

낙동강 유역 수리학적 하도추적 모형 구축 및 적용 (II) 홍수사상의 적용

The Establishment and Application of Hydraulic Channel Routing Model on the Nakdong River (II) Model Application

이 을 래*⁺ / 김 상 호**
Lee, Eul Rae*⁺ / Kim, Sang Ho**

:: Abstract ::

In this study, hydraulic flood routing is performed by 1-Di. unsteady flow model, FLDWAV on the downstream of Nakdong river. For input information, KOWACO Rainfall-Runoff Model is used and reasonable boundary condition is constructed. As the result of the application about the past flood event, good agreement of comparison with observed and calculated values are show in the interesting sites, Jindong and Samrangjin. Additionally, estuary barrage's WSL evaluation procedure is enhanced to accurate calculation, and it is defined by downstream boundary condition in Nakdong river. The new regressive equation to calculate the predicted tide value is developed by considering the astronomical tide and past observed tide value at Nakdong estuary barrage. The guideline's construction of the new application and flood forecasting system of other river basins is possible by using this studied results.

Keywords: FLDWAV, KOWACO Rainfall-Runoff Model, estuary tidal evaluation, regressive equation

:: 요 지 ::

본 연구에서는 1차원 부정류 해석 모형인 FLDWAV 모형을 이용하여 낙동강 하류지역의 수리학적 특성을 분석하였다. 입력자료 구축을 위해서 KOWACO 홍수분석 모형을 이용한 합리적인 경계조건을

+ To whom corresponds should be addressed. erlee@kowaco.or.kr

* 한국수자원공사 물관리센터 선임연구원

Senior Researcher, Water Resources Operations Center, KOWACO, Daejeon, 306-711, Korea

** 상지대학교 이공과대학 건설시스템공학과 조교수

Assistant Prof. Dept. of Civil Eng., Sangji Univ., Wonju 220-702, Korea

수립하였다. 과거의 홍수 사상에 대해서 적용한 결과 진동, 삼랑진 지점에서의 관측수위와 비교하여 정량적, 정성적인 면에서 일치하고 있는 것으로 나타났다. 또한 낙동강 유역의 하류경계조건으로 입력이 되는 하구둑 수위산정법을 개선하였다. 이를 위해 낙동강 하구에서 발생하는 천문조위와 과거의 하구둑 관측수위를 이용하여 합리적인 예측수위값을 산정하는 회귀방정식을 산정하였다. 본 연구에서 수행된 절차 등을 이용하면 타수계에서의 적용 및 홍수예경보 구축을 위한 지침으로 적용될 수 있을 것으로 판단된다.

핵심용어: 수리학적 모형(FLDWAV), KOWACO 홍수분석모형, 하구둑 조위분석, 회귀방정식

1. 서론

최근 낙동강 유역에서는 매년 발생하는 집중호우 및 태풍의 영향으로 상당한 인적, 물적피해를 유발하고 있다. 우리나라에서는 주로 수문학적 홍수예측방법인 저류함수법을 이용하여 홍수예경보를 실시해왔으나 이 모형이 수문학적 모형이기 때문에 낙동강 하류부의 완만한 하도경사, 하도에 존재하는 각종 보의 침수 및 부상에 관련한 예측, 하구둑 및 낙동강 하구에서 발생하는 조위의 영향 등을 정확하게 고려하는 것이 곤란하였다. 이러한 이유에 따른 다양한 사회적 요구에 따라 정교한 하천홍수해석이 수행되고 하천에서의 합리적이고 정확한 수리현상을 모의할 수 있는 수학적 모형의 개발 및 그 수행이 필수적이다. 현재까지 많은 수학적 모형이 필요한 목적이 맞도록 개발되어 왔으며 더욱 정확한 실제상황의 해석을 위해 많은 연구가 이루어지고 있다. 본 연구에서는 낙동강 유역의 수리학적 홍수추적의 적용을 위한 이론전개 및 홍수도달시간산정의 지침을 마련한 논문과 연계하여 실제 홍수사상을 대상구간에 적용하였다. 구축된 모형에 2004년 6월의 디엔무와 2003년 9월의 매미사상을 적용하여 주기적으로 침수 및 범람피해가 발생하는 낙동강 하류부에서의 수리학적 분석을 수행하였다. 관측수위표가 존재하는 지점에서의 당시 관측된 수위값과 계산값을 비교함으로써 본 모형의 적합성 및 정확성을 입증하였다. 또한 수리학적 모형에서 계산값의 정확도를 도출하게 되는 중요한 인자인 하류단 경계조건을 지정방법을 마련하

였다. 본 연구에서 적용된 대상구간에서 하류단 경계조건이 되는 지점이 낙동강 하구둑이 되는 데, 하구둑의 특성상 갈수기 때는 수문을 닫아놓지만, 홍수기에는 완전개방을 원칙으로 하고 있다. 이때 낙동강하구의 천문조위값과 하류단경계조건이 되는 하구둑에서의 관측조위값을 비교하였을 때 유하하는 홍수량의 영향으로 값에서 다소 차이가 발생하게 된다. 과거 사상을 모의하기 위해서는 하구둑에서의 당시 관측값을 적용하는 것이 가능하지만, 미래사상을 예측하는 관점에서는 정확한 하류경계조건을 산정하는 것이 어려운 과정이 될 수 있다. 이를 위해서 과거 4개 홍수사상에 대해서 하구둑에서의 관측수위값과 낙동강하구의 예측조위값과의 상관관계를 이용하여 하구둑에서의 예측수위값을 산정하는 방정식을 산정하였다. 이를 이용하면 상류 댐방류량과 하류의 하구둑수위값의 정확한 예측값으로 인해 합리적이고 효율적인 하천관리가 가능할 것으로 판단된다.

부정류 해석기법을 이용한 하천에서의 홍수와 해석은 여러 연구자들에 의해 컴퓨터의 발달과 함께 본격적인 연구가 이루어 졌다. Fread와 Lewis(1998)은 DWOPER와 DAMBRK 모형의 기능을 결합시킨 FLDWAV 모형을 개발하여 하도에서의 종합적인 홍수추적을 가능하게 하였다. 국내에서는 이정규 등(2004)이 FLDWAV 모형을 한강하류부에 적용하여 최적의 조도계수를 산정한 사례가 있으며, 김상호 등(2005)은 한강하류에서 서해의 조위에 의해 발생하게 되는 다양한 수리학적 특성들을 DWOPER 모형을 이용하

여 신곡수증보에서 검토하였다. 현재까지 1차원 부정류해석을 이용하여 하천에 적용한 사례는 대부분의 경우 한강유역에 적용하였으며, 한강에서의 매개변수 등은 일정부분 확립이 되어 있으나, 낙동강 유역에서는 아직까지 다양한 해석이 이루어 지지 않았기 때문에 여러 가지 수리학적 특성 분석이 이루어질 필요가 있다.

2. 모형의 선정

미국 기상청(NWS)의 동역학적 하도추적 모형인 FLDWAV는 두 개의 널리 쓰이는 모형 DWOPER와 DAMBRK의 통합모형이다. FLDWAV는 이들 각각의 모형에 포함되어 있지 못한 혼합류흐름계산, 다중하도의 하도추적기능, Kalman Filter 기능 등 중요한 기능을 포함하고 있으며, 단일수로나 수지형 수로에서의 1차원 부정류 해석이 가능하다.

해석을 위해서 Saint-Venant 식의 가중 4점 음해형 유한차분기법을 이용하여 수공구조물을 포함한 다양한 조건에서의 부정류 흐름해석을 가능하게 한다. 또한 단일하도 또는 지류를 포함한 하도망을 구성하는 하천에서 실시간으로 홍수파의 흐름해석을 가능하게 한다.

FLDWAV는 부정류의 Saint-Venant 식의 해석을 기본을 두고 있다. 즉, 질량보존의 식과 운동량보존의 식은 각각 식 (1), (2)와 같다.

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

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial\left(\frac{Q^2}{A}\right)}{\partial x} + gA\left(\frac{\partial h}{\partial x} + S_f + S_e\right) + L = 0 \quad (2)$$

여기서 x 는 하천의 흐름방향거리, t 는 시간, Q 는 유량, A , A_0 는 각각 흐름단면적과 저류단면적, h 는 수위, q 는 측방유출입량, L 은 측방유출입량에 의한 운동량의 영향으로서 $L = qL V \cos\theta$ 로 표시되며 V 는 유출입량의 유속, θ 는 유출입량의

접선방향과 이루는 각이다. S_f , S_e 는 각각 마찰경사와 단면변화에 따른 손실경사의 향으로서 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$S_f = \frac{n^2 |Q| Q}{A^2 R^{\frac{4}{3}}} = \frac{|Q| Q}{K_c^2}, \quad S_e = \frac{K_e \partial\left(\frac{Q}{A}\right)^2}{2g \partial x} \quad (3)$$

x , t 좌표상에 있어 Δx , Δt 의 간격은 일정할 수도 있고, 일정하지 않을 수도 있다. Saint-Venant 식인 비선형 쌍곡선형 편미분방정식을 비선형 대수방정식의 형태로 변환하기 위해 가중 4점 음해 유한차분 근사해법을 사용하였다.

식 (1), (2)로 구성되는 비선형 대수방정식의 해를 구하기 위하여 반복 계산법의 하나인 Newton-Raphson 방법을 적용하여 해석한다. Newton-Raphson 방법은 2차항 및 고차항의 모든 항들을 무시하는 비선형함수의 Taylor 급수 전개이론에서 유도된다. 그 결과로 나타난 계산알고리즘은 식 (4)와 같다.

$$\mathcal{J}(x^k) \Delta x = -f(x^k) \quad (4)$$

여기서, x 는 $(Q_1, h_1, \dots, Q_N, h_N)$ 으로 표시되는 미지의 벡터량이며, k 는 계산 반복횟수, $\mathcal{J}(x^k)$ 는 x^k 값에 대한 편미분치로 구성되는 Jacobian 매트릭스, $f(x^k)$ 는 x^k 값에 대한 비선형방정식, x^k 는 초기가정값, x^{k+1} 은 $x^k + \Delta x$ 로써 계산에 의하여 개선된 값을 나타낸다. 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 때 까지 계산을 반복하게 된다.

3. 수리학적 모형의 입력자료 구축

3.1 적용 대상구간 선정

본 모형의 적용성을 입증하기 위해서 최근 발생한 홍수사상에 대해서 검토를 하였다. 낙동강은 전 구간의 하도길이가 340km로서 상당히

긴 하천이며 하상경사가 다른 수계에 비해서 완만하고, 굴곡이 많이 있다. 또한 하구둑 부분의 조위에 의해 발생하는 배수위 영향이 상류로 전파되기 때문에 낙동강 유역의 모든 지점에서 정확한 값을 예측하는 것은 실질적으로 어려운 실정이다. 특히 낙동강 유역에 존재하는 많은 지류들의 영향들을 모두 고려할 수 없는 상황에서는 정확한 수리학적 특성에 의한 계산값을 추정하는 것이 더욱 힘들게 된다.

특히 낙동강 유역은 적포교를 중심으로 하류지역에서 침수피해와 제방붕괴 등이 집중적으로 발생하고 있는 실정이다. 하류로 갈수록 완만한 경사에 의해서 내수배제가 불량해지고 제방범람이 발생하기 때문에 관리자가 정보를 알고 싶어하는 하류 특정지점에서의 수위값을 산정할 필요가 있게 되었다. 이러한 이유로 본 연구에서는 적포교 수위관측소를 기점으로 하여 낙동강 하구둑까지 110km를 대상구간으로 설정하였으며, 관련 단면 자료는 낙동강 하천정비기본계획(1991, 1992, 1993)을 참조하였다. 그림 1은 낙동강 유역에 적용하기 위한 하도추적모형의 절차를 나타낸 것이다.

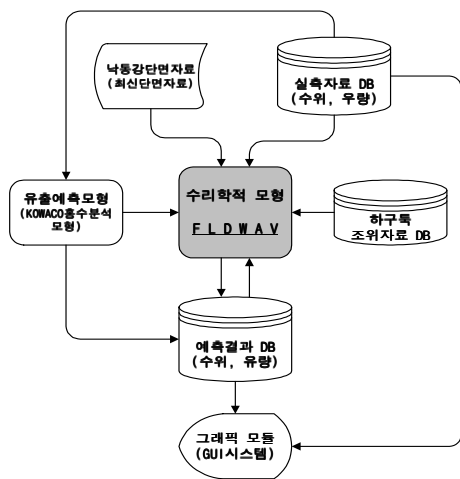


그림 1. 하도추적 모형의 절차

상류유입은 적포교지점에서의 유입유량과 지류/소유역에서 유입되는 유량을 유입경계조건으로 지정하였다. 본 대상구간에서 유입하는 지류로는

남강과 밀양강, 양산천 등이 있는데, 이는 KOWACO 홍수분석에 의해 유입량을 고려하여 지점별 횡방향 유입량(QL)으로 입력하였다. 모든 지류의 단면을 구성한 다음 계산을 수행하는 것이 합리적인 방법이지만 본 연구의 목적은 낙동강 본류의 하류지역에 발생하는 수리학적 거동을 분석하는 것이 주 목적이며, 각 지류의 단면 자료를 포함하여 지류상황을 고려하기 위해 필요한 제반조건들을 모두 구하기가 현실적으로 곤란하였다. 또한 지류를 횡방향으로 처리하더라도 본류에서의 수리학적 특성은 큰 차이를 발생하지 않을것으로 판단되어 지류의 유입조건은 횡방향 유입조건으로 처리하였다.

하류단 경계조건이 되는 하구둑에서는 매 시간 별로 수위가 관측되고 있다. 수자원공사 부산권 관리단에서는 하구둑의 상류와 하류지역에 수위계를 설치하여 실시간수문정보로 입력이 되고 있다. 본 절에서는 대상사상의 모의를 위해서 실제적으로 운영되어진 하구둑 상류유역의 수위조건을 적용하였다.

그림 2~3은 낙동강전체 구간 중 연구의 적용 대상구간인 적포교수위표~하구둑까지의 하도특성인 최심하상고와 하폭을 도시한 그림이다. 하상경사는 상류지역에 비해서 하류지역이 상당히 완만한 형태를 띄고 있으며 하폭도 하류로 진행될수록 증가되고 있었다.

그림 4는 한국수자원공사(KOWACO)에서 구축되어 있는 홍수분석 모형(한국수자원공사, 2000)에서 제시하고 있는 대상구간의 유역모식도이며 표 1은 모식도를 이용한 KOWACO 홍수분석모형과의 연계를 나타내고 있다. 이를 이용하여 대상구간의 상류, 지류유입, 소유역 유출이 본류로 유입하게 되는 경계조건을 나타내고 있다. 적포교지점에서는 유역유입으로는 23, 24번이 유입되며 19번 하도에서 유입하는 유량과 20번하도에서 유입하는 유량이 모두 합쳐져서 적포교지점의 유입유량이 된다. 그리고 남강유역에서는 유역유입 25번과 27번, 남강하도유입 23번이 측방향으로 유입하게 된다. 또한 유역유입 28번

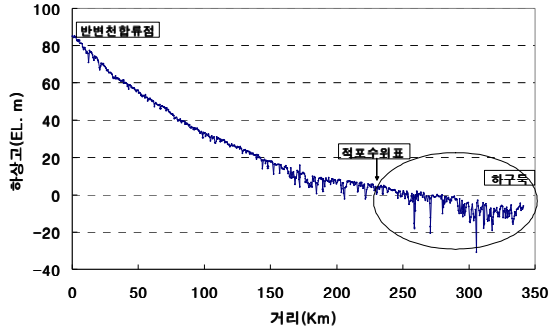


그림 2. 낙동강수계의 최심하상고

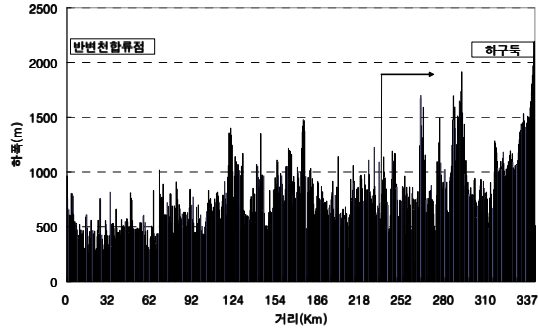


그림 3. 낙동강수계의 하폭

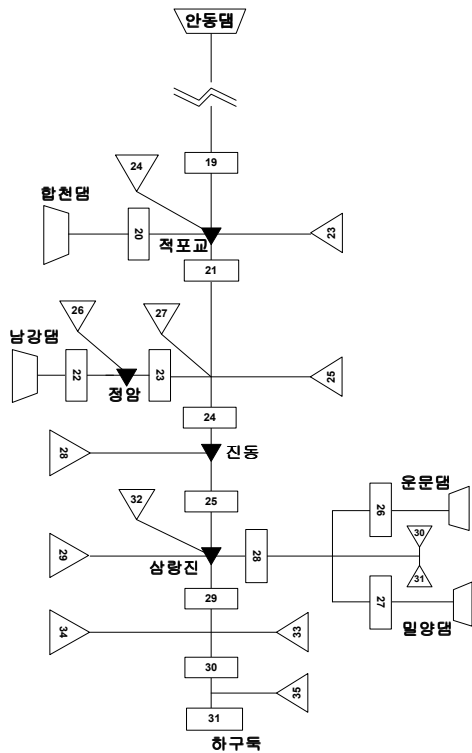


그림 4. 대상구간의 유역모식도

이 진동지점으로 유입되고 있으며 삼랑진 지점에서는 유역유입 29, 32번 밀양강의 하도유입 28번이 유입되고 있다. 또한 양산천 유역에서는 유역유입 33, 34번, 그리고 하류부에서 유역유입 35번이 유입된다. 이러한 모든 유역유입 또는 하도유입은 KOWACO 홍수분석에 의해서 산정할 수 있으며 궁극적으로 이러한 계산의 정확한 입력값을 산정하기 위해서 KOWACO 홍수분석 모

형과 연계운영이 필요하게 된다.

표 1. KOWACO 홍수분석모형과의 연계

유입지점	유역유입	하도유입	비고
적포교지점	20, 23, 24	19	상류단 경계조건
남강유역	25, 27	23	횡방향유입경계조건
진동지점	28		횡방향유입경계조건
밀양강지점	29, 32	28	횡방향유입경계조건
양산천지점	33, 34		횡방향유입경계조건
하류유역유입	35		횡방향유입경계조건

3.2 강우 - 유출모형의 개요

유역 수계상의 주요지점에 대한 홍수조절을 위해서는 그 지점에 대한 정확한 유출량의 계산이 가능해야 하며 그 예측은 일반적으로 유역내의 강우와 유출관계를 모의하는 유출예측 모형에 의해 가능하다. 이를 위해 유출예측 모형으로 선정된 저류함수법을 이용하여 유출체계를 구축하였다. 저류함수법은 하천유역이나 하도에 대한 저류량과 유출량 사이의 관계를 나타내는 저류함수법을 연속방정식과 조합하여 유출량을 산정하는 방법이다. 유출현상의 비선형성을 나타내기 위하여 강우-유출의 변환과정에 유역저류과정을 도입하고, 그것을 매개변수로 하여 저류량과 유출량의 관계식을 성립하여 저류량의 물수지를 계산하여 유출을 해석하게 된다.

홍수유출을 Manning의 경험식을 따르는 표면

류라 가정하면 하천유역 또는 하도의 저류량 S와 유출량 Q와의 관계는 식 (5)에 의해 표시된다.

$$S_t = KQ_{t-P} \quad (5)$$

여기서 K, P는 유역과 하도의 저류상수이며 침차 1은 지체시간이 고려되었음을 의미한다. 이식을 운동방정식이라 하여 다음식으로 표현되는 연속방정식과 조합하여 유역 및 하도의 유출을 산정하게 된다.

$$\frac{1}{3.6} f \cdot r_{ave} A - Q_t(t) = \frac{dS_t}{dt} \quad (6)$$

(유역의 유출)

f : 유입계수, r_{ave} : 유역평균강우량

A: 유역면적

$Q_t(t)$: 지체시간이 고려된 직접유출량,

$S_t(t)$: 지체시간이 고려된 직접유출량

$$\sum_{i=1}^n f_i \cdot I_i - Q_t = \frac{dS_t}{dt} \quad (7)$$

(하도의 유출)

여기서 I는 일정하도구간의 상류지점 유입량이다.

식(5)의 저류량 S와 유출량 Q와의 관계(즉 K, P)는 과거의 강우-유출자료에서 구할 수 있으며, S와 Q의 관계가 결정되면 Q는 유역의 평균강우량 r_{ave} 또는 하도의 유입량 I를 연속식에 대입하여 직접유출량 Q를 산정할 수 있다. 이상이 저류함수에 의한 유출계산과정의 골격이다. 유역유출을 모의하기 위해서는 유효강우량의 산정이 필요하게 되며 이를 위하여 유입계수 f를 산정하여야 한다. 유입계수 f는 시간에 따라 변화하게 되며 유역면적에 관계된다. 즉, 강우초기에는 $f=f_1$ (1차유출률)으로 f_1A 의 면적(유출역)만으로 유출이 발생하는 것으로 하고 누가유출이 포화유출을 초과하게 되면 $f \approx 1$ (포화유출

률)으로 되어 $(1-f)A$ (침투역)에서도 유출이 발생한다. 따라서 유역으로 부터의 유출량은 유출역에 대한 유출량과 침투역에 대한 유출량을 홍수기간 종료까지 분리하여 계산한후 이를 합하여 얻은 직접 유출량에 기저유출량을 더하여 구하게 된다.

큰 유역에 대한 유출량계산에 있어서는 전체유역을 작은 소유역과 하도로 분할하여 유역추적과 하도추적을 상류로부터 하류로 순차적으로 실시하게 된다. 유역분할에 있어서 고려할 점으로는 지형적 특성(유역계, 유로연장, 경사 등), 하도의 구성, 강우의 분포 특성, 수위·유량관측소의 위치, 강우·유량자료, 상황 및 항수예보상의 주요지점 등을 들 수 있다.

3.3 수리학적 매개변수의 산정

여러 논문 및 자료에 의하면 조도계수의 산정이 하천의 수위변화에 상당히 민감하게 반응하고 있는 것으로 나타나있다. 특히 조도계수를 10% 증가시킨 경우와 홍수량을 10% 증가시킨 경우의 홍수위 영향이 거의 유사하게 나타났다는 결과도 제시된바 있다(한국수자원학회지, 2005. 11). 이러한 한계점을 극복하기 위해서 부정류 모형의 정확한 사용, 조도계수의 체계적 결정, 하도별 조도계수 조사사업 필요 등의 개선방안이 제기되기도 한다. 조도계수의 영향이 하천흐름에 매우 인자임에도 불구하고 현실적으로 조도계수를 검정할 수 있는 방법이 없으므로 여러 부정류 모형을 과거 홍수에 적용하여 적절한 조도계수를 산정할 필요가 있다. 또한 조도계수의 결정이 하천조건, 하천선형 등을 종합적으로 판단하여 체계적으로 결정될 수 있도록 우리나라 상황에 적합한 매개변수산정 방법의 제시가 필요할 것으로 보인다. 구체적으로 전국의 주요 하천구간에 대한 조도계수 조사사업이 제안되기도 하였다. 따라서 설계자의 판단에 따른 조도계수의 산정으로 각 하천마다 산정되는 조도계수가 모두 상이한 경우도 많은데, 이를 방지하기 위해서 국가, 지방하천 등에 대해서는 USGS에서 제시하는 조도계수방법

을 고려하거나 수위관측을 통해 조도계수를 역산하는 등 하천흐름에 절대적 영향을 주고 있는 조도계수를 합리적이고 일관되게 산정할 수 있는 방안 제시는 시급히 필요할 것으로 판단된다.

표 2는 과거의 문헌에 나타난 하상에 따른 조도계수의 범위를 고려하고, 하천정비기본계획에서 제시하는 조도계수의 제시값을 확인해보았다. 하천정비기본계획상에 나타난 조도계수는 낙동강 본류에 대해서 동일한 값을 제시하였다. 이주헌 등(1998)은 구간별, 유량등급별 조도계수를 산정한 사례가 있었으나 다른 연구자료에서는 낙동강 유역의 조도계수의 정량적 체계화를 나타낸 자료는 없었다. 특히 하천정비기본계획서상

의 동일한 값은 하도의 구성입자에 따라서 개략적으로 산정한 값이기 때문에 이값을 시간별, 지점별로 수심의 변화와 유량의 변화가 발생하는 부정류해석에 적용하는 것은 무리가 있을 것으로 판단되었다.

본 연구에서는 대상구간에 대한 조도계수의 구축을 위해서 과거의 자료를 참조로 하여 부정류 모형에 의한 조도계수 산정방법을 이용하여 과거 발생한 홍수사상에 대한 실측수위자료를 가장 잘 재현하도록 구간별 유량별 조도계수를 시행착오법을 통하여 산정하였다. 표 3은 본 모형에서 산정된 최적의 조도계수를 나타내고 있다.

표 2. 하천정비기본계획 및 과거 연구의 조도계수

참 고 자 료	조 도 계 수
1992년 하천정비기본계획 (밀양강합류부~남강합류부, 남강)	낙동강 본류 : 0.023 남강 : 0.023 ~ 0.030
1991년 하천정비기본계획 (하구둑~밀양강 합류부)	낙동강 본류 : 0.023
이주헌 등(1998)	3개구간, 7개 유량등급의 조도계수 (0.0108 ~ 0.0573)

표 3. 본 모형에서 산정된 최적조도계수

단면구간 유량구간 (× 10 ³ CMS)	1~49	50~99	100~119	120~180	181~199	200~265
	00 ~ 22.77 (Km)	~ 40.05 (Km)	~ 50.14 (Km)	~ 76.71 (Km)	~ 86.51 (Km)	~ 110.16 (Km)
0~0.1	0.022	0.022	0.026	0.028	0.025	0.025
0.1~0.2	0.019	0.020	0.026	0.028	0.025	0.025
0.2~1	0.017	0.017	0.025	0.028	0.022	0.022
1~2	0.017	0.017	0.024	0.028	0.020	0.020
2~4	0.017	0.015	0.024	0.027	0.019	0.018
4~6	0.014	0.014	0.024	0.027	0.019	0.018
6~9	0.014	0.014	0.023	0.027	0.013	0.013
9~12	0.011	0.011	0.023	0.027	0.013	0.013
12~15	0.013	0.013	0.023	0.027	0.013	0.013
15~20	0.013	0.013	0.023	0.027	0.013	0.013

주 : 단면번호는 FLDWAV에 의한 단면번호임 #63 진동수위표, #152 삼랑진수위표

표 4. 과거 홍수사상

대 상 기 간	적포교 최대유입량(CMS)	하구둑 최대/최소조위 (EL. m)	비 고
2004년 6월 18일 ~ 6월 27일	6,880	1.48/0.03	TY6. DIANMU
2003년 9월 11일 ~ 9월 20일	11,600	3.2/-0.15	TY14. MAEMI

4. 수리학적 모형의 적용(낙동강 하류지역을 중심으로)

4.1 홍수사상에 대한 적용

낙동강 하구둑의 조위에 대한 낙동강 본류부의 영향을 상류단에서 유입되는 홍수량과 연계하여 살펴보기 위해서 대상구간에 대한 1차원 수리학적 모형을 수행하였다. 실제 발생한 과거 홍수사상을 이용하여 모형을 구축하기 위해서 표 4와 같은 과거사상을 적용하였다. 이때는 KOWACO 분석 모형에 의해서 상류 및 지류의 유입유량을 산정하였으며 과거사상은 하류단의 하구둑 내수위 관측수위값이 존재하기 때문에 그 자료를 이용하게 되었다.

4.2 2004년 6월 18일 사상

본 모형의 적용을 위해서 2004년 6월 18일 ~ 6월 27일까지 발생한 홍수사상에 대해서 적용하였다. 당시 발생한 태풍 디엔무의 영향으로 대상구간인 적포교로 유입하는 최대유입량이 6,880 CMS 였으며 하구둑에서의 당시 실측값은 대조위가 1.48m, 소조위가 0.03m를 나타내었다.

적포교수위표 ~ 하구둑 까지의 대상구간에서는 수위표지점이 두 개가 있는데 진동수위표와 삼량진수위표이다. 모든 모형수행은 해석을 수행한 후 실측치와 비교하여 매개변수를 산정하는 보정(calibration)과정을 수행해야 한다. 본 구간에서는 두 개의 수위표 지점에서 수행당시의 관측수위값을 추출하여 모형의 계산값과 비교하였다. KOWACO 홍수분석에서는 수리학적 모형에서 중요한 경계조건 자료가 되는 입력조건을 산

정하게 되는데, 정확한 값을 산정하기 위해서 상류단에서의 분석을 수행한 후 하도구간을 모의해야 한다. 그림 5~7은 수리학적 모의 수행을 위한 상류 유입경계조건과 횡방향유입량, 하류경계조건들을 나타낸 그림이다. 횡방향 유입량의 변화에서 밀양강과 남강 유역의 유입량이 두 번의 첨두치를 가지면서 유입하고 있다. 그러나 이러한 유량값은 본류의 적포교에서 유하하는 6,880 CMS에서 발생하는 규모에 비해서 작은 양이기 때문에 지류에서 유입하는 유량규모의 정성적인 형태를 관측지점에서 모두 나타낸다고는 볼 수 없을 것이다.

모의수행에서는 조도계수 및 FLDWAV모형에 입력되는 매개변수의 값들이 보정되는 과정을 거쳐야 하는데, 현재 나타나 있는 계산값들을 가지고 비교를 하였을때는 첨두치에 좀 더 근접하고 있으며 정량정성적인 면에서 실측치와 유사한 값을 나타내고 있었다.

특히 수리학적 홍수추적모형에서는 유일한 매개변수가 조도계수가 될 수가 있으며 FLDWAV 모형에서는 유량대 조도계수의 형태로 입력이 되고 있다. 또한 최적의 조도계수 산정을 위한 방법은 한강유역에서는 어느 정도 관련연구(이정규 등, 2004, 황의준 등, 1997)가 있으나 낙동강 유역에서는 전무한 현실이므로 이 부분도 추후 연구과제로 고려할 수 있다.

모형의 적용을 위해서 시작시간은 2004년 6월 18일 00시에서 시작하여 2004년 6월 27일 24시까지의 240시간을 모의수행하였다. 계산시간간격은 1.0시간으로 하였으며 이러한 조건들을 이용하여 부정류모형을 수행하였다.

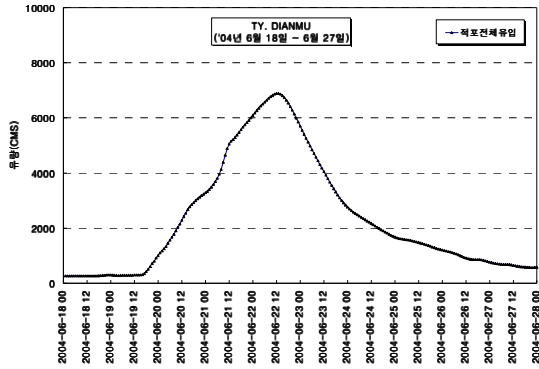


그림 5. 상류단 적포교 유입량

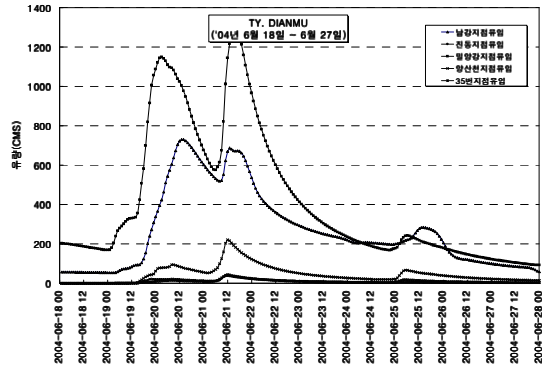


그림 6. 대상구간 지류유입량

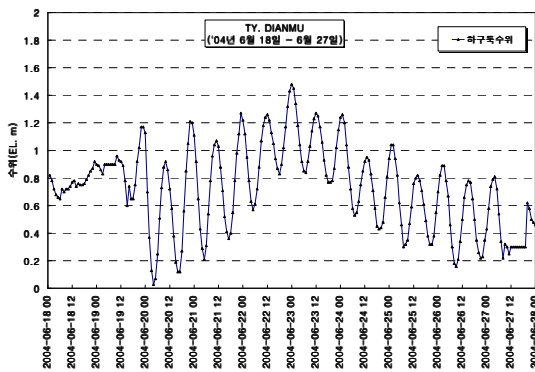


그림 7. 하구둑 상류수위

그림 8~9는 본 모형의 적용성을 비교, 검증하기 위해서 수위관측지점인 진동지점과 삼랑진지점에서의 수위를 비교하였다. 그림에서 나타난 바와 같이 전체적인 경향은 관측치와 거의 일치하고 있었다. 진동지점의 변화그림에서 초기의 시간대에서는 관측치와 계산치가 많은 차이를 나타내고 있다. 이는 적포교에서 전체적으로 유입되는 유량의 변화양상이 일정하게 유입되고 있으나, 유량의 상승부에서는 거의 계산값과 실측값이 일치하고 있는 것으로 판단하건데, 유입 유량의 정확한 산정이 필요할 것으로 판단되는 점이다.

삼랑진지점에서는 계산초기시점과 계산의 중점부에서 거의 일치하는 경향을 나타낸다. 침두 유량치에서 약간의 시간적 편이가 발생했으며 최고수위는 0.3m 정도의 차이를 나타내고 있다. 특히 삼랑진 지점에서는 하강하는 저수위 단계

에서 조위의 영향을 받고 있는 것을 확인할 수가 있다. 이는 진동지점에서는 발생하지 않는 것으로 하류의 수위조건이 삼랑진지점의 수위산정에 절대적인 영향을 미치는 것으로 판단된다. 그림 11에 의하면 삼랑진지점에서 발생하는 조위의 영향은 유량이 증가하는 경우에는 거의 발생하지 않고 있다가, 유량이 감소하여 수위가 낮아지는 부분에서는 상류로 전파되는 영향에 의해서 조위의 영향이 두드러지게 나타나고 있는 것을 확인할 수 있었다.

그림 10은 홍수사상에 대한 최대수위와 침두 유량의 중단도를 나타낸 그림이다. 최대유량은 하류로 진행할수록 작아지다가 측방으로 유입하는 유량이 존재하는 남강유역지점, 진동지점, 밀양강유역지점, 양산천지점, 하류35번 유역지점 등에서 유량이 증가하게 된다. 특히 남강과 밀양강에서는 많은 양의 유량이 유입이 되기 때문에 침두유량값의 도식화에서 본류구간에서 유량값이 증가하는 양상을 나타낸다. 이와 같은 최대 유량/수위값을 이용하게 된다면 홍수사상별 취약단면에서의 수리학적 특성을 파악하여 향후 하천정비 및 유지관리에 기여할 것으로 판단된다.

그림 11은 시간과 거리에 따른 수면의 거동 현상을 3차원적 형태로 나타내고 있다. 이와 같은 3차원 그림을 바탕으로 하여 하류부 조위의 영향이 미치는 구간을 확인할 수가 있으며 추후 하천의 합리적인 운영을 위한 지침을 마련할 수가 있을 것이다.

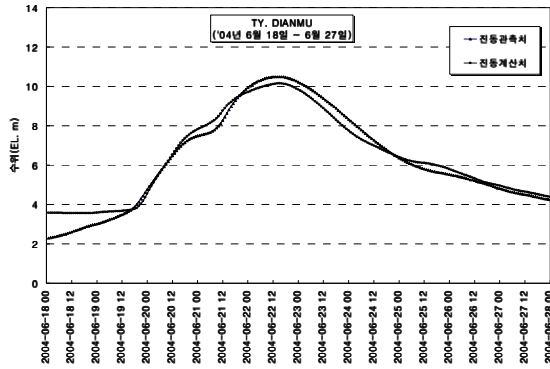


그림 8. 진동지점의 수위비교

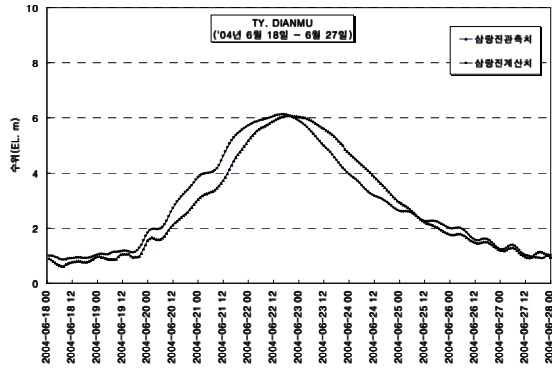


그림 9. 삼랑진지점의 수위비교

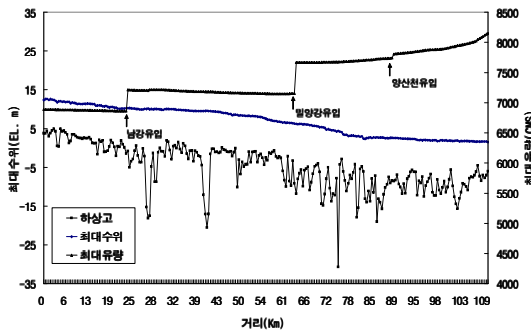


그림 10. 홍수사상에 대한 최대수위/첨두유량

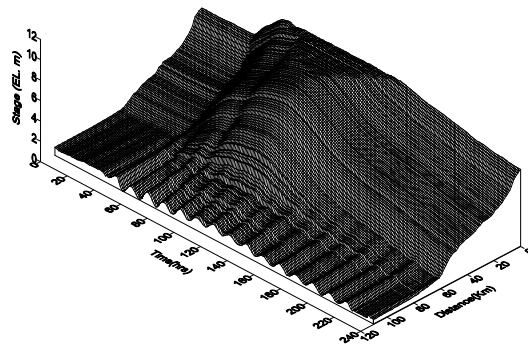


그림 11. 수면변화의 3차원 거동 분석

4.3 2003년 9월 11일 사상

본 사상은 2003년 9월 11일 ~ 9월 20일까지 발생한 홍수사상에 대해서 적용하였다. 2002년 발생한 RUSA에 이어 다음해에 발생한 MAEMI는 더욱 큰 피해를 유발하였다. 그림 12~14는 당시의 적포교 유입량, 지류유입량, 하두둑 상류수위를 나타내고 있다. 당시 적포교지점으로 유입하는 유량도 11,600 CMS 규모의 상당한 양이 유입되고 있었으며 지류에서도 많은 양의 유량이 측방향으로 유입되고 있었다. 당시 유입되는 유량양상은 9월 12일에서 16일 사이에 집중적으로 유입하였으며 이는 측방유입에서도 비슷한 시간대에 최대유입이 되었다. 당시 남강유역 및 밀양강의 유입량규모는 각각 3,432 CMS, 3,160 CMS로서 예년의 홍수규모에 비해서 상당히 큰 유입량이 발생하였다.

당시에 관측된 하구둑의 조위양상도 일정한 양상이 아닌 상당히 불규칙한 형태로 관측이 되고 있으며 이는 조위영향을 직접적으로 받는 삼랑진지점에서 가장 민감하게 작용하게 된다. 모형에서는 계산의 정확성을 가지기 위해서 매개변수를 조정하게 되는데 수리학적 모형에서는 주로 조도계수를 보정하게 된다. 그러나 경계조건 불확실성을 많이 내포한 경계조건의 경우, 실측치와 계산치를 맞추기 위해서 수행하는 매개변수의 조정도 한계가 있을 수가 있다.

그림 15~16은 각각 진동지점과 삼랑진관측소에서의 관측치와 계산치를 비교한 결과이다. 그림에서 나타난 바와 같이 진동지점에서는 관측치의 수위양상과 일치하고 있으며 계산값도 큰 차이를 나타내지 않고 있다. 이번 사상에 대해서도 진동지점에서는 계산수위가 관측수위보다 조금 낮게 산정이 되고 있다. 대체적으로 0.5m

정도의 수위차를 나타내고 있는데, 이 값도 좀 더 정확한 유입유량산정과 조위의 정확한 관측치가 수반될 때 향상된 값을 산정할 수 있을 것이다.

삼랑진지점에서는 계산치가 조금 높게 산정되었으며 0.40m의 차이를 가지고 있다. 유량의

상승부에서는 거의 값이 일치하고 있으나 감수부에서는 수위값이 차이를 나타내고 있다. 그러나 저유량의 경우 발생하는 조위의 영향에 따른 수위변화양상과 정량적 값은 실측치와 계산치가 거의 일치하고 있는 것을 확인할 수가 있다.

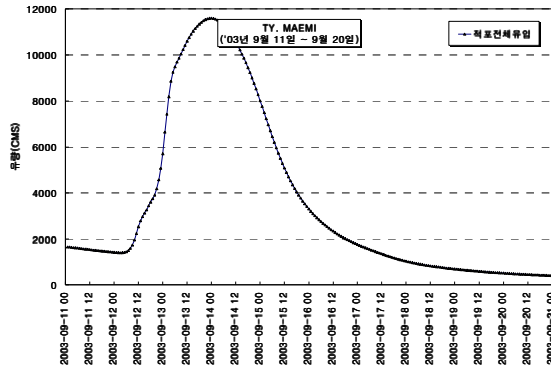


그림 12. 상류단 적포교 유입량

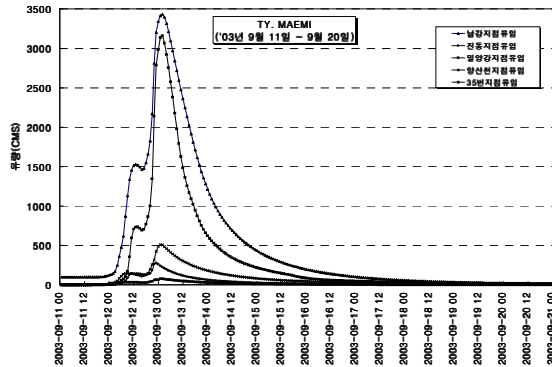


그림 13. 대상구간 지류유입량

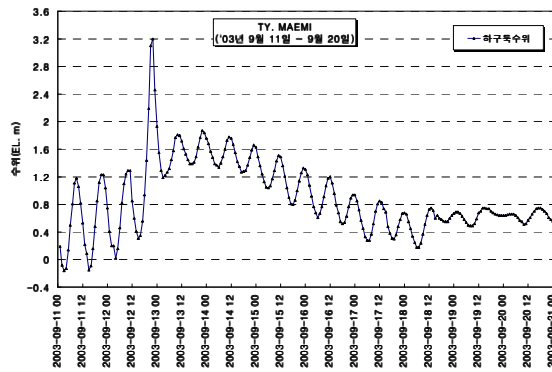


그림 14. 하구둑 상류수위

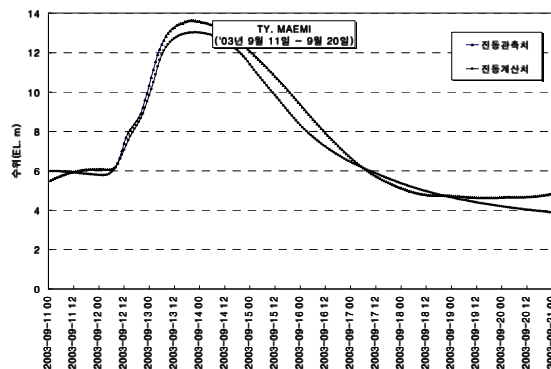


그림 15. 진동지점의 수위비교

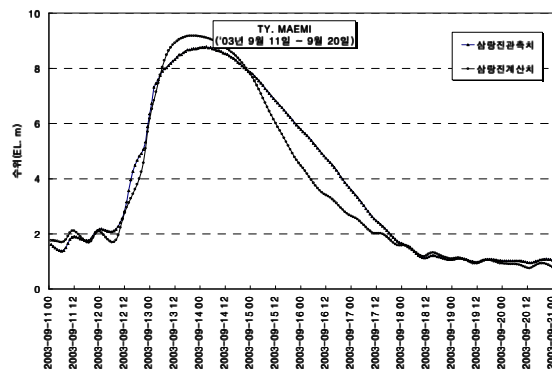


그림 16. 삼랑진지점의 수위비교

5. 하구둑 운영률에 의한 수위예측시스템 구축

5.1 하구둑 위치와 개요

낙동강 하류 서부산에 위치한 하구둑은 안동댐으로부터 하류로 355km 지점에 위치하고, 하류 바다로부터 상류쪽으로 대략 8km 떨어져 있다. 낙동강은 하구 수 킬로 상류 지점에서 을숙도를 중앙에 두고 좌안과 우안으로 갈라진다. 하구둑 주배수문이 설치된 좌안은 부산시 사하구 하단동에 그리고 우안배수문이 설치된 우안은 부산시 북구 명지동과 접하고 있다. 하구둑은 하구(河口)와 강(江)을 분리하며 하구둑의 상류로 뻗어있는 강은 담수이며 저수지 역할을 한다.

UNDP/FAO 낙동강 유역 조사단에서는 장래 용수 공급을 위해 1966년에서 1972년까지의 7개년間に 걸친 조사에서 18개 댐과 1개의 하구둑을 선정하여 조사하였다. 또한 UNDP/FAO 지원 하에 1974년에 착수하여 1977년에 완료한 낙동강 하구 조사에서는 낙동강 하구 지역의 염수 침투를 영구적으로 방지하는 대책이 검토되었으며, 낙동강 하구둑의 위치 선정은 염해 방지, 하구둑 상류 저수범위, 인근 지역의 배수, 상·하류의 수질, 생태학적 측면, 하구둑의 교통기능과 매립 등을 고려하여 현재의 위치에 건설되었다.

5.2 조위예측프로그램의 보완

하류부(수문) 조위는 여러 가지 요인에 의해 결정되나, 주로 천문조위 및 하구둑 방류량에 크게 지배를 받기 때문에 예측조위와 실제로 발생하는 조위간에 차이가 발생하게 된다. 이는 낙동강 하류부의 수리학적 홍수추적을 수행하는데 부정확한 값을 산정하는 원인이 되며, 이로 인해 낙동강 하구둑 방류량 산정시에도 오차를 내포하게 된다.

홍수추적 모형을 수행하기 위해서는 하류단의 경계조건이 상당히 중요한 인자가 될 수 있는데 만약 과거의 발생한 사상을 수행하기 위해서는

낙동강 내수위의 수위관측치가 실시간으로 한국수자원공사에서 측정되고 있기 때문에 그 값을 그대로 사용하는 것이 가능하다. 그러나 발생하지 않는 미래사상을 예측하기 위해서는 상류단의 적포교유입량은 수문학적 홍수분석 모형에서 예측이 가능하지만 하류단의 조위 값은 다른 정보가 없는 한 일년치를 예측한 조위값을 사용할 수밖에 없는 실정이다. 이러한 단점을 극복하고자 본 연구에서는 수자원공사에서 산정한 하구둑 조위예측시스템인 Tips-P에 의해 산정되는 예측조위값과 낙동강하구둑의 방류량, 그리고 과거의 실측조위를 이용하여 실제 사상과 가장 근접한 예측조위를 산정하였다. 물론 이와 같은 보완식은 실제 관측되는 여러 조위사상을 가지고 검증은 해야한다. 본 연구에서는 02년 집중호우와 루사발생시, '03년 매미발생시, '04년 민들레발생시의 4개 호우사상에 대해서 관측조위값과 예측조위를 보완하여서 비교하였다.

관계식 유도 방법은 현재 하구둑에서 운영중인 조위예측프로그램(Tips-P)에 의한 하구둑 외수위 예측조위(하구둑 400m하류) 및 하구둑 관측 내수위자료를 먼저 산출한 다음, 4개 호우사상에 대한 KOWACO 홍수분석모형의 하구둑 지점 유량을 적용하게 되는데, 이때는 상류 수위국에 대해서 실시간 수위에 대한 유량을 산정한 다음 수문학적 분석에서 산출되는 유출량을 비교하여 보정해가는 절차를 거치게 된다. 이러한 수행과정을 거쳐서 Tips에 의한 예측조위와 하구둑 유량, 그리고 최종적인 하구둑의 내수위에 대한 관계식을 다음과 같이 회귀분석에 의해서 산정할 수 있었다. 결과가 그림에 나타나 있는데, 그림 17에서 상당한 편차를 보이고 있는 천문조위와 관측조위가 회귀방정식에 의해서 그림 18과 같이 거의 일치하는 경향을 나타내고 있다.

$$\begin{aligned} \text{예측내수위(cm)} &= 0.64717284 \times \text{예측조위} \\ &(\text{cm}) + 0.007369015 \times \text{하구둑유량(m}^3/\text{s)} \\ &+ 21.8366573 \quad (R^2=0.77) \end{aligned}$$

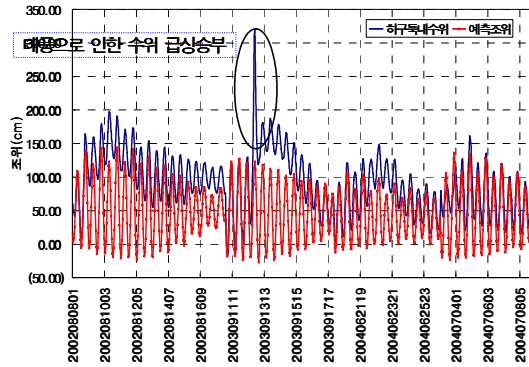


그림 17. Tips에 의한 예측조위

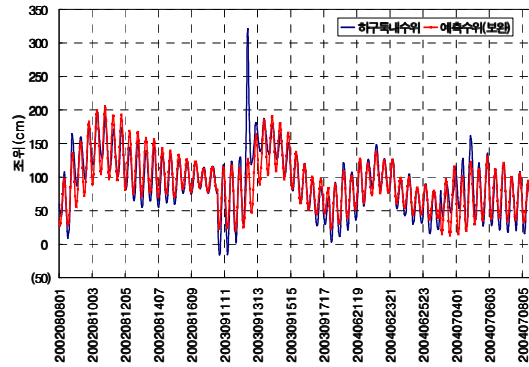


그림 18. 회귀식에 의한 예측조위 보완

본 대상구간에서 적포교 유입량 및 지류에서의 유입량을 정확하게 산정하는 것도 중요하지만, 그와 더불어 하구둑에서의 정확한 수위 경계조건을 입력하는 것도 모형수행의 상당히 중요한 절차가 될 수 있다. 본 연구에서 제시한 회귀식에 의해서 KOWACO 분석모형에서 산출되는 하구둑의 방류량과 예측조위를 조합하면 실제사상에 근접한 조위자료를 산출할수있을 것으로 판단된다. 그림에서 나타난 바와 같이 예측된 천문조위를 가공없이 사용한다면 계산결과의 불확실성은 더욱 커질것으로 판단되며, 본 연구에서는 KOWACO 홍수분석과 연계하여 과거의 실측치와 오차를 줄일 수 있는 회귀식을 산정하게 되었다. 그러나, 본 연구에서 제시한 회귀식도 향후 지속적인 검증을 통해서 최적의 값을 산정해야 할 것이다. 이는 과거의 발생한 낙동강 하구둑 내수위의 여러 가지 사상을 적용하여 검증한다면 가능할 것으로 판단된다.

6. 결론

본 연구에서는 미국 기상청(NWS, National Weather Service)에서 개발된 수리학적 홍수추적 모형인 FLDWAV Model을 이용하여 낙동강 유역의 수리학적 모형을 적용하고 그에 따른 결과를 분석하였다. 기존의 수문학적 모형과는 달리 수리학적 홍수추적 모형은 하천의 흐름방정

식을 수치계산법에 의한 해석에 의해서 해를 구하게 되는데 하천의 지형자료가 모두 입력자료로 들어가기 때문에 실제하천의 상황을 그대로 반영하는 물리적인 방법이다.

낙동강하류부의 적포교와 하구둑구간 110 Km, 265개 단면에 대한 입력자료를 구축하였으며, 과거 홍수사상인 2004년 디엔무와 2003년 매미에 대해 분석을 수행하였다. 유입유량값은 KOWACO 홍수분석에 의한 유입량을 산정하였으며 하류단 조건은 하구둑 내수위를 적용하였다. 모의수행을 위해서 본 연구에서는 최적의 일관된 매개변수를 확립하였으며, 과거의 홍수사상에 대해서 적용한 결과 진동, 삼랑진 지점에서의 관측수위와 비교하였을 때 정량적, 정성적인 형태가 거의 일치하고 있었다. 또한 이때 적용된 하류단 조건은 홍수기의 조위조건으로서 상,하류단의 부정류 조건을 제시된 모형은 잘 수행하고 있는 것으로 판단된다.

과거 발생한 사상을 모의하기 위해서는 하류부의 관측수위표지점까지를 구간거리로 선택하면 되지만, 향후 발생할 수 있는 홍수사상을 예측하기 위해서는 하류단에서의 합리적인 조위경계조건이 제공되어야 한다. 현재 낙동강 하구에서는 1년치 예측조위를 산정할 수 있지만 이는 천문조위로서 실제 발생하는 조위값과는 상당한 차이를 나타내게 된다. 본 연구에서는 이러한 예측조위값을 실제 조위값으로 변화하는 회

귀방정식을 도출하였다. 이를 이용하여 향후 홍수분석모형에서 산정된 하구둑 방류량과, 예측조위를 이용하여 산정된 하류경계조건의 확립으로 과거 발생한 사상 뿐만 아니라 향후 예측가능한 홍수사상의 모의가 가능하게 되었다.

참고문헌

건설부 (1991). **낙동강하천정비기본계획(보완) (하구둑-밀양강합류부)**

건설부 (1992). **낙동강하천정비기본계획(보완 II) (밀양강합류부-남강합류부, 남강)**

건설부 (1993). **낙동강하천정비기본계획(보완 III) (남강합류부-반변천합류부)**

김상호, 김원, 이을래, 최규현 (2005). “한강하류부 신곡수중보의 수리학적 영향분석.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제38권, 제5호, pp. 401-413.

김원, 우효섭 (2005). “기존 하천 수리량 산정방법의 한계와 개선방안” **한국수자원학회지**

이정규, 이창현 (2004). “수리학적 홍수추적모형을 이용한 한강하류부의 조도계수 산정.” **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제24권, 제1B호, pp. 25-32.

이주현, 이은태, 이도훈, 김남원 (1998). “낙동강 하류부의 감조구간에 대한 홍수해석.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제31권, 제3호, pp. 235-242.

한국수자원공사 (2000). **KOWACO 홍수분석모형 개발**

황의준 (1997). “한강 본류에 대한 부정류 계산모형 : 모형의 보정.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제30권 제5호, pp. 549-559.

Fread, D. L. and Lewis, J. M. (1998). *NWS FLDWAV MODEL*, Theoretical Description and User Documentation, Hydrologic Research Laboratory Office of Hydrology, National Weather Service(NWS), NOAA.