

# 1차원 부정류 모형을 활용한 낙동강 하류의 홍수 특성

이상진 · 신현호 · 김주철\* · 황만하

한국 수자원공사 K-Water 연구원

(2009년 9월 16일 접수; 2009년 11월 12일 수정; 2009년 11월 25일 채택)

## Flood Characteristics at Nakdong Estuary with 1 Dimensional Unsteady Model

Lee Sang-jin, Shin Hyunho, Kim Joo-cheol\*, Hwang Man Ha

Korea Institute of Water and Environment, Korea Water Resources Corporation, Daejeon 305-730, Korea

(Manuscript received 16 September, 2009; revised 12 November, 2009; accepted 25 November, 2009)

### Abstract

Rainfalls would increase the discharges or stages of tributary channels in natural watersheds, which in turn augment the magnitude of main stream stages. Rising of water surface elevation in main streams can affect and damage the human activities because of the possibilities of the breakdown or overflow of the embankment. Therefore it is necessary to establish the structural or non-structural alternatives for the sake of prevention or treatment of those disasters. Many mathematical models to analyze the flood flows in natural watercourses have been proposed as the non-structural alternatives so far. In this study one of the such models, FLDWAV developed by NWS(National weather Service), is applied to the downstream reach of Nakdong river. Model calibration is performed on various Manning's roughness coefficients at the gauging stations. The simulation results are compared well with hydrological estimations of flood discharges considering the effects of multipurpose dams upstream of control points.

**Key Words :** Manning's coefficient, FLDWAV, Flood discharge, Multipurpose dam

### 1. 서론

최근 이상기후에 따른 국지성 집중호우와 빈번한 태풍의 발생으로 인하여 지류의 유량이 급증하고 본류의 수위를 증가시킴으로써 낙동강 중·하류 지역에 피해가 급증하고 있다. 이러한 자연재해는 인간의 정상적인 활동에 심각한 피해와 막대한 재산손실을 가져오기 때문에 이러한 피해를 최소화하기 위한 노력이 여러 기관에서 지속적으로 수행되고 있다. 또한 하

천유역내의 인구증가와 산업시설의 고도화에 따른 도시의 발전으로 피해의 종류는 대형화·다양화의 양상을 띄고 있는 실정이다. 특히 2002년 루사 태풍과 2003년 매미 태풍은 강우관측소 지점별로 기록적인 강우가 기록되었으며 단기간에 많은 유수가 집중적으로 하도로 유입되어 대규모 홍수의 발생으로 많은 제방과 저수지가 붕괴되어 수많은 가옥과 농경지가 침수하였다(이 등, 2006). 이와 같은 홍수피해를 경감하기 위해서는 홍수조절용 댐의 건설, 하천제방의 정비, 천변저류지의 건설 등의 구조적 대책뿐만 아니라 홍수방어시설의 설계기준 강화, 수계내 댐군 홍수 조절 연계운영, 응급재해시스템 구축 등의 비구조적 대책도 절실히 요구되는 상황이다. 비구조적 대책의 일

\*Corresponding Author : Kim Joo-cheol, Korea Institute of Water and Environment, Korea Water Resources Corporation, Daejeon 305-730, Korea  
Phone: +82-42-870-7402  
E-mail: kjoocheol@kwater.or.kr

환으로 단시간에 많은 호우가 내려 하천에 홍수량이 유입되어 수위가 급증하는 것을 분석하고 미래를 예측하여 하도 내의 수문학적 현상뿐 만이 아니라 수리학적인 현상까지 모의할 수 있는 수학적 모형이 지속적으로 개발되고 있는 실정이며, 많은 연구가 이루어지고 있다. 김 등(1995); 김 등(1996)은 1차원 Saint-Venant 방정식을 활용하여 한강 하류부 하도를 구성한 다음 홍수류의 특성을 분석하고 운동량 방정식의 각 항의 크기에 따라 변화하는 수리적 결과를 해석하였으며, 이(2001)는 낙동강의 화원-고령교-현풍 수위 관측소 구간에 대하여 수리학적 하도추적을 통하여 조도계수를 추정하였다. 하도추적에 의해 계산된 유량 자료로부터 수위-유량관계식을 작성하였으며 이는 기존의 수위-유량관계식보다 나은 결과를 보였다. 그리고 수위측정 오차가 유량계산에 미치는 영향에 대하여 분석하였으며, 측방유입류를 억제할 수 있도록 하도길이를 제한하는 방법도 제시하였다. 또한 이 등<sup>1)</sup>은 낙동강유역 댐 하류 전 구간에 대해서 미 기상청에서 개발한 FLDWAV 모형을 구성하고 낙동강 상류 댐의 영향과 하류의 조위를 동시에 고려하여 하도추적을 수행하고 실측값과의 검증을 수행하였으며, 낙동강 하구둑 수문운영을 보다 과학적이고 체계적으로 만들기 위해 수문개도 결정에 활용되는 하구둑 하류 조위값과 하단 홍수통제소 수위관측소의 조위값을 예측하는 프로그램을 만들었다. 본 연구에서는 FLDWAV 모형을 활용하여 적포포 수위관측소 이하 낙동강 하류부에 모형을 구성하고 주요 지점별 실측 수위를 통해 모형을 검증한 뒤 댐방류량을 고려한 하구둑의 수문학적 추정 유입량을 산정하여 비교·분석을 수행하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1. 1차원 부정류 모형

#### 2.1.1. 모형의 개요

본 연구에서 낙동강 하구부의 수리특성을 연구하기 위해 선정된 모형은 1차원 홍수파추적 모형인 FLDWAV 모형이다. FLDWAV 모형은 이전의 부정류 계산모형인 DWOPER 모형과 댐 파괴 모의 모형인 DAMBRK 모형을 결합하고 몇 가지 새로운 기능을 추가하여 미국 기상청(NWS)에 의하여 개발된 다양한

기능을 갖춘 수지형 하천수계에 대한 종합적인 1차원 부정류 계산모형이다(Fred, 1987; Fred, 1998). 모형의 지배방정식은 사용자가 지정한 시간에 따라 변하는 댐 파괴 조건 하에서 댐, 교량/둑과 같은 구조물을 통과하는 급변류를 묘사하는 내부 경계조건이 결합된 부정류에 대한 일차원 Saint-venant 방정식이다. 또한 상류단과 하류단에 적절한 외부 경계조건을 사용한다. 지배방정식의 해는 비선형의 가중 4점 음해유한차분법을 사용하여 구한다. 상류, 사류 또는 시간적, 공간적으로 두 가지 흐름 상태가 결합된 혼합류에 대한 계산이 모두 가능하다. 뉴턴유체 또는 비 뉴턴유체 흐름을 모두 다룰 수 있으며, 추적대상 홍수 수문곡선은 시 계열 입력자료로서 사용자가 직접 지정할 수도 있고 사용자가 지정한 댐 파괴 매개변수들로부터 모형에 의하여 생성될 수도 있다. 흐름을 조절할 능력이 있고 홍수에 의하여 파괴될 수 있는 하류 댐의 존재, 교량/제방에 의한 단면 수축, 지류 유입, 하천 사형, 하류 하천 또는 지류를 따라 위치한 제방 및 조석의 영향 등이 홍수가 하류로 전파됨에 따라 모두 적절히 고려된다(한국수자원공사, 2004). 또한 FLDWAV 모형은 사용자가 지정한 상류 수문곡선을 사용하여 토석류나 강우/용설에 의한 홍수를 추적하는데 사용될 수 있다. 지배방정식은 질량 보존의 식과 운동량 보존의 식을 사용하고 다음과 같다.

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

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

$$\text{여기서, } S_f = \frac{n^2 |Q| Q}{A^2 R^3} = \frac{|Q| Q}{K_c^2}, S_e = \frac{K_c \theta (\frac{Q}{A})^2}{2g(\partial x)},$$

$$W_f = C_w |V_r| V_r \quad (3)$$

여기서 Q는 유량, A는 흐름 단면적, A<sub>0</sub>는 저류단면적, q는 측방유입량, x는 거리, t는 시간, h는 수위이며 S<sub>f</sub>는 마찰경사, S<sub>e</sub>는 단면의 확대·축소에 의한 손실 경사이다. B는 하폭이며 n은 조도계수 W<sub>f</sub>는 바람에 의한 응력, 그리고 L은 지류에 의한 유체의 운동량

변화이다. Saint-Venant 식인 비선형 쌍곡선형 편미분 방정식을 비선형 대수방정식의 형태로 변환하기 위해 가중 4점 음해 유한 차분 근사해법이 사용되는데, Grid함수 f에 대한 시간 및 공간에 대한 편미분은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial f}{\partial t} = \frac{f_i^{j+1} + f_{i+1}^{j+1} - f_i^j - f_{i+1}^j}{2\Delta t^j} \quad (4)$$

$$\frac{\partial f}{\partial x} = \theta \frac{f_{i+1}^{j+1} - f_i^{j+1}}{\Delta x_i} + (1-\theta) \frac{f_{i+1}^j - f_i^j}{\Delta x_i} \quad (5)$$

$$f_{i+\frac{1}{2}}^{j+\theta} = \frac{\theta}{2} (f_i^{j+1} + f_{i+1}^{j+1}) + \frac{(1-\theta)}{2} (f_i^j + f_{i+1}^j) \quad (6)$$

여기서, 가중인자  $\theta$ 가 0.5일 경우는 BOX 기법, 1.0일 경우는 완전음해기법이 된다. 무조건적인 선형수치안정성과 좋은 정도를 제공받기 위해서는  $\theta$ 가 0.5에 가깝게 접근하는 것이 추천된 바 있다. 이 경우 정확도는  $\theta$ 가 0.5에서 1.0으로 가까워질수록 감소된다. 이러한 영향은 시간간격의 크기를 증대시킴에 따라 더욱 명백해진다. FLDWAV에서는  $\theta$ 가 입력 자료로 사용되게 되어있는데 일반적으로 0.55~0.60의 값이 0.5를 사용하였을 때 종종 나타나는 불안적인 난점을 해결하고 정도의 손실을 최소화 할 수 있어 자주 사용된다.

### 2.1.2. 모형의 적용

모의구간은 낙동강 적포교 수위관측소부터 낙동강 하구 10 km이며 홍수사상을 적용하기 위해 과거 실제로 일어난 태풍 호우사상 중 '06 에위니아 태풍을 적용하였다. 지점별 수위와 유량계산을 위해 상류 경계 조건은 적포교의 실측유량 그리고 하류의 경계는 명

지지점 실측수위를 사용하여 모형을 구성하였다. 매개변수를 활용한 모형의 검증을 위해 낙동강 하류의 주요 수위관측소인 진동과 삼랑진에서 구간별 가변 조도계수를 활용하였다. 아래의 Fig. 1에 상류와 하류의 경계조건을 도시하였다.

상류부터 하류까지 지류의 유입은 한국수자원공사 물관리센터에서 개발된 댐군 홍수조절 연계운영 모형(COSFIM)으로 산정하였다. COSFIM 모형은 수문학적 저류함수 모형으로 수계 댐군 연계운동을 통한 상류댐 방류량을 배분하고 하도 추적에 저류함수, Muskingum 및 Muskingum-cunge 방법이 활용된다. 소유역 강우손실 계산에 F1-Rsa 및 SCS Curve number이 도입되며 수계내 수력발전댐에 운영 효과를 고려할 수 있다. Fig. 2는 COSFIM모형의 GUI를 나타내고 있다.

실제 과거 홍수사상을 모의하기 위해서는 각 지류별로 수위관측소의 실측수위를 바탕으로 수위-유량곡선을 작성하여 산정해야하지만 지류유역 수위관측소의 부재와 자료의 부족으로 모형을 통해 산정하였다.

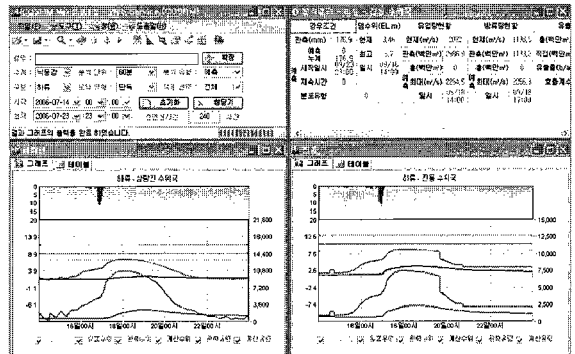


Fig. 2. COSFIM model's graphic user interface.

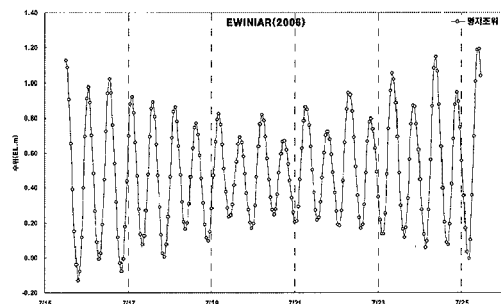
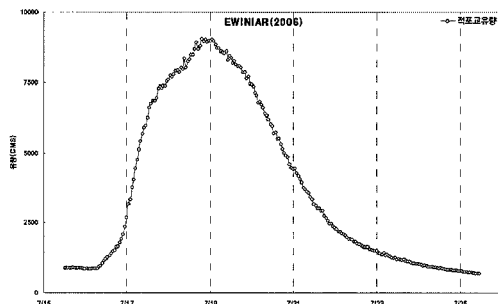


Fig. 1. Boundary condition.

상·하류 지류유입 조건은 다음과 같다(Fig. 3).

본 모형의 지배방정식인 1차원 St. Venant방정식의  $S_f$  항 즉 운동량 방정식의 마찰항은 하천의 급경사나 완경사에 정도는 있겠지만 지배방정식의 인자 중 가장 큰 영향을 미치는 항이다. Henderson(1966)의 연구 결과로 급경사의 총적층 하도에서 급격하게 상승하는 홍수파의 경우 운동량 방정식 항의 크기를 밝힌 적이 있었으며, 하상경사가 매우 완만한 경우 압력항의 크기는 하상경사항의 크기와 비슷하게 되고 Froude수는 매우 작게 된다고 밝히고 있다. 따라서 1차원 부정류 모형을 적용하여 하도 추적을 하는 경우에 계산결과에 영향을 미치는 중요한 변수중의 하나는 운동량방정식에 있는 마찰경사항의 조도계수이다. 조도계수의 원래 의미는 하상의 조도(roughness)를 나타내는 척도

로서, 하상재료 및 하상 표면의 특성에 의해 결정되지만 실제 흐름계산에서는 하천구조물, 사행도, 단면 형태, 단면 변화양상 등 하도의 상황뿐만 아니라 유량이나 수위에 의해서도 변화하기 때문에 이론적으로 조도계수를 정확하게 계산하는 것은 거의 불가능하다. 이에 따라 흐름 계산 시 조도계수를 산정하기 위해서는 많은 경험과 실험을 통해 제시된 하상 특성별 조도계수를 이용하는 것이 일반적이다. 본 연구에서는 1차원 부정류 해석을 통해 구간별, 유량별 조도계수를 산정하였으며 산정된 조도계수의 변화에 따른 수위의 변화양상을 검토하였다. 하지만 유량의 증가에 따른 하상형태의 변화와 그에 따른 마찰변화는 본 연구에서 제외하였다. Fig. 4에 진동과 삼랑진에서 수위의 검증을 나타내고 있다.

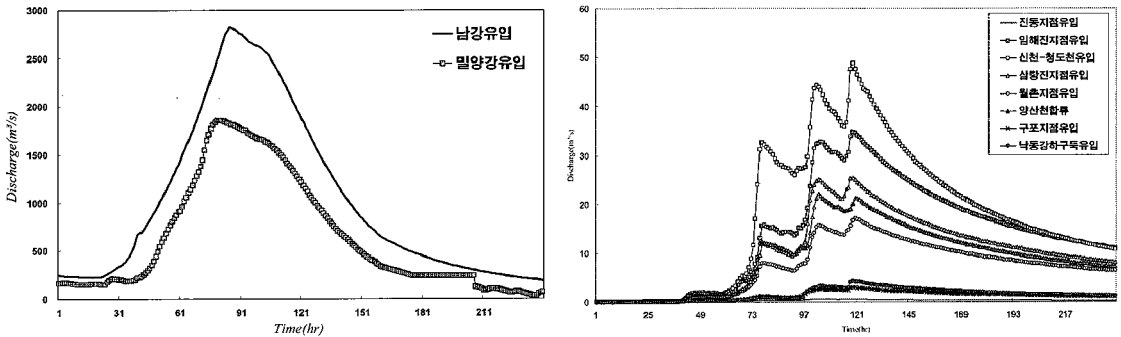


Fig. 3. Upstream and downstream tributary boundary condition.

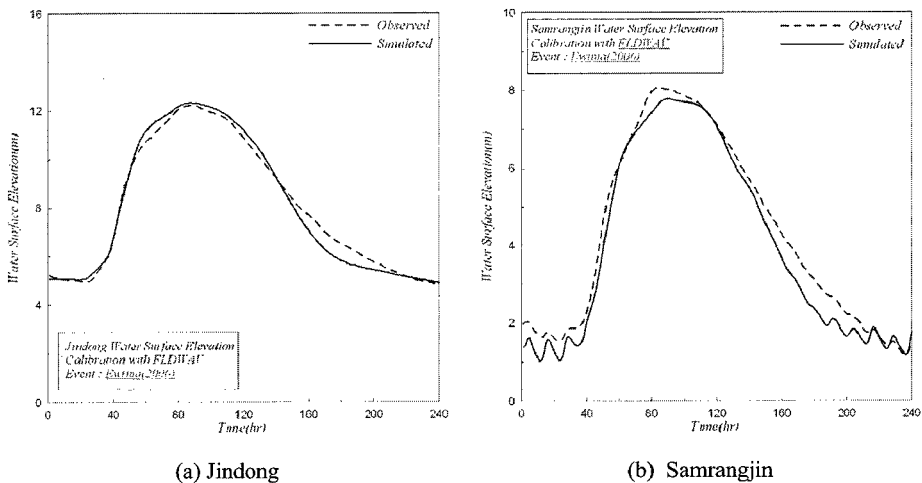


Fig. 4. Water surface elevation calibration with FLDWAV.

위의 그래프를 보면 진동과 삼랑진의 경우 대체적으로 모형의 값은 실측치를 잘 반영하고 있다. 삼랑진의 경우 수문곡선의 도입부와 감쇠부에서 조위의 영향을 받고 있으며, 수위가 미소하지만 진동의 양상을 띠고 있다. 하지만 수문곡선의 상승부, 첨두치, 그리고 하강부에는 진동의 양상이 없어 홍수기시에는 조위의 영향을 적게 받거나 받지 않는 것으로 판단된다.

3. 결과 및 고찰

아래의 Table 1은 구간·유량별 실측유량과의 검증을 통해 산정된 낙동강 하류 최적 조도계수이다. 하류

와 비교해서 상류구간은 유량이 상대적으로 작으므로 상류는 따로 유량 구간을 설정해서 조도계수를 산정하였다. 조도계수는 0.026에서 0.011의 값을 띠고 있으며 유량이 크면 클수록 전체 단면에 대한 조도계수는 작아지는 경향을 잘 나타내고 있다.

이와 같이 구성된 모형을 토대로 각 지점별 유량의 전달을 구현하여 홍수파의 전파양상을 산출해낼 수 있으며 산정된 수위를 토대로 홍수기시 추후 지점별 수위양상을 파악할 수 있다. Fig. 5는 시간과 거리에 따른 수면의 거동형태를 3차원적으로 도시했으며 전체적인 수위의 변화양상을 파악할 수 있다. 이와 같은 3차원 그림을 바탕으로 하여 하류부 조위의 영향이 미

Table 1. Various roughness coefficient each reach

Q(m <sup>3</sup> /s)	1~39	40~79	80~99	100~139	140~199	Q(m <sup>3</sup> /s)	200~219
0	0.022	0.022	0.026	0.028	0.025	0	0.025
100	0.019	0.02	0.026	0.028	0.025	100	0.025
200	0.017	0.017	0.025	0.028	0.022	200	0.022
1000	0.017	0.017	0.024	0.028	0.02	1000	0.020
2000	0.017	0.015	0.024	0.027	0.018	2000	0.0195
4000	0.014	0.014	0.024	0.027	0.018	3000	0.0195
6000	0.014	0.014	0.023	0.027	0.013	4000	0.013
9000	0.011	0.011	0.023	0.027	0.013	6000	0.013
12000	0.013	0.013	0.023	0.028	0.013	7000	0.013
15000	0.013	0.013	0.023	0.028	0.013	8000	0.013
20000	0.013	0.013	0.023	0.028	0.013	9000	0.013

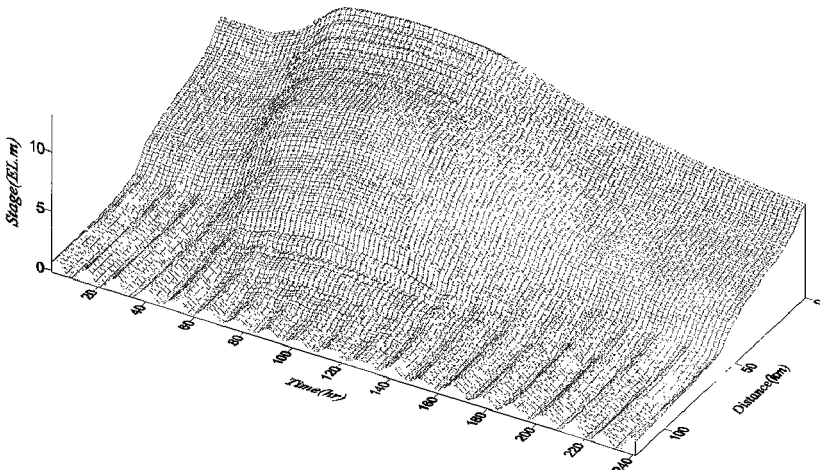


Fig. 5. 3D analysis of water surface elevation.

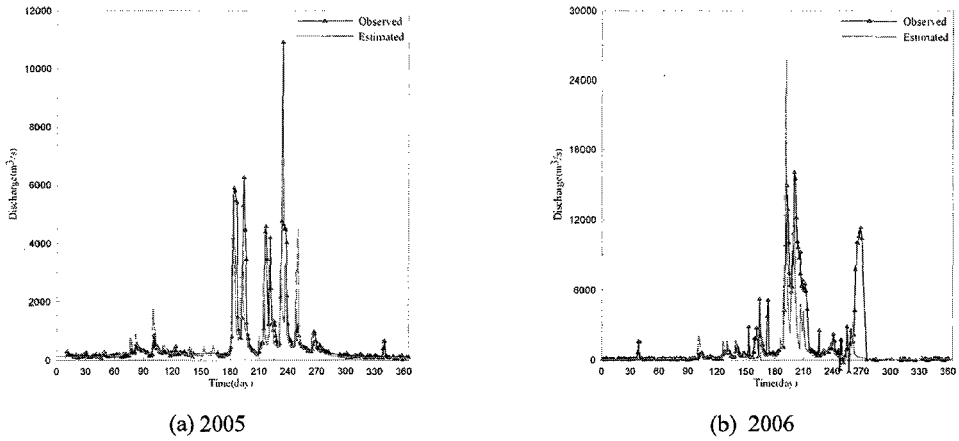


Fig. 6. Estimated discharge at Nakdong estuary barrage.

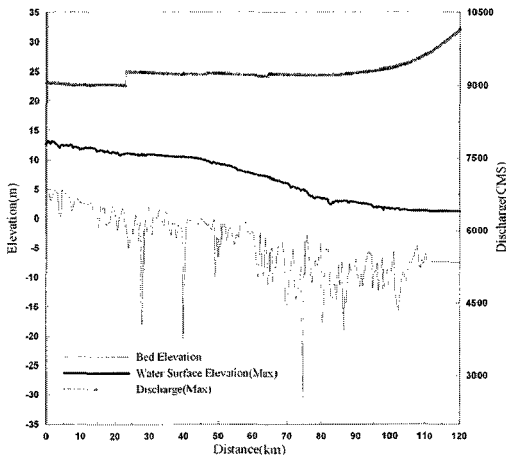


Fig. 7. Maximum water surface elevation & discharge.

치는 구간을 확인할 수 있으며 홍수의 피해가 빈번하게 발생하는 중·하류부의 구간에 대해 하천의 합리적인 운영을 위한 기초 자료로 활용될 수 있다.

본 연구에서는 낙동강 유역에 있는 다목적 댐(안동, 임하, 하천, 남강, 운문, 밀양댐)의 유입량과 방류량 자료를 활용하고 비유량법을 적용하여 진동지점에서 댐 방류량에 의한 유량과 실측유량을 검증한 뒤 최종 유출구인 낙동강 하구둑의 방류량을 산정했다. 아래의 Fig. 6은 위의 방법을 활용하여 비유량법으로 수문학적으로 추정된 유량과 하구둑 실제 방류량을 비교·분석한 그림이다.

각 구간별로 오차가 발생하지만 대체적으로 일치하는 경향을 보여주고 있다. 아래의 Fig. 7은 FLDWAV

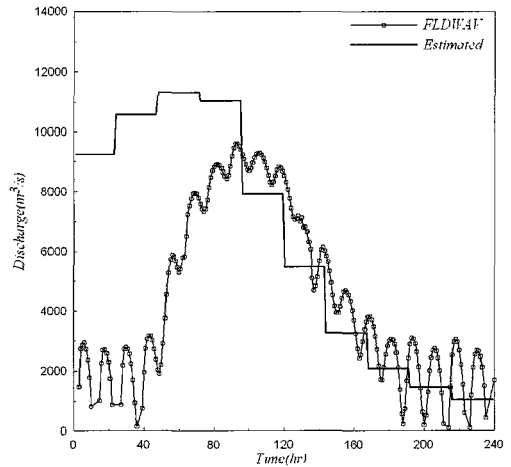


Fig. 8. Comparison between estimated & model discharge.

모형을 수행하여 지점별 유량 및 수위를 나타낸 그림이다. 적포교 수위관측소로부터 하류로 지류의 유입으로 유량의 증가를 확인하고 수위로 홍수파의 전파양상을 판단할 수 있다. 이와 같은 결과를 토대로 Fig. 8은 2006년 에위니아 태풍 시 수문학적 유입량을 산정하여 FLDWAV 모형의 결과와 비교·검토하였다. 수문곡선의 도입부와 상승부에서는 도달시간 등의 문제로 인해 일치하지 않지만 첨두부터 수문곡선의 하강부는 일치하는 경향을 나타내고 있다.

4. 결 론

낙동강 하류부에 1차원 수리모형을 구축하여 주요

호우 사상에 대한 홍수 특성을 분석한 결과는 다음과 같다.

첫째, FLDWAV 모형을 활용하여 에위니아 태풍 호우사상시 낙동강 하류에 대해 1차원 부정류 해석을 실시했으며, 이를 토대로 진동과 삼랑진의 수위관측소의 자료를 활용하여 검증을 수행하였다.

둘째, 검증결과를 토대로 구간과 유량규모별로 구분한 최적 조도계수를 산정하였다. 조도계수는 0.026에서 0.011의 값을 띠고 있으며 유량이 크면 클수록 전체 단면에 대한 조도계수는 작아지는 경향을 잘 나타내고 있었다. 또한 이와 같이 구성된 모형을 토대로 각 지점별 유량의 전달을 구현하고 시간과 거리에 따른 수면의 거동형태를 3차원적으로 도시했으며 전체적인 수위의 변화양상을 파악할 수 있었다.

셋째, FLDWAV 모형의 입력자료를 생성하기 위해 각 구간의 지류유입량을 저류함수 모형 COSFIM모형으로 산정하고 각각의 측방유입량으로 입력함으로써 유량산정에 있어 보다 더 정확한 유출량을 산정하고자 했다.

마지막으로, 2006년 에위니아 태풍 도래시 발생한 호우사상을 대상으로 하류부에 영향을 끼치는 여러 다목적 댐을 고려하고 비유량법을 도입하여 산정한 수문학적 추정 유출량과 1차원 모형으로 산정된 유량을 비교·분석한 결과 모의 유량은 추정된 유량과 비교적 근사함을 알 수 있었다. 이로부터 적포교 수위관측소로부터 하류로 지류의 유입으로 유량의 증가를 확인하고 수위로 홍수파의 전파양상을 판단할 수 있었다.

## 감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적확보기술개발사업단의 연구비지원(과제번호: 1-6-3)에 의해 수행되었습니다.

## 참고 문헌

- 김원, 김양수, 우효섭, 1995, 부정류 모형을 이용한 한강 하류부 하도의 조도계수 산정, 한국수자원학회지, 28(6), 133-146.
- 김원, 우효섭, 김양수, 1996, 1차원 St. Venant 방정식을 이용한 한강 하류부 하도의 홍수류 특성 분석, 한국수자원학회지, 29(1), 163-179.
- 이상호, 2001, 수위관측과 수리학적 하도추적에 의한 수위-유량 관계식 작성, 한국수자원학회지, 34(5), 551-560.
- 이을래, 신철균, 김상호, 2006, 낙동강 유역 수리학적 하도추적 모형 구축 및 적용 (I) 이론 및 도달시간 산정, (II) 홍수사상의 적용, 한국습지학회지, 8(1), 73-96.
- 한국수자원공사 물관리 센터, 2004, 하구둑 조위를 고려한 낙동강 하류부 수리학적 하도추적 모형의 연구, 연구보고서.
- Fread, D. L., 1987, National Weather Service Operational Dynamic Wave Model, National Weather Service, Silver Springs, MD.
- Fread, D. L., Lewis, J. M., 1998, NWS FLDWAV MODEL, Theoretical Description and User Documentation, Hydrologic Research Laboratory Office of Hydrology, National Weather Service(NWS), NOAA.
- Henderson, F. M., 1966, Open Channel Flow, MacMillan Co., Newyork.