

감조하천에서 수위-유량관계곡선식에 관한 연구 (A Study on the Stage - Discharge Relationship in Nakdong Estuary Barrage)

추태호¹⁾, 김현식²⁾, 김만식³⁾, 김철구⁴⁾

1. 서론

하천과 하구의 수위변동은 물을 이용하는 사람이나 수공학자의 주요 관심대상이다. 일반적으로 하구에서의 밀물은 홍수위를 증가시키고 이러한 홍수위는 범람지역을 발생하게 되어 재해의 원인이 된다. 이러한 감조하천에서 수위-유량관계는 단순히 수위와 이에 대응하는 유량만의 함수라기 보다는 유량과 어느 특정한 수위표 지점의 수위차 및 조석파에 의해 영향을 받는 함수일 것이다. 특히 감조하천에서는 관련수위자료 등은 손쉽게 취득할 수 있는 반면에 수위-유량관계곡선에 필수적인 유량은 일반유속계 등을 사용하여 유량을 직접취득하기가 불가능할 뿐 아니라 본 구간은 수문개도 및 바다의 조위영향 등을 직접적으로 받기 때문에 수위-유량관계를 직접적으로 사용할 수 가 없어, 그동안 신뢰성 있는 수위-유량관계곡선을 개발하는데 그 한계성이 있었다.

따라서 본 연구에서는 이러한 문제점을 근본적으로 해결하고 신뢰성 있는 정확한 유량자료를 취득하기 위하여, 하구둑의 상류 접근수로 구간에 6척의 선박을 동시에 띄워 7 개탐이 약 3일간 연속적으로 유량측정을 실시하였다. 또한 측정유량이 가급적 실시간에 가깝게 산정될 수 있도록 사전에 예비측정훈련을 실시한 후 최소한의 소요시간 내에서 유량측정을 시행하였다. 특히 유량측정결과로부터 산정된 값을 수리학적으로 검증하기 위하여 우리공사에서 개발하여 여러차례 적용한 사례가 있는 Loopnet 1차원 부정류 하도추적 모형과 미국 기상청에서 개발한 FLDWAV 1차원 홍수파 추적모형을 사용하여, 낙동강 본류인 진동지점으로부터 약 83km 하류에 위치한 하구둑지점까지 적용하였다. 위 결과를 토대로 하여 낙동강 수문운영의 핵심인 구포지점과 하구둑지점의 새로운 수위-유량관계 곡선식을 제안하고자 한다.

2. 유량측정

본 연구과제를 위하여 '98년부터 '99년까지 하구둑 직상류지점에서 프로펠라 유속계, 전자파 표면유속계 및 ADCP를 이용하여 하구둑 상·하류 수위차별, 수문개도별 그리고 흐름조건별로 하구둑을 통하여 흘러 나가는 유량측정를 지속적으로 실시하였다.

하구둑지점의 유량측정을 위해서는 평상시의 하구둑 운영조건과같은 상황에서 유량측정을 실시하여야 하기 때문에 다음과 같은 2가지 조건이 만족되는 날을 선택하여 유량측정일로 선정하였다.

- ① 하구둑 외수위를 기준으로 조수간만의 차가 가장 많이 나는 날.

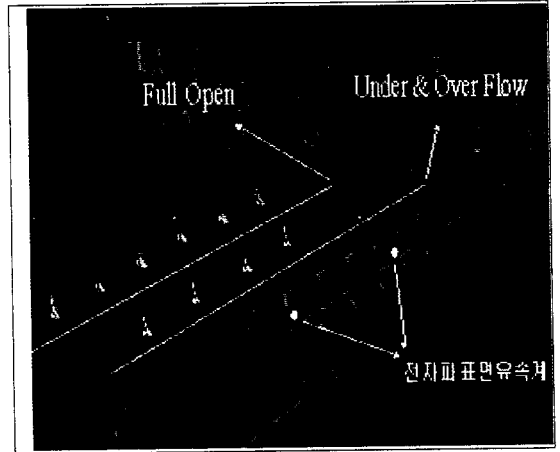
1) 한국수자원공사 부산권관리단 공무과장
2) 한국수자원공사 수자원연구소 연구원
3) 신성대학 토목과 교수
4) 국립환경연구소 위축연구원

② 염수침투로 인한 하구둑 상류 주요 취수지점의 취수장애 문제 때문에 하구둑 상류에 수량이 풍부한 날

상기 2가지 조건에 맞추어 '99년 6월과 10월에는 하구둑 직상류지점에 6척의 배를 수문개도 조건별로 상황에 맞게 횡으로 배치하여 동시에 유량측정을 실시 하였으며, 유량측정 전경 및 현황도는 <그림1>와 <그림2>과 같다.



<그림1> 유량측정 전경사진



<그림2> 유량측정 현황도

3. 사용된 일차원 부정류 모형

3.1. Loopnet 모형

우리공사에서 개발한 Loopnet(Looped network)모형은 1987년 개수로의 흐름해석에 사용한 부정류 해석 프로그램으로써(이환기, 1987), Preissmann 기법에 따른 차분방정식으로 수위 및 유량에 관한 선형연립방정식을 구성하여 looped solution 알고리즘으로 해석하였다. 본 모형에서는 개수로의 1차원 부정류에 관한 Saint Venant의 연속방정식과 운동량 방정식을 사용하였으며, Saint Venant의 방정식은 "Barr de Saint Venant"에 의해 개수로의 일차원 부정류 흐름을 계산하기 위한 아래의 식은 여러가지 기본 가정(생략)으로 개발되었다.

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

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\beta \frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial y}{\partial x} + g \frac{Q|Q|}{AR^n} = 0 \quad (2)$$

여기서 t 는 시간, x 는 거리(m), y 는 수위(m), Q 는 유량(m^3/s), q 는 측방향의 단위길이당 유입량($m^3/s/m$)이다. A 는 흐름에 기여하는 단면적(m^2)이고, A_s 는 흐름에 기여하는 단면적과 저류효과를 가지는 홍수터를 고려한 단면적(m^2)이다. β 는 운동량 보정계수, R_n 은 Manning의 조도계수 n 과 동수반경 R 을 사용하여 나타내면 $R_n = R^{4/3} / n^2$ 이다.

3.2. FLDWAV모형

FLDWAV모형은 미국 기상청에서 Fread가 20여년에 걸쳐 개발한 일차원 하천모형으로 기존에 일차원 흐름 모형으로 많이 사용된바 있는 DWOPER모형의 단점을 보완하고 댐 파괴시에 발생하는 급격한 홍수와 해석 프로그램인 DAMBRK를 통합하여 개발하였고, 수리학적 모의과정등 많은 부분이 개선된 모형으로 다음과같은 특징을 가지고 있다.

- 1차원 부정류 Saint - Venant 방정식을 4점 음해 유한차분법으로 해석
- 대상흐름은 상류, 사류 또는 혼합흐름에 적용
- 유체특성은 Newtonian 유체와 Mud/Debris 흐름이나 Tailing dam에서의 흐름등과 같은 Non-Newtonian 유체에도 적용
- 홍수와 추적시 하류구조물, 지류유입, 하천의 만곡효과, 제방영향 및 조석영향 고려
- 추적기법의 선택(동역학적 음해법, 양해법, 보존방정식에 의한 저수지 추적등)
- 단일수로나 수지형(Dendritic) 수로에 적용되며, 유량이나 수위에 따른 Manning 조도계수 n을 자동조정으로 자동 검정(Auto-Calibration)

본 모형에서는 부정류 홍수와흐름을 해석하기 위해 1차원 Saint Venant 부정류 흐름 방정식을 기본으로 한 수리학적인 하도추적 알고리즘을 사용하였으며, 기존 Saint Venant 방정식에 하도의 확대 및 축소효과, 하도의 만곡흐름과 Non-Newtonian흐름 및 바람의 영향 등 항목을 추가하여 아래와 같이 연속방정식과 운동량방정식으로 구성하였다.

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial s_{co}(A + A_o)}{\partial x} - q = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial (s_m Q)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\beta \frac{Q^2}{A}) + gA [\frac{\partial h}{\partial x} + S_f + S_e + S_i] + L + W_j B = 0 \quad (4)$$

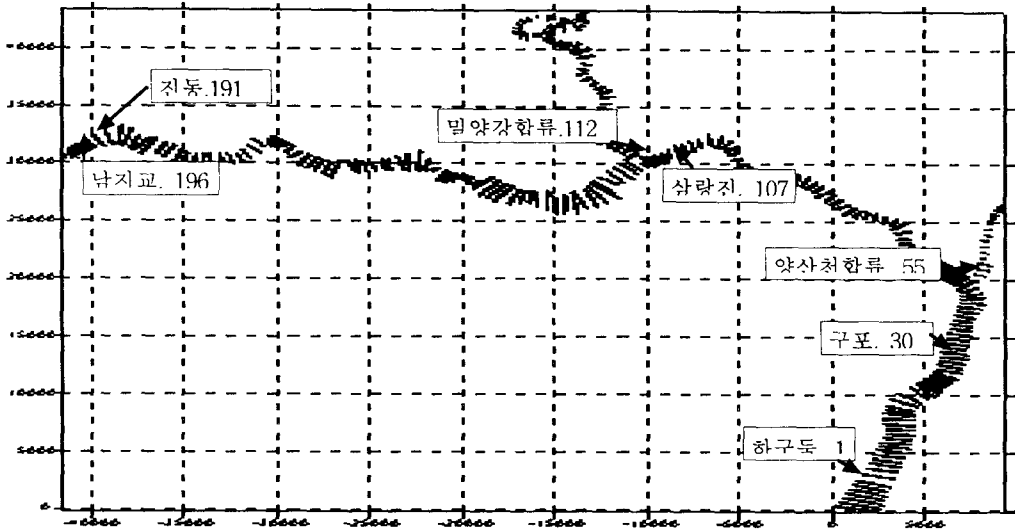
4. 부정류모형 단면구성 및 경계조건

4.1 단면구성

Loopnet 모형과 FLDWAV 모형은 모든 계산 격자점에서 고유의 하천횡단면 자료를 요구하며, 각 하천단면은 수위별 주수로의 하폭, Manning의 조도계수로 구성된다. 일단 입력된 하천단면은 대칭으로 간주되며, 본 모형에서는 내삽으로 하천 횡단면을 추가하여 사용 할 수도 있다. 본 연구에서는 낙동강 본류 진동지점에서 낙동강 하구둑지점까지의 부정류 하도추적 체계 구성을 위한 하도 총연장은 83.35km로 총 196개 단면자료를 이용 하였으며, 삼랑진 수위표 1.6km 직상류에서 합류하는 밀양강과 구포수위표 지점으로부터 9.4km 상류에서 합류하는 양산천은 별도의 단위하도로 구성하지 않고 지류유입으로 구성하였으며, 일차원 부정류해석을 위한 하도추적 대상구간의 개략적인 종·횡단도는 <그림3> 과 같다.

4.2 경계조건

본 연구에서 모의하는 하도추적 구간은 낙동강 본류구간(진동~낙동강 하구둑)을 대상으로 하였기 때문에, 상류단 경계조건으로는 T/M으로부터 전송되어 들어온 진동지점의 수위자료를 이용하여 '98년 홍수통제소에서 제시한 수위-유량곡선식을 사용, 유량으로 환산후 이 유량을 상류단 경계조건으로 설정하였다. 하류단의 경계조건으로는 하구둑 상류지점의 수위자료를 하류단의 경계조건으로 설정하였다.



<그림3> 부정류 하도추적구간 중·횡단면 개략 현황도

5. 모형 및 유량측정성과 비교

5.1 모형 수행기간 선정

Loopnet모형과 FLDWAV모형에 사용되는 모형 수행기간, 초기조건, 경계조건, 조도계수등 모형에 들어가는 모든 입력자료는 동일하게 적용 하였으며 모형 수행기간은 하구둑에서 2차례 동시 유량측정을 실시한 날을 모형 수행기간의 중간점으로하여 총 240시간동안 모형을 수행토록 하였다. 1차 모형 수행기간은 '99년 6월 16일부터 6월 25일까지(유량측정일 : 6월 21일)를 설정하였고, 2차 모형 수행기간은 '99년 10월 8일부터 10월 17일까지(유량측정일 : 10월 13일부터 10월 15일 까지)로 설정하였다.

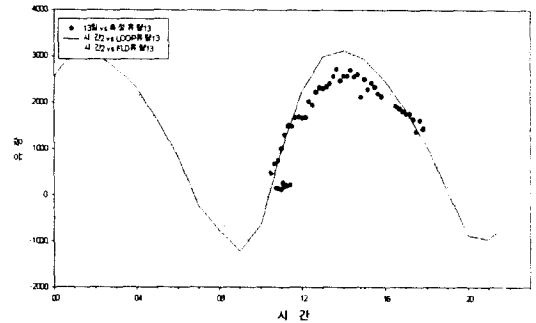
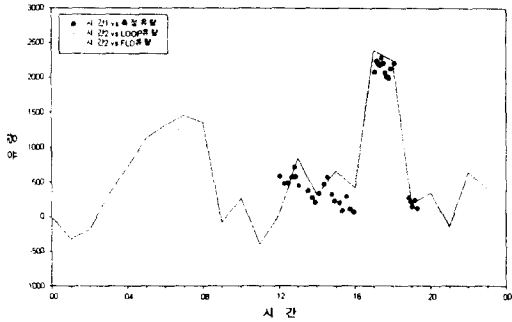
5.2 모형 및 유량측정 성과 비교

'99년에 실시한 유량측정 조사중 6월21일에 실시한 유량측정은 하루동안에 하구둑의 수문운영조건을 주수문과 조절수문의 Fullopen, 조절수문의 Underflow, Overflow 경우로 나누어 유량측정조사를 실시하였으며, 10월13일부터 15일까지의 유량측정 조사중 13일은 주수문과 조절수문을 Fullopen하여 유량측정조사를 실시하였고, 14일은 주수문을 Fullopen하는 경우, 그리고 각 Level 별로 주수문을 Underflow하는 경우를 대상으로 유량측정을 실시하였다.

하구둑 상류지점에서 상기 2회의 유량측정 성과와 부정류모형 수행결과를 비교 검토하기 위해 부정류모형수행 결과중 유량측정을 실시하였던 날을 발췌하여 실제 유량측정조사를 실시하여 얻은 결과와 Loopnet모형 및 FLDWAV모형의 수행결과를 <그림4>와 <그림5>와 같이 나타내었다.

<그림4>와 <그림5>는 99년 6월21일과 10월13일을 기준으로 Loopnet모형 및 FLDWAV모형의 수행결과와 실측 유량측정결과를 서로 비교한 결과로써 두 경우 모두 Loopnet 및 FLDWAV모형 수행결과를 분석해보면 그림에서 알수 있듯이 Loopnet 모형 수행결과와 FLDWAV모형 수행결과는 거의 동일하게 분석되었고, 실측 유량측정성과도 두 모형의 수행결과보다는 다소 적지만 거의 동일하게 분석되었다. 따라서 실제 측정값이 있는 하구둑지점은 실측유량자료를, 실제측정이 불가

능한 구포지점의 유량값은 모형의 수행결과를 이용하여 구포지점의 수위-유량관계를 도출하였다.



<그림4> 모형 및 유량측정 성과 비교('99.6.21) <그림5> 모형 및 유량측정 성과 비교('99.10.13)

6. 수위-유량관계곡선식 산정

6.1 구포지점

낙동강하구둑 저수구역내에 위치한 구포지점에서의 하천성격은 일반 자연하천과는 달리 바다 조위의 영향, 하구둑 수문조작의 영향 등 복합적 요인이 유량변화에 관여하고 있기 때문에 단순한 수위변화 이외에 복합적 요인의 영향을 고려할 수 있는 인자를 포함하는 것이 본 지점의 유량산정에 필수적으로 요구된다. 따라서 본 연구에서는 이러한 영향을 고려할 수 있는 변수로서 구포 수위변화 이외에 구포-상류 수위차, 상류-하류 수위차를 함께 포함하였다. 구포 수위-유량관계곡선식을 작성함에 있어 다변수들간의 상관관계는 구포수위와 하구둑상류수위차의 변화보다는 구포수위와 상류-하류수위차의 변화가 유량변화에 미치는 영향이 적음을 알 수 있다. 그러나 구포지점의 보다 정확한 유입량을 산정하기 위해서 세가지 변수를 모두 포함하여 다중회귀분석을 실시하였다. 위의 세가지 변수를 모두 고려하여 다중회귀분석을 하였고 구포유량(종속변수)에 대한 독립변수로서 구포-상류수위차, 구포수위 및 상류-하류수위차의 세가지 변수가 포함된 경우에 가장 높은 상관관계($R^2=0.77$)를 나타냈으며, <그림6>은 구포지점의 제안된 수위-유량관계 곡선식으로

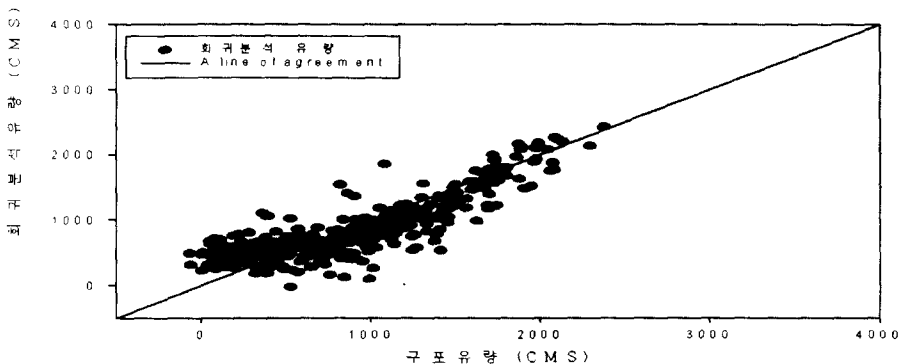


그림 6 구포지점에서 다중회귀분석 유량과 관측유량 비교

산정된 유량과 관측유량을 서로 비교한 결과로써 그림에서 알 수 있듯이 산정유량이 관측유량을 거의 유사하게 나타내었다. 따라서 구포지점의 수위-유량관계 곡선 식을 다음과 같이 제안하였다.

$$Q_{\text{구포지점}} = 931.93 - 685.46H + 4504.12\Delta H_1 + 243.95\Delta H_2$$

여기서 $Q_{\text{구포지점}}$; 구포지점의 유량 (CMS), H ; 구포수위(=H₁)(m)

ΔH_1 ; 구포수위(=H₁) - 상류수위(=H₂)차 (m), ΔH_2 ; 상류수위(=H₂) - 하류수위(=H₃)차 (m)

6.2 하구둑지점

현재 낙동강 하구둑은 수문을 완전개방시는 자연하천의 조건이 되기 때문에 구포지점같이 하구둑유량에 영향을 미치는 다변수들을 검토하여 다중회귀분석을 실시하였다. 다중회귀분석에서 하구둑방류량(종속변수)에 대한 독립변수로서 구포-상류수위차, 상류수위 및 상류-하류수위차의 세가지 변수가 포함된 경우에 가장 높은 상관관계를 나타내었다. 따라서 본 논문에서는 상관관계가 가장 좋은 다음과 같은 다중회귀분석결과(R²=0.77)를 하구둑지점의 새로운 수위-유량관계 곡선식으로 제안하였다.

$$Q_{\text{하구둑지점}} = -571.3 + 735.2H + 4647.6\Delta H_1 + 6993.8\Delta H_2$$

여기서 $Q_{\text{하구둑지점}}$; 하구둑지점의 유량 (CMS), H ; 상류수위(=H₁)(m)

ΔH_1 ; 상류수위(=H₁) - 하류수위(=H₂)차 (m), ΔH_2 ; 구포수위(=H₃) - 상류수위(=H₁)차 (m)

라. 결 론

본 논문에서는 낙동강 하구둑상하류수위와 구포수위 그리고 상류수위와 구포수위간 수위차등 감조하천에서 수위에 따른 유량관계곡선식에 영향을 미치는 변수들을 찾아 구포지점과 하구둑지점에서 수위유량관계곡선식을 새롭게 제안하였다. 특히 보다 신뢰성 있는 수위-유량관계를 도출하기 위하여 우리나라에서 최초로 연속 실측된 유량측정 성과자료를 대표적인 일차원 부정류 모형인 Loopnet모형 및 FLDWAV모형을 통해 검증하였다. 그러나 보다 정확한 수위-유량관계곡선식을 산정하기 위해서는 보다 장기간의 연속유량측정자료 및 하구둑의 관측자료의 분석이 요구된다.

참고문헌

1. 한국수자원공사 (1997). 낙동강수계 댐방류량 조절을 위한 하도추적모형 연구, RRI-WR-97-3. .
2. Abbott, M.B, and Basco, D.R. (1989). Computational fluid dynamics : An introduction for engineers. Longman Scientific & Technical.
3. Chiu, C. -L.(1991). "Application of Entropy Concept in Open Channel Flow Study." Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol.117, No.5, pp.615-627.
4. Choo, T. H. (1998). An Efficient Method of Discharge Measurement in Sandy Rivers." Ph.D Thesis, Dep. of Civ. Engrg., Univ. of Pittsburgh, Pittsburgh.
5. Chow, V. T. (1973). Open-Channel Hydraulics : McGraw-Hill Company, pp.24-28. pp.70-81.
6. Fread, D.L. (1987). "National weather service operational dynamic wave model Version 07/18/84." National Weather Service, NOAA, Silver Spring, Maryland.