

1차원 부정류 모형을 이용한 낙동강 하구둑 유량 검증

추태호¹⁾, 김현식²⁾, 김만식³⁾, 김철구⁴⁾, 윤재홍⁵⁾

1. 서론

하천에서의 일차원 부정류 해석은 수공학자들에 의해 많은 연구가 있었으며, 최근들어 컴퓨터 기술의 발달로 그 동안 해석적으로 해결하지 못했던 많은 수리현상들을 수치해석법으로 계산할 수 있게 되었다. 특히, 본 연구에서 사용하고 있는 프로그램의 수치해석 기법은 Saint Venant의 연속 방정식과 운동량 방정식을 Preissmann 기법을 이용하여 해석한다. 음해법의 하나인 Preissmann 기법은 계산거리 및 시간 간격의 제약이 적고, 안정성과 정확성이 우수하여 자연 하천에서 부정류 해석을 위하여 많이 사용되고 있다. Preissmann 기법을 사용하고 있는 대표적인 범용 1차원 하천 모형으로는 미국 기상청(National Weather Service)의 FLDWAV모형, 미국 USGS의 BRANCH모형, 프랑스 SORGREAH의 CARIMA모형, 영국 수리연구소의 FLUCOMP모형, 덴마크 DHI의 MIKE11 등이 대표적이다.

본 연구는 낙동강하구둑 상류지점에서 프로펠라 유속계, 전자파 표면유속계 및 ADCP(Acoustic Poppler Current Profiler)를 이용하여 하구둑 상·하류 수위차별, 수문개도별 그리고 흐름조건별로 하구둑을 통하여 흘러나가는 유량을 배를 이용하여 동시에 유량측정 조사를 실시하고, 낙동강 본류인 진동지점으로부터 약 83km 하류에 위치한 하구둑지점 까지를 대상으로 우리공사에서 개발하여 여러차례 적용한 사례가 있는 Loopnet 1차원 부정류 하도추적 모형과 미국 기상청에서 개발한 FLDWAV 1차원 홍수와 추적모형을 이용하여 유량측정 조사성과를 수리학적으로 검증하고자 한다.

2. 일차원 모형의 이론적 검토

개수로 하천에서 일차원 부정류를 해석하기 위해서는 비압축성이라고 가정할 수 있는 물이 난류 상태로 자유수면을 가지고 흐름 경우에, 몇 가지 가정을 첨가하여 1차원 수확모형을 구성할 수 있다. 즉, 물의 흐름은 한 방향만을 가지며 단면에 대하여 균일한 유속을 가진다는 점과 연직 방향의 유속과 가속도는 중력항에 비하여 무시될 수 있다는 가정으로부터 Saint Venant의 연속방정식과 운동량방정식은 식(1)과 (2)와 같이 성립된다.

-
- 1) 한국수자원공사 부산권관리단 공무과장
 - 2) 한국수자원공사 수자원연구소 연구원
 - 3) 신성대학 토목과 교수
 - 4) 국립환경연구원 위축연구원
 - 5) 한국수자원공사 수자원연구소 상하수도연구팀장

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

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(Q^2/A)}{\partial x} + gA\left(\frac{\partial y}{\partial x}\right) - gA(S_o - S_f) = 0 \quad (2)$$

여기서, Q는 유량(m³/sec), A는 흐름에 기여하는 유수단면적(m²), q는 횡 유입량(Lateral Inflow), x는 하도에 따른 흐름방향의 거리, t는 시간, g는 중력가속도, y는 수심(m), S_o는 하상경사, S_f는 다음같은 (3)식으로 주어지는 마찰경사(Friction Slope)항이다.

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

여기서 n은 Manning 계수, R은 동수반경(Hydraulic Radius)이다.

상기 (1)식과 (2)식의 해를 구하기 위해서는 거리축에 따른 초기조건과 시간축을 따라 상단 및 하단에 각각 한 개씩의 경계조건을 필요로 한다. 초기조건이란 t=0에서 전 영역에 걸쳐 주어지는 종속변수이다. 경계조건으로 x=0에서는 유체흐름에 대한 종속변수가 주어져야 하는데 유량, 흐름 단면적, 수심 등이 사용될 수 있다. 하류경계에서는 하류의 흐름을 지배하는 방식에 따라 좌우되므로 명확하게 정의하기 어렵지만 유량, 수심, 수위-유량관계 곡선식 등이 사용된다.

2.1 부정류모형 지배방정식

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 다음과 같은 기본 가정으로 개발되었다.

- 물의 흐름은 한 방향이며, 흐름단면에서 균일한 유속분포와 수위를 갖는다.
- 물의 수직단면에서 수직 가속도는 매우 작으며, 따라서 흐름방향으로 작용하는 수압은 정수압 분포를 가진다.
- 물의 흐름에 의한 마찰손실은 정류흐름의 마찰손실로 가정한다.
- 하도의 기울기는 완만하며, 그 기울기의 cosine은 1로 가정한다.

$$\frac{\partial A_s}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} - q = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\beta \frac{Q^2}{A}) + gA \frac{\partial y}{\partial x} + g \frac{QQ}{ARn} = 0 \quad (5)$$

여기서 t는 시간, x는 거리(m), y는 수위(m), Q는 유량(m³/s), q는 측방향의 단위길이당 유입량(m³/s/m)이다. A는 흐름에 기여하는 단면적(m²)이고, A_s는 흐름에 기여하는 단면적과 저류효과를 가지는 홍수터를 고려한 단면적(m²)이다. β는 운동량 보정계수, Rn은 Manning의 조도계수 n과 동수반경R을 사용하여 나타내면 $Rn = R^{4/3} / n^2$ 이다.

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 모의과정 등 많은 부분이 개선된 모형으로 다음과 같은 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 흐름 등과 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 홍수와 흐름을 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.

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial s_{co}(A+A_o)}{\partial x} - q = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial (s_m Q)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\beta \frac{Q^2}{A}) + gA [\frac{\partial h}{\partial x} + S_f + S_e + S_i] + L + W_f B = 0 \quad (7)$$

여기서, Q는 유량(m³/sec), h는 수심(m), A는 흐름에 기여하는 단면적(m²)이고, A_s는 흐름에 기여하는 단면적과 저류효과를 가지는 홍수터를 고려한 단면적(m²), S_{co}와 S_m은 수위 변화에 따른 만곡부 인자, t는 시간, x는 거리(m), q는 지류 유입량이나 횡 유입량, β는 속도 분포에 대한 운동량 보정계수, g는 중력가속도, S_f는 하도 및 홍수터의 마찰경사, S_e는 하도의 확대·축소경사, S_i는 홍수기 탁류와같은 Non - Newtonian 유체의 내부점성의 소산과 관련된 추가적인 마찰경사, B는 표고별수위에따른 하도폭, L은 지류유입 혹은 유출로 인한 운동량 효과이고, W_f는 흐름표면에서 바람의 영향이며 다음식으로 나타낼 수 있다.

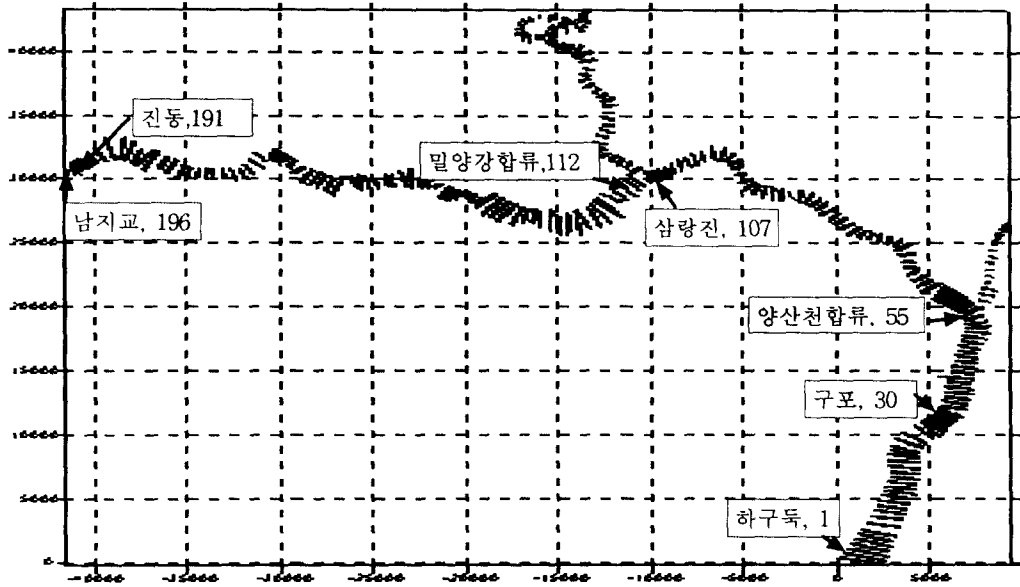
$$W_f = C_w V_w |V_{rw}| \quad (10)$$

2.2 부정류 모형 단면구성 및 경계조건

① 단면구성

Loopnet 모형과 FLDWAV 모형은 모든 계산 격자점에서 고유의 하천횡단면 자료를 요구하며, 각 하천단면은 수위별 주수로의 하폭, Manning의 조도계수로 구성된다. 일단 입력된 하천 단면은 대칭으로 간주되며, 본 모형에서는 내삽으로 하천 횡단면을 추가하여 사용 할 수도 있다. 본 연구에서는 낙동강 본류 진동지점에서 낙동강 하구둑 지점까지의 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 하도추

적 대상구간의 개략적인 종·횡단도는 <그림1> 과 같다.



<그림1> 부정류 하도추적구간 종·횡단면 개략 현황도

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-유량관계 곡선식을 사용, 유량으로 환산후 이 유량을 상류단 경계조건으로 설정하였다. 하류단의 경계조건으로는 하구둑 상류지점의 수위자료를 하류단의 경계조건으로 설정하였다.

3. 모형 및 유량측정성과 비교

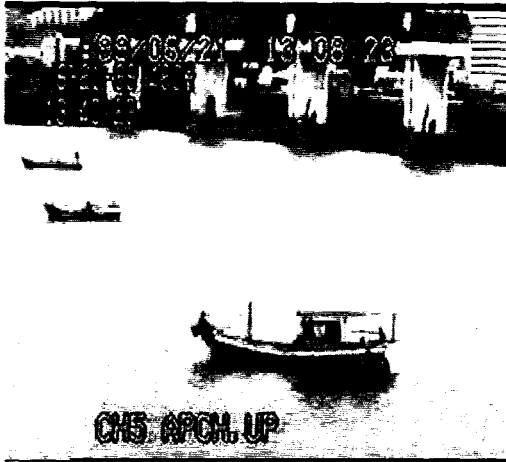
3.1 유량측정 조사

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

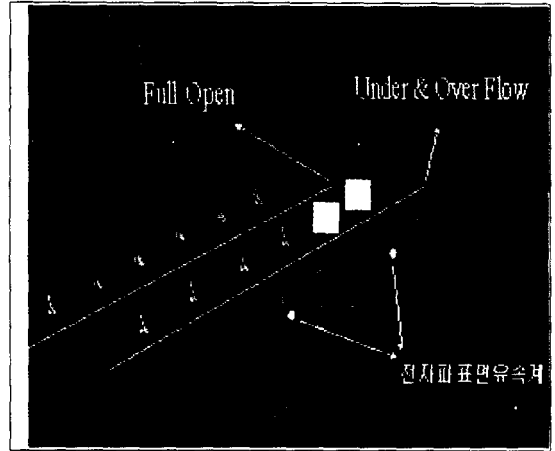
하구둑 지점의 유량측정조사를 위해서는 평상시의 하구둑 운영조건과같은 상황에서 유량측정을 실시하여야 하기 때문에 다음과 같은 2가지 조건이 만족되는 날을 선택하여 유량측정 조사일로 선정하였다.

- ① 하구둑 외수위를 기준으로 조수간만의 차가 가장 많이 나는 날.
- 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 조사전경 및 현황도는 <그림2>와 <그림3>과 같다.



<그림2> 유량측정 조사 전경사진



<그림3> 유량측정 조사 현황도

3.2 모형 수행기간 선정

Loopnet모형과 FLDWAV모형에 사용되는 모형 수행기간, 초기조건, 경계조건, 조도계수 등 모형에 들어가는 모든 입력자료는 동일하게 적용하였으며 모형 수행기간은 하구둑에서 2차례 동시 유량측정을 실시한 날을 모형 수행기간의 중간점으로 하여 총 240시간동안 모형을 수행토록 하였다.

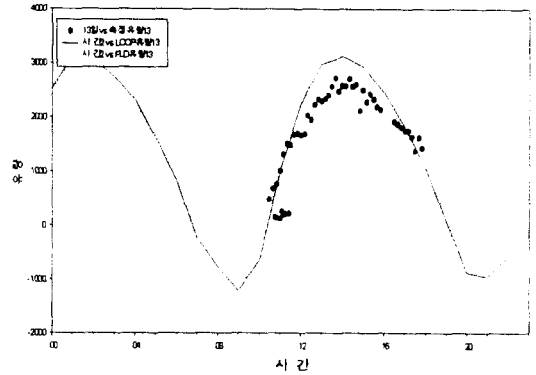
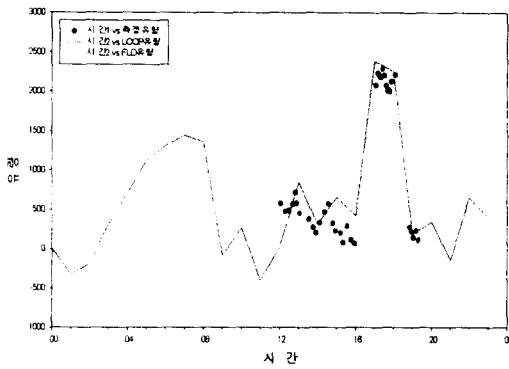
1차 모형 수행기간은 '99년 6월 16일부터 6월 25일까지(유량측정일 : 6월 21일)를 설정하였고, 2차 모형 수행기간은 '99년 10월 8일부터 10월 17일까지(유량측정일 : 10월 13일부터 10월 15일까지)로 설정하였다.

3.3 모형 및 유량측정 성과 비교

'99년에 실시한 유량측정 조사중 6월 21일에 실시한 유량측정은 하루동안에 하구둑의 수문 운영조건을 주수문과 조절수문의 Fullopen, 조절수문의 Underflow, Overflow 경우로 나누어 유량측정조사를 실시하였으며, 10월 13일부터 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 부정류 모형 수행 결과중 유량측정을 실시하였던 날을 발췌하여 실제 유량측정조사를 실시하여 얻은 결과와 Loopnet모형 및 FLDWAV모형의 수행결과를 <그림4>와 <그림5>와 같이 나타 내었다.

<그림4>와 <그림5>는 99년 6월 21일과 10월 13일을 기준으로 Loopnet모형 및 FLDWAV모형의 수행결과와 실측 유량측정결과를 서로 비교한 결과로써 두 경우 모두 Loopnet 및 FLDWAV 모형 수행결과를 분석해 보면 그림에서 알 수 있듯이 Loopnet 모형 수행결과와 FLDWAV모형 수행결과는 거의 동일하게 분석되었고, 실측 유량측정성과도 두 모형의 수행결과 보다는 다소 적지만 거의 동일하게 분석되었다.



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

4. 결 론

수리학적 하도추적 모형에서 모형수행 결과의 정확도를 좌우할 수 있는 외적 요소로써 가장 중요한 것은 모형의 경계조건이므로 상류단 경계조건은 진동지점의 T/M자료에서 직접 수신한 수위에 따른 유량을 적용('98 수위-유량관계 곡선식) 하였으며, 하류단 경계조건으로 낙동강 하구둑 상류수위표지점의 수위자료를 사용하여 분석한 결과, 99년 6월 21일과 10월 13일을 기준으로 Loopnet모형 및 FLDWAV모형의 수행결과와 실측 유량측정 성과를 비교하면 실측 유량측정 성과가 두 모형의 수행결과 보다는 다소 적지만 거의 동일하게 분석되었다.

따라서, 본 연구의 주목적인 낙동강 하구둑에서의 수문 개도별 방류량 산정을 위하여 실시하였던 유량측정 성과자료를 일차원 부정류 모형을 통해 검증 하므로써 보다 정확한 하구둑 방류량을 산정토록 하였으며, 또한 우리공사에서 개발하여 여러차례 실무 적용사례가 있는 Loopnet 모형 결과와 미국 기상청에서 개발한 FLDWAV모형 분석 결과 앞으로 Loopnet모형의 범용성 및 사용자 Interface(GUI)를 지속적으로 보완하여 수공학 문제해결과 물 관리 및 수리 수문에 관한 실무에 더욱더 활발히 활용할 수 있으리라 기대된다.

참고문헌

1. 이환기 (1987). "수치모형에 의한 개수로 Network의 부정류 해석." 제8회 한국대담학회 학술 발표회 발표집.
2. 박봉진, 이환기, 정관수 (1996). "폐합형수계 모형에 의한 부정류 해석". 한국수문학회지, Vol. 29, No.5, pp.129-138.
3. 한국수자원공사 (1997). 낙동강수계 댐방류량 조절을 위한 하도추적모형 연구, RRI-WR-97-3.
4. Abbott, M.B, and Basco, D.R. (1989). Computational fluid dynamics : An introduction for engineers. Longman Scientific & Technical.
5. Fread, D.L. (1987). "National weather service operational dynamic wave model Version 07/18/84." National Weather Service, NOAA, Silver Spring, Maryland.