

하도추적모형의 수치적 불안정성 요인 분석

Analysis of Numerical Unstable Factors in Channel Routing Model

이을래*, 이근상**, 김영성***, 황의호****

Eul Rae Lee, Geun Sang Lee, Young Sung Kim, Eui Ho Hwang

요 지

최근 이상기후 및 국지성 돌발호우 등 여러 가지 형태의 예기치 못한 기상이변으로 인하여 매년 수재해는 빈번히 발생하고 있으며, 이를 위해 하천에서 실시간으로 신속하고 안정성있는 수리학적 하도추적모형의 구축은 지속적으로 연구해야 할 사항이다. 현재 주요 수계 홍수통제소에서는 홍수예보를 위해 주로 수리학적 및 수문학적 모형이 병행되어 적용되고 있으나, 한강과 금강하류를 제외한 나머지 수계에서는 아직까지 개념적 수문학적 모형만을 이용하여 홍수예보를 수행하고 있는 실정이다. 그러나, 신속하고 안정적인 수문학적 모형이 가지고 있는 몇가지 장점에도 불구하고, 실시간 분석 및 신속한 상황대처를 위해서는 정교한 하천흐름해석 기술인 수리학적분석이 반드시 필요하다.

그러나, 대부분의 모형운영자가 직면하게 되는 수리학적 하도추적모형에서 발생하는 수치적 불안정성인 발산의 문제점은 상당한 어려움으로 작용하고 있다. 이는 다양한 원인들이 있을 수 있으나, 대표적으로 단면의 불규칙성을 고려할 수 있다. 실제단면들을 모형에 반영할 때 수치계산의 과정 중에 급확대/급축소/특이단면에 따른 잦은 발산이 발생하게 되며, 이를 방지하기 위해서 단면의 보간 및 평활화 작업 등을 수행하게 된다. 이때 단면의 형상을 최대한 반영한 보간 및 평활화 작업이 되지 않으면, 물리적 개념이 무시된 비합리적인 계산이 수행될 수 있다. 발산의 요인을 제거한 최적의 단면형태를 선정하는 것은 모형의 안정성을 확보하는 데 중요한 요인이 된다. 또한 모형수행에 있어 발산의 요인으로서 하구와 만나게 되는 지점에서의 경계조건으로서 조위영향이 있다. 수리학적 하도추적모형의 중요한 요인인 하구에서의 흐름을 조위와 연계하여 가장 합리적인 하류 경계조건을 제시하는 것이 모형의 발산 방지 및 정확도를 향상시키는데 중요한 인자로 작용하고 있다. 본 연구에서는 이와 같은 수리학적 하도추적모형의 안정성 검증을 위하여, 아직까지 수리학적 하도추적모형이 구축되어 있지 않는, 금강상류구간인 용담댐~대청댐구간을 설정하여 수리학적 모형의 입력자료를 구축하고, 그에 따른 영향검토를 지속적으로 추진할 계획이다. 대상구간에서 향후 검증될 다양한 수리학적 안정화 기술은 향후 타 수계에서 적용시, 신속하고 합리적인 입력자료 구축에 많은 도움을 줄 것이며, 현재 하천에서 발생하는 계산의 불안정성을 빠르게 수정하는 것이 가능하다.

핵심용어 : 댐방류량, CFL, 하도추적모형, 평활화

1. 서 론

최근 이상기후 및 국지성 돌발호우 등에 따라 댐방류 또는 하천유역의 고유한 특성에 따라 발생하는 하류하천의 정확한 홍수예측능력의 향상이 절대적으로 필요한 실정이다. 그러나, 아직까지도 개념적으로 간단하고 계산의 용이함을 이유로 수문학적 모형이 하천유역에 적용되고 있으나,

* 정회원 · 한국수자원공사 K-water연구원 선임연구원 · E-mail : erlee@kwater.or.kr
** 정회원 · 한국수자원공사 K-water연구원 책임연구원 · E-mail : ilovegod@kwater.or.kr
*** 정회원 · 한국수자원공사 K-water연구원 책임연구원 · E-mail : yskim@kwater.or.kr
**** 정회원 · 한국수자원공사 K-water연구원 선임연구원 · E-mail : ehhwang@kwater.or.kr

점차 댐하류 하천을 포함한 중, 소규모하천에서도 수리학적 하도추적모형이 적용되고 있다.

그러나, 수리학적 하도추적모형에서 가장 큰 난제인 계산수행중의 발산의 영향에 따라 수리학적 모형의 구축이 어려운 것은 사실이며, 계산의 수렴성을 유지하기 위해서 다양한 방법에 의해 지형자료 및 입력자료의 보안을 수행하고 있다. 현재 홍수예경보시스템 구축에서 사용되는 하천의 모형은 1차원모형을 사용하게 되는데, 이는 2차원모형에 비해서 계산시간의 단축과 입력자료 구축의 용이함이 가장 큰 이유가 될것이다. 그럼에도 불구하고, 수리학적 하도추적 모형의 구축시 입력자료에 의한 다양한 형태의 모형의 불안정성은 모형수행자에게는 큰 어려움으로 작용하고 있다. 본 연구에서는 수리학적 계산의 발산요인들을 검토해보고, 이를 최대한 극복할 수 있는 방안을 찾고자 하는 데 목적이 있다. 이를 위해서 대청댐~용담댐까지의 대상구간을 설정하여 수리학적 하도추적모형을 구축하고 실질적으로 계산의 불안정성을 유발하는 인자들을 도출하였다. 추후 계속되는 연구의 수행으로 좀 더 효율적인 결과도출을 유도할 예정이다.

2. 수리학적 하도추적모형의 선정

자연하천에서는 역류현상이 발생하기도 하고, 댐이나 교량, 제방 등과 같은 내부구조물의 영향을 많이 받게 되어 실시간으로 정교한 하천에서의 거동을 분석하기 위해서는 완전(fully) 동역학적 홍수추적이 가능한 모형이 사용되어야만 한다. 특히 하류 경계조건을 설정함에 있어서 조위에 의한 하도상류로의 배수영향에 따른 하도부의 부정류 수리학적 특성을 분석하기 위해서는 더욱 그러하다. 이를 위해 국내의 홍수예경보 모형에 가장 많이 적용하고 있으며, 그 적용성이 널리 입증된 FLDWAV모형을 적용하였다. 해석을 위해서 Saint-Venant 식의 가중 4점 음해형 유한차분기법을 이용하여 수공구조물을 포함한 다양한 조건에서의 부정류 흐름해석을 가능하게 한다. 즉, 질량보존의 식과 운동량보존의 식은 각각 식 (1), (2)와 같다.

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

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

3. 수치적 불안정성 유발인자

3.1 단면자료의 비균질성

일반적으로 자연하천에서는 단면의 불균등성 때문에 잦은 발산을 유발하게 된다. 단면의 급확대 및 급축소 뿐만 아니라, 하상고의 급변 또는 특이단면의 존재는 심각한 계산결과의 오류를 유발하게 되거나, 발산을 초래하게 된다. 특히 단면의 급확대 또는 급축소에 따른 흐름의 변화는 상류흐름 또는 사류흐름의 복합적인 발생을 초래하게 되며, 흐름이 변환되는 지점에서 계산의 수행을 방해하는 현상을 초래한다. 이를 위해서는 단면이 급변하는 지점에서는 보간단면을 사용하여 계산구간의 거리를 줄여줌으로서, 흐름의 급변을 막아주고 계산의 안정을 도출할 수 있다.

3.2 경계조건에 의한 불안정성

댐하류 또는 하천흐름의 계산시, 상·하류 경계지점에서의 적절한 유량 또는 수위의 입력이 필요하다. 통상적으로 상류경계조건으로는 유량을, 하류경계조건으로는 수위를 지정해주는 것이

가장 안정적인 입력형태로 나타나 있다. 이때 상하류지점이 수위관측지점이면, 흐름의 변화율이 상당히 완만하여 계산의 안정성을 유발하지만, 댐방류량의 경우 댐운영에 따른 방류형태가 거의 자연하천에서 발생하기 어려운 형태를 도출하게 된다. 또한 하류경계지점이 조석의 영향을 받는 하구지점이라면 물리적 특성을 반영하는 것은 맞지만 계산의 수렴을 위해서는 모형운영자가 여러 상황을 고려해야만한다. 이 경우에도 전 절과 동일하게 유입량 및 하구 조위 등에서 발생하는 급변하는 흐름에서는 홍수수문사상의 시간간격을 줄이는 것이 방법이다.

또한 상, 하류경계조건의 값은 기왕의 자료를 이용할 수도 있고, 수문학적 모형의 도입을 통한 유입, 유출지점의 경계조건을 설정하게되는데, 이때 부적절한 계산에 의해 질량보전이 성립하지 않을 수도 있으므로 이를 주의하여야 한다.

3.3 Wetting/Drying의 영향

Wetting/Drying 처리과정과 홍수터흐름에 대한 적용시 적절한 매개변수의 선정과 경계조건의 지정은 상당히 복잡한 수치해석의 어려움으로 직면되고 있다. 자연수로는 저수시 및 평수시에 물을 소통시켜주는 주수로와 홍수시 수위상승에 따른 범람을 목적으로 구성된 홍수터로 나누어진다. 특히 홍수시 수위상승과 함께 범람되었다가 수위가 하강함에 따라 마른하도로 변화하게 되는 부분이 항상 발생하게 되며, 만약 하도구간내 섬이 존재하는 경우 이러한 현상을 2차원수리학적 모형으로 처리하기 위해서는 이를 위한 새로운 기법이 도입되어야만 한다. 2차원 모의를 위해서는 요소절점을 제거한다든지, 초기조건을 충분한 수위를 유지한 후 점진적으로 지정된 경계조건에 따라 하강하는 방법을 사용하고 있으나, 1차원모의에서는 명확한 계산절차가 아직까지 부족한 실정이다.

3.4 Courant 수의 영향

단면절점간 거리와 계산시간간격은 해의 수렴성을 유발하는 중요한 인자이다. 계산거리간격이 너무 크면 절단오차의 영향에 의해 계산수위와 유량이 합리적인 값이 되지 않을수 있다. 대체적으로 계산거리와 시간간격은 Courant 수에서 제시하는 안정조건을 최대한 만족시키기 위해서 시간 및 거리간격을 조정할 필요가 있다. Courant 수의 정의는 1차원의 경우 $C = u \Delta t / \Delta x$ 이며 이때 Δx 는 공간상의 거리, Δt 는 시간간격, 그리고 u 는 흐름방향의 속도를 나타내고 있으며, 이 식에서 $C < 1$ 일 때 안정성이 확보됨을 의미하며, 가능한 이 조건을 만족하여야 안정성이 확보될 수 있으나, 그에 따른 정확도의 저감도 유발할 수 있으므로 모형운영자는 합리적인 조건들을 고려하여야만 한다.

4. 대상구간의 적용

본 연구를 위해서 수리학적 하도추적모형을 금강상류지역인 용담댐~대청댐 구간을 설정하였다. 수리학적 모형구축의 가장 중요한 자료는 최신의 정확한 단면자료 구축에 있다고 볼 수 있다. 현재 용담댐과 대청댐구간의 단면자료가 동일하게 전 구간에 대해서 실시된 사례는 없다. 따라서 대상구간에 대한 지형자료를 구축하기 위해서는 기 구축된 여러 실적 보고서를 참조하여 단면을 조합하는 방법이 있을 수 있다. 실질적으로 이와 같은 단면의 조합과정에서 접합부에 발생하는 단면의 급작스런 변화에 의해 모형의 발산을 많이 초래하게 된다. 이를 방지하기 위해서 접합부의 일정거리만큼은 보간작업에 의해 단면의 변화를 방지하는 것이 필요하다.

표 1 용담댐 ~ 대청댐 구간 측량단면 현황

대상구간	보고서	시행처
용담댐 ~ 초강합류점 90.015km	금강상류(초강합류점 ~ 용담댐) 하천정비기본계획(보완)(2004.10)	대전지방국토관리청 한국수자원공사
영동천합류점(양강수위표) ~ 금강유원지보 (24.325km)	금강수계 하천정비기본계획 (2002. 12)	건설교통부 대전지방국토관리청
금강2교 ~ 대청댐상류	대청댐 퇴사량조사보고서 (2006. 10)	한국수자원공사 대청댐관리단

표에서 제시된 바와 같이 용담댐과 대청댐구간의 지형자료 구축을 위해서는 3개의 보고서상에 나타나 있는 단면자료를 활용해야 한다. 그러나 각 관측자료마다 중복되는 구간이 발생하고, 단면이 합류되는 부분에 있어서는 직접 눈으로 확인하고 보완하는 수작업이 필요하다. 그림 1~2는 대상구간에서의 구간정보와 단면거리를 나타낸 것이며, 최종적인 조합에 따른 종단별 최심하상고를 나타낸 그림이다. 그림에서 나타난 바와 같이 대상구간의 총 길이는 188km 로서 긴 구간의 흐름을 유지하게 되는데, 특히 실제적으로는 하천에서 저유량의 물이 유하하더라도, 그것을 수치적으로 모의하기에는 무리가 따를 수도 있다. 통상적으로 저유량의 물이 유하할때는 수면과 하상의 접하는 비율이 크게 발생하기 때문에 조도계수는 증가하게 되고 과도한 조도계수의 입력은 또한 계산의 발산을 유발하는 인자가 된다.

특히 FLDWAV모형은 조도계수 - 유량의 관계를 설정하여 계산을 수행하게 되는데, 이때 유량이 적은 초기조건인 경우 부적절한 조도계수의 지정은 계산의 최적값을 도출하기 위한 반복기법 수행시 발산 또는 수렴하지 않는 경우가 발생한다. 특히, 댐하류하천을 수리학적으로 모의할 때 홍수기가 아닌 비홍수기의 경우는 충분한 유량이 확보되지 않았고, 그에 따른 계산의 수렴을 위해서 실제적용에서는 n값과 관련된 불확실성의 한계내에서 추정된 n값의 적절한 변화를 유지함으로써 계산의 수행을 도모할 수 있다.

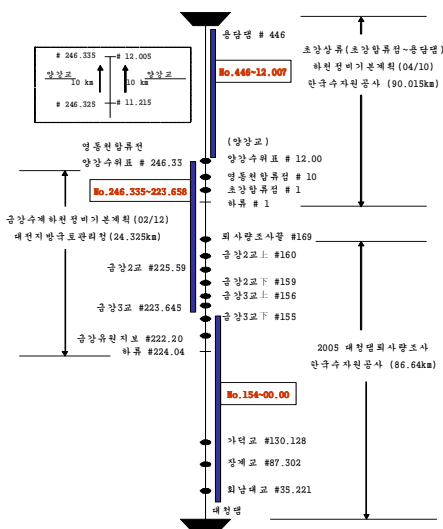


그림 1. 대상구간 단면조합

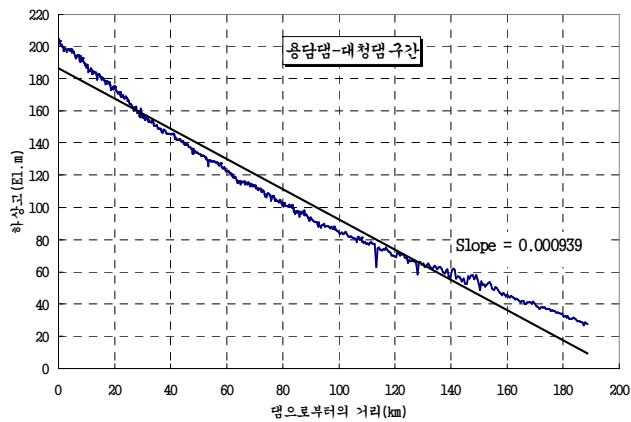


그림 2. 종단별 최심하상고

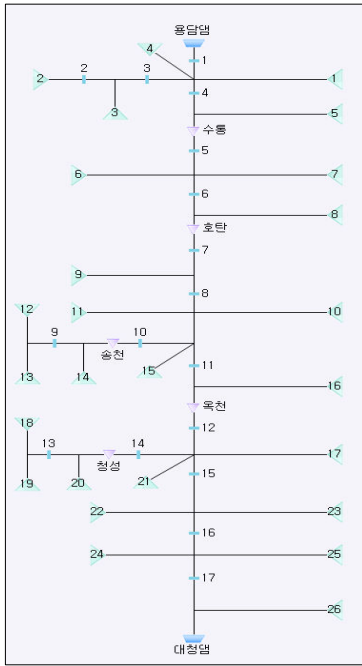


그림 3. 대상구역 모식도

NWS No.	HEC No.	위 치	유입량산정방법	수위표 영점표고
		상류경계	용담댐	C1(in)
69	334	무주남대천 합류부	B04+C03(out)+B(01)	
115	246	수룡수위표 (적벽교)	B05	146.13
163	157	봉황천 합류부	B06+B07	
193	105	호탄수위표	B08	113.96
204	87.70	학산천	B09	
242	246.33	영동천	B10+B11	
250	243.94	초강	B15+C10(OUT)	
294	227.61	옥천수위표	B16	88.288
323	143	보청천유입부	B17+B21+C14(OUT)	
402	64	소옥천유입부	B22+B23	
431	35.606	회인천유입부	B24+B25	
465		대청댐유입	B26	

주 : B (Basin No.), C (Channel No.), in (Channel Inflow), out(Channel outflow)

그림 4 대상구간 유입량 산정방법

5. 결론

현재 용담댐~대청댐에서의 수리학적 하도추적모형은 구축 중에 있다. 용담댐과 대청댐이 금강상류에 위치해 있음으로 인해, 금강유역의 홍수피해는 상당히 줄어들었다고 볼 수 있다. 그러나 이 유역에서 발생할 수 있는 대청댐 저수위의 영향에 따른 상류로의 배수영향, 지류의 유입배제에 따른 지천범람 등 두 댐간의 합리적인 댐운영의 지원과 홍수피해시 적절한 원인규명을 위해서 수리학적 하도추적 모형의 필요성이 대두되었다. 특히 자연하천에서 발생하는 수위 또는 조위패턴이 아니고, 대청댐저수위로 인해 산정되는 하류단 경계조건 들은 인위적 구조물에 의해 인위적 수위조절이 발생하기 때문에 자연하천의 흐름계산과 또 다른 절차를 가져야 할 수도 있다. 즉 인위적 수위조절에 따라, 정상상태에서는 안정적으로 수행할 수 있는 수리학적 분석이 부정류 흐름시 어려운 점을 도출할 수도 있다.

이와 더불어 다양한 형태의 수리학적 불안정성을 유발하는 인자가 본 대상구간의 모형을 구축할 때 고려되어야 할 사항으로 판단되고 있다. 수문학적 모의와는 달리 수리학적 모의에서 발생하는 다양한 발산인자들을 분석하여, 향후 모형수행자 또는 개발자들이 수행함에 있어서 각 경우별 발산요소들의 해결방안을 좀더 체계적으로 활용할 수 있다면, 현재의 홍수추적능력이 한층 더 진보될 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 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.
2. 건설교통부 (2002, 2004). 금강수계 하천정비기본계획
3. 한국수자원공사(2006). 대청댐 퇴사량조사보고서