

하천 수리해석 모델링에서 수자원 조사 정보의 필요성



송창근
인천대학교
안전공학과 교수
baybreeze119@
incheon.ac.kr

*본 기사는 2022 KIHS 수자원 포럼 최종보고서의 일부 내용을 요약한 것입니다.

하천에서의 동수역학적 흐름을 해석하거나 유사이송 및 하상변동을 수치모형으로 모델링하는 경우 다양한 수자원 조사 정보가 필요하다. 즉, 하천 수리해석 모형을 구동하고, 매개변수를 추정하며, 모의 결과의 신뢰성을 검증하는 데에 있어 수자원 조사 정보가 없거나 부실하다면 수리해석은 무의미한 결과 (garbage in, garbage out)를 도출하기 때문이다.

여기서는 하천 수리해석에 필요한 수자원 조사정보를 요약하고, 하천 흐름해석 모형을 실제 자연하천에 적용하는 경우 수자원 조사 정보와 관련하여 어떤 어려움이 있고, 어떤 점을 개선하면 바람직한지를 분석하였다.

01 하천 수리해석에 필요한 수자원 조사 정보 요약

하천 흐름해석 모형을 통해 유의미한 결과를 얻기 위해서는 표 1과 같이 지형 및 초기경계조건을 포함한 입력자료, 매개변수 추정을 위한 자료, 결과 검증을 위한 자료 등이 필요하다. 이 중 초기조건은 수치모형 상에서 처리가 가능하고 경계조건은 홍수통제소의 수위

자료 혹은 rating curve를 통해 추출할 수 있다. 그리고 동점성계수의 경우 모형 구동 과정에서 시행착오를 통해 역추적으로 찾아낼 수 있다. 하지만 하상 측량자료와 조도계수 추정 및 모의결과 검증을 위한 유속·수위자료는 실측자료를 확보하지 못하는 경우 난관에 부딪히게 된다. 따라서 표 1에 음영 표시되어 있는 자료는 수요자 중심 정보생산의 일환으로 대국민 서비스를 제공하는 것이 바람직하다고 판단된다.

표 1. 하천 수리해석을 위한 입력·추정·검증 자료

구분	자료명	설명		용도/처리
입력자료	지형자료	x, y, z 좌표 추출을 위한 횡단 측량 자료 (DEM)		scatter point set 구성
		하천 경계 확인을 위한 수치지도 혹은 항공사진		
	초기조건	t=0 에서 수위의 공간적 분포		초기수위 가정
	경계조건	상류 경계	유입 수문곡선	유량 반영
하류 경계		수위	저류량 반영	
추정자료	매개변수	조도계수 (Manning n, Chezy C)		하상재료 및 식생분포 반영
		동점성계수		난류 특성 고려
검증자료	수리량 측정자료	흐름방향	최심선을 따른 유속 및 수위	수리해석 결과의 신뢰성 입증
		하폭방향	횡방향 유속 및 수위	
		(수리)구조물 직상류에서의 선수파		
		흐름 차단에 의한 배수위 효과		

02
지형자료 구축

2차원 흐름 해석을 진행하기 위한 지형 자료 구축에는 여러 절차들이 필요하다. 여기서는 세계적으로 널리 사용되는 SMS(Surface water Modelling System) 모형을 이용하는 경우와 국내에서 개발한 RAMS(River Analysis Modelling System) 모형을 이용하는 경우의 두 가지 지형구축 방법을 설명하여 하천 흐름해석을 위한 수자원 조사 정보의 활용에 관하여 언급하고자 한다.

먼저 SMS 모형을 이용하는 경우 그림 1과 같이 HEC-RAS에서 횡단면의 위치와 측량자료(Geometry), 하천중심선 데이터를 export하여 .sdf 형태의 파일을 생성해야 한다. 이후 하천중심선은 CL, 횡단면은 XSEC 파일명으로 표출되며 2D 모델링을 진

행하기 위해 XSEC 커버리지를 활성화하여 횡단면의 표고 데이터를 scatter로 변환해주는 과정이 필요하다. 변환된 횡단면 scatter 데이터를 바탕으로 하천라인을 구축하고 삼각화 옵션을 통해 지표면을 확인한 다음 초기 지형에서 scatter data set에 따라 수직 벽과 같은 부분을 제거한다. 이후 Feature Point와 Feature Arc 를 통해 지형 자료의 외각라인을 구성하여 2D mesh를 생성할 수 있다.

RAMS-G 모형을 이용하는 경우 그림 2와 같이 HEC-RAS의 Geometry file인 .g01 file을 별도의 절차없이 사용할 수 있다. 원하는 좌표대로 file을 import하여 하천중심선과 횡단면 자료를 불러온 뒤 Bank Station을 Polyline으로 변환하여 지형의 외각라인을 구성할 수 있다. 이후 Cross Section 정보를 Linear Interpolation하여 Z축 데이터를 생성할 수 있고 이를 바탕으로 2D mesh를 생성한다. 따라서 지형자료 구축에 있어 SMS 보다 효과적으로 지형을 구성할 수 있다.

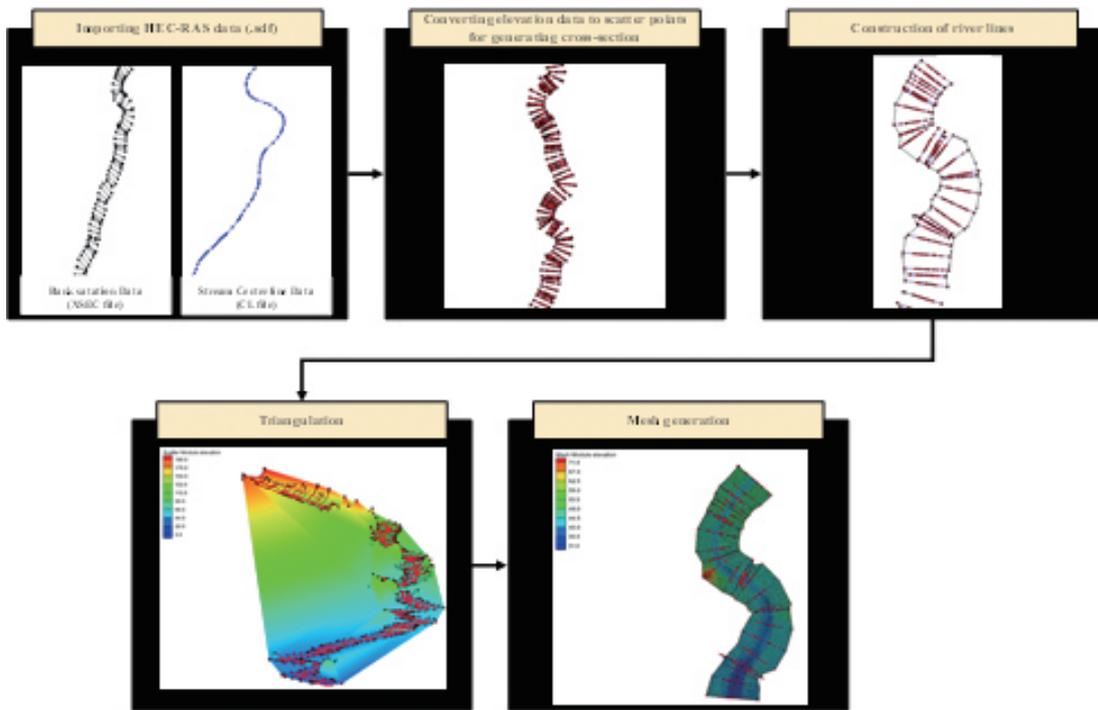


그림 1. 수자원 조사 정보를 이용한 하천 지형의 구축 (SMS 모형)

앞서 설명한 바와 같이 횡방향 하상 측량자료가 전산 파일로 존재하는 경우에는 하천흐름 해석모형의 전처리 GUI 기능을 통해 반자동으로 모의대상 하천의 지형자료를 구축할 수 있다. 그러나 횡방향 하상 측량자료가 망실되거나 획득이 불가능한 경우에는 그림 3과 같이 종이나 pdf 형태의 도면을 디지털화하여 횡방향 하상 자료를 생성해야 하는 번거로움이 있다. 이 경우 측량한 횡단자료를 디지털화하여 로

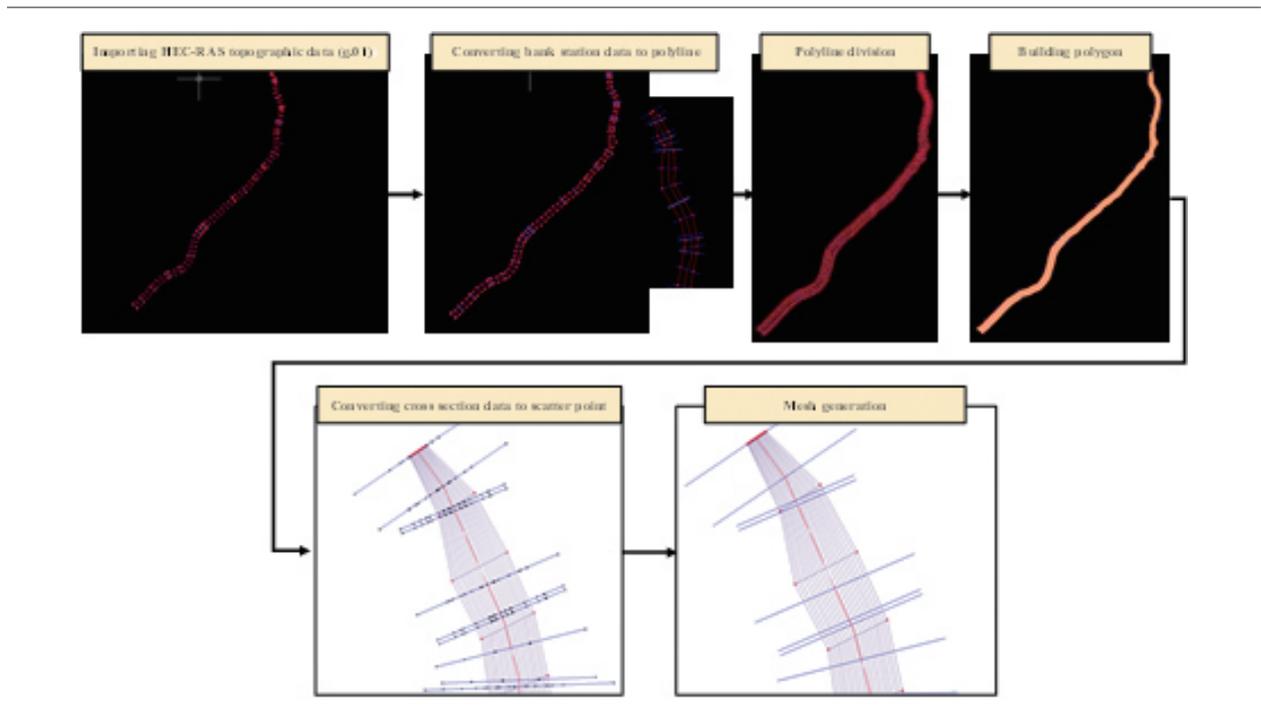


그림 2. 수자원 조사 정보를 이용한 하천 지형의 구축 (RAMS-G 모형)

결좌표계를 글로벌 좌표계로 변환하고, 축선별 x,y,z 값을 도출하여 내삽하여 지형 격자망을 생성한 후 계산엔진을 구동하여 결과를 도출하게 된다.

그림 4는 2차원 하천 흐름해석 모형의 자연하천 적용 사례를 보여주는 그림으로 모의 구간은 낙동강 구미보-칠곡보 32 km 구간이다. 수치모의를 위한 경계조건으로는 낙동강 본류 유량 197.39 cms, 제1지류인 감천 유량 28.78 cms를 입력하였고 하류단 경계조건으로는 칠곡보 수위를 18.64 m로 입력한 결과로 해당 구간의 하상고와 등수위도, 등수심도, 등유속도를 그림 4에 도시하였다. 하지만 이 결과는 낙동강 하천정비 준공 후 2013년 지형자료를 이용한 것으로 2020년 모의 당시 해당 구간의 최신 지형자료를 획득하는데 많은 어려움이 있었으며, 어렵게 구한 자료가 존재했지만 비공개로 처리되어 전혀 이용할 수 없는 어려움이 있었다.

위의 내용을 종합해 봤을 때 하상 관련 수자원 조사 정보의 활용과 관련하여 다음 두 가지 이슈가 존재하게 된다. 첫째, 하상 측량 자료가 정부 지정 담당기관에서 유지 관리 되고 있지 않아 개인적인 인맥을 통해서 암암리에 어렵게 취득해야 하는 어려움이 있었다. 실제로 지형 격자망을 구축하고 수치모의를 진행하여 결과를 도출하는데에는 그리 많은 시간이 필요하지 않지만 하상 측량자료를 수소문하여 구하는데 대부분의 시간이 소요되고 있는 실정이다. 둘째, 하상 측량자료를 구했다 하더라도 오래된 자료들(outdated geometry)이 상당수 존재하여 적용에 많은 어려움이 있다. 하

천관련 기관에서 산발적으로 측량이 이루어지므로 이들이 인벤토리 형태로 관리가 되지 않고 상호 비공개를 원칙으로 하고 있어 자료획득의 어려움을 토로하는 연구자가 다수 존재한다. 따라서 상이한 기관에서 하상 측량을 하더라도 이들이 하나의 DB에 집적되고 추가 측량이 이루어지면 DB에 추가되는 형태로 관리되어 양질의 하상 자료와 더불어 최신화가 시급한 실정이다.



그림 3. 자연하천 흐름해석을 위한 하상 횡단 측량자료의 활용

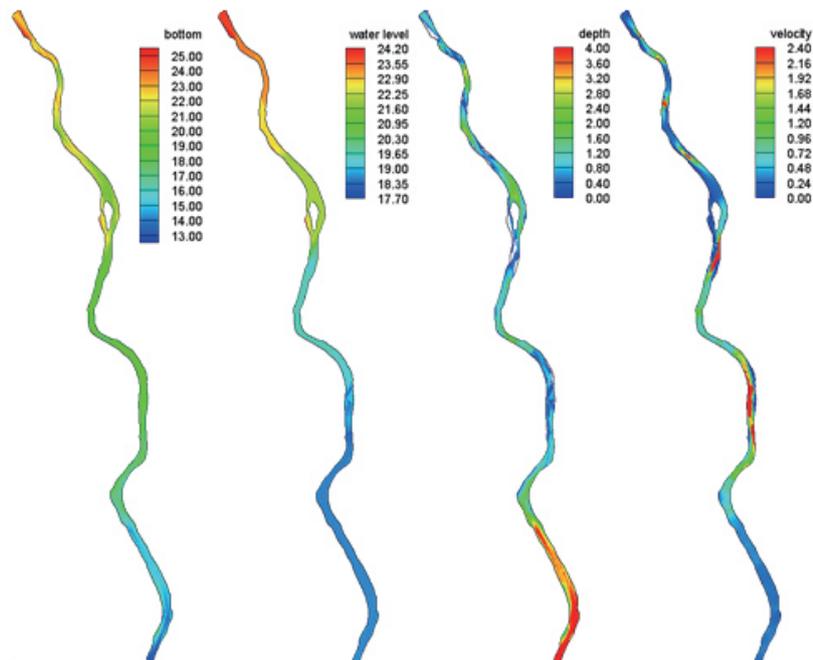


그림 4. 하천 흐름해석모형의 자연하천 적용 (낙동강 구미보-칠곡보 구간)

03
매개변수 추정

천수흐름 해석모형을 이용하여 하천 수리거동을 해석하는 경우 점성계수나 조도 계수 등이 매개변수로 포함된다. 적용 대상 구간과 경계조건이 주어진 경우 천수흐름 해석모형이 정확한 수치해를 도출하기 위해서는 적정 매개변수를 추정하는 것이 매우 중요하다. 여기서는 자연하천 흐름 모의 시 조도계수에 따른 수위 변동을 분석하여 수리해석 모형의 매개변수 추정에 수자원 조사 정보를 활용하는 것이 필수적임을 제시하였다.

그림 5와 같이 한강 본류구간(영동대교-행주대교)을 대상영역으로 하였다. 약 25 km에 이르는 이 구간은 중랑천과 안양천이 본류로 합류하고 완만한 2개의 사행부를 포함하고 있으며, 3개의 하중도(노들섬, 밤섬, 선유도)가 위치하고 있어 위락시설과 철새의 도래지로 이용되는 중요한 영역이다. 또한 대상영역 내에 한강대교 수위관측소와 잠수교 수위관측소가 존재하여 수치모의 결과를 검증하고 매개변수를 결정할 수 있는 이점이 있다. 본 연구에서는 영동대교를 상류단 경계, 행주대교를 하류단 경계로 한 유한요소망을 구축하였다. 대상영역 내의 두 개의 지천과 세 개의 하중도를 포함하였으며, 불규칙한 형태의 섬 주변은 삼각망으로 구성하여 5,551개의 혼합요소망을 제작하였다.

2011년 5월 4일부터 3일간 관측된 유량과 수위를 이용하여 부정류 흐름 모의를 실시하였다. 입력 매개변수 선정을 위하여 표 2와 같은 조도계수와 점성계수를 고려하였다. 하천의 좌안과 우안에 인접한 영역의 조도계수가 저수로 구간에 비해 물리적으로 큰 값을 가지므로 이를 차등적으로 적용하였으며, 요소망의 크기를 고려하여 3가지의 점성계수를 포함하였다. 한강대교와 잠수교의 수위관측소 실측자료와 수위



그림 5. 매개변수 민감도를 확인하기 위한 자연하천 적용구간

표 2. 매개변수 민감도 테스트를 위한 모의 케이스

Case	저수로 조도계수	양안 조도계수	점성계수 (m ² /s)	한강대교 RMSE	잠수대교 RMSE
HM1	0.020	0.030	4.0	0.098	0.112
HM2	0.025	0.035		0.070	0.084
HM3	0.030	0.040		0.094	0.102

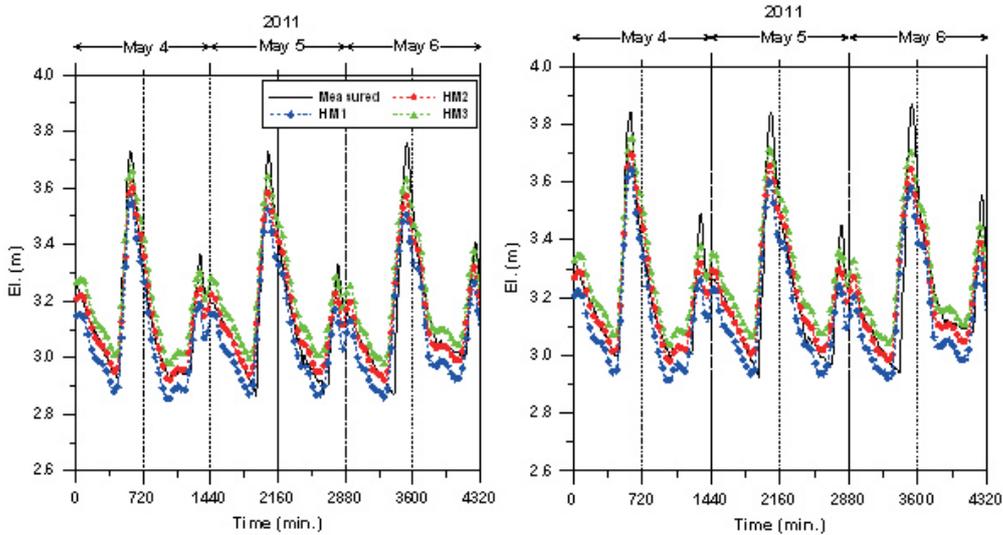


그림 6. 수리모형 매개변수에 따른 수위 거동 비교 (좌: 한강대교; 우: 잠수대교)

04 흐름해석 결과의 검증

모의결과를 비교하여 RMSE를 계산한 결과 그림 6과 같이 양안 인접영역의 조도계수를 0.035, 저수로의 조도계수를 0.025로 적용한 경우의 RMSE가 각각 0.070 m와 0.084 m로 가장 작게 나타났다. 따라서 하천 수리해석 모형의 매개변수를 추정하기 위해서는 수자원 조사 정보를 활용해야 함을 확인하였다.

자연하천에서의 흐름은 실험수로와는 크게 다르다. 수로의 폭과 하상고가 공간적으로 변하고 사행의 불규칙성이 크며, 수로 바닥이 매끄럽지 않고 홍수량 혹은 국부적 사류 발생과 같은 조건이 하천 흐름 내에 존재하기 때문이다. 따라서 실험수로나 인공수로에 수리해석모형을 적용하거나 실험계측을 수행하는 것은 자연하천에서의 수치모의나 현장측량을 수행하는 것에 비해서 용이하다고 할 수 있다. 이는 결국 자연하천에 수리모형을 적용하는 경우 결과의 수렴성과 신뢰성을 확보하는데 어려움이 많으며 흐름해석 결과를 검증하기 위해서는 현장실측 자료와의 비교가 필수적임을 의미한다. 따라서 본 절에서는 만족도가 심한 자연하천을 대상으로 흐름해석모의 결과의 검증을 위한 수자원 조사정보의 필요성에 대하여 기술하였다.

적용대상 자연 하천은 그림 7과 같이 한반도 남단에 위치한 남강으로 만곡이 잘 형성되어 있고, 크기가 적당하여 흐름해석모형 결과의 검증을 위한 수자원 조사 정보를 취득하는데 적합한 하천이라 할 수 있다. 상류의 남강댐에 의해 제어되는 유량과 하류의 남강 수중보에 의해 유지되는 일정한 수심으로 인해 수치모의의 경계조건을 입력하는데 용이한 장점도 있다. 남강의 평균 곡률반경 대 하폭비는 6.43이고 sinuosity는 1.78이어서 만곡에 의한 강한 2차류가 생성되는 하천이다.

그림 8은 섹션별 횡방향 유속분포를 나타낸 것으로 만곡부 진입 직전(섹션 1)에서의 속도는 양안에서 감소하고 중앙부에서 증가하여 속도 재분배가 우세하게 나타났다. 섹션 1~3 사이에서도 양안에서의 유속이 감소하고 최대 유속이 수로의 중앙부로 집중되었다. 자연 하천의 만곡부에서의 전형적인 유속 분포와는 다르게 섹션 2-4에서는 만곡부 내측 제방에서 유속이 높게 나타났는데 이것은 수심이 이 구간 전체에 걸쳐 균일하게 분포하기 때문이다. 또한, 횡방향 유속 경사가 만곡부 입구부터 섹션 5까지 두드러지게 나타났으며 특히 굽힘 입구에서 섹션 5까지의 도달 범위에서 분산응력이 없었습니다. 섹션 6 이후에는 속도 분포가 균일하게 분포하였다.

실측치와 모의치의 정량적 비교분석을 위해 섹션별 RMSE를 계산하여 표 3에 나타내었다. ADCP 측정 자료에 일부 노이즈가 있어 이상치(outlier value)가 포함된 섹션 5과 6을 제외하고 개선모형(with dispersion term)이 ADCP 관측치와 근사하였고, RMA-2 모형의 결과와 일반모형(without dispersion term)에 비해 만족스러운 성능을 보였다. 섹션 평균 RMSE 값을 보면 개선모형이 만곡 시작부에서 정점에 이르기까지 보다 더 정확한 결과를 도출함을 알 수 있다.

이상의 내용으로 확인할 수 있듯이 하폭 방향으로의 공간적 유속 측정자료가 제공되면 2차원 흐름해석 모형의 결과를 검증하는데 큰 도움이 된다. 만약 유속 측정자료가 없었다면 개선모형(with dispersion term)이 종전의 일반모형(without dispersion term)에 비해 우수한 결과를 도출한다는 것을 확정하기 어렵기 때문이다.



그림 7. 하천 흐름해석모형의 자연하천 적용 사례 (진주시 남강)

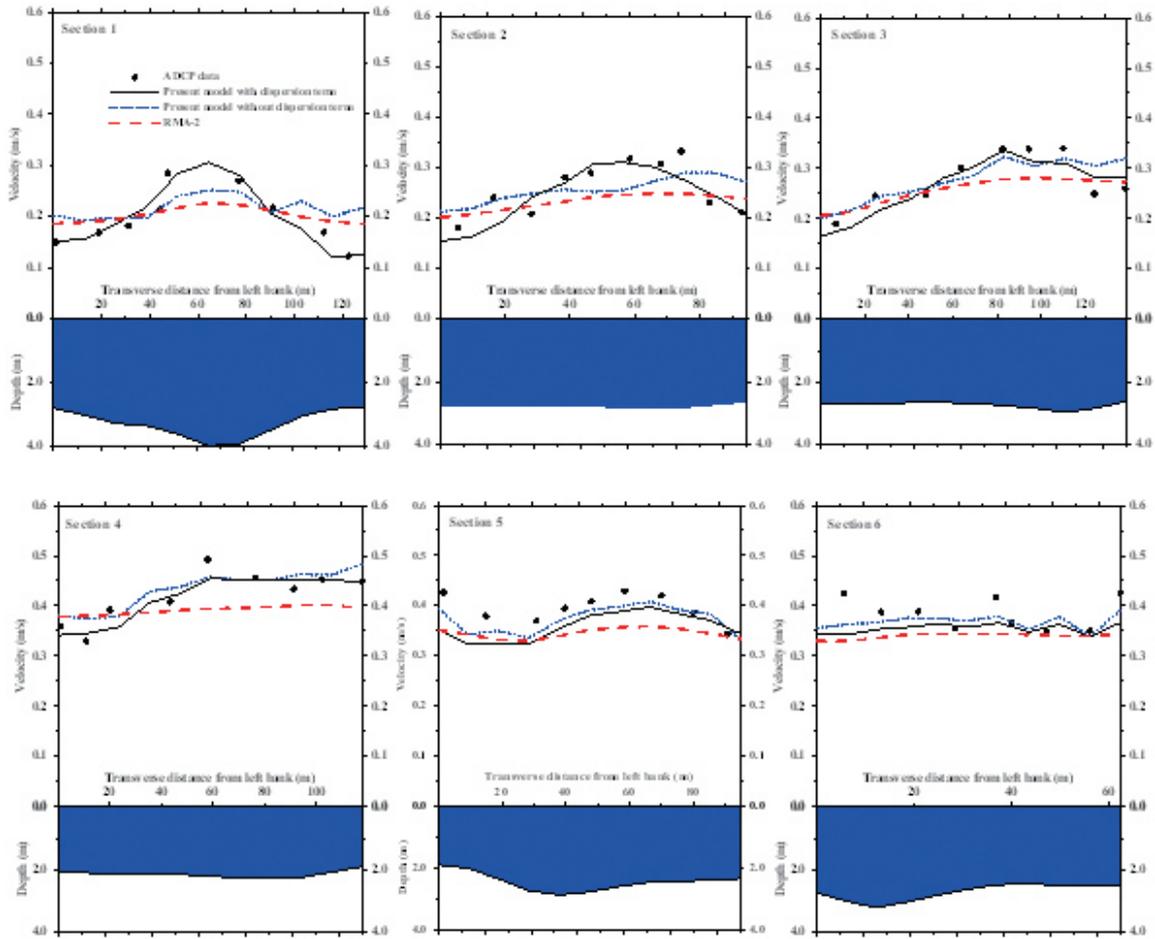


그림 8. 횡방향 유속 및 수심분포 모의결과와 실측자료와의 비교

표 3. 하천흐름해석모형 결과와 수자원 조사 정보와의 비교

모형	섹션							평균 RMSE
	1	2	3	4	5	6		
RMA-2		0.0391	0.0479	0.0382	0.0504	0.0539	0.0535	0.0472
개선 모형		0.0461	0.0437	0.0325	0.0295	0.0241	0.0300	0.0343
기존 모형		0.0077	0.0283	0.0210	0.0174	0.0372	0.0369	0.0247

05 요약 및 결론

본 원고에서는 하천 수리해석에 필요한 수자원 조사정보를 요약하고, 하천 흐름해석 모형을 자연하천에 적용하는 경우 수자원 조사 정보와 관련하여 어떤 어려움이 있고, 어떤 점을 개선하면 바람직한지를 제시하였다.

하천 흐름해석 모형을 통해 유의미한 결과를 얻기 위해서는 지형 및 초기경계조건을 포함한 입력자료, 매개변수 추정을 위한 자료, 결과 검증을 위한 자료 등이 필요

하다. 이 중 초기조건은 수치모형 상에서 처리가 가능하고 경계조건은 홍수통제소의 수위자료 혹은 rating curve를 통해 추출할 수 있다. 그리고 동점성계수의 경우 모형 구동 과정에서 시행착오를 통해 역추적으로 찾아낼 수 있다. 하지만 하상 측량자료와 조도계수 추정을 위한 유속 및 수위자료, 결과검증을 위한 유속 및 수위자료는 실측자료를 이용하지 못하는 경우 난관에 부딪히게 된다.

횡방향 하상 측량자료가 전산 파일로 존재하는 경우에는 하천흐름 해석모형의 전처리 GUI 기능을 통해 반자동으로 모의대상 하천의 지형자료를 구축할 수 있다. 그러나 횡방향 하상 측량자료가 망실되거나 획득이 불가능한 경우에는 종이나 pdf 형태의 도면을 디지털화하여 횡방향 하상 자료를 생성해야 하는 번거로움이 있다. 이 경우 측량한 횡단자료를 디지털화하여 로컬좌표계를 글로벌 좌표계로 변환하고, 측선별 x,y,z 값을 도출하여 내삽하여 지형 격자망을 생성해야 한다.

끝으로 수리해석 결과의 검증 및 신빙성 확보와 관련하여 하폭 방향으로의 공간적 유속 측정자료가 제공되면 흐름해석 모형의 결과를 검증하는데 큰 도움이 된다. 만약 유속 측정자료가 없다면 개선모형이 종전의 일반모형에 비해 우수한 결과를 도출한다는 것을 확정하기 어렵기 때문이다.

이상의 내용을 종합해 봤을 때 하상 관련 수자원 조사 정보의 활용과 관련하여 다음 두 가지 이슈가 존재하게 된다. 첫째, 하상 측량 자료가 정부 지정 담당기관에서 유지관리 되고 있지 않아 개인적인 인맥을 통해서 암암리에 어렵게 취득해야 하는 어려움이 있었다. 실제로 지형 격자망을 구축하고 수치모의를 진행하여 결과를 도출하는 데에는 그리 많은 시간이 필요하지 않지만 하상 측량자료를 수소문하여 구하는데 대부분의 시간이 소요되고 있는 실정이다. 둘째, 하상 측량자료를 구했다 하더라도 오래된 자료들(outdated geometry)이 상당수 존재하여 적용에 많은 어려움이 있다. 하천관련 기관에서 산발적으로 측량이 이루어지므로 이들이 인벤토리 형태로 관리가 되지 않고 상호 비공개를 원칙으로 하고 있어 자료획득의 어려움을 토로하는 연구자가 다수 존재한다. 따라서 상이한 기관에서 하상 측량을 하더라도 이들이 하나의 DB에 집적되고 추가 측량이 이루어지면 DB에 추가되는 형태로 관리되어 양질의 하상자료와 더불어 최신화가 시급한 실정이다.