

낙동강 유역 수리학적 하도추적 모형 구축 및 적용 (I) 이론 및 도달시간 산정

The Establishment and Application of Hydraulic Channel Routing Model on the Nakdong River (I) Theory and Evaluation of Travel Time

이 을 래*⁺ / 신 철 균** / 김 상 호***

Lee, Eul Rae*⁺ / Shin, Chul Kyun** / Kim, Sang Ho***

:: Abstract ::

In this study, the hydraulic channel routing model is applied to analyze water surface elevation pattern on the Nakdong river in flood cases. The procedure to apply FLDWAV model is presented to solve the Saint-Venant Equations by using four points implicit finite differential scheme. And the flood travel time is studied for reasonable dam management. As this results, variable assumption and constraint are followed to evaluate flood travelling time by hydraulic model. A guideline of reasonable dam's decision making considering downstream effect is showed by this constructed model, and scientific hydraulic analysis is possible by it.

Keywords: Saint-Venant Eq., FLDWAV, flood travel time, dam's decision making

:: 요 지 ::

본 연구에서는 홍수시 낙동강 유역에서 발생하는 수위거동양상을 분석하기 위해서 수리학적 하도추적모형을 적용하였다. 이를 위해 Saint-Venant 식의 가중 4점 음해법 유한차분해를 구하는 FLDWAV모형을 적용하는 방법을 제시하였다. 또한 합리적인 댐관리를 위해서 상류 댐방류량에 따른 하류부의 홍수도달시간에 대해서도 검토하였다. 모의 결과 수리학적 모형에 의한 방류량의 도달시간을 산정하기 위해서는 여러 가지 가정과 제한조건에 따른 방류시간산정이 수반되어야 할 것으로 판단되

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

* 한국수자원공사 물관리센터 선임연구원

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

** 한국수자원공사 물관리센터 선임위원

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

*** 삼지대학교 이공과대학 건설시스템공학과 조교수

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

었다. 본 연구에서 구축된 모형을 적용함으로써 하류하천의 영향을 고려한 합리적인 댐방류 의사결정의 지침을 제공하며, 홍수시 하천에서의 과학적인 수리학적 분석이 가능할 것으로 판단된다.

핵심용어: Saint-Venant Eq., 수리학적 모형(FLDWAV), 홍수도달시간, 댐의사결정

1. 서론

자연재해는 인간의 정상적인 활동에 심각한 피해를 초래하기 때문에 이러한 피해를 최소화하기 위한 노력이 지속적으로 수행되고 있다. 그럼에도 불구하고 최근 들어 기상이변으로 집중호우가 발생하여 막대한 홍수피해를 야기하고 있으며, 또한 하천유역 내의 인구증가와 산업시설의 집중으로 인한 토지이용의 고도화에 따라 피해의 종류가 다양화되고 피해규모도 대형화되어 가는 실정이다. 2002년 태풍 루사와 2003년 매미는 전국적으로 엄청난 피해를 유발하였다. 특히 루사 때는 강릉지역에서 현재까지 관측된 일강우량을 갱신하는 많은 양의 강우가 내렸다. 매미의 경우도 유입유량 양상은 단기간에 집중적으로 하도로 유입하였으며 특히 남강유역 및 밀양강의 유입량 규모는 예년 홍수규모에 비해서 상당히 큰 유입량이 발생하였다. 이와 같은 대규모 홍수의 발생으로 많은 제방과 저수지가 붕괴되어 수많은 가옥과 농경지가 침수하였으며 낙동강 수위가 상승하면서 중하류지역에 엄청난 피해를 남겼다. 이에 따라 유역전반의 홍수피해를 경감하기 위한 홍수조절용 댐의 건설, 하천제방의 정비 등 구조적인 대책뿐만 아니라 강우 및 유출의 분석에서부터 관측자료의 체계적인 분석 및 관리, 홍수방어시설의 설계기준 강화, 응급재해시스템 구축 등의 비구조적 대책들을 포함하는 종합적인 대책이 절실히 요구되는 실정이다.

이를 위해서 정교한 하천홍수해석이 수행되고 다양한 수리현상을 모의할 수 있는 수학적 모형의 개발 및 그 수행이 필수적이다. 현재까지 많은 수리학적 모형이 필요한 목적에 맞도록 개발되어 왔으며 더욱 정확한 실제상황의 해석을 위해 많은 연구가 이루어지고 있다.

그러나 수리학적 모형의 구축을 위해서는 많은 노력이 필요하고 운영을 위해서는 높은 기술적 수준이 요구되는 단점이 있다. 또한 하상의 변화가 많은 지점에서는 하상의 변화를 자주 고려해야 한다는 단점이 있다.

하천에서의 부정류에 관한 연구는 Saint-Venant에 의한 1차원 방정식의 도입과 컴퓨터의 발달에 의해서 본격적인 연구가 이루어 졌다. 하천의 홍수추적에 관한 수리학적 연구로는 Amein과 Fang(1970)의 유한차분법에 기초를 둔 자연하천에서의 양해법과 음해법에 의한 연구가 있었다. 또한 Liggett와 Cunge(1975)는 Saint-Venant식을 선형화시키기 위한 기법을 개발하였으며 Fread(1987, 1988)은 동역학적 홍수추적을 위해서 DWOPER와 DAMBRK를 개발하였으며, Fread와 Lewis(1998)는 DWOPER와 DAMBRK 모형의 기능을 결합시킨 FLDWAV 모형을 개발하여 하도에서의 종합적인 홍수추적을 가능하게 하였다. 국내에서는 이정규 등(2004)이 FLDWAV 모형을 이용하여 팔당담에서 전류구간에서의 한강하류부의 하천구간별 최적조도계수산정을 수행하였으며 김원 등(1996)이 1차원 유한차분모형인 Network를 이용하여 Saint Venant 방정식에서 각 항의 크기를 과거의 홍수사상에 대해서 비교 분석하였다. 또한 윤태훈 등(2000)이 한강하류의 신곡수중보까지의 구간에 대해서 수위 및 유량자료를 Hec-2와 Network, SMS등을 이용하여 한강하류구간에 대한 조도계수의 산정결과와 외점성계수의 산정식 등이 제시되었으며 실측수위와 비교를 수행하였다. 전경수(1998)의 폐합형 모형을 이용한 준 2차원 홍수범람모형에 관한 연구가 있었으며, 한건연(1987)의 하천에서의 홍수와 해석을 위한 수치모형의 개발, 김상호 등(2002)은 한강하류

부에서 발생하는 조위에 의한 홍수과해석을 위해서 DWOPER 모형을 이용하였다.

본 연구에서는 1차원 부정류 해석모형인 FLDWAV모형의 수치해석 방법과 적용절차에 대해서 기술하였으며, 현재 합리적 댐방류 의사결정을 위해 중요한 인자가 되고 있는 침투유량의 전과양상을 분석하였다. 이와 같은 결과들을 이용하면 과학적인 댐관리의 지침이 될 수 있을 것으로 판단된다.

2. 수리학적 하도추적 모형 선정

자연하천에서는 역류현상이 발생하기도 하고, 댐이나 교량, 제방 등과 같은 내부 구조물의 영향을 많이 받게 되므로 저류함수모형을 이용한 홍수추적보다는 동역학적 홍수추적이 가능한 모형이 많이 사용되고 있다. 특히 하류부의 조위에 대한 영향에 따른 하도부의 수리학적 특성을 분석하기 위해서 동역학적 홍수추적이 필수적이다.

최근까지 이러한 모형의 대표로 미국 기상청의 DWOPER 모형이 사용되었다. 하지만 앞으로는 DWOPER의 하도망의 조건뿐만 아니라 DAMBRK 모형에서의 모의 가능한 댐붕괴모의와 제방의 붕괴, 상사류 조건에서의 수렴성 등을 개선한 FLDWAV 모형이 그 자리를 대신할 것으로 판단된다.

2.1 기본 방정식

미국 기상청(NWS)의 동역학적 홍수추적 모형인 FLDWAV는 두 개의 널리 쓰이는 모형 DWOPER(Fread, 1987)와 DAMBRK(Fread, 1988)의 통합모형이다. FLDWAV는 이들 모형에 포함되어 있지 못한 중요한 기능을 가지고 있기도 하다. FLDWAV는 단일수로나 수지형 수로에서의 1차원 부정류 해석을 위한 동역학적 홍수추적모형의 일반형태를 가지고 있으며 Saint-Venant 식의 가중 4점 음해법 유한차분해법을 이용하여 해석해를 구하도록 되어 있다.

Saint-Venant식을 구성하고 있는 연속방정식

과 운동량방정식은 각각 다음과 같다.

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

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

$$\text{여기서, } S_f = \frac{n^2 |Q| Q}{A^2 R^{\frac{4}{3}}} = \frac{|Q| Q}{K_c^2},$$

$$S_e = \frac{K_e \partial\left(\frac{Q}{A}\right)^2}{2g \partial x}, \quad W_f = C_w |V_r| V_r$$

Q = 유량, A = 흐름단면적, A_o = 저류단면적, q = 측방유입량, x = 거리

t = 시간, h = 수위, S_f = 마찰경사, S_e = 단면 확대축소에 의한 손실경사

B = 하폭, n = 조도계수, W_f = 바람에 의한 응력, L = 지류에 의한 운동량의 변화

K_c =통수능, g = 중력가속도, C_w =바람계수, V_r = 풍속이 고려된 유체의 흐름 유속

Saint-Venant 식인 비선형 쌍곡선형 편미분 방정식을 비선형 대수방정식의 형태로 변환하기 위해 가중 4점 음해 유한차분 근사해법이 사용되는데, Gird 함수 f 에 대한 시간 및 공간에 대한 편미분은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial f}{\partial t} = \frac{f_i^{j+1} + f_{i+1}^{j+1} - f_i^j - f_{i+1}^j}{2 \Delta t^j} \quad (3)$$

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

$$f_{i+\frac{1}{2}}^{j+\theta} = \frac{\theta}{2}(f_i^{j+1} + f_{i+1}^{j+1}) + \frac{(1-\theta)}{2}(f_i^j + f_{i+1}^j) \quad (5)$$

여기서, 가중인자 θ 가 0.5일 경우는 Box 기법, 1.0일 경우는 완전음해기법이 된다. 무조건적인 선형수치안정성과 좋은 정도를 제공받기 위해서는 θ 가 0.5에 가깝게 접근하는 것이 추천된다. 이 경우 정확도는 θ 가 0.5에서 1.0으로 가까워질수록 감소된다. 이러한 영향은 시간간격의 크기를 증대시킴에 따라 더욱 명백해진다.

FLDWAV에서는 θ 가 입력자료로 사용되게 되어있는데 일반적으로 0.55~0.60의 값이 0.5를 사용하였을 때 종종 나타나는 불안정의 난점을 해결하고 정도의 손실을 최소화 할 수 있어 자주 사용된다.

2.2 계산알고리즘

식 (3)~(5)를 기본방정식인 식 (1)~(2)에 입력하면 비선형대수방정식을 도출할 수가 있다. 이렇게 구성되는 비선형 대수방정식은 정확해 산정의 어려움으로 인해 수치적 반복계산기법을 도입하게 되는데, 이때 도입되는 기법이 Newton-Raphson방법이다. 식 (1), (2)을 이산화과정을 거쳐서 정리하게 되면 각각 C_i, M_i 의 함수로 표시하면 식 (6)~(7)로 나타낼 수 있다.

$$C_i(Q_i^{j+1}, h_i^{j+1}, Q_{i+1}^{j+1}, h_{i+1}^{j+1}) = 0 \quad (6)$$

$$M_i(Q_i^{j+1}, h_i^{j+1}, Q_{i+1}^{j+1}, h_{i+1}^{j+1}) = 0 \quad (7)$$

$Q_i^{j+1}, h_i^{j+1}, Q_{i+1}^{j+1}, h_{i+1}^{j+1}$ 은 구하고자 하는 값이고, $\hat{Q}_i^{j+1}, \hat{h}_i^{j+1}, \hat{Q}_{i+1}^{j+1}, \hat{h}_{i+1}^{j+1}$ 은 원하는 해석치에 근접한 값이라 하면 다음관계가 성립한다.

$$Q_i^{j+1} = \hat{Q}_i^{j+1} + dQ_i$$

$$h_i^{j+1} = \hat{h}_i^{j+1} + dh_i$$

$$Q_{i+1}^{j+1} = \hat{Q}_{i+1}^{j+1} + dQ_{i+1}$$

$$h_{i+1}^{j+1} = \hat{h}_{i+1}^{j+1} + dh_{i+1}$$

Newton-Raphson 방법은 2차항 및 고차항의 모든 항들을 무시하는 비선형함수의 Taylor 급수 전개이론에서 유도된다. 그 결과로 나타난 계산알고리즘은 식 (8)과 같다.

$$J(x^k)\Delta x = -f(x^k) \quad (8)$$

여기서, x 는 $(Q_1, h_1, \dots, Q_N, h_N)$ 으로 표시되는 미지의 벡터량이며, k 는 계산 반복횟수, $J(x^k)$ 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. 대상구간선정 및 분석방법

3.1 대상구간의 선정

본 연구에서는 낙동강 유역에서 다양한 홍수해석을 수행함으로써 댐방류 및 하구의 흐름특성이 본류에 미치는 영향을 분석하는 것이 목적이다. 이를 위해서 댐방류량이 낙동강 본류를 따라서 도달시간이 어떻게 변화하는지를 검토하였으며, 낙동강수계에서 상습적으로 침수피해 및 제방의 파제가 발생하는 하류부를 중점적으로 검토하여 수위변화를 분석하였다. 그림 1은 낙동강 본류의 최심하상고를 나타낸 것으로서, 낙동강 전체구간은 반변천합류점에서 하구둑까지 340Km의 구간이다. 낙동강본류구간의 하천측량은 1991~1993년에 수행된 자료가 있으며 현재 낙동강본류에 대한 하천정비기본계획이 수립 중에 있다. 현재 수행되는 측량자료는 구하는데 어려움이 있으므로, 모형수행을 위한 단면자료는 기왕에 측량된 자료를 적용하였다. 모형 구축절차는 동일하기 때문에 최근 단면자료가 취득되면 같은 절차에 의해서 단면자료를 대치하면 모형수행은 가

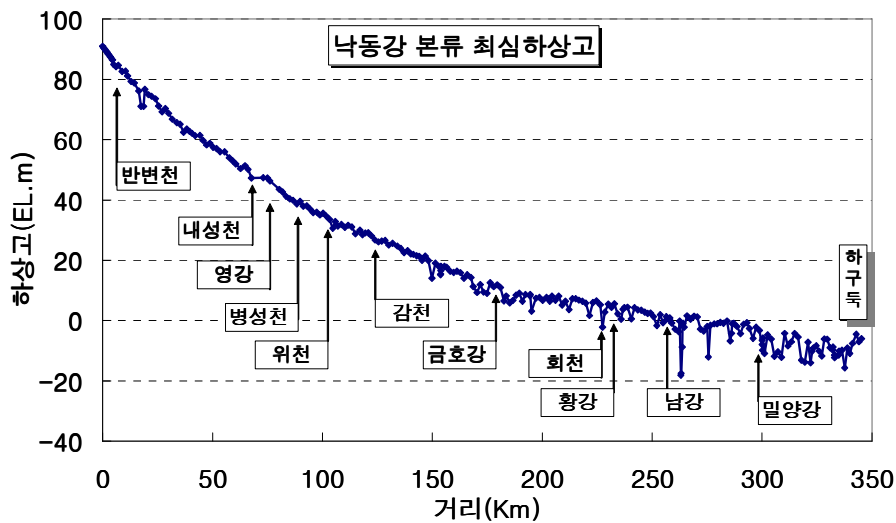


그림 1. 낙동강 본류 최심하상고

능하게 된다.

NWS에서 구축된 FLDWAV모형을 수행하기 위해서는 기존의 HEC-2형식의 하천측량자료를 표고대 하폭의 형태로 전환이 필요하다. 본 모형을 수행하기 위해서 가장 많은 시간과 정확도가 요구되는 작업이기도 한데 단면 전환작업의 정확한 절차는 모형의 정확성에 상당한 영향을 미치게 된다.

구축된 단면은 하류단인 하구둑의 측량번호 #0.0에서 반변천 합류점인 측량번호 #697번의 단면을 도달시간 산정을 위해 모두 NWS 단면으로 변환하였다. 결국 FLDWAV를 수행하기 위한 단면은 781개의 단면이 변환되어서 적용되었다. 현재는 낙동강 본류로 유입되는 지류는 생략하였는데 추후 필요에 의해서 지류유입을 고려한 필요가 있는 경우 이 부분은 간단하게 추가하여 수행이 가능하다.

3.2 도달시간의 정의

대규모 댐에서 방류를 수행할 때 하류의 주요 지점까지 홍수가 도달하는데 소요되는 시간 (travel time of flood peak)과 하류수위는 홍수예경보 시스템이라든지, 도시우수배제시스템, 하수오염물질의 소거시설 및 하천수문관측망의 운

영과 관리를 위해서 대단히 중요한 인자이다.

하천에서의 홍수도달시간은 일반적으로 하도의 다양한 수리학적 특성과 홍수량의 크기에 좌우된다. 본 절에서는 다목적댐 구간에서 방류량의 크기에 따른 홍수도달시간을 산정하는 방법과 그 결과의 신뢰성에 대해서 분석하고자 한다. 댐 또는 하도 상류부에서 침투유량을 가진 유량수문곡선을 유지하며 유하하는 경우 하류로 진행하면서 침투값이 낮아지고 유량의 분포가 시간에 대해서 넓게 분포하게 된다.

홍수방류시 상류댐으로부터 하류까지의 홍수도달시간과 하류 임의지점에서의 홍수유변동의 예측을 위해서는 부정류 해석모형을 수행하여 홍수파의 전파양상을 우선적으로 산정하여야 한다. 일반적으로 홍수도달시간(travel time)은 하도의 어떤 구간을 홍수파가 통과하는데 소요되는 시간으로 정의되며 상류단에서의 홍수수문곡선의 침투유량발생 시각에서부터 하류단 통과 홍수수문곡선의 침투유량발생 시각까지의 시간으로 표현할 수 있다.

현재는 각 수계별 홍수예경보계획을 수립함에 있어서 각 수계별로 과거의 수문기록과 홍수통제소의 경험을 바탕으로 각 지점간의 도달시간을 분석한 관계로, 산정된 도달시간의 정확성을 입

증하는 것이 현실적으로 곤란한 실정이다. 또한 침투유량을 상류단에서 유하할 때 수리학적 모형의 수행을 위한 상류경계조건 자료가 상류부의 유량값이 될 수 있는데, 이를 지정할 때 침투유량의 값을 순간방류를 수행하고 다시 방류규모를 줄어나갈지, 침투유량값을 일정시간 방류를 할지, 초기유량을 얼마로 설정하고 점진적인 침투치를 향한 방류를 수행할지 또는 하류단의 경계조건이 어떠한 형태로 지정이 되어있는지 등 여러 가지 수리학적 인자의 조건에 따라서 특정지점의 도달시간은 달라지게 된다. 따라서 이와 같은 다양한 특성을 변화시키면서 발생하는 수리학적 특성을 검토하여 홍수도달시간의 개념을 정립하였다.

4. 수리학적 모형의 적용(도달시간 산정)

4.1 모형의 경계조건

수리학적 모형을 수행하기 위해 가장 중요한 인자가 정확한 단면조건과 경계조건인 입력이다.

이를 위하여 낙동강 하천정비기본계획상의 HEC-2 단면자료를 표고 대 하폭으로 구성되는 FLDWAV 모형으로 변환하였으며, 특정지점에서의 침투유량 및 도달시간을 산정하게 된다.

본 모형의 적용을 위해서 5가지의 조건을 지정하였다. 그림 2는 모형의 적용을 위한 상,하류 경계조건을 나타낸 것이며, 그림 3은 Case별 적용조건을 나타낸 것이다. 상류단 경계조건의 경우에는 침투유량이 순간방류를 수행하고 유량규모가 서서히 줄어드는 경우와, 침투유량이 발생하고 6시간 동안 유지되는 경우, 그리고 침투유량 유지시간이 12시간 지속되는 동안의 경우를 각각 모의하였다. 하류단 경계조건인 경우에는 하구둑의 평상시 유지수위인 EL. 1.0m를 모의 시간동안 유지하는 경우와 하류부의 조위변화양상을 두 가지 가정하여 상류의 수문곡선과 하류의 조위영향이 동시에 주어졌을 때 결과를 분석하였다.

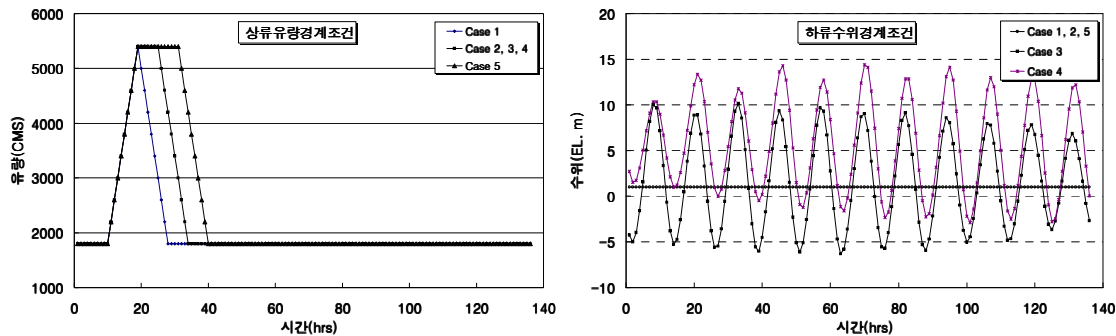


그림 2. 상, 하류 경계조건

| | Case 1 | Case 2 | Case 3 | Case 4 | Case 5 |
|----------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 상류 경계 조건 | | | | | |
| 하류 경계 조건 | | | | | |

그림 3. Case별 적용조건

4.2 낙동강유역 도달시간 산정

그림 4는 본 모형을 통해서 수행한 지점별 침투 홍수량 및 도달시간이다. 낙동강 전체구간에 대해서 상류단에 가상유입 유량곡선을 지정하였을 때 나타나는 홍수량의 전파양상을 나타낸 것이다. 최대유량을 $5,400 \text{ m}^3/\text{s}$ 으로 지정하였으며 초기에 큰 유량을 지정하게 되면 초기계산수행에서 수치적 발산을 발생하기 때문에 유량의 변화를 주었다. 본 수행은 계산시간간격을 1시간으로 하였으며 135시간까지 모의하였다. 낙동강 본류에서의 각 수위표 지점까지를 도달시간 산정위치로 지정하고 각 구간별 최대유량과 도달시간을 산정하였다.

순간방류를 의해 $5,400 \text{ m}^3/\text{s}$ 를 산정한 경우에 비해서 계속방류를 한 경우가 도달시간이 좀 더 길게 산정되는 것을 확인할 수 있었다. 유입유량의 변화에 의해 발생하는 수문곡선의 경우와는 달리, 댐방류의 형태를 수문개방에 따른 지속시간이 없는 순간방류로 지정하는 것은 실질적으로 곤란하리라 판단된다. 그러나 본 적용사상을 이용하여 침투 방류량의 감쇠효과에 따른 전파양상의 비교와 같은 크기의 침투유량을 가지는 수문곡선의 하류전파양상을 판단하는 근거로서 의미가 있게 된다.

Case 1과 Case 2는 하류수위경계조건은 동일하지만 상류유입유량이 순간방류인 경우와 계속방류의 경우를 비교한 것이다. 그림과 표에서 나타난 바와 같이 계속방류를 수행한 경우가 도달시간과 침투홍수량의 변화량이 더욱 커지는 것을 알 수가 있다. 따라서 상류단의 동일한 침투유량이 입력이 된다하더라도 침투치가 어떻게 유지되는가에 따라서 침투파의 도달시간은 달라질 수가 있다.

Case 3과 4는 동일한 유입유량조건에 대해서 각각 다른 조건의 하류 경계조건을 부여한 경우이다. Case 3은 대조위가 9.35m 이고 소조위가 -6.0m 의 경우로서 동절기에 발생하는 천문조위값이며, Case 4는 대조위가 14.39m 이고 소조

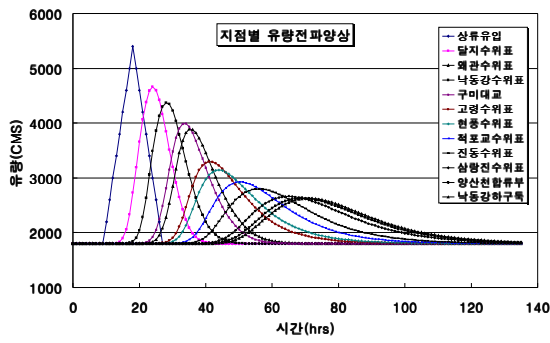
위가 -2.33m 의 경우로서 하절기에 발생하는 낙동강하구의 천문조위값이 되는데 이는 대표적인 값들을 추출하여 산정한 조위경계조건이다.

계산결과 두 경우가 거의 유사한 도달시간 및 침투유량값을 산정하고 있었다. 두가지 경우 모두 하구둑에서의 조위영향이 상류수위에 영향을 미치며 조위파에 의해서 상류로의 유량값도 그 영향을 받는 구간이 발생하게 된다. Case 3의 경우 삼랑진지점, Case 4의 경우는 진동지점까지 하구둑의 조위의 영향을 받게되며 조위의 영향을 받는 지점에서는 침투홍수량 및 도달시간산정의 의미가 없어지기 때문에 도표에서 생략하였다. Case의 비교에 의해서 하류단의 조위경계조건은 조위의 영향을 받지 않는 구간에서는 큰 차이가 발생하지 않는 것을 확인할 수가 있었다.

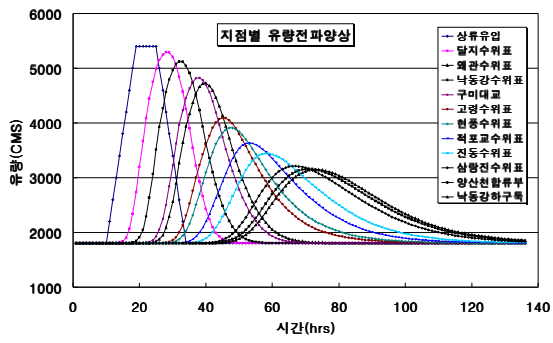
Case 5의 경우는 계속방류의 시간을 다른 Case에 비해서 6시간을 증가시킨 12시간의 계속 방류를 수행한 다음 방류량을 줄이는 경우를 모의한 것이다. 이때 하류단은 하구둑의 평수기 유지수위인 1.0m 를 지정하였다. 계속방류량을 6시간 유지한 Case 2와 비교하였을 때 계속방류시간을 증대할수록 도달시간 및 침투홍수량이 증가하고 있는 것을 알 수가 있다.

표 1은 각 경우별 침투 홍수량 및 도달시간을 정량적으로 나타낸 것이다. 앞에서 제시한 바와 같이, Case 1, 2, 5는 각각 하류단 수위를 평수기 유지수위 E.L. 1.0m 를 유지할 때 상류 댐방류형태를 순간방류, 6시간지속방류, 12시간지속방류의 경우이다. 이와 같은 경우를 적용하였을 경우 침투유량값은 모두 같은 $5,400 \text{ m}^3/\text{s}$ 이지만, 순간방류일때보다 지속시간이 길어지는 계속방류의 경우가 침투홍수량도 증가하고 도달시간도 길어지는 것을 확인할 수 있으며, 이는 기존의 연구논문(윤용남, 1992)과 일치하는 경향을 나타내고 있다.

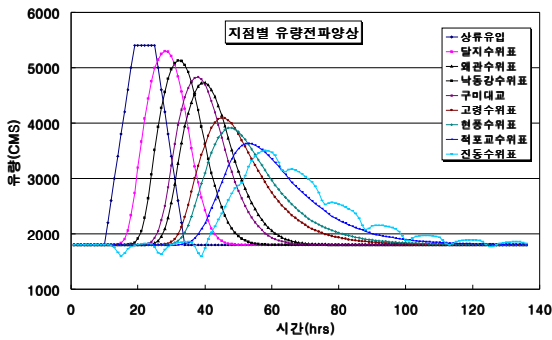
본 Case 별 적용사례들은 사용자가 발생가능한 상하류 경계조건을 지정하여 수치학적으로 어떻게 변화가 나타나는 가를 분석한 것으로서 여기서 나타나는 정량적인 값들은 큰 의미를 가지지



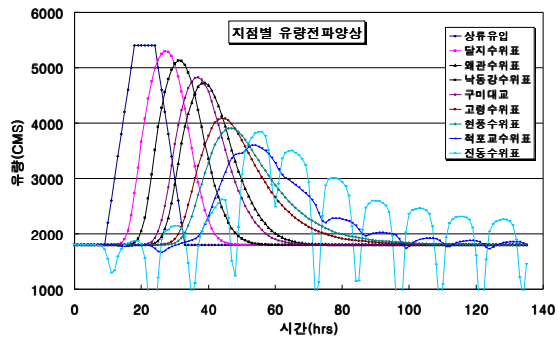
(a) Case 1



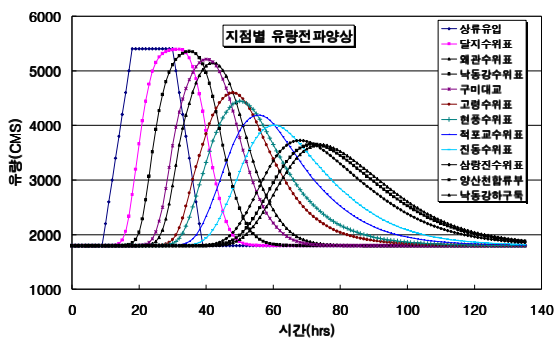
(b) Case 2



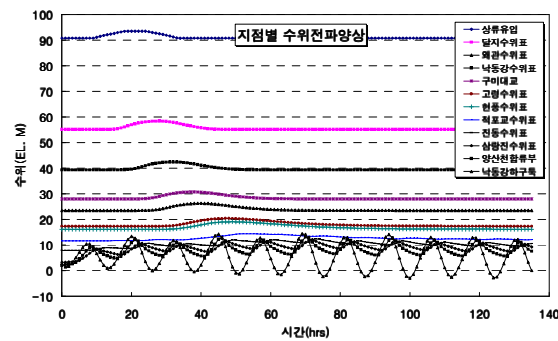
(c) Case 3



(d) Case 4



(e) Case 5



(f) Case 4에 의한 지점별 최대 홍수위

그림 4. 지점별 침투홍수량 및 도달시간

않을 수도 있다. 그러나 댐방류량에 따른 홍수도 도달시간은 댐 수문의 개폐시간에 상당한 영향을 미치게 된다. 본 연구에서는 지정된 방류량에 따른 하류수위전과를 고려할 때 지류 및 소유역에서 유입되는 유량들은 고려하지 않았다. 지역별 강우량을 포함한 다양한 특성들이 지류유입량을 고려하므로 정확한 유량을 산정하는 것은 곤란

하다. 가장 정확한 댐방류의사결정은 예측된 방류량 및 지류유입량 등을 고려하여 모형을 수행하는 것이 합리적이나, 사전에 개략적인 방류의사결정을 예측하고, 신속한 대응과 함께 정확한 모형을 수행하는 것도 중요한 의미가 될 것이라 판단한다.

표 1. Case 별 첨두홍수량 및 도달시간

| 지 점 | Case - 1 | | Case - 2 | | Case - 5 | |
|-----|-------------|------------|-------------|------------|-------------|------------|
| | 첨두홍수량 (CMS) | 도달시간 (hrs) | 첨두홍수량 (CMS) | 도달시간 (hrs) | 첨두홍수량 (CMS) | 도달시간 (hrs) |
| 상류단 | 5,400 | 18(0) | 5,400 | 18(0) | 5,400 | 18(0) |
| 달 지 | 4,666 | 24(6) | 5,290 | 27(9) | 5,390 | 32(14) |
| 왜 관 | 3,886 | 35(17) | 4,725 | 39(21) | 5,148 | 42(24) |
| 현 풍 | 3,144 | 44(26) | 3,910 | 47(29) | 4,443 | 50(32) |
| 진 동 | 2,800 | 56(38) | 3,440 | 57(39) | 4,002 | 60(42) |
| 삼랑진 | 2,660 | 65(47) | 3,212 | 66(48) | 3,725 | 68(50) |
| 하 구 | 2,626 | 71(53) | 3,149 | 72(54) | 3,645 | 74(56) |

주 : 도달시간의 범례표시 : 첨두홍수량이 발생하는 시간(상류단 첨두홍수량의 시간을 0이라 가정)
Case 3, 4 는 하류 조위의 영향에 의해 하류홍수도달시간을 비교하지 않음.

이와 같은 여러 가지 경우들을 고려할 때 발생하는 정성적인 양상은 향후 방류량과 도달시간과의 상관관계를 확립하는 데 참고자료가 될 수가 있을 것이다. 또한 계산결과에서 확인할 수 있듯이 같은 5,400 m³/s의 방류량을 가정한다고 하더라도 순간방류, 계속방류, 그리고 계속방류의 지속시간별로 값들이 모두 차이가 나고, 하류단의 경계조건에 따라서도 큰 차이는 아니지만 무시할 수 없는 차이를 발생하고 있다. 따라서 도달시간을 산정한다는 의미는 단순한 첨두유량값만 의미가 있는 것이 아니고, 여러 가지 수리학적 제한조건들이 정확하게 입력이 되어질 때 그 값이 의미가 있게 된다. 즉 수리학적 모형에 의한 방류량의 도달시간을 산정하기 위해서는 여러 가지 가정과 제약조건에 따른 방류시간 산정이 수반되어야 할 것으로 판단된다. 추후 도달시간에 따른 정확한 개념의 확립이 필요하며 경험에 의한 값보다는 실질적인 계산에 의한 도달시간 산정과 이에 따른 검증작업도 필요할 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구는 낙동강유역의 과학적이고 정확한 하천흐름 거동을 해석하기 위한 수리학적 모형을

적용하였다. 이를 위해서 미국 기상청(NWS, National Weather Service)에서 개발된 수리학적 홍수추적모형인 FLDWAV모형을 이용하여 낙동강 유역의 수리학적 모형을 적용하기 위한 지침을 마련하였다. 기존의 수문학적 모형과는 달리 수리학적 홍수추적모형은 하천의 흐름방정식을 정교한 수치계산에 의해 해석해를 산정한다. 또한 하천의 지형자료가 모두 입력자료로 사용되기 때문에 실제하천의 상황을 그대로 반영하는 물리적인 방법이다. 본 연구에서는 적용된 모형의 수치이론에 대해서 설명하였으며, 홍수도달시간의 합리적인 적용방안을 제시하였다. 낙동강 유역에 대해 본 모형은 적용함으로써 현재 운영 중인 댐 운영을 위한 도달시간을 산정하였다. 검토결과 동일한 유량규모라 할지라도 유입수문곡선형태와 당시의 하류단 경계수위에 따라서 상이한 값이 나타났다. 순간방류인 삼각형형태의 유량규모보다 계속방류인 사다리꼴 형태의 유량규모일 때 각 지점별로 도달하는 첨두유량은 커지고, 도달시간은 좀 더 길게 나타난다. 또한 같은 형태의 사다리꼴 형태인 계속방류의 형태라 하더라도 방류시간을 좀 더 길게 할수록 도달시간은 길게 나타나는 경향을 나타내고 있었다. 따라서, 같은 유량규모라 할지라도 어떤 방류형태인지에 따라서 도달시간은 달라질 수 있으므로 수리학적

모형에 의한 방류량의 도달시간을 산정하기 위해서는 단순한 첨두유량값만 의미가 있는 것이 아니고, 여러 가지 수리학적 제한조건들이 정확하게 입력이 되어 질 때 그 값이 의미가 있게 된다. 본 연구에 적용된 4점 음해 유한 차분 근사해법을 사용하는 FLDWAV 모형은 낙동강 유역에 발생하는 여러 가지 수리학적 인자들을 좀 더 자세히 분석하는 것이 가능하며 향후 대상구간의 확장 또는 타수계의 적용에서도 본 모형을 이용하여 수행할 수 있는 일관성을 유지할것으로 판단된다.

참고문헌

- 건설부 (1991). **낙동강하천정비기본계획(보완) (하구둑-밀양강합류부)**
- 건설부 (1992). **낙동강하천정비기본계획(보완 II) (밀양강합류부-남강합류부, 남강)**
- 건설부 (1993). **낙동강하천정비기본계획(보완 III) (남강합류부-반변천합류부)**
- 김상호, 김원 (2002). “한강 하류부 흐름해석을 위한 수리학적 모형의 구축.” **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제35권, 제5호, pp. 485-500.
- 김원, 우효섭, 김양수 (1996). “1차원 St. Venant방정식을 이용한 한강 하류부 하도의 홍수류 특성 분석.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제29권, 제1호, pp. 163-179.
- 윤용남, 박무종 (1992). “수리학적 홍수추적에 의한 댐방류시 하류수위 및 주요 하도구간별 홍수도달시간의 예측.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제25권, 제3호, pp. 115-124.
- 윤태훈, 이종욱, 제갈선동 (2000). “동수역학모형의 매개변수 산정.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제33권, 제1호, pp. 39-50.
- 이정규, 이창현 (2004). “수리학적 홍수추적모형을 이용한 한강하류부의 조도계수 산정.” **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제24권, 제1B호, pp. 25-32.
- 전경수 (1998). “준2차원 홍수범람모형에 관한 연구.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제31권, 제5호, pp. 515-528.
- 한건연 (1987). “하천에서의 홍수파해석을 위한 수치모형의 개발” **한국수문학회지**, 제20권, 제4호, pp. 285-294.
- Amein, M., and Fang, C. S. (1970). “Implicit flood routing in natural channels.”, *Journal of the Hydraulic Division*, Vol. 96(HY12), 2481-2500.
- Fread, D.L. (1987). *National Weather Service Operational Dynamic Wave Model*, National Weather Service, Silver Springs, MD.
- Fread, D.L. (1988). *The NWS DAMBRK model : Theoretical background and users documentation*. Hydrologic Research Lab., Office of Hydrology, National Weather Service. NOAA, Silver Springs, MD.
- 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.
- Liggett, J. A., and Cunge, J. A. (1975). “Numerical methods of solution of the unsteady flow equation.”, *In Mahmood, K., and Yevjevich, V.(eds), Unsteady flow in Open Channel, Vol. I*. Fort Collins, Colorado : Water Resources Publications, chapter 4, pp. 89-182.