

1차원 하천흐름 해석 모형의 비교분석

Water for Future



김극수 | 한국건설기술연구원 박사후 계약직 keuksookim@kict.re.kr



김지성 | 한국건설기술연구원 박사후 계약직 jisungk@kict.re.kr



김원 | 한국건설기술연구원 책임연구원 wonkim@kict.re.kr

1. 머리말

최근 발생하는 홍수는 과거에 발생하지 않았던 대규모이며 돌발적으로 발생하는 경우가 많아 피해가 급증할 뿐만 아니라 일반 국민들의 홍수에 대한 심리적 불안감이 증대되고 있다. 따라서 홍수피해에 대한 사회적인 안전과 국민의 신뢰확보를 위해서는 정확한 하천 홍수의 예측이 필요하다. 수리 해석 모형은 평탄한 지형, 조석영향, 배수효과, 댐 붕괴 시나리오, 동역학적 침수지도 등의 조건에서 하

천 수위 예측을 위해 필수적이라 할 수 있다. 하천 흐름 해석을 위해 국내외 다수의 모형이 개발되어 실무에 적용되고 있으나 극한홍수의 경우 계산된 수위의 정확도와 안정성 측면에서 여전히 많은 문제점을 내포하고 있다. 특히, 댐붕괴, 제방붕괴, 하천단면 수축부 등에서 나타나는 급격한 흐름의 변화를 모의할 경우 현재까지 개발된 하천 흐름 해석 모형의 정확도 및 안정성은 매우 부족한 실정이다. 최근 2002년 8월 강원도 강릉시의 농업용저수지인 장현저수지와 동막저수지가 붕괴되어 댐 하류에 위치한 가옥 및 농경지 침수로 인해 재산피해가 발생하였다. 대구도 다목적 댐이 붕괴될 경우 엄청난 인명 및 재산 피해가 예상되므로 댐 붕괴시 발생하는 급격한 유량 및 수위증가와 상류, 사류 및 천이류 등 전 흐름영역을 해석할 수 있는 하천모형의 필요성이 대두되고 있다.



그림 1. 소양강댐 여수로

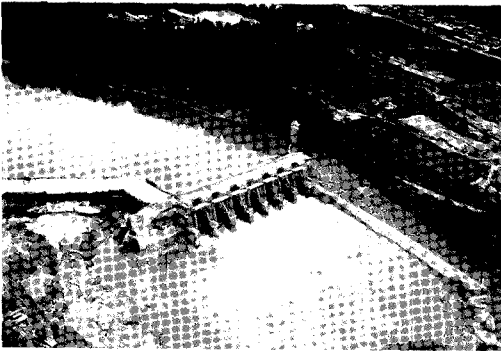
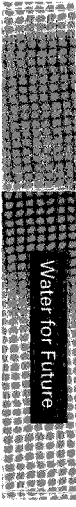


그림 2. 연천댐 붕괴

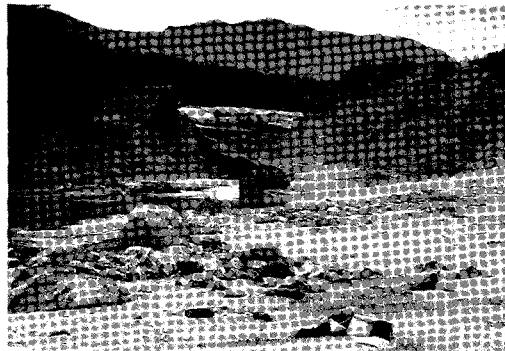


그림 3. 장현댐 붕괴

2. 하천수리해석 기법

하천흐름 해석을 위한 Saint-Venant 방정식의 수치해법은 특성선법, Godunov 기법, 준음해기법, 완전음해기법 등이 있다. 특성선법의 경우 주로 경계조건 처리에 활용되고 있으며 내부영역의 해석에는 비효율적인 면이 있다. Godunov 기법의 경우는 주로 Riemann 해법을 활용하고 있으며 불규칙한 단면형상 및 하상경사 변화의 수치처리를 위해 특별한 기법의 추가가 필수적일 뿐만 아니라 양해법의 사용으로 인해 계산시간간격의 제약이 상대적으로 크게 나타나는 기법이다. 반면 2차이상의 고정확도 해석으로의 확장이 가능하며 최근에도 국내외적으로 많은 연구들이 지속되고 있다. 준음해법의 경우는 임의적인 단면형상에서도 수치적으로 안정하며 매우 효율적인 기법이나 수공구조물이나 하상급변 등에 의한 불연속 흐름 발생시 정확도가 감소하는 문제점을 가지고 있다. 완전음해기법의 경우 실무적인 하천흐름해석을 위해 주로 이용되고 있으며 범용하천 수리해석에서 주로 채택하고 있는 기법이다. 그러나 불연속 흐름의 모의에 약점을 가지고 있어 적용성의 제약이 따른다.

최근 하천흐름 해석을 위한 수치기법에 관한 연구들은 주로 불연속 흐름해석에 관한 내용들이 주를 이루고 있다. 이를 위해 고정확도 기법에 의한 수치모형 개발을 위한 연구가 선진국을 중심으로

지속되고 있으나 고정확도 기법의 자연하천으로의 적용에 대한 연구는 초기 단계이다. 현재 하천 수치해석의 큰 흐름은 공기동역학 분야에서 개발된 고정확도 해석기법을 불규칙한 종횡방향 형상과 매우 넓은 계산영역을 포함하는 자연하천에 적용하기 위하여 보존특성을 만족할 수 있는 생성항 수치처리에 관련된 연구가 주로 수행되고 있다.

불연속 흐름 해석을 위한 고정확도 해석은 차분기법에 따라 유한요소법, 유한체적법, 유한차분법으로 나눌 수 있으며, 유한요소법을 이용한 연구로는 Characteristic-Dissipative-Galerkin(CDG) 기법에 의한 천이류 해석, Petrov-Galerkin 기법에 의한 충격파 해석에 관한 연구가 수행되었으나 수백 km에 달하는 하천 전체연장에서 흐름해석을 위한 1차원 해석에는 적용이 어려우며, 1차원 하천 흐름 해석을 위해서는 주로 유한체적법과 유한차분법이 이용되고 있다. 유한체적법을 이용한 연구는 1990년대 후반부터 지금까지 지속되어 오고 있으며, 특히 흐름율(flux) 계산을 위하여 Riemann 해법이 주로 사용되고 있다. Riemann 해법에 의한 흐름율 계산은 천이류와 불연속 흐름에 매우 안정적이고 정확한 해를 제공하지만 생성항과의 보존특성을 만족시키지 위해서는 생성항에 특별한 수치처리가 요구된다. 이를 위해 수면경사를 변수로 이용하는 기법(Surface Gradient Method, SGM)이 개발되어 이후 불연속적인 계단 형태의 하상경사에 적

용이 가능하도록 SGM이 확장되었으며, 다양한 하상경사를 갖는 실험자료와 비교하여 천이류를 안정적으로 해석한 바 있다. 그러나 이러한 연구는 2차원 흐름해석에 국한되어 있어 실무적용성이 다소 부족한 면이 있다. 생성항을 포함한 1차원 고정확도 흐름 해석을 위해서 하상 경사항에 상류이송기법을 적용하여 차분하고, 측면 정수압은 중앙차분기법으로 처리하여 흐름을 계산의 보정없이 보존 특성이 유지될 수 있음이 확인되었으며, 유한차분법을 이용한 고정확도 해석은 주로 물리적 전파속도를 정확하게 반영할 수 있는 상류이송(upwind) 기법을 사용하며, 2차 정확도 이상의 해석을 위하여 ENO 및 TVD 기법이 적용된 바 있다. 국외에서 개발된 범용 하천모형의 경우 홍수흐름 해석에 안정적이고 효율적인 해를 제공하고 있으나 댐 붕괴 등 극한홍수시 발생하는 국지적인 불연속 흐름과 붕괴과의 정확한 전파해석에 한계가 있으며 최근까지 고정확도 해석을 위한 다양한 수치기법 연구가 수행되었으나 대부분 특정 조건에 국한된 해석으로 연구 수준에 머물러 있으므로 극한홍수가 발생한 자연하천에서의 실무 적용에는 다소 부적합한 실정이다.

국내의 경우 하천흐름 해석을 위한 수리모형에 관한 연구는 주로 대학, 연구소 등에서 시도된 바 있으나, 이러한 연구들은 거의 초기단계에 머물러 있으며, 현재 상용화되어 이용되고 있는 모형은 전무하다. 국내 실무에서 이용되고 있는 1차원 하천흐름 해석 모형은 대표적으로 HEC-RAS 모형과 FLDWAV/DWOPER/ DAMBRK 모형을 들 수 있다. HEC-RAS 모형의 경우 하천정비 기본계획 수립시 정상류 해석을 위해 주로 이용되고 있으며, FLDWAV/DWOPER 모형의 경우는 홍수예보 시스템에서 수리학적 홍수예측을 위해 한강, 낙동강, 금강, 안성천, 임진강, 삼교천에 대해 적용된바 있고, DAMBRK 모형의 경우는 국내 댐/저수지 비상대처계획 수립에 다수 이용된바 있다. 국내 하천홍수 흐름해석에서는 주로 미국에서 개발된 HEC-RAS 모형, FLDWAV 모형이 이용되고 있으며, 홍

수범람지도 작성에 관한 연구를 위해 MIKE-FLOOD 모형(MIKE11 모형과 MIKE21 모형의 연계)이 일부 도입된 바 있다. 그러나 국내 하천의 경우 교량, 보, 댐 등의 매우 많은 하천내 구조물, 매우 불규칙한 하상경사 및 하천단면 등과 같은 복잡한 하천특성을 보이고 있어 극한 홍수해석시 실무적 이용에 있어 다소 어려움이 있다. 최근들어 댐붕괴, 제방붕괴 등에 대한 관심이 늘어나면서 불연속적인 하천흐름 해석을 위해 고정확도 기법의 개발 및 적용에 대한 연구가 증대되고 있으나 주로 기존 기법의 비교 분석 수준에 머물러 있으며, 특히 TVD, ENO 등의 고정확도 기법에 대한 연구가 수행된 바는 있으나 새로운 개발보다는 비교분석과 가상하도에 대한 적용수준으로 실제하천에 대한 적용은 어려운 실정이다.

최근 미기상청 수문개발부 수리분과에서는 수리평가팀(Hydraulic Evaluation Team)을 구성하여 NWS 홍수예보 지원이 가능한 수리모형 평가 프로젝트를 수행한 바 있다(NWS, 2007). 현재 NWSRFS(National Weather Service River Forecast System)에서는 FLDWAV 모형과 DWOPER 모형을 수리학적 홍수예측 모듈로 사용하고 있다. 미기상청에서는 현재 운영중인 수리학적 홍수예측 모듈의 모형 불안정, 발산문제 해결기법 미비, 부적합한 지침서/설명서, 다수의 결함, AWIPS 버전과 PC 버전의 불일치, 교육과정의 미비 또는 비효율성을 이유로 수리모형 평가 프로젝트를 수행하였다. 프로젝트 수행결과 FLDWAV 모형을 HEC-RAS 모형으로의 대체를 추진 중이며, NWSRFS로 HEC-RAS 모형을 추가하기 위한 연구를 수행중에 있다.

3. 1차원 하천수리해석 모형 비교

범용 1차원 하천 수리해석 모형들은 주로 미국, 유럽 등에서 개발되어 개선·유지되고 있다. 지금

표 1. 범용 1차원 하천 흐름해석 모형 일반

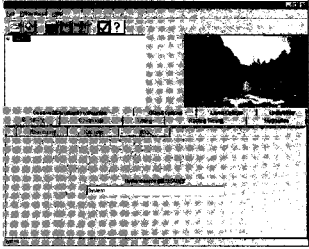
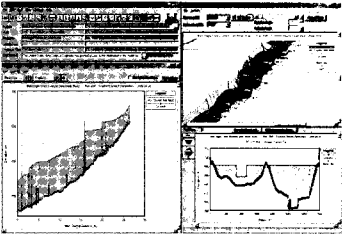
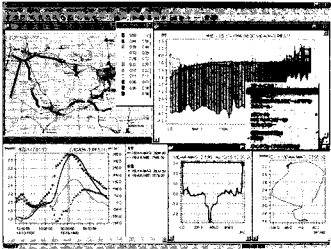
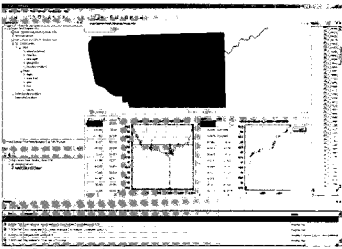
구분	FLDWAV 모형	HEC-RAS 모형	MIKE 11 모형	SOBEK 모형
지배 방정식	Saint-Venant 방정식에 기초			
차분기법	Preissmann 기법	Preissmann 기법	Abbott-Ionescu 기법	Delft 기법
모형일반	<ul style="list-style-type: none"> • 미국 NWS HL에서 개발한 동역학적 하도추적 모형 • DWOPER 모형과 댐통과 홍수해석 모형인 DAMBRK 모형을 결합/개선한 모형 • 미국 홍수예보 시스템인 NWSRFS의 동역학적 홍수추적 모듈 • 세계 각국에서 하천수리해석을 위해 다수 적용된 바 있음. • 현재 NWS에서는 모형의 추가적인 지원이 이루어지지 않고 있으나 아래의 웹 사이트에서 모형실행파일을 제공받을 수 있음. 	<ul style="list-style-type: none"> • USACE HEC에서 개발 • 초기에는 정상류 해석모형으로 개발되었으나 버전 3.0부터 부정류 해석 모형인 UNET 모형을 부정류 해석 모듈 추가 • Newton-Raphson 반복법의 적용을 통한 유한 차분 Saint-Venant 방정식의 해 도출시 발생할 수 있는 발산의 문제를 감소시키기 위해 차분시 선행화 과정이 포함되어 있음. • 전 세계적으로 많이 이용되고 있는 1차원 하천흐름 해석 모형 	<ul style="list-style-type: none"> • DHI에서 개발 • DHI 개발 소프트웨어와 동적연계를 통해 다양한 분야 대한 적용 가능 • 국외의 경우 많은 적용 사례를 가지고 있으나 국내의 경우 MIKE FLOOD를 이용한 제내지 범람에 관한 일부 연구들이 수행된 바 있음 	<ul style="list-style-type: none"> • WLDelft Hydraulic에서 개발 • SOBEK 모듈과의 연계를 통해 다양한 분야에 대한 적용가능 • 이탈리아, 수리남, 네덜란드, 트리니다드, 크로아티아 등의 하천실무에서 적용된바 있으며 현재까지 국내에서 적용사례는 없음
웹사이트	www.weather.gov/oh/hri www.rivermechanics.net	www.hec.usace.army.mil	www.dhigroup.com	delftsoftware.wldelft.nl

까지 개발된 1차원 하천 부정류 수리해석 모형들은 미국 연방비상관리국에서 인정하고 있는 모형들인 HEC-RAS(UNET)(미국 육군공병단), FEQ(미국 지질조사국), ICPR(Streamline Technologies, Inc.), SWMM(미국 환경부), FLDWAV(미국 기상청), MIKE11(덴마크 수리연구소) 모형이 있으며, 이외에 네덜란드 WLDelft Hydraulics에서 개발하여 지속적으로 연구중인 SOBEK 모형이 있다. 실무적으로 주로 사용되는 하천모형인 HEC-RAS(UNET) 모형과 FLDWAV 모형은 계산 효율성과 실무 적용성을 이유로 지배방정식의 차분과정에 Preissmann 기법이 사용되고 있으나 Preissmann 유한 차분 기법은 불연속적인 흐름에 대한 수치감쇠영향이 크기 때문에 불연속흐름을 정확히 모의할 수 없으며 상류와 사류가 교차하는 천이영역에 대한 흐름해석은 불가능하다. 이러한 한계의 극복을 위해 불연속 흐름이 발생하는 영역에 대해 LPI(Local Partial Inertia) 기법, 양해법과 음해

법 혼합기법 등의 기술이 적용되고 있으나 계산안정성과 정확도 면에서 여전히 문제점을 가지고 있다. 범용 하천 수리해석 모형들 중 비교적 지속적으로 유지관리가 이루어지고 있는 모형들인 FLDWAV, HEC-RAS, MIKE11, SOBEK 모형에 대한 일반사항 및 제한사항들은 표 1, 2에 제시하였다.

표 1, 2에서 살펴본 바와 같이 1차원 수리해석 모형에는 기능적 측면 뿐만 아니라 용이한 사용자 조작과 같은 조건이 요구됨을 확인할 수 있다. 특히, 기능적 측면에서는 지류/합류/분기류 모의, 교량/암거/수문/위어/횡방향구조물/제방·제방붕괴/댐·댐붕괴 등의 하천모의, 조석 영향, 홍수터 모의 등이 가능해야하며 지역적인 특성에 따른 추가적 기능(유빙 모의) 등이 가능하여야 한다. 모형 사용자의 측면에서는 지침서/GUI/교육/지원 등의 사용성, 계산기법/안정성/수렴성/모형수행시간/문제해결/단면자료구축과 같은 모형 수행, 단위/단면편집/단면내삽/조도계수/측방유출입/경계조건과 같은

표 2. 범용 1차원 하천 흐름해석 모형 기능 및 제한사항

모형	모형 기능 및 제한사항
 <p>FLDWAV 모형</p>	<p>모형기능</p> <ul style="list-style-type: none"> · 다양한 상하류/내부 경계조건 · 댐/제방붕괴 모의 · 상류/사류/혼합류 모의 · 상사류 혼합류 흐름 모의(LPI 기법, MIXED FLOW 알고리즘) · 실시간 홍수예측(Kalman Filter 기법) <p>제한사항</p> <ul style="list-style-type: none"> · 사용자 지침서/설명서 미비 · 모형의 지속적인 지원 미비 · 네트워크 모의 불가 · DOS 환경 기반 소프트웨어(취약한 GUI 개선을 위해 FLDAT 개발) · 하천측량단면의 전처리과정 필요(수위 vs. 하폭) · 모형의 안정성과 정확성을 위해 시·공간적 제약조건이 수반됨 · 불연속흐름 모의 불가
 <p>HEC-RAS 모형</p>	<p>모형기능</p> <ul style="list-style-type: none"> · 근사적 댐/제방붕괴 모의 · 다양한 상하류/내부 경계조건 · 거의 대부분의 수공구조물 모의 · 상사류 혼합류 흐름 모의(LPI 기법) · 네트워크 모의 가능 · 준부정류 모의, 유사이송, 수질 모의 가능 · 사용자 편의 시스템 구비 <p>제한사항</p> <ul style="list-style-type: none"> · 모형의 안정성과 정확성을 위해 시·공간적 제약조건이 수반됨 · 불연속흐름 모의 불가
 <p>MIKE 11 모형</p>	<p>모형기능</p> <ul style="list-style-type: none"> · 다양한 상하류/내부 경계조건 · 댐붕괴/제방붕괴 모의 · 2차원 홍수, 수질, 지하수모의 가능(DHI에서 개발된 다른 수문/수리 해석 소프트웨어와 동적으로 연계) · 네트워크 모의 가능 · 사용자 편의 시스템 구비 <p>제한사항</p> <ul style="list-style-type: none"> · 모형의 안정성과 정확성을 위해 시·공간적 제약조건이 수반됨 · 불연속흐름 모의 불가
 <p>SOBEK 모형</p>	<p>모형기능</p> <ul style="list-style-type: none"> · 다양한 상하류/내부 경계조건 · 다양한 수공구조물(펌프, 위어, 수문, 암거 등) 모의 · 댐붕괴/제방붕괴 모의 · 네트워크 모의 가능 · 천이류 모의 가능 · drying/wetting 모의 가능 · 홍수예측, 배수/관계시스템, 우수관거, 지하수위 제어, 하천지형, 염수침투, 수질모의 가능(Delft에서 개발된 모듈과 결합) · 사용자 편의 시스템 구비 <p>제한사항</p> <ul style="list-style-type: none"> · 모형 이론서 및 적용 예제 부족 · 모형의 안정성과 정확성을 위해 시·공간적 제약조건이 수반됨

입력자료 구축, 출력테이블상세/단면별출력상세/도식적 출력 및 애니메이션 등과 같은 출력자료의 다양성 등이 필요하다. 또한 1차원 하천흐름 해석 뿐만 아니라 수질, 유사, 범람 등의 부가적인 모의 기능들이 지속적으로 추가되고 있음을 알 수 있다.

4. 맺음말

하천홍수의 증가에 따라 홍수를 예측을 위한 계산수리모형에 대한 연구 및 개발이 지속되고 있다. 이러한 계산수리모형들은 의사결정에 필요한 정보를 제공해야하며, 1차원 수리 모형은 하천과 유역 규모에서 의사결정을 지원하기 위해 적절한 모형일 수 있다. 일반적으로 1차원 수리해석 모형은 하천수위를 예측하는데 적합하며 어떤 의미에서는 횡방향 범람 범위의 예측이 가능하다라고 말할 수 있다. 또한 GIS와 연계될 경우 좀 더 유용한 정보의 제공이

가능하며, 최근 원격탐사 자료의 가용성 증가에 따라 2차원 모형과의 연계를 통한 내·외수 침수모의로의 확장이 진행되고 있는 추세이다. 또한 하천에서 발생될 수 있는 불연속 흐름의 모의를 위한 연구들이 지속되고 있으며, 자연하천으로의 적용을 위한 노력이 지속되고 있다. 국외의 경우 1차원 수리해석 모형이 상용화 단계에 이르러 새로운 알고리즘의 보완을 통한 지속적 유지·관리가 이루어지고 있는 반면 국내의 경우는 연구수준에 머물러 있으며 외국의 수리해석 모형에 종속되어 있는 실정이다. 그러므로 범용 하천수리해석 모형의 이용에 있어 모형의 기능 및 제한점을 정확히 파악할 필요가 있으며 국내 하천문제에 대한 적용시 해석결과에 대한 자세한 분석을 통한 물리적으로 의미있는 적용이 필요할 것이다. 또한 국내에서도 국내하천 환경에 적합하고 하천관련 종사자들의 요구에 부합하는 독자 수리해석 모형의 개발 및 실용화가 필요할 것으로 판단된다. ☞

참고문헌

1. NWS(2007). Evaluation of Difference Hydraulic Models in Support of Nationa Weather Service Operations. Final Report of the Hydraulic Model Evaluation Team, NWS, NOAA.
2. <http://www.hec.usace.army.mil> (USACE, Hydrologic Engineering Center 홈페이지)
3. <http://www.dhigroup.com> (Danish Hydraulic Institute 홈페이지)
4. <http://delftsoftware.wldelft.nl> (WLI Delft Hydraulics 홈페이지)
5. <http://www.weather.gov/oh/hrl> (NOAA, NWS, Hydrology Lab. 홈페이지)
6. <http://www.rivermechanics.net> (River Mechanics 홈페이지)