 이러한 양상은 서해안 조위와는 상관없이 유사하게 나타났다.



(a) 홍수량:300cms



(b) 홍수량:37000cms

그림 12. 신곡수중보 설치에 따른 최대 및 최소홍수위 증감량

4.3 조위 영향분석

서해안에서 발생하는 조석현상으로 인한 수위의 변동은 한강 본류부로 영향을 미치게 되는데 평수기에는 신곡수중보를 중심으로 상·하류쪽으로 모두 영향을 미치는 것으로 나타났다. 하지만 팔당댐에서의 방류량이 증가할수록 한강 본류부에 미치는 조위의 영향은 점차 약해지다가 계획홍수량이 방류되면 전류 지점에서도 조위의 영향은 아주 작게 나타났다. 이와 같이 팔당댐의 방류량과 월곶 지점에서의 만조위의 크기에 따라 한강 본류부에서 나타나는 조위의 영향은 서로 밀접한 연관성을 갖고 있는 것으로 보인다.

팔당댐의 유량규모와 만조위의 조고에 따른 신곡수중보에서의 조위감소 효과를 살펴보기 위해 표 4에서 제시한 바와 같은 팔당댐의 방류량 규모와 월곶 지점의 가상 조위자료를 이용하고자 한다. 여기서 팔당댐의 방류량은 평수기 방류량인 300cms에서부터 계획홍수량인 37,000cms까지 6개 유량등급으로 나누어 고려하였다. 시간별 방류량은 유량이 작을 경우는 방류량이 일정하게 유지되는 것으로 하였고, 유량이 많을 경우에는 1,000cms에서부터 증가하여 15시간 후에 목표유량에 도달하여 일정하게 유지되는 것으로 가정하여 조위의 영향에 대한 영향을 쉽게 분석할 수 있도록 하였다. 월곶 지점에서의 가상 조위자료는 그림 7과 같이 최대 만조위(5.5m), 최소 만조위(2.4m) 그리고 이들 규모 가운데 중간규모(3.8m)에 해당하는 세가지 경우에 대한 24

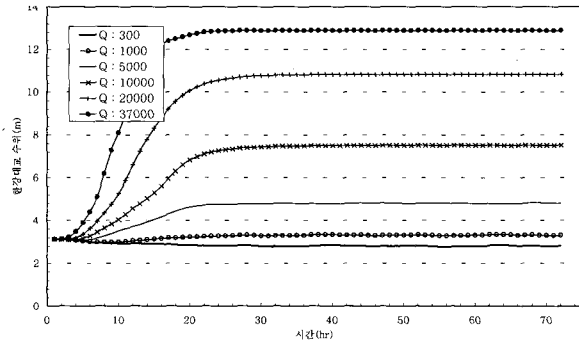
시간 동안의 실측자료를 선정하여 72시간 동안 선정된 자료를 반복함으로써 규모별 3개의 가상조위자료를 생성하여 모형의 하류단 경계조건으로 사용하고자 한다.

이와 같은 상·하류단에서의 경계조건들을 서로 조합하여 동수역학적 흐름해석 모형을 수행하였으며, 한강대교, 신곡수중보 하 그리고 전류 지점에서 시간별 수위변화를 만조위와 간조위의 차인 조차를 이용하여 살펴보았다. 그림 13과 14는 월곶 지점의 만조위가 2.4m와 5.5m일 경우에 대한 한강대교와 전류 지점에서의 모의결과를 나타내고 있다. 먼저, 만조위가 2.4m일 경우는 그림 13에서와 같이 전류 지점에서는 팔당댐의 방류량이 10,000cms일 때는 약 0.44m로 나타났으며, 300cms일 때는 2.96m 정도의 조차가 나타났다. 하지만 20,000cms 이상이 방류될 때에는 0.11m 이하로 조차가 거의 나타나지 않았으며, 한강대교 지점에서는 전체 유량등급에 대해 조차가 거의 나타나지 않았다.

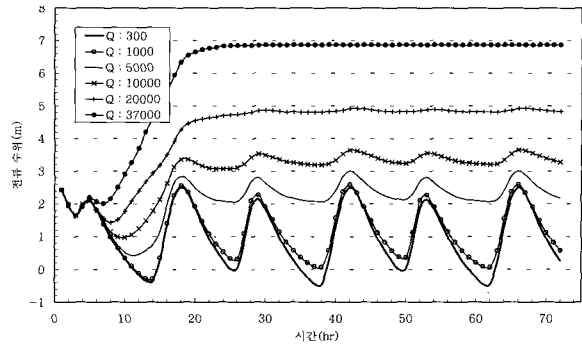
월곶 지점의 만조위가 최대인 5.5m인 경우는 그림 14와 같이 전류 지점에서는 계획홍수량의 유량이 방류될 경우 0.25m 정도의 조차가 나타나고 있었으며, 300cms에서는 4.80m의 큰 조차가 나타나고 있었다. 신곡수중보 하 지점에서는 37,000cms 유량규모에서 조차가 거의 나타나지 않아 하류단에서의 조고가 상당히 높지만 홍수파의 영향을 더 많이 받는 것으로 나타났으며, 20,000cms의 유량규모에서는 0.35m의 조차가 나타났고 이보다 작은 유량규모에서는 1m 이상의 비교적 큰 조차가 발생하고 있었다. 그러나 한강대교 지점에서

표 4. 조위영향분석을 위한 경계자료

팔당댐 방류량 규모 (cms)	월곶 지점의 가상 만조위 (m)
300 1,000	5.5
5,000 10,000	3.8
20,000 37,000	2.4

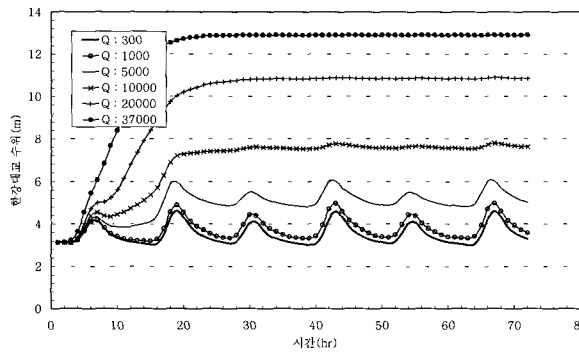


(a) 한강대교 지점

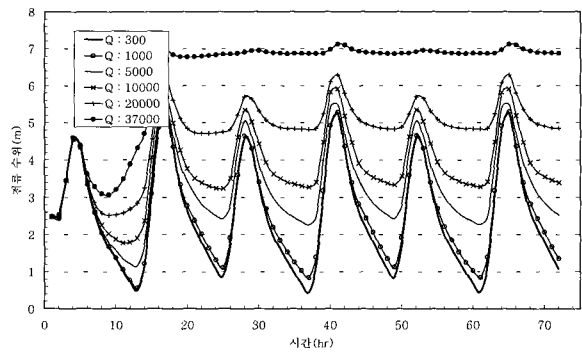


(b) 전류 지점

그림 13. 유량등급별 조차분석도(만조위:2.4m)



(a) 한강대교 지점



(b) 전류 지점

그림 14. 유량등급별 조차분석도(만조위:5.5m)

는 20,000cms 이상의 유량에서 조위의 영향이 거의 나타나지 않았으며, 10,000cms 유량에서는 0.25m, 300cms에서는 1.59m 정도로 신곡수중보 직하류부에 비해 상당히 작게 나타났으며, 이는 신곡수중보로 인해 조위의 전달이 일부 차단되었음을 의미하고 있다.

표 5는 한강대교, 신곡수중보 직하류부 그리고 전류 지점에서의 조차를 팔당댐의 방류량과 서해안의 만조위 크기별로 나타내고 있으며, 그림 15과 16에서는 한강대교와 전류 지점에 대한 조차분석도를 나타내고 있다. 표와 그림에서 보는 바와 같이 신곡수중보의 상류쪽에 위치한 한강대교 지점에서는 만조위의 크기가 작을수록 조차는 작게 나타났으며, 만조위가 5.5m이고 팔당댐 방류

량이 300cms일 때 약 1.6m 정도 나타났으며 홍수량이 많을수록 조차는 감소하였다. 특히, 홍수량이 5,000cms일 때는 1.2m 정도로 크게 나타났으나 10,000cms로 증가하였을 경우 0.25m 정도로 크게 감소하였다. 전류 지점에서는 서해안과 가까운 지리적 특성으로 인해 조차는 비교적 크게 나타나고 있었으며, 홍수량이 클수록 점차 작아지는 경향을 나타내고 있었는데, 팔당댐의 방류량이 300cms이고 서해안의 만조위가 5.5m일 때 약 4.8m 정도의 조차가 나타났으며, 계획홍수량인 37,000cms, 만조위가 5.5m일 때는 약 0.25m 정도의 조차가 발생하는 것으로 나타났다.

표 5. 한강 하류부 주요 지점에서의 조차분석 결과(단위:m)

유량 (cms)	만조위 : 2.4m			만조위 : 3.8m			만조위 : 5.5m		
	한강대교	신곡수중보 (하)	전류	한강대교	신곡수중보 (하)	전류	한강대교	신곡수중보 (하)	전류
300	0.07	1.79	2.96	0.48	2.44	3.78	1.59	3.38	4.80
1000	0.05	0.97	2.52	0.54	1.88	3.41	1.66	2.95	4.44
5000	0.04	0.16	0.94	0.26	0.72	2.07	1.22	1.87	3.21
10000	0.02	0.08	0.44	0.05	0.40	1.38	0.25	1.34	2.62
20000	0.00	0.01	0.11	0.01	0.06	0.42	0.06	0.35	1.47
37000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.01	0.04	0.25

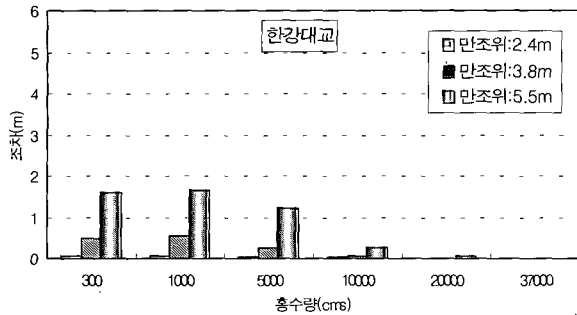


그림 15. 한강대교 지점에서의 조차분석

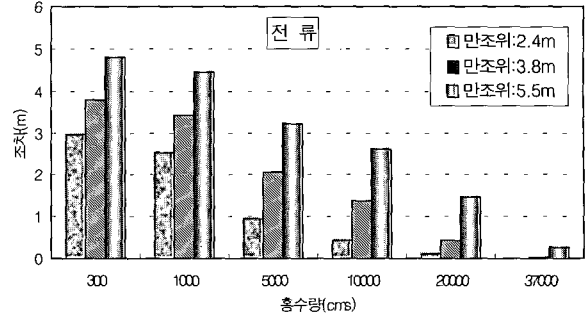


그림 16. 전류 지점에서의 조차분석

5. 결 론

본 연구에서는 한강 하류부에 위치한 신곡수중보가 한강흐름에 미치는 영향을 분석하고자 한다. 이를 위해 1차원 동수역학적 수리해석 모형을 이용하였으며, 팔당댐의 방류량과 서해안의 조위조건에 따른 흐름양상을 분석하였는데 주요 연구결과는 다음과 같다.

- (1) 신곡수중보로 인한 한강 하류부의 조차발생을 살펴보면 평수량 300cms가 방류될 때 최대 만조위가 2.4m인 경우 한강대교에서는 신곡수중보가 없을 경우 0.70m의 조차가 발생하는 것으로 나타났으나, 수중보 설치로 인해 0.07m 정도로 크게 감소되어 90%의 조차감소율을 보였으며, 최대 만조위가 5.5m일 때는 한강대교에서 2.45m의 조차가 1.6m로 줄어들어 조차감소율이 35%인 것으로 나타났다. 팔당댐에서 계획홍수량이 방류될 경우 한강대교 지점에서는 만조위의 크기에 상관없이 조차가 거의 나타나지 않았지만 0.13m 정도의 수위상승 효과가 있는 것으로 나타났다.
- (2) 신곡수중보의 설치로 인해 한강 하류부의 수위상승효과는 평수시 서해안의 만조위가 2.4m일 때 잠실수중보 직하류부와 신곡수중보 직상류부에서 최고 수위는 각각 약 0.65m와 0.90m, 최저 수위는 약 1.25m와 1.30m 정도의 상승이 발생한 것으로 나타났다. 만조위가 5.5m일 때는 잠실수중보와 신곡수중보 사이의 최고 수위는 오히려 낮게 나타났으며, 최저 수위는 약 0.7m 정도 높게 나타났다. 그러나 홍수시에는 신곡수중보의 영향이 미미한 것으로 나타났다.
- (3) 서해안에서 발생하는 조석현상이 한강 하류부에 미치는 영향을 살펴보기 위해 다양한 팔당댐 방류량 조건과 월곳의 만조위 조건을 활용하였다. 모의결과 팔당댐의 방류량이 클수록, 서해안의

만조위가 낮을수록 한강 하류부에서의 조차가 작게 나타났다. 한강대교에서는 만조위가 5.5m일 경우 팔당댐의 방류량이 5,000cms 이하일 때 1.2m 이상의 비교적 큰 조차가 나타났으며, 10,000cms일 때 0.25m, 20,000cms일 때 0.06m, 계획홍수량인 37,000cms가 방류될 때는 약 0.01m 정도의 조차가 나타나 조위로 인한 수위변동이 거의 없는 것으로 나타났다.

본 연구에서 살펴본 신곡수중보의 수리학적인 분석 결과는 팔당댐의 방류량과 서해안 조석의 영향을 고려한 한강 홍수예경보시스템의 활용과 한강 홍수예방에 크게 기여할 것으로 사료된다.

감사의 글

이 논문은 2002년도 상지대학교 교내 연구비 지원에 의한 것임.

참 고 문 헌

- 국립건설시험소 (1983). **한강하류부 이동상 수리모형 실험 보고서**.
- 국립건설시험소 (1984). **잠실수중보 수리모형 실험 보고서**.
- 김동구, 김원, 김상호 (2001). "한강 하류부 흐름해석을 위한 UNET 모형의 적용." **2001년도 한국수자원학회 학술발표회 논문집(II)**, 한국수자원학회, pp. 673-678.
- 김상호, 김원 (2002). "한강 하류부 흐름해석을 위한 수리학적 모형의 구축." **한국수자원학회논문집**, 제35권, 제5호, pp. 485-500.
- 김상호, 김원, 최홍식 (2003). "한강 및 임진강의 조위 영향분석." **한국수자원학회논문집**, 제36권, 제2호, pp. 301-313.

- 김 원, 김양수, 우효섭 (1995). "부정류 모형을 이용한 한강 하류부 하도의 조도계수 산정." **한국수자원학회지**, 제28권, 제6호, pp. 133-146.
- 김 원, 김창완, 윤광석, 윤태훈 (2001). "신곡수중보와 조석운동을 고려한 한강 본류의 흐름특성." **대한토목학회논문집**, 제21권, 제3B호, pp. 305-314.
- 김 원, 우효섭, 김양수 (1996). "1차원 St. Venant 방정식을 이용한 한강 하류부 하도의 홍수류 특성 분석." **한국수자원학회지**, 제29권, 제1호, pp. 163-179.
- 서울특별시 (1986). **한강수위유지시설(하류수중보) 기본계획 및 실시설계 보고서**.
- 안익장, 고진석, 최병호 (1994). "동수역학적 모형에 의한 한강 홍수의 실시간 산정." 1994년도 대한토목학회 학술발표회논문집(II), 대한토목학회, pp. 217-220.
- 유명관, 전경수 (2004). "홍수시 댐 운영방안을 내부 경계조건으로 포함하는 부정류 계산모형." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제37권, 제12호, pp. 1043-1054.
- 윤태훈, 이종욱, 제갈선동 (2000). "동수역학모형의 매개변수 산정." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제33권, 제1호, pp. 39-50.
- 이정규, 이창현 (2003). "수리학적 홍수추적 모형을 이용한 한강하류부의 조도계수 산정." **2003년도 한국수자원학회 학술발표회논문집(II)**, 한국수자원학회, pp. 847-850.
- 이정규, 전세호 (2004). "부정류 모형을 이용한 한강의 수리학적 홍수추적에 관한 연구." **대한토목학회논문집**, 제24권, 제4B호, pp. 301-310.
- 이정규, 전세호, 장기환 (2003). "홍수시 한강 흐름특성에 미치는 수리구조물의 영향 분석." **2003년 대한토목학회 학술발표회논문집(II)**, 대한토목학회, pp. 2727-2731.
- 이종태, 한건연, 서병하 (1993). "한강의 홍수규모에 따른 인도교 수위의 조석영향 분석." **한국수문학회지**, 제26권, 제2호, pp. 67-77.
- 한강관리사업소 (1993). **한강하류 수질보전대책 수립 조사 보고서**.
- 한강홍수통제소 (1994). **홍수자료관리시스템구축**.
- 한국수자원공사 (1989). **한강주운개발사업 타당성 조사 보고서**.
- 해양수산부 (2001). **한강·임진강 유역에 대한 조위영향 연구**.
- 황의준, 전경수 (1997). "한강 본류에 대한 부정류 계산 모형: 모형의 보정." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제30권, 제5호, pp. 549-559.
- Fread, D.L. (1974). *Numerical Properties of Implicit Four-Point Finite Difference Equations of Unsteady Flow*, HRL-45, NOAA Tech. Memo NWS HYDRO-18, Hydrologic Research Laboratory, National Weather Service, Silver Springs, MD.
- Fread, D.L. (1987). *National Weather Service Operational Dynamic Wave Model*, National Weather Service, Silver Springs, MD.
- Fread, D.L. (1988). *The NWS DAMBRK model : Theoretical background and users documentation*, Hydrologic Research Lab., Office of Hydrology, National Weather Service. NOAA, Silver Springs, MD.
- Fread, D.L., and Lewis, J.M. (1998). *The NWS FLDWAV Model Quick Users Guide*, NOAA, Silver Spring.

(논문번호:05-15/접수:2005.01.24/심사완료:2005.04.29)