수치해석에 의한 사행하천에서의 흐름특성 해석

Flow Characteristic Analysis in Meandering Channels by the Numerical Analysis

손아롱*, 한건연**, 허윤형***, 류종현****

Ah Long Son, Kun Yeun Han, Yun Hyoung Huh, Jong Hyun Ryu

요 지

홍수기 호우로 인한 피해는 대부분 하천구역에서 발생되며, 이러한 피해는 인간에게 직·간접적으로 영향을 미치게 된다. 자연 상태의 하천형상은 대부분 호우로 인한 홍수로 인해 자연스럽게 만들어지게 되며, 대부분 사행하천의 형태를 띠게 된다. 사행하천에서의 흐름의 기하학적 특성은 성장이나 사멸, 또는 두 가지 모두의 형태를 보인다. 사행하천에서의 흐름 및 유속 분포는 하천제방 보호, 주운, 취수, 그리고 유사 이동 및 퇴적 패턴과 관련하여 실용적인 관점에서 연구하여야 하는 하천수리학에서는 매우 중요한 주제이다. 그리고 사행하천은 특히 만곡부가 교호적으로 나타나는 곳에서의 흐름구조가 매우 복잡하다. 이러한 사행하천에서는 회전방향이 교호적으로 바뀌는 나선형의 흐름(2차류)이 3차원적으로 발생하는 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 사행하천이 많은 국내 하천특성을 고려하여, 하천 만곡부에서의 흐름특성을 분석하고자 하였으며 2차원 CCHE2D 와 3차원 FLOW3D 모형을 적용하였으며 가상 하도에 대하여 수리모형 실험의 실측치와 비교하여 모형의 정확성과 안정성을 검증하였다. 그리고 남강댐 하류에 대하여 만곡부의 흐름특성(유속분포 및 최대유속경로, 수위분포, 2차류 거동, 편수위, 전단응력 분포 등)을 분석함으로써, 하천 만곡부에서의 수리적 특성을 보다 정확하게 제시하고자 한다. 모의 분석결과 동일 하도에 대하여 유량을 변동시킬 경우, 유량이 증가할수록 만곡부에서의 수리영향이 더욱 뚜렷해짐을 알 수 있었고 2차원 모형보다 3차원모형의 결과의 정확도가 더 높은 것으로 분석되었다. 곡률반경이 1,300~1,600 정도인 실제하천에 적용한 결과, 수위의 경우 2차원 결과가 3차원 결과보다 최대 3% 정도 수위가 높은 것으로 나타났으며, 또한, 상관계수가 평균 0.91의 값을 보이고 있어 2차원모형과 3차원모형의 결과가 비교적 잘 일치하는 것으로 분석되었다. 흐름 분석을 통해서 만곡부에서의 최대유속은 최정점(apex)에서 보다는 오히려 최정점 이전 하도의 내측에서 발생하였으며, 정점에서의 종단유속은 감소하지만 횡단유속은 오히려 크게 증가하는 경향을 보이고 있었다. 따라서 하천설계시 사행하천의 제방 안정성 확보를 위하여 종단유속 뿐만 아니라 횡단유속 또한 고려할 필요가 있음을 확인하였다. 또한 남강댐 하류 만곡부에서의 내측 및 외측의 수위를 분석한 결과, 제방 외측의 수위가 평균수위에 비해 최대 약 37cm정도 증가하는 것으로 분석되었다. 따라서 만곡부에 대한 하천제방설계시 좌, 우안의 여유고를 일률적으로 적용하기 보다는 만곡에 따른 흐름특성을 분석하여 설계에 적용하여야 안정성 및 경제성을 동시에 확보할 수 있을 것으로 사료된다.

핵심용어 : 사행하천, CCHE2D, FLOW3D

1. 서론

하천 만곡부는 원심력, 2차류(Secondary flow) 등에 의한 수위상승, 제방침식 등에 의해 제방이 파괴되고 월류되어 홍수피해가 발생할 수 있는 취약지점이다. 특히 만곡부가 교호적으로 나타나는 곳에서의 흐름구조는 매우 복잡하며, 회전방향이 교호적으로 바뀌는 나선형의 흐름(2차류)이

* 정회원・경북대학교 토목공학과 박사과정・E-mail : salong83@knu.ac.kr
** 정회원・경북대학교 토목공학과 교수・E-mail : kshanj@knu.ac.kr
*** 경북대학교 토목공학과 석사과정・E-mail : dbsguds83@hotmail.com
**** 한국수자원공사 수자원개발처・E-mail : ruy123@kwater.or.kr

3차원적으로 발생한다. 일반적으로 하천 설계에서는 만곡부의 수위 상승 효과를 설계홍수위에 반영하지 않고 일률적으로 1차원 부등류 해석에 의해 산정된 설계홍수위에 여유고를 고려하여 제방을 설계하고 있기 때문에 정확한 설계가 된다고 할 수 없다. 본 연구에서는 하천 만곡부에 대하여 2차원 및 3차원 모형을 적용하여 만곡부 흐름특성을 분석 제시함으로써 하천 설계 및 관리시 활용될 수 있도록 할 것이다.

2. 모형의 특성

2.1 CCHE2D Model

CCHE2D 모형은 천이류에 대한 지배방정식을 풀기 위해 Efficient Element Method(EEM; Wang과 Hu,1992)를 적용하였으며, 비정상흐름의 이동경계조건을 다루기 위해 마른영역 기법을 사용하였다. 그리고 개수로에서 시간의 변화에 따른 정상상태의 해를 해석할 수 있으며, 상류와 사류영역뿐만 아니라 천이영역에 대한 모의를 수행할 수 있다. 사행하천에서는 전형적인 소류사 이송공식을 사용하여 하상의 경사와 2차류(secondary flow)의 영향으로 인한 하천 지형의 변화에 대한 계산이 가능하다.

2.2 FLOW3D Model

1985년 미국의 허트 박사(C.W. Hirt)가 개발·출시한 프로그램으로 기본적으로 비정상 유동상태이며, 연속방정식, 3차원 Navier-Stokes 방정식 및 에너지 방정식을 이용하여 해석한다. FDM 기법에 FAVOR(Fractional Area/Volume Obstacle Representation)를 도입한 유한체적법(FVM)을 적용하였으며, 경계면 적용과 경계면 추적의 정확성을 향상시키기 위해 VOF 기법을 적용, 그리고 직사각형의 격자를 용이하게 생성할 수 있는 FAVOR 기법 적용하였다. 최근 수자원분야에서 여수로 접근수로 해석, 게이트 유동 현상, 댐 안정성 해석, 여수로 수문조작, 하천 오염 확산 문제 등 많은 분야에서 적용되고 있으며, 그 적용성이 입증된 프로그램이다.

3. 가상하도에서의 모형 적용

3.1 수리모형 실험 개요

본 연구에서는 Laboratorio Nacional de Engenharia Civil(LNEC)에서 수행한 수리모형실험 결과를 이용하였다. 실험은 θ_0 = 110°의 비교적 큰 사행비를 가진 sine-generated laboratory channel에서 수행되었다. 수로단면은 직사각형 단면으로 수로 폭은 0.4m, 수로 길이는 18.6m, 수로 경사는 1/1,120이다. 사행수로의 길이는 18.6m이며, 수로 양측벽은 길이 1.0m, 높이 20cm, 두께 3.0mm의 유리(plexiglass sheets)재질로 만들어 졌다.

3.2 2차원 수치모형의 적용

비교적 큰 사행비를 가지는 사행수로에서의 흐름특성을 파악하고자 본 연구에서는 2차원 모형인 CCHE2D를 적용하였다. 상류단 유입유량이 0.00201m^3/s이고 하류단 수심 0.03m를 경계조건으로 지정하였다. 계산 시간간격은 0.01초로 하였고 반복 모의 횟수를 10,000회로 지정하였다. 난류모형으로 $k-\epsilon$ model을 사용하였고 수치해석기법 중 wall slipness coefficient는 0.5, 마름 젖음의 기준수위는 0.005m를 사용하였다.

유입부가 유출부에 비해 높은 수심을 유지하며, 하류로 갈수록 수심이 낮음을 알 수 있다. 수심은2.9~3.6㎝의 분포를 보이며, 내측보다는 외측의 수심이 높았다. 유속은 0.014~0.252m/s의 분포를 보였으며, 만곡부 정점 전 지점의 내측에서 유속이 가장 크며, 정점을 지나면서 최대 유속이 외측으로 이동함을 알 수 있다. 만곡정점(apex)에서 횡단유속이 다른 지점에 비하여 크지만 종단유속은 작다. 따라서, 총유속 뿐만 아니라 횡단유속으로 인한 영향을 고려할 필요 있음을 알 수 있었다. 소류력은 0.0~0.127㎏/㎡의 분포를 보이며, 점차적으로 증가함을 알 수 있다.

3.3 3차원 수치모형의 적용

본 연구에서는 수치해석기법으로 음해법(Implicit method)을 사용하였으며, 난류 모형은 비교적 계산시간이 오래 걸리지만 정확도가 높은 RNG 모형을 적용하였다. 경계조건은 “Turbulent Flow In Sine-generated Meandering Channels(Silva, 1995)"에서 수리모형실험 결과를 토대로 경계조건을 부여하였으며, 상류단 조건은 0.00201m^3/s, 하류단은 0.03m를 부여하여 모의를 실시하였다.

실험하도에 대하여 FLOW-3D를 이용하여 수치 모의한 결과 수로 전구간 유속 분포는 0.029~0.238m/sec로 분석되었다. 이는 2차원 모형(CCHE2D)에서 분석된 유속분포 0.014~0.25m/sec와 다소 차이가 있음을 알 수 있었다. 또한, 첫 번째 만곡부보다는 두 번째 만곡부에서 유속이 더 큰 값을 보이고 있어 2차원 분석결과와 동일한 분포를 보이고 있다.

4. 실제하천에서의 모형 적용

4.1 연구대상지역

실제하천의 적용에 있어서, 대상유역으로는 사행수로를 형성하고 있으며, 2006년 태풍 에위니아에 의해 제방붕괴 사례가 있는 남강댐 하류 26.5㎞ 지점부터 15.6㎞까지의 구간을 선정하였다. 하상경사 1/2,970~1/6,611로 매우 완만하여 홍수소통이 원활치 못할 뿐만 아니라 낙동강 본류 배수영향을 받아 홍수위험도가 높은 지역으로써, 적용성이 뛰어날 것으로 판단된다.

표 1 경계조건 및 초기조건

하 천	분석구간	경계조건		조도 계수	비 고
		상류단 유량 (㎥/s)	하류단 수위 (EL.m)		
남강댐 하 류	진주시 금산면 ~지수면	남강 본류 : 3,310 반성천 지류 : 680	17.19	0.025	100년빈도 계획홍수량

4.2 2차원 수치모형의 적용

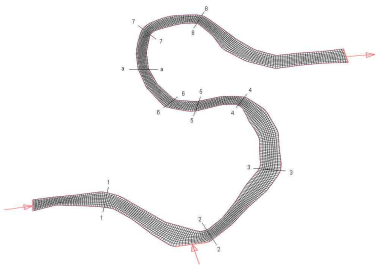

그림 1. 실제하천의 격자구성

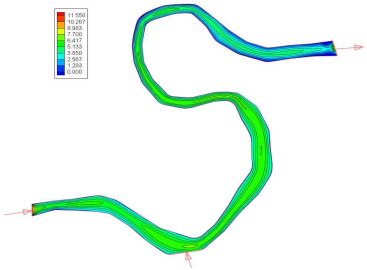

그림 1. 실제하천의 수심분포

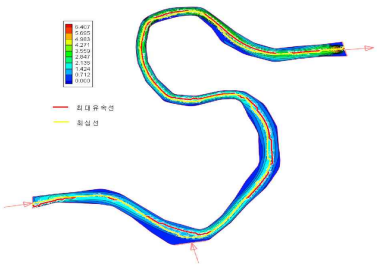

그림 3. 실제하천의 유속분포도

2차원 CCHE2D 모의에서 수위는 16.8m~21.6m, 수심은 1.25~11.55m 범위 분포를 보였으며, 수위는 상류에서 하류로 갈수록 저하되었다. 그리고 수심은 하천 중심을 따라 높게 나타났다.
만곡 및 협착부의 영향으로 모든 횡단지점에서 내측에서 외측으로 갈수록 수위가 상승하는 것을 볼 수 있었으며, 반성천 지류 유입부에서 2~4% 수위상승을 나타냈다. 특히 외측으로 갈수록 커짐을 알 수 있었다.

4.3 3차원 수치모형의 적용

분석 구간에 대한 수위분포는 16.805m~20.816m로 분포하고 있다. 수위는 전체적으로 하류쪽보다 상류쪽에서 높게 형성되는 것으로 분석되었다. 수심 분포를 분석한 결과는 0.252~13.445m의 범위를 보이고 있다. 만곡부를 가지는 자연하천에서는 제방 바깥쪽에 최심선이 형성되고 있음을 알 수 있으며, 최심선을 따라 수심이 깊게 형성되고 있음을 알 수 있다.

<그림 4>에서 나타난 바와 같이 표면 부근에서는 흐름이 내측에서 외측으로, 수심 하단부에서는 외측에서 내측으로 이동하며 순환하는 2차류(secondary flow) 흐름이 발생하고 있음을 알 수 있었다. 만곡부 횡단에 대한 내측 및 외측의 수위를 분석한 결과, 외측의 수위가 평균수위에 비해 최대 2.13% 정도 증가하는 것으로 분석되었으며, 내·외측 수위차는 최대 3.72% 정도 발생하는 것으로 분석되었다.

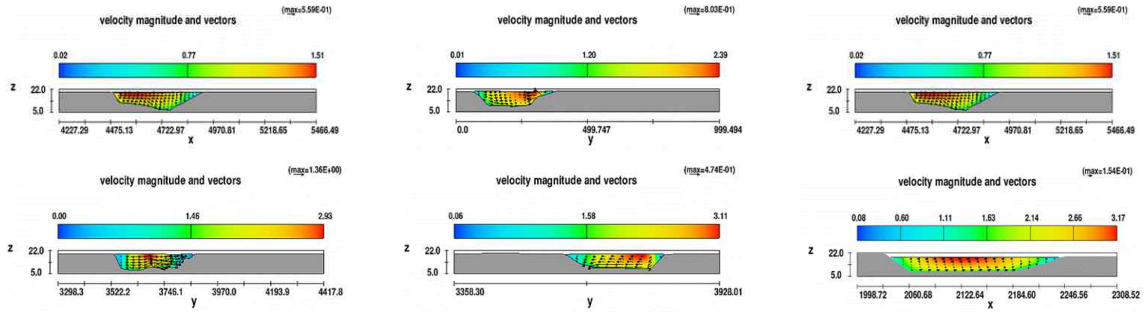

그림 4. 각 단면에서의 2차류 유속크기 및 벡터

4.4 편수위분석

만곡부 횡단에 대한 내측 및 외측의 수위를 분석한 결과, 외측의 수위가 평균수위에 비해 최대 2.13% 정도 증가하는 것으로 분석되었으며, 내·외측 수위차는 최대 3.72% 정도 발생하는 것으로 분석되었다. <표 3>은 주요 지점에 대한 2,3차원의 편경사를 구한 것이다.

표 2 편수위 산정결과

분석지점	수위차 (평균수위 & 외측수위)		수위차 (내측수위 & 외측수위)	
	m	%	m	%
1	0.065	0.32	0.19	0096
2	0.231	1.16	0.69	3.45
3	0.087	0.44	0.15	0.73
4	0.260	1.33	0.50	2.56
5	0.066	0.34	0.17	0.87
6	0.299	1.56	0.36	1.85
7	0.292	1.60	0.57	3.10
8	0.368	2.13	1.01	3.72

표 3. 2차원 및 3차원 편경사 분석결과

지점	편 경 사	
	2차원 모의결과	3차원 모의결과
1	0.0014	0.0017
2	0.0023	0.0013
3	0.0064	0.0062
4	0.0091	0.004
5	0.0036	0.002
6	0.0033	0.0017
7	0.0157	0.0059
8	0.0153	0.0096

5. 결과

곡률반경이 1,300~1,600 정도인 실제하천에 적용한 결과, 수위의 경우 2차원 결과가 3차원 결과보다 최대 3%정도 수위가 높은 것으로 나타났다. 만곡부 정점에서의 종단유속은 오히려 감소하지만 횡단유속은 오히려 크게 증가하는 경향을 보이고 있다. 따라서, 하천설계시 사행하천의 제방 안정성 확보를 위하여 종단유속 뿐만 아니라 횡단유속을 고려할 필요가 있다. 실험하도와 자연하천에 대한 2차류 거동 분석결과, 수표면 부근에서는 흐름이 내측에서 외측으로, 수심 하단부에서는 외측에서 내측으로 이동하며 순환하는 2차류(secondary flow) 흐름이 발생하고 있음을 알 수 있었다. 그리고 제방 외측의 수위가 평균수위에 비하여 최대 약 37cm 정도 증가하고 내외측의 차는 최대 64cm 정도 발생하는 것으로 분석되었다. 또한, 만곡부 시점에서 발생하는 횡파는 하류에까지 영향을 미치므로 만곡뿐만 아니라 상당히 떨어진 거리의 하류에 대해서도 편수위의 크기를 고려하여 제방고 설계하여야 할 것으로 판단된다. 따라서, 향후 만곡부를 가진 하천에 대한 제방 설계시 좌, 우안의 여유고를 일률적으로 적용하기 보다는 만곡부 흐름특성을 분석한 후 설계하여야 안정성 및 경제성을 동시에 확보할 수 있을 것으로 사료된다.

감 사 의 글

이 연구는 소방방재청 자연재해저감기술개발사업(NEMA-09-NH-01) 연구비 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 국토해양부 부산지방국토관리청(2009). 남강하천기본계획
2. 백창현(2004). “하천흐름해석을 위한 3차원 상향가중 유한요소모형의 개발.” 공학박사 학위논문, 경북대학교
3. 윤세의(1986). “수심이 얕은 고정상 만곡수로에서의 흐름특성 해석.” 공학박사 학위논문, 연세대학교
4. Silva A.M.F.(2001). Fluvial Process. International Association of Hydraulic Engineering Research