

한강 하류부 흐름해석을 위한 수리학적 모형의 구축

Establishment of Hydraulic Model for Flow Analysis of the Lower Han River

김 상 호* / 김 원**
Kim, Sang Ho / Kim, Won

Abstract

Hydraulic model was developed to analyze the complex flow due to channel structures, tide, and tributaries in the lower Han river and Imjin river. DWOPER-2K model which can automatically process the data transformation in the model was developed as the 1-D hydraulic routing model. Observed data in tidal zone and the recent channel geometry data were collected for hydraulic model. And the flow over the Jamsil and Singok submerged weir was analyzed properly and roughness coefficient was optimized to each regions and each discharges. By the results of verification of the model, the model developed in this study may contribute to improvement of the accuracy of flood forecasting and channel management because this model can efficiently and properly analyze the various kind of flow occurred in the region of the lower Han river and Imjin river.

keywords : Han River, Imjin River, Flood Analysis, Hydraulic Model, Tide

요 지

본 연구에서는 한강 하류부 및 임진강에서 하천구조물, 조위, 주요 지류 등으로 인해 복잡하게 형성되는 흐름을 해석하기 위한 수리학적 홍수추적모형을 구축하였다. 이를 위해 하천측량 자료를 모형에서 자동적으로 처리할 수 있는 DWOPER-2K 모형을 개발하였다. 감조지역에서 이루어진 실측 조위자료와 최근의 하천측량성과를 이용하여 모형을 구축하였고 잠실수중보와 신곡수중보에서 발생하는 흐름을 효과적 모의할 수 있도록 하였으며 하천구간별 유량구분별로 조도계수를 최적화시켰다. 개발된 모형의 검증결과 한강 및 임진강 하류부에서 복잡하게 발생하는 여러 가지 형태의 흐름을 효과적으로 해석할 수 있는 것으로 나타나 홍수예경보 정확도 향상, 하천관리 등에 효율적으로 사용될 것으로 기대된다.

핵심용어 : 한강, 임진강, 수리학적 모형, 조위

* 상지대학교 이공과대학 토목공학과 전임강사
Full-time Lecturer, Dept. of Civil Eng., Sangji Univ., Wonju 220-702, Korea
(E-mail : kimsh@mail.sangji.ac.kr)

** 한국건설기술연구원 수자원환경연구부 선임연구원
Senior Researcher, Water Resources & Environmental Research Div., Korea Institute of Construction Technology,
Koyang, Kyeonggi 411-712, Korea

1. 서론

한강 하류부는 흐름이 매우 복잡하게 발생하는 구간이다. 서해안의 조위는 평상시 뿐만 아니라 홍수시에도 한강과 임진강에 영향을 미치고 있어 수위, 유속 등을 연속적으로 변화하게 한다. 조위의 영향으로 한강 본류의 많은 부분에서 수위상승이 발생하며 일부 구간에서는 역류가 발생하여 하류에서 상류로의 흐름이 발생하기도 한다. 조석변화는 일정하지 않고 기간에 따라 그 크기가 지속적으로 변화하는데 하구에서 발생하는 조위 영향은 상류에서 내려오는 유량과 밀접한 관계를 가지고 그 영향범위가 결정된다. 이와 같은 조위영향은 일반적인 하천흐름과는 완전히 달리 연속적인 흐름의 변화, 염수침입의 발생, 유사이동 등을 발생시켜 흐름의 특성을 변화시킨다. 조위 뿐만 아니라 한강과 임진강에서 발생하는 홍수량은 서로 영향을 미치고 있다. 한강, 임진강 그리고 조위가 서로에게 상당한 영향을 미치면서 한강 하류부의 흐름을 매우 복잡하게 만드는 것이다. 또 한강 본류에는 신곡수중보와 잠실수중보가 있어 하천흐름에 매우 큰 영향을 미치고 있으며 하천에 설치된 많은 교량, 도로 등도 직·간접적으로 흐름에 영향을 끼치고 있다.

이에 비해 흐름을 해석할 수 있는 조건은 매우 불리하다. 한강 하구에는 군사분계선이 위치하는 까닭에 조위측정을 실시하기 곤란하고 임진강 일부와 한강 하구부에 대한 하상, 수위, 유속 등의 측정이 불가능하여 흐름해석을 위한 기초자료가 거의 없는 실정이다. 1945년 이전에는 몇 차례 조위측정이 이루어진 적이 있지만 그 이후로는 한강 하구에 관련된 어떠한 조사도 이루어지지 못하고 있는 실정이다.

한강과 임진강의 중요성을 감안해 보면 홍수피해 방지, 염수침입 방지, 담수이용, 하상변화 분석 등 한강 하구에서 발생하는 흐름을 해석하는 것은 매우 중요하다. 여러 가지 한계에도 불구하고 홍수방지, 하천관리 등의 목적을 위해 지금까지 여러 가지 가정을 기반으로 몇몇 연구가 수행되어 왔다. 국내에서 한강 본류에 대한 수리학적 모형의 구축을 통한 흐름해석 예를 살펴보면 윤용남과 박무종(1993)은 한강 전구간에 대해 수리학적 홍수추적 방법을 이용하여 홍수방류에 의한 하류지점의 침투 홍수량과 홍수도달시간을 계산한 바 있으며, 이종태 등(1993)은 1차원 하도추적모형인 DWOPER 모형을 이용하여 한강 본류에 대한 조위영향 분석을 실시하였고, 안익장 등(1994)은 한강 하구부

의 흐름특성 분석을 위해 음해법 수치기법을 적용한 동수역학모형을 개발한 바 있다. 김원 등(1996)과 황의준과 진경수(1997)는 1차원 부정류 계산모형을 이용하여 한강 본류에 대한 흐름해석을 실시한 바 있다. 그러나 대부분의 연구결과들은 정확한 조위측정 자료가 없는 관계로 가정을 통해 연구를 수행한 까닭에 서해안에서 발생하여 한강 본류의 홍수위 형성에 상당한 영향을 미치는 조위현상을 정확하게 반영하지 못한 한계를 지니고 있다.

본 연구에서는 최근에 이루어진 한강 및 임진강 하구부에 대한 조위측정결과와 하천측량성공과를 이용하여 한강 하류부의 복잡한 흐름을 해석할 수 있는 수리학적 모형을 개발하였다. 이를 통하여 서해안의 조위의 영향으로 인한 한강 하류부에서 나타나는 수리학적 흐름특성을 살펴볼 수 있으며, 한강 및 임진강에서의 홍수에 정보의 정확도 향상을 통해 효율적인 하구부 흐름관리에 활용될 수 있을 것이다.

2. 수리학적 홍수추적모형의 개신

일반적으로 수리학적 모형은 하천에서 일차원 점변 부정류를 해석하기 위해 연속방정식과 운동량방정식으로 구성되어 있는 St. Venant 방정식에 대한 해를 구하도록 되어 있다. 일차원 모형으로서 사용되고 있는 모형은 여러 가지가 있으나 국내에서는 DWOPER (Dynamic Wave Operational Model) 모형의 활용이 가장 보편화되어 있는 실정이다. 이 모형은 미국의 홍수예보시스템인 NWSRFS에 사용되고 있는 것을 비롯하여 국내외에서 여러 하천에 적용되어 모형의 적용성, 정확성 등이 여러 차례 검증된 바 있으며, 국내에서도 한강, 낙동강, 영산강 등에서 홍수예보를 위해 실제 사용되고 있다(한강홍수통제소, 1994).

DWOPER 모형은 1978년 미국 기상청(NWS)의 D.L. Fread가 처음 개발한 이래로 1989년까지 계속 모형에 대한 수정과 보강작업이 이루어졌었다. 이 모형을 이용한 실시간 홍수예측시스템이 구축되고 여러 가지 활용성이 높아지고 있지만 하천의 하상자료에 대한 자료를 구축하기 위해서는 많은 어려움이 따르고 있다. 기존의 DWOPER 모형은 하상 형태를 반영하기 위해 각 지점마다 일반적인 좌표시스템이 아니라 이를 변형한 수위-하폭 관계가 필요하다. 이를 위해서는 일반적으로 나타나 있는 좌표시스템을 단면 그림으로 그리고, 사용자가 적절하다고 판단되는 수위에 대한 하폭을 계산하여 각 지점마다 최대 8개 정도의 수위-하폭 관계

를 구성한 후 이를 모형에 입력해야 하는 매우 번거롭고 시간이 많이 소요되는 작업을 해야만 했다. 또한 객관적인 기준보다는 사용자가 임의로 매 측정단면마다 8개 정도의 수위-하폭 관계를 선택해야 하는 관계로 일관성이 부족한 단점도 있다. 많은 시간이 소요되고 일관성이 확보되지 못하는 단점을 개선하기 위해 별도로 이를 처리할 수 있는 프로그램을 개발하여 DWOPER 모형과 같이 공급하였지만 이 역시도 모형 내부에서 직접적으로 처리되는 것이 아니라 여러 번의 작업을 거쳐서 수행해야 하는 까닭에 여러 가지 한계가 있었다.

본 연구에서는 하도에 대한 중횡단 측정자료인 HEC-2 또는 HEC-RAS 단면자료를 자료의 변형없이 자동으로 DWOPER 모형에 대한 입력자료로서 활용할 수 있는 기법을 개발하여 모형에 대한 편의성과 정확성을 높이고자 하였다(김상호 등, 2000). 이 때 HEC-2 또는 HEC-RAS 단면자료를 이용하여 본 연구모형을 수행할 경우 모형은 대상 구간에 대한 수위-하폭 관계자료(HS, BS)를 자동으로 산정하고 상류단으로부터의 각 지점별 누가거리(X)를 산정할 수 있으며, 사용자가 HEC-2 자료에서 임의로 지정한 하상고 아래부분의 단면적(AS)을 산정하고 HEC-2 자료에서 제시된 각 지점의 제방고를 찾아 모형결과에 제시함으로써 사용자가 편리하게 이용할 수 있도록 하였다. 그리고 기존의 모형에서는 영국단위계만을 사용하고 있어서 모형을 사용할 때에 단위를 변환하여야 하는 불편이 있었으나 입력과 출력을 국제단위계(System International, SI)와 자유롭게 선택하여 사용할 수 있도록 함으로써 모형의 효율성을 높였다. 이러한 기능을

DWOPER-LEV 모형에 추가하여 DWOPER-2K 모형을 개발하였다. DWOPER-LEV 모형은 DWOPER 모형에 불확실도 해석기법을 도입하여 홍수 범람해석 및 월류 위험도 분석, 제방월류 및 붕괴에 따른 홍수해석, 재내지에서의 범람해석 등을 처리할 수 있도록 한 모형(이홍래 등, 1998a,b)이다. 그림 1은 DWOPER-2K 모형의 구성과 모형의 수행을 위해 필요한 자료들 간의 상관관계를 나타내고 있다.

3. 대상구간에 대한 수리학적 모형의 구축

3.1 하도자료 및 상·하류단 경계조건의 구축

한강 유역에 대한 동수역학적 홍수추적모형을 구축하기 위해 DWOPER-2K 모형을 중심으로 하도자료를 구축하였다. 모의를 위한 대상구간은 그림 2에서 보는 바와 같이 한강 상류단인 팔당댐에서부터 한강하구부인 월곶지점까지 91.35 km이며, 임진강을 비롯한 왕숙천, 탄천, 중랑천, 안양천과 같이 본류로 유입되는 주요 지천들을 모두 고려하였다. 이를 위하여 한강 본류부에 대한 하도 단면자료는 2000년에 한강 하천정비기본계획을 위해 서울지방국토관리청에서 측량한 자료를 이용하였으며, 임진강을 포함한 5개의 주요 지류도 2000년에 실시한 단면측량자료를 이용하였다. 그림 2에서 한강 및 임진강에 기호로 표시되어 있는 지점은 건설교통부와 서울특별시 그리고 한국해양연구원에서 관측한 수위자료가 있는 지점들을 나타내고 있다.

한강 본류부에 대한 하도자료는 표 1에서와 같이 팔당댐 상류부터 월곶지점까지 226개의 단면자료로 구성

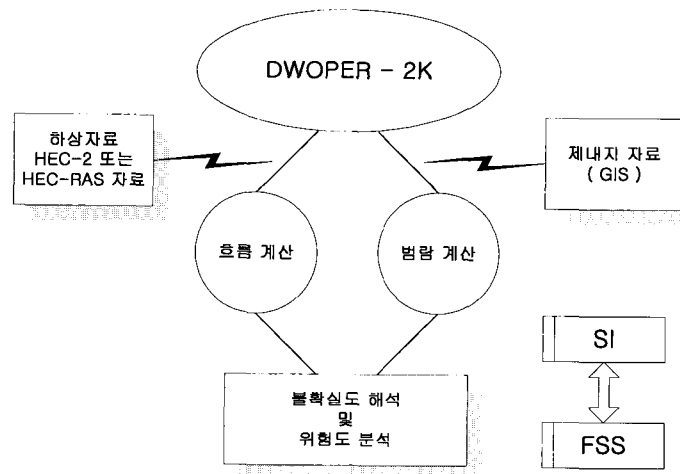


그림 1. DWOPER-2K 모형의 구성도

되어 있다. 본 연구에서 모형구축을 위해 사용하게 되는 단면자료의 수는 전체 868개로 상당히 많은 편이다. 한강에서 측정된 단면자료들을 이용하여 하도에서의 최심하상고를 그림 3에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 전체적인 하상경사가 대체로 완만하면서도 변화정도가 매우 심한 양상을 나타내고 있었다. 또한 한강 본류부에는 팔당댐으로부터 22.447 km와 54.507 km 지점에 잠실수중보와 신곡수중보가 위치해 있는데 이들 수중구조물은 홍수량에 따른 흐름 특성과 서해안에서 미치는 조위가 상류쪽으로 전파되는데 많은 영향을 미칠 것으로 판단된다.

수리학적 모형을 구축하는데 있어 하상의 단면자료와 함께 가장 중요한 자료는 모형의 상류단과 하류단

서의 경계조건이라 할 수 있다. 특히 상류단의 유량수문곡선은 대상 구간내 전반적인 홍수량의 분포를 좌우하게 되며 하류단의 수위수문곡선 즉, 조위자료는 상류단의 홍수량에 따른 조위의 효과를 상류로 전파시킴으로써 지점에 따라 흐름특성을 크게 변하게 하는 요인이 된다. 본 연구에서 구축된 모형의 경계조건으로 팔당댐에서는 대상 홍수사상에 대한 실제 방류량을 이용하였으며, 왕숙천, 탄천, 중랑천, 안양천, 임진강에서의 상류단 경계조건은 각 지류의 상류에 위치한 수위관측소의 수위관측자료를 수위-유량관계곡선을 이용하여 유량자료로 환산하여 모형에 사용하였다. 하류단 경계조건은 한강 하구경계인 월곶지점에서 2000년 7월 20일부터 2001년 2월 1일까지 한국해양연구원에서 관측한 조위

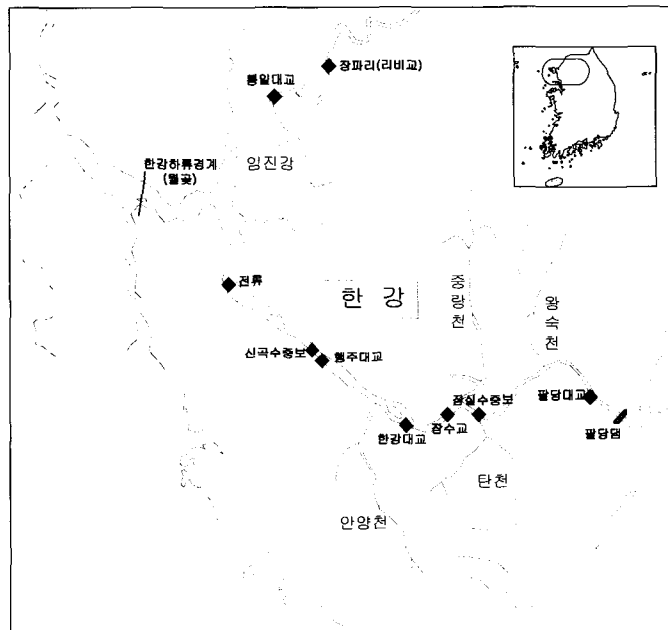


그림 2. 대상구간에 대한 유역도

표 1. 대상구간에 대한 하도자료의 구축

하천명	대 상 구 간	
	단면수	거리(km)
한 강	226	91.35
왕숙천	107	8.46
탄 천	123	8.00
중랑천	122	11.39
안양천	187	19.72
임진강	103	48.55

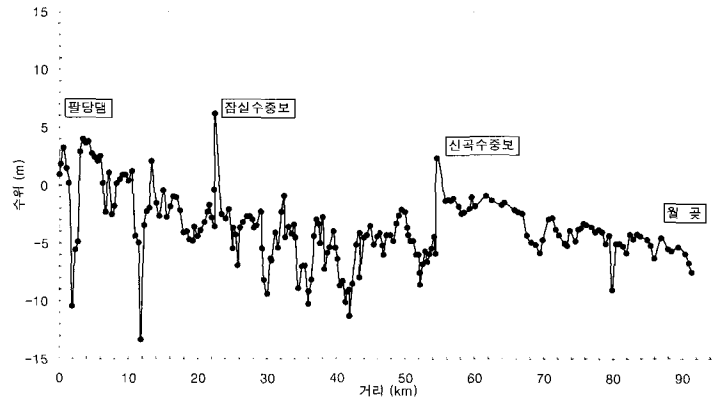


그림 3. 한강 본류부의 최심하상고

자료를 경계조건으로 사용하였다(해양수산부, 2001).

3.2 수중구조물에 대한 보정

한강 본류구간에는 많은 교량과 잠실수중보, 신곡수중보와 같은 2개의 수중보가 존재하고 있다. 교량의 경우 일반적으로 수리학적 모형에 반영을 할 수가 있지만 홍수시에만 그 영향이 미치며 범위 또한 국부적으로 나타나기 때문에 긴 구간에 대한 흐름특성분석이 주 목적인 본 연구에서는 교량의 영향을 무시하였다. 그리고 한강 본류부에 존재하는 수중보와 같이 흐름 전반에 걸쳐 영향이 크게 나타나서 하천의 흐름특성을 지배하게 되는 잠실수중보와 신곡수중보는 본 모형에서 고려하였다.

이 중 잠실수중보는 취수수심의 확보, 주운수심의 확보, 하천 환경개선 등을 목적으로 설치되었는데, 고정보의 높이가 E.L. 6.2 m로 이를 중심으로 상류쪽과 하류쪽으로 흐름특성이 크게 다르게 나타나면서 한강 본류

의 흐름특성에 크게 영향을 미치고 있다. 잠실수중보에서의 흐름해석을 위해 한강홍수통제소(1994)에서는 잠실수중보상의 흐름을 한계류가 발생하는 수위와 발생하지 않는 수위로 구분한 후 한계류 계산과 과거 홍수자료를 이용하여 수위-유량관계곡선을 산정하였다. 본 연구에서는 이렇게 개발된 수위-유량관계곡선을 과거 홍수사상에 적용하여 잠실수중보에서의 관측수위와 근접하도록 수위-유량관계곡선을 수정하여 개선된 수위-유량관계곡선을 그림 4와 같이 산정하였다. 그림 5~6은 두 가지 수위-유량관계곡선을 1999년 7월 30일에 발생한 사상과 1997년 8월 3일에 발생한 사상에 적용한 결과를 나타내고 있다. 그림에서 나타나듯이 본 연구에서 개발된 수위-유량관계곡선이 실제 관측수위와 더 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있다. 이러한 잠실수중보에서의 수위-유량관계곡선식의 개선으로 인한 효과를 정량적으로 살펴보았는데, 과거 홍수사상 중 잠실수중보의 관측수위가 결측된 1998년을 제외한 나머지 사상에 대

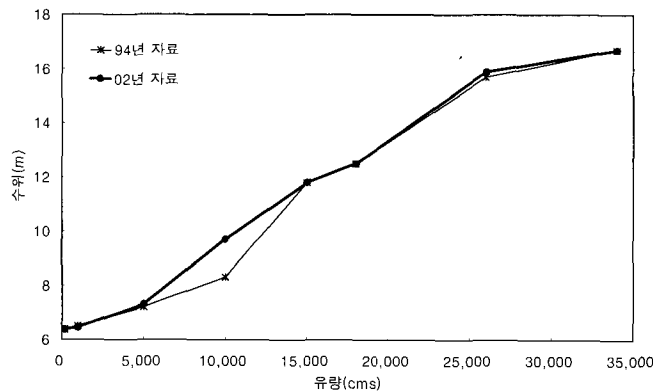


그림 4. 잠실수중보의 수위-유량관계곡선의 개선

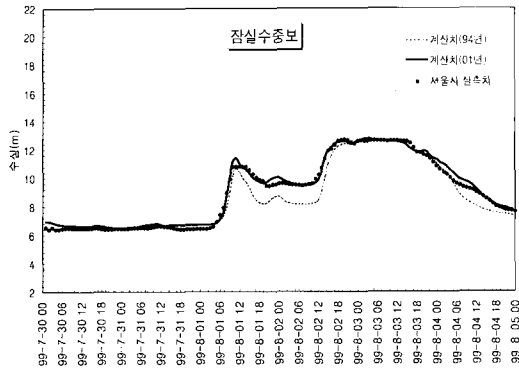


그림 5. 수위-유량관계곡선의 적용결과 (1999년 7월 30일 사상)

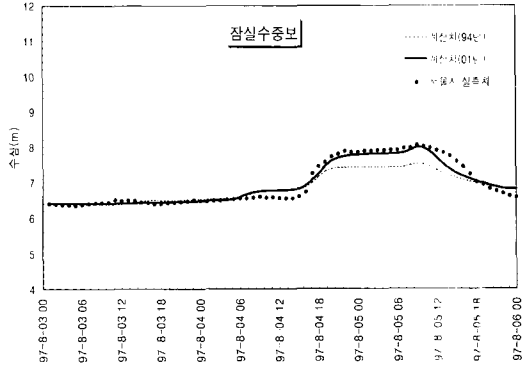


그림 6. 수위-유량관계곡선의 적용결과 (1997년 8월 3일 사상)

해 1994년과 2002년의 수위-유량관계곡선을 적용하였을 때 발생하는 RMS 오차(m)를 산정하여 표 2와 같이 나타내었다. 표에서 보는 바와 같이 수위-유량관계곡선의 개선으로 인해 홍수사상에 따라 최고 96.5%까지 RMS 오차가 감소하는 것으로 나타났다.

신곡수중보는 한강종합개발사업(서울특별시, 1986)의 일환으로 설치되었는데, 보의 높이는 E.L. 2.4 m로 상류부에서 내려오는 홍수파의 감소와 하류부의 조위영향을 감소시키는 등 흐름에 많은 영향을 미치고 있다. 이 지점에서의 하상경사는 매우 완만하고 상류부의 유량에 따라 서해안에서 발생하는 조위의 영향을 상당히 많이 받기 때문에 보 위에서 흐름의 방향이 시간에 따라 주기적으로 변하게 되는 특성을 가지고 있다. 결국 신곡수중보에서의 흐름은 단일형태가 아니라 루프형의 수위-유량관계곡선으로 나타나기 때문에 잠실수중보에서와 같이 단일형태의 수위-유량관계곡선을 이용하여 모형에 적용하기에는 한계가 있다. 따라서, 보를 중심으로 상·하류에서 발생하는 수위차가 크게 나타나지 않으므로

이러한 흐름양상은 신곡수중보가 있는 위치에서 단면이 축소되는 것으로 모형에 고려해 줌으로써 모의가 가능할 것으로 판단된다. 이에 대한 모의결과는 그림 7에서와 같이 신곡수중보 상·하류단에 설치되어 있는 수위관측소의 수위자료와 비교함으로써 검증하였다.

3.3 조도계수에 대한 보정

동수역학적 홍수추적모형의 모의결과가 실제 관측수위와 잘 일치하도록 하기 위한 과정인 모형의 보정은 주로 조도계수를 사용하여 수행할 수 있다. 조도계수는 원래 하상재료의 조도(roughness)를 나타내는 척도로서, 하상재료 및 하상표면의 특성에 의해 결정되지만 실제 흐름계산에서는 식생, 하천구조물, 사행도, 단면형태, 단면 변화양상 등 하도의 상황뿐만 아니라 유량이나 수위에 의해서도 변화한다(French, 1985). 그러므로 조도계수를 산정하기 위해서는 대상 하천구간에 대한 많은 경험과 실험을 통해서 적절한 값을 추정하는 것이 일반적인 방법이 될 것이다. 그러나 이렇게 추정

표 2. 잠실수중보에서 과거 홍수사상에 대한 수위-유량관계곡선 오차비교

대 상 기 간	RMS 오차(m)		비 고	
	1994년 관계식	2002년 관계식	개선율 (%)	팔당댐 최대 방류량(m ³ /s)
1999년 7월 30일 ~ 8월 4일	0.661	0.246	62.8	18,750
1998년 8월 5일 ~ 8월 11일	-	-	-	17,700
1997년 6월 30일 ~ 7월 2일	0.207	0.126	39.1	8,070
1997년 8월 3일 ~ 8월 5일	3.865	0.135	96.5	6,840
1996년 7월 26일 ~ 7월 29일	0.557	0.333	40.2	12,590
1995년 8월 22일 ~ 8월 28일	0.500	0.282	43.6	24,960
1990년 9월 9일 ~ 9월 13일	0.549	0.511	6.9	31,300

된 조도계수는 그 과정에서 존재하는 많은 불확실한 요인과 가정이 포함되어 있기 때문에 여러 가지 방법을 이용하여 추정된 값에 대한 보정과 검증이 필요할 것이다.

따라서, 본 연구에서는 대상구간에 대해 과거에 조도계수 산정을 위해 시행된 실험결과(국립건설시험소, 1983, 1984)와 부등류 모형을 이용한 결과(한국수자원공사, 1989; 한강관리사업소, 1993) 그리고 한강홍수통제소(1994), 김원 등(1995)에서 산정된 조도계수를 토대로 부등류 모형인 수리학적 모형을 이용하여 과거 홍수사상의 관측수위를 가장 잘 재현해내도록 조도계수를 구간별로, 유량별로 수정하는 방법을 사용하였다. 이 방법은 시간과 노력이 많이 소요되고 작업과정이 매우 복잡한 단점이 있지만 실제 발생한 홍수사상에 대해 비교 검토하기 때문에 비교적 객관적인 방법이라고 할 수 있다. 이러한 방법에 의한 조도계수의 보정을 위해 표 3에서 제시한 2000년 홍수기 및 비홍수기 4개 사상에 대해 적용하여 대상구간을 11개로 세분화하여 12개의 유량 등급별 함수로 최적의 값을 산정하였으며 임의의 유량에 대한 조도계수는 선형보간법에 의하여 계산이 가능하도록 하였다. 이와 같이 산정된 조도계수는 표 4에 나타내었다. 표에서는 잠실수중보와 신곡수중보를 경계로 하상과 흐름의 양상이 크게 다르기 때문에 이들 수중보를 중심으로 상하로 나누어 결과를 제시하였다.

3.4 모형의 보정결과

본 절에서는 표 3에서와 같이 2000년의 홍수기 및 비홍수기 4개 사상에 대한 홍수자료를 이용하여 한강 본류의 8개 수위관측소 지점과 임진강의 2개 수위관측소 지점에서 관측된 실제 수위자료에 대한 모형의 보정 결과를 제시하였다. 이 가운데 팔당댐의 최대방류량이 5,190 m³/s로 홍수기에 해당하는 2000년 7월 21일 사상과 팔당댐의 최대방류량이 820 m³/s로 비홍수기에 해당하는 2000년 8월 8일 사상에 대한 모의결과를 살펴보고자 한다.

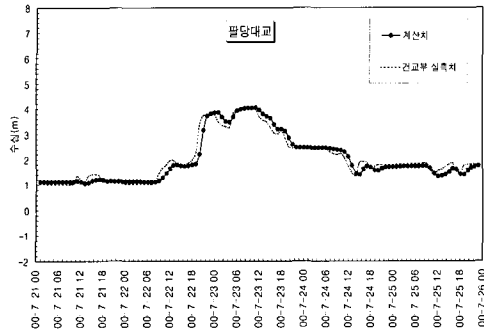
그림 7은 2000년 7월 21일 사상에 대한 모형의 보정결과를 나타내고 있는데, 한강 본류부에 위치한 수위관측지점의 실측자료와 모형을 통한 계산결과가 비교적 잘 일치하고 있었다. 임진강에서는 통일대교지점에서 서해안의 간조위로 인한 실측치와 계산치간의 수위차이가 약간 나타나고 있지만 만조위로 인한 수위상승은 잘 재현하고 있었다. 그림에서 신곡수중보 하류부에 있는 여러 관측지점에서 초기 계산치가 일정한 수위로 나타나면서 실측치와 차이를 나타내고 있는데, 이는 초기 흐름계산을 통해 산정된 수위가 월곶지점의 조위가 낮아지는 동안 초기 수위를 유지하고 있기 때문에 나타나는 현상이다. 표 5는 대상구간내 한강 본류부의 8개 지점과 임진강의 2개 지점에서 실제 관측값과 모형을 통

표 3. 모형의 보정을 위한 홍수사상

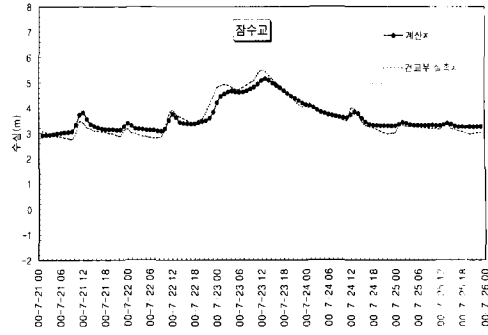
대 상 기 간	팔당댐 최대 방류량 (m ³ /s)	한강대교 최대수위(m)	비 고
2000년 7월 21일 ~ 7월 25일	5,190	5.22	홍수기
2000년 8월 25일 ~ 8월 30일	8,080	6.72	홍수기
2000년 8월 8일 ~ 8월 10일	820	3.46	비홍수기
2000년 8월 21일 ~ 8월 23일	1,890	4.47	비홍수기

표 4. 대상구간에 대한 조도계수의 보정결과

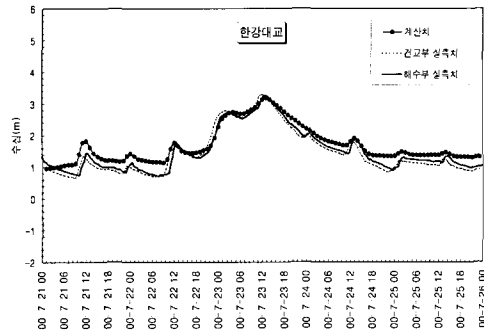
유 량 (m ³ /s)	팔당댐 ~잠실수중보	잠실수중보 ~신곡수중보	신곡수중보 ~월곶
< 1,000	0.065~0.033	0.045~0.025	0.025~0.022
~ 2,000	0.040~0.033	0.035~0.020	0.025~0.022
~ 4,000	0.035~0.030	0.035~0.020	0.022~0.018
~ 6,000	0.032~0.030	0.032~0.020	0.022~0.018
~ 12,000	0.030~0.027	0.032~0.020	0.018~0.015
~ 20,000	0.027~0.025	0.030~0.020	0.018~0.015
~ 35,000	0.025~0.022	0.030~0.020	0.018~0.015



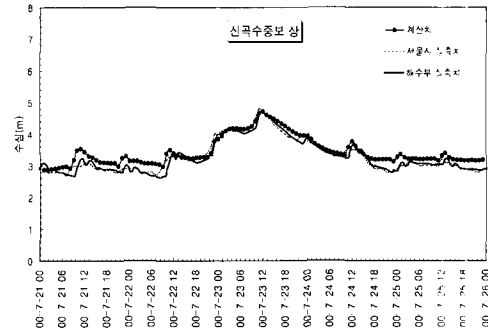
(a) 팔당대교지점



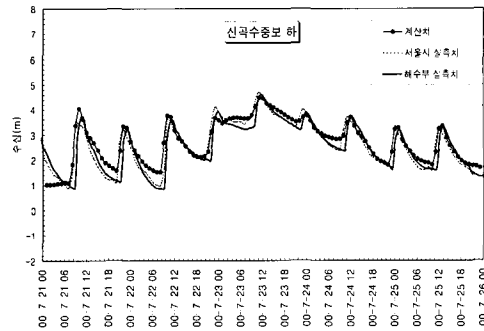
(b) 잠수교지점



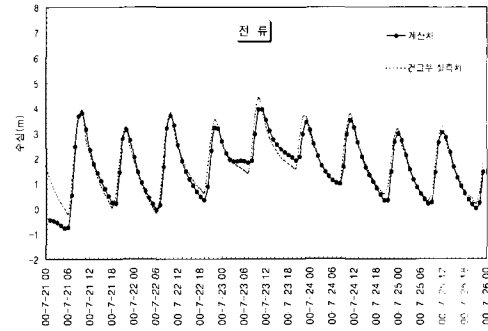
(c) 한강대교지점



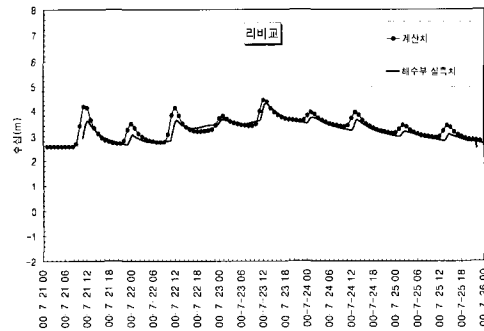
(d) 신곡수중보(상)지점



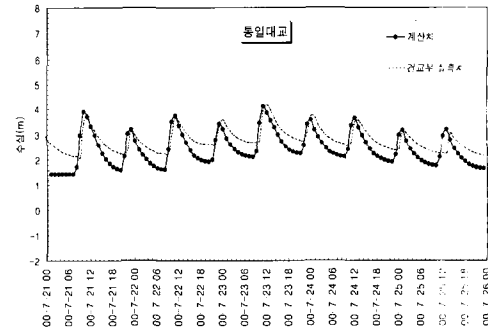
(e) 신곡수중보(하)지점



(f) 전류지점

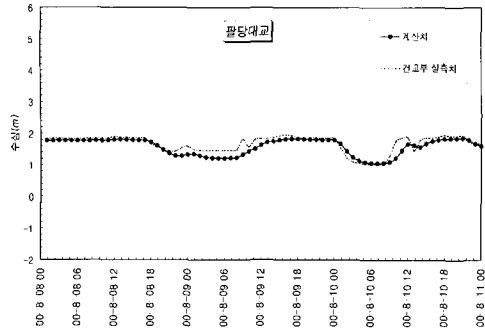


(g) 리비교지점(임진강)

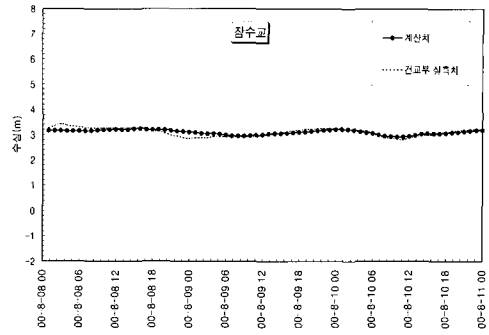


(h) 통일대교지점(임진강)

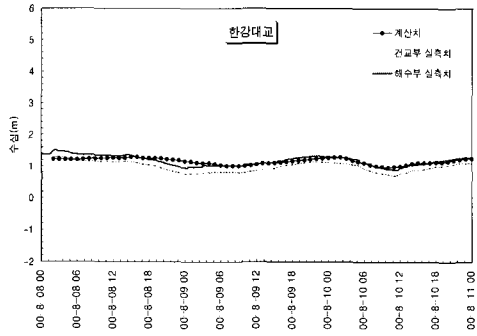
그림 7. 2000년 7월 21일 사상에 대한 보정결과



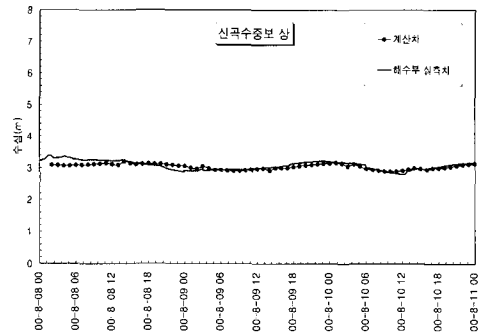
(a) 팔당대교지점



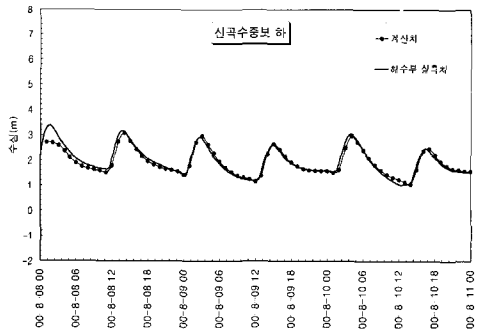
(b) 잠수교지점



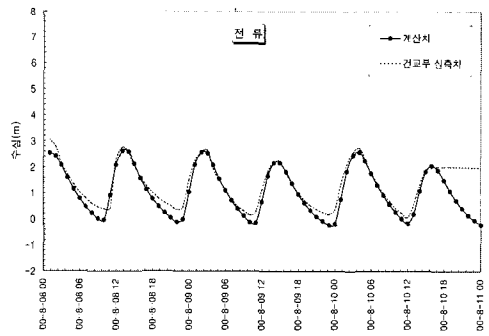
(c) 한강대교지점



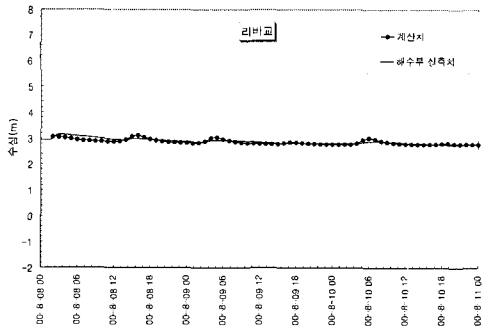
(d) 신곡수중보(상)지점



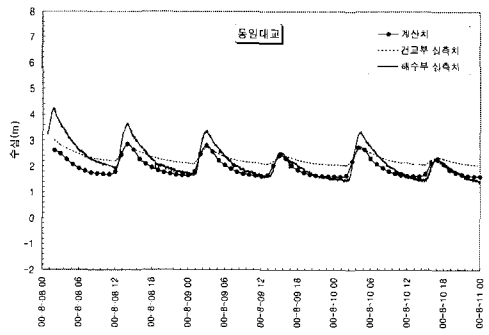
(e) 신곡수중보(하)지점



(f) 전류지점



(g) 리비교지점(임진강)



(h) 통일대교지점(임진강)

그림 8. 2000년 8월 8일 사상에 대한 보정결과

표 5. 2000년 7월 21일 사상에 대한 보정결과

지 점 명	관측 최대수위(m)	RMS 오차(m)	비 고
팔당대교	9.50	0.217	
잠실수중보	7.33	0.170	
잠수교	5.50	0.205	
한강대교	5.24	0.241	
행주대교	5.10	0.144	
신곡수중보(상)	4.73	0.219	
신곡수중보(하)	4.63	0.442	
전 류	4.49	0.541	
리비교	4.29	0.216	
통일대교	4.17	0.680	

표 6. 2000년 8월 8일 사상에 대한 보정결과

지 점 명	관측 최대수위(m)	RMS 오차(m)	비 고
팔당대교	7.45	0.160	
잠실수중보	-	-	결 측
잠수교	3.43	0.100	
한강대교	3.24	0.096	
행주대교	3.48	0.126	
신곡수중보(상)	3.40	0.102	
신곡수중보(하)	3.37	0.152	
전 류	3.12	0.561	
리비교	3.15	0.066	
통일대교	3.02	0.390	

한 계산값과의 RMS 오차를 나타내고 있다.

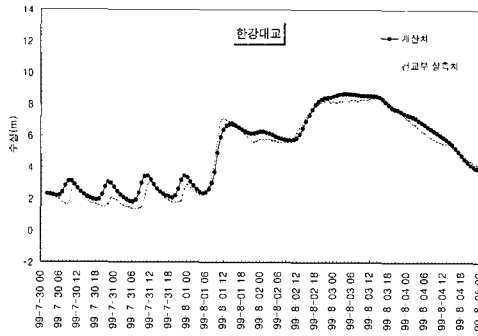
그림 8은 2000년 8월 8일 사상에 대한 모형의 보정 결과를 나타내고 있다. 이 기간은 팔당댐의 최대방류량이 820 m³/s이고 평소 300 m³/s를 유지하는 비홍수기에 해당하는 기간으로 갈수기에 대한 모형의 적용성을 판단할 수 있을 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 한강 본류에서는 신곡수중보를 중심으로 하류쪽으로 조위의 영향이 크게 나타나고 있지만 상류쪽에서는 조위의 영향이 거의 나타나지 않고 있었으며, 이러한 흐름특성은 모형을 통한 결과에서도 잘 나타나고 있었다. 표 6에서는 이러한 모의결과에 대한 RMS 오차분석결과를 제시하고 있다. 표에서 보는 바와 같이 전류지점에서 56 cm로 약간 높게 나타나고 있을 뿐 전체적으로 오차가 상당히 작게 나타나고 있었다.

4. 수리학적 모형의 적용성 분석

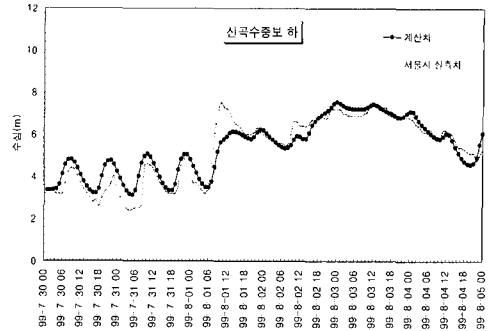
4.1 수리학적 모형의 검증

한강과 임진강에 대한 동수역학적 흐름해석을 위해 한강 본류부와 임진강에 대한 수리학적 모형을 구축하여 2000년의 홍수 및 비홍수기에 해당하는 4개 사상에 적용하여 모형에 대한 최적화를 실시하였다. 이를 통해서 구축된 단면자료와 조도계수, 수중보와 같은 구조물의 처리방식 등을 그대로 활용하여 1999년 이전에 발생한 홍수사상에 대해 적용하여 모형에 대한 검증을 실시하고자 한다.

검증을 위한 홍수사상은 표 2에서 제시한 1999년 이전의 7개 사상에 대해 적용하였으며, 그 결과를 대상구간내 건설교통부 관할하의 주요 수위관측소에서 관측한 수위자료와 비교하여 구축된 수리학적 모형에 대한 정

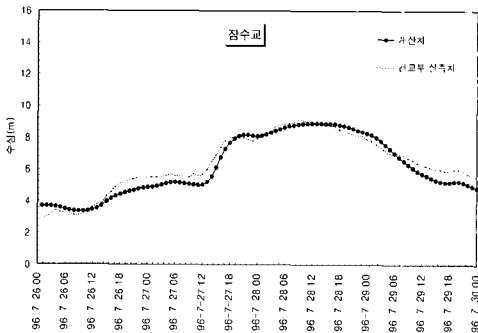


(a) 한강대교지점

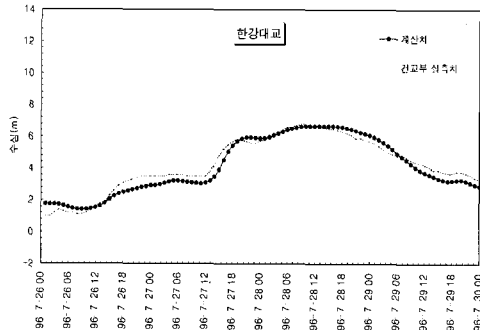


(b) 신곡수중보(하)지점

그림 9. 1999년 8월 사상에 대한 검증결과

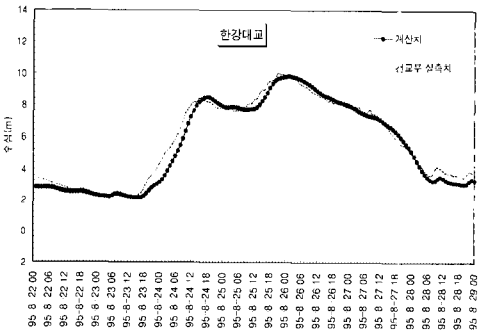


(a) 잠수교지점

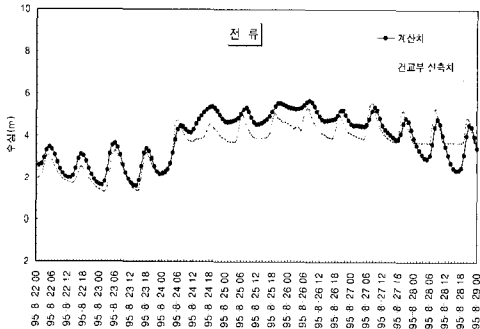


(b) 한강대교지점

그림 10. 1996년 7월 사상에 대한 검증결과



(a) 한강대교지점

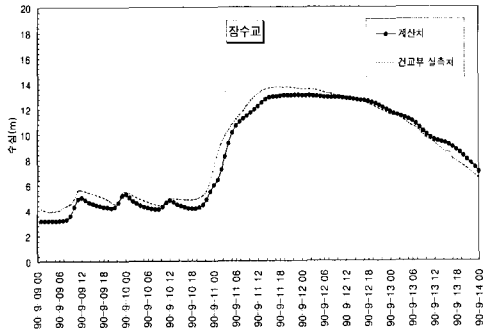


(b) 전류지점

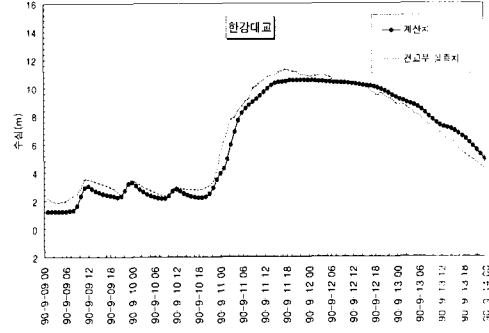
그림 11. 1995년 8월 사상에 대한 검증결과

확성을 판단하고자 한다. 1999년 이전의 홍수사상에 대한 하류부의 경계조건은 한국해양연구원에서 관측한 조위자료가 없기 때문에 인천항의 조위로부터 조화분석을 통해 변환된 월곶지점의 예측조위자료를 하류단 경계자료로 이용하였다.

모형에 대한 검증을 위해 표 2의 과거 홍수사상 중 홍수량이 비교적 큰 1999년, 1996년, 1995년 그리고 1990년 사상에 대해 살펴보고자 한다. 그림 9~12는 각 사상의 주요 지점에 대한 검증결과를 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 부분적으로 실측치와 차이가



(a) 잠수교지점



(b) 한강대교지점

그림 12. 1990년 9월 사상에 대한 검증결과

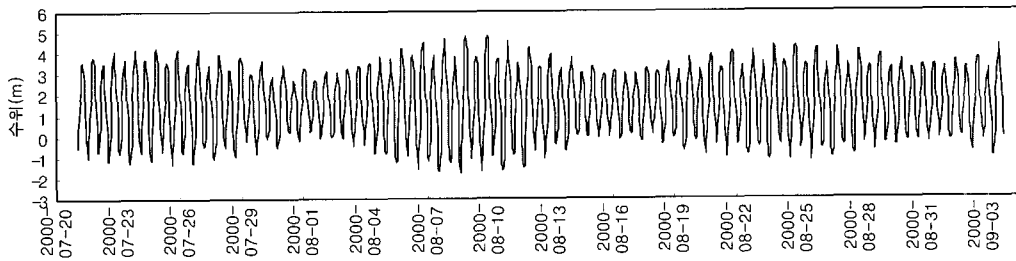
나는 지점이 있지만 전체적으로 실측치와 계산치가 잘 일치하고 있음을 알 수 있으며, RMS 오차도 1.0 m 미만의 양호한 결과를 얻을 수 있었다.

4.2 실측조위와 예측조위의 영향

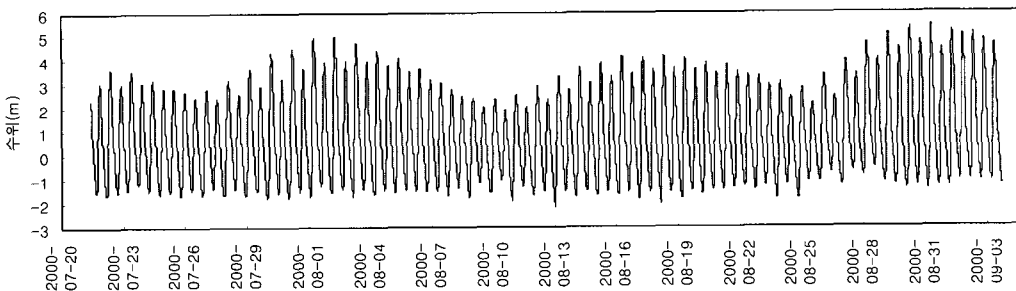
한강 하류부와 같이 조석의 영향을 많이 받는 하천에 대한 수리학적 흐름해석을 위해서는 정확하게 측정된 조위자료를 경계조건으로 사용하여야 한다. 그러나 월곶지점은 접적지역으로 조위관측이 불가능하기 때문에 인천항의 조위자료를 조위분석을 통해 변환하여 예측된 조위자료를 얻을 수 있다. 이와 같이 예측된 조위

자료에 대한 정확성을 살펴보기 위해 한국해양연구원에서 관측한 조위자료와 비교하였다. 그림 13(a)는 인천 조위를 변환하여 계산한 월곶지점의 조위를 나타낸 것이며, 그림 13(b)는 동일기간에 월곶에서 실측된 조위자료를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 두 자료는 파형, 진폭, 간·만조 발생시각 등에서 많은 차이를 보이고 있다. 이것은 지금까지 추정되어 온 월곶의 자료에 많은 오차가 내포되어 있음을 보여주는 것이다.

변환 조위자료와 실측 조위자료를 모형의 하류경계 조건으로 사용하였을 때 나타나는 모형의 결과를 살펴 보기 위해 표 3의 실제 사상 중 2000년 8월 8일 사상



(a) 변환 조위자료



(b) 실측 조위자료

그림 13. 월곶지점의 조위자료

에 적용하였다. 그림 14는 대상기간에 대해 월곶지점에서 변환된 예측조위와 실측조위를 도시한 그림이다. 그림에서 보는 바와 같이 만조와 간조 발생시간이 약 3~4시간씩 차이가 나고 있으며, 조고의 경우 간조위는 비슷하게 나타나고 있지만 만조위는 최고 2.48 m까지 나타나고 있었다. 만조와 간조에 대한 창조시간과 낙조시간을 살펴보면 예측조위는 창조시간과 낙조시간이 약 6시간으로 거의 일정하게 나타나는 반면 실측조위에서는 창조시간이 5시간, 낙조시간이 8시간 정도로 나타나고 있었다. 이러한 양상은 한강에서 유입되는 유량이 조위가 낮아질 때는 느리게 그리고 조위가 상승할 때는 빠르게 올라가도록 해주는 역할을 하기 때문에 나타나는 현상으로 하천의 흐름으로 인한 조석의 변화를 잘 나타내고 있다. 그림 15에서는 예측조위와 실측조위를 사용하였을 때의 모의결과를 한강대교지점에 대해 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 예측조위를 사용하였을 때는 조위의 영향이 1.7 m 정도로 크게 나타나고 있지만 실측조위를 사용한 경우는 조위의 영향이 거의 나타나지 않았으며 한강대교에서 실제 관측한 수위와 거의 일치하고 있었다. 결국 월곶지점에서 예측조위자료를 사용하였을 경우 만조위가 2.48 m 정도 높게 예측됨에 따라 한강대교를 비롯한 한강 본류의 모든 지점과 임진강에서 조위의 영향이 크게 나타남으로써 모형을 통해 각 주요 지점에서의 실측 수위를 재현하는 것은 불가능할 것이다.

4.3 1차원 동수역학적 모형과의 비교

본 절에서는 DWOPER-2K 모형의 결과에 대한 우수성을 살펴보기 위해 1차원 하천 흐름해석을 위해 많이 사용되는 FLDWAV 모형(Fread와 Lewis, 1998)과 개수로의 복잡한 하도망에 대한 흐름모의가 가능하고 홍수터와 같은 저류영역에 대한 모의를 수행할 수

있는 UNET 모형(Barkau, 1993)을 적용한 모의결과와의 비교를 실시하였다. 비교를 위해 표 2와 3에 제시한 홍수기 및 비홍수기에 대해 모두 적용하였으며 본 논문에서는 홍수기와 비홍수기로 나눈 두 경우에 대해서만 결과를 제시하고자 한다.

FLDWAV 모형을 수행하기 위한 모형의 입력자료는 단면에 대한 수면고(HS)와 수면폭(BS)이 각 단면에 대해 쌍을 이루어야 한다. 따라서 HEC-2 형식의 측량자료를 이용한 DWOPER-2K 모형의 출력자료를 이용하여 FLDWAV 모형에 대한 입력자료를 구축하였으며 모형의 수행을 위한 Manning의 조도계수는 DWOPER-2K 모형에서 구간별로 사용된 유량과 조도계수와의 관계를 이용하였다. UNET 모형의 경우 단면에 대한 입력자료는 HEC-2 형식의 입력자료를 이용하여 모형을 수행할 수 있다. 그래서 본 연구에서 입수한 HEC-2 형식의 하상자료를 그대로 이용할 수 있었으나 영국단위로만 모형을 수행할 수 있기 때문에 단면 측량자료에 대한 단위변환과 모형을 수행하고 난 후 출력자료에 대한 단위변환 작업이 필요하게 된다. 그리고 하천흐름에서 조도계수는 수위나 유량의 규모에 따라 가변적으로 사용되어야 하지만 UNET 모형에서는 구간별로 횡단면에서 주수로 부분과 홍수터 부분에 대해 일정한 조도계수를 사용하여야 하는 어려움이 있다.

먼저 과거 홍수사상 중 팔당댐의 방류량이 2,000 m³/s 미만의 비홍수기에 해당하는 2000년 8월 8일과 8월 21일 사상에 대해 살펴보았다. 그림 16은 2000년 8월 21일 사상에 대한 모의결과 가운데 한강대교지점에 대한 모의결과를 나타내고 있으며, 그림 17은 2000년 8월 8일 사상에서 신곡수중보(하)지점에 대한 모의결과를 나타내고 있다. FLDWAV 모형의 결과에서는 DWOPER-2K 모형의 결과보다 만조위로 인해 발생하는 역류의 높이가 낮아 주기적으로 상승하는 수위가

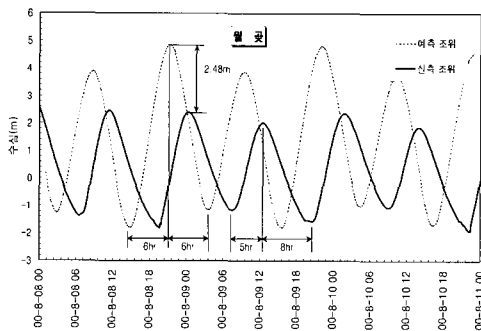


그림 14. 월곶지점의 조위비교

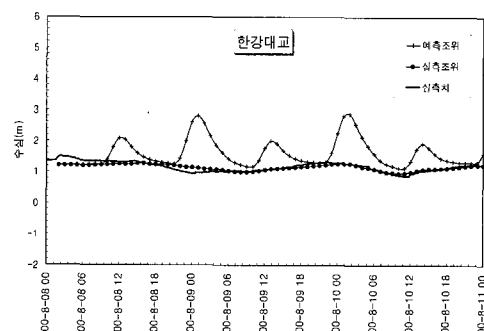


그림 15. 조위자료에 따른 모의결과

약간 낮게 발생하고 있었지만 간조위로 인해 수위가 하강하는 최저 높이는 동일하게 나타나고 있었다. UNET 모형에서는 그림 16에서는 상승고와 하강고에서의 수위가 모두 낮게, 그림 17에서는 상승고만 낮게 나타나고 있었는데 이는 UNET 모형에서 조도계수가 일정한 값으로 고정되어 있어서 이 지점에서의 유량에 대한 적절한 조도계수가 반영되지 않았기 때문인 것으로 판단된다.

팔당댐의 최대 방류량이 1996년 7월의 12,590 m³/s 규모에서부터 1990년 9월 사상인 31,300 m³/s 정도의 최대규모를 가지는 홍수기 사상에 대한 모의결과를 비교해 보았다. 각 모형간의 비교결과는 앞에서와 마찬가지로 DWOPER-2K 모형의 결과와 FLDWAV 모형의 결과는 서로 잘 일치하고 있는 반면에 UNET 모형은 팔당댐의 방류량의 규모와 월곡 지점에서의 예측조위의 높이에 따라 다양한 모의결과를 나타내고 있었다. 1999년 7월 사상의 모의결과 중 한강 하류부와 가장 가까운 지점인 전류 지점에서의 모의결과인 그림 18의 경우는 전반부 저수위에서는 다른 모형의 결과와 유사하게 나타나다가 첨두 홍수량이 지나가는 부분에서는

월곡의 만조위로 인한 홍수위는 잘 재현하고 있었으나 간조위로 인한 수위의 감소는 잘 나타나지 않았다. 그림 19에서는 1995년 8월 사상에 대한 모의결과 중 한강대교지점에 대해서 비교한 그림이다. 그림에서 보는 바와 같이 DWOPER-2K 모형과 FLDWAV 모형의 결과는 잘 일치하고 있지만 UNET 모형의 결과는 저수위에서는 다른 모형보다 0.2~0.3 m 정도 높게, 고수위에서는 최고 1.65 m 낮게 나타나고 있었다.

결국 상류단에서의 다양한 방류조건과 하류단의 여러 가지 규모의 조위자료가 주어지더라도 DWOPER-2K 모형과 FLDWAV 모형간의 모의결과는 큰 차이가 없었지만 UNET 모형의 모의결과에서는 각 사상에 따른 오차의 편차가 심하게 발생하고 있었다. 이러한 결과는 DWOPER-2K 모형의 구축과정에서 결정된 조도계수를 FLDWAV 모형에도 동일하게 사용할 수가 있었지만 UNET 모형에서는 주수로와 좌우의 홍수터에 대해 구간별로 일정한 값으로 고정하여 전 사상에 사용하기 때문에 각 사상별로 모의결과가 심한 편차를 나타내는 것으로 판단된다. 따라서 UNET 모형에 대한 좀 더 정확한 동수역학적 모형의 적용을 위해서는 대상

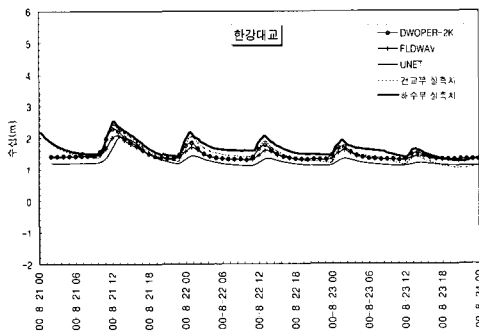


그림 16. 한강대교지점의 비교결과

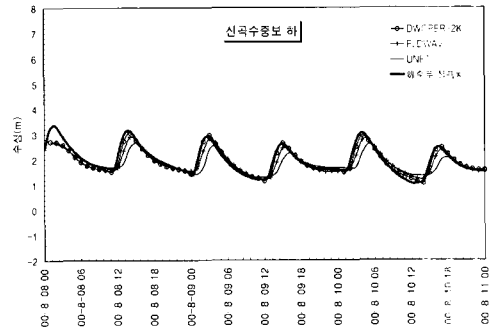


그림 17. 모형간의 최대 홍수위 비교

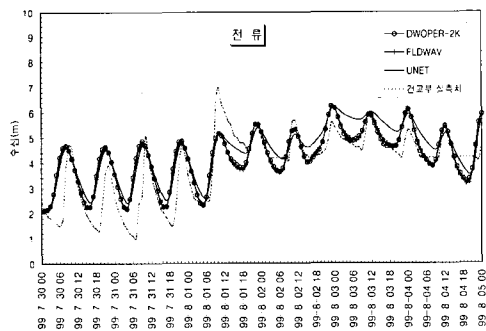


그림 18. 전류지점의 비교결과

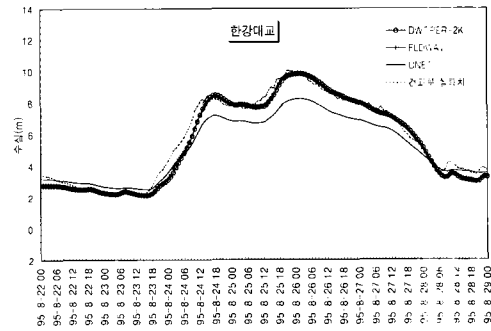


그림 19. 한강대교지점의 비교결과

구간내 주요 구간별로 유량 또는 수위 등급에 따른 조도계수와와의 상관관계를 사용할 수 있도록 모형에 대한 보완이 필요한 것으로 판단된다.

5. 결 론

한강 하류부 구간은 많은 교량, 잠수교, 수중보 등의 하천구조물이 설치되어 있고 서해안 조위의 영향을 받기 때문에 이 구간에서 발생하는 흐름은 매우 복잡한 양상을 띠고 있다. 특히 서해안 조위의 영향은 평상시 뿐만 아니라 홍수시에도 한강 및 임진강에 큰 영향을 미치고 있으며 홍수 예측시 반드시 고려해야 하는 중요한 변수이다. 본 연구에서는 최근의 조위측정 자료 및 하상단면 자료를 바탕으로 한강 하구부의 흐름을 해석할 수 있는 모형을 구축하였는데 주요 결론은 다음과 같다.

- (1) 홍수추적 모형 가운데 범용 모형으로 널리 사용되고 있는 DWOPER 모형에 대해 하도 측량자료를 직접 활용할 수 있고 단위변환을 자유롭게 한 DWOPER-2K 모형으로 수정·개발하였다.
- (2) 최근의 하상자료를 이용하여 한강 하류 및 임진강 본류, 주요 지류 등을 포함한 수리학적 모형을 구축하였으며 실측 수문자료를 바탕으로 잠실수중보와 신곡수중보에서의 흐름변화를 최적화시켰고, 구간별 유량별로 조도계수를 최적화하여 한강 하류부에서 발생하는 흐름을 해석할 수 있도록 하였다.
- (3) 한강 하구인 월곶지점의 실측자료를 분석한 결과 지금까지 인천 조위를 변환하여 사용한 월곶지점의 자료에 많은 오차가 포함되어 있으며, 이로 인해 한강 및 임진강의 홍수해석에도 영향을 미친 것으로 나타났다.
- (4) 본 연구에서 구축된 수리학적 모형을 FLD-WAV 모형과 UNET 모형과 비교하였는데 FLDWAV 모형은 본 연구에서 사용한 모형과 유사하게 나타났으나 UNET 모형의 경우에는 조도계수 사용에 대한 제한으로 적절한 모의에 한계가 있는 것으로 나타났다.

본 연구에서 구축한 수리학적 모형은 서해 조위, 한강과 임진강의 합류, 수중보, 주요 지류 등의 영향을 모두 적절하게 고려할 수 있는 것으로 나타나 한강 및 임진강의 홍수예경보, 흐름해석, 하구의 효율적인 관리 등에 효과적으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 2001년도 해양수산부의 해양수산연구개발 사업에 의한 연구결과로서 지원당국에 깊이 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 국립건설시험소 (1983). **한강하류부 이동상 수리모형 실험 보고서**.
- 국립건설시험소 (1984). **잠실수중보 수리모형 실험 보고서**.
- 김상호, 김창완, 김원, 한건연 (2000). "HEC-2 자료를 이용한 DWOPER-2K 모형의 개발." 2000년도 대한토목학회 학술발표회 논문집(III), **대한토목학회**, pp. 213-216.
- 김 원, 김양수, 우효섭 (1995). "부정류 모형을 이용한 한강 하류부 하도의 조도계수 산정." **한국수자원학회지**, 제28권, 제6호, pp. 133-146.
- 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.
- 윤용남, 박무중 (1993). "수리학적 홍수추적에 의한 댐 방류시 하류수위 및 주요 하도구간별 홍수 도달 시간의 예측." **한국수자원학회지**, 제25권, 제3호, pp. 115-124.
- 이종태, 한건연, 서병하 (1993). "한강의 홍수규모에 따른 인도교 수위의 조석영향 분석." **한국수문학회지**, 제26권, 제2호, pp. 67-77.
- 이홍래, 한건연, 김상호 (1998b). "하천 홍수범람해석을 위한 수치모형의 개발(II): 불확실도 해석." **한국수자원학회논문집**, 제31권, 제4호, pp. 429-437.
- 이홍래, 한건연, 김상호, 최현상 (1998a). "하천 홍수범람해석을 위한 수치모형의 개발(I): GIS와의 연계해석." **한국수자원학회논문집**, 제31권, 제4호, pp. 415-427.

- 한강관리사업소 (1993). **한강하류 수질보전대책 수립조사 보고서.**
- 한강홍수통제소 (1994). **홍수자료관리시스템구축.**
- 한국수자원공사 (1989). **한강주운개발사업 타당성 조사 보고서.**
- 황의준, 전경수 (1997). “한강 본류에 대한 부정류 계산모형: 모형의 보정.” **한국수자원학회논문집**, 제30권, 제5호, pp. 549-559.
- 해양수산부 (2001). **한강·임진강 유역에 대한 조위영향 연구**, 한국해양연구원/한국건설기술연구원.
- Barkau, R.L. (1993). *UNET One-Dimensional Unsteady Flow through a Full Network of Open Channels User's Manual*, U.S. Army Corps of Engineers, Davis.
- French, R.H. (1985). *Open channel hydraulics*. Mc-Graw-Hill, New York.
- Fread, D.L., and Lewis, J.M. (1998). *The NWS FLDWAV Model Quick Users Guide*, NOAA, Silver Spring.
- (논문번호:02-17;접수:2002.4.09/심사완료:2002.08.20)