

댐 하류 만곡부 하천에 대한 수리학적 특성 연구

A Study on Hydraulic Characteristics of the Curved Channel in the Downstream of Dam

최 한 규* 백 호 선** 이 계 윤***
Choi, Han-Kyu Beak, Hyo-Seon Lee, Kye-Yun

Abstract

In order to accurately analyze the detailed hydraulic characteristics of the curved channel in the downstream of dam with the hydraulic structures such as bridge piers, RMA2 model which is one of two-dimensional models is applied to ChunCheon dam downstream curved channel. A series of hydraulic model tests are carried out for comparison studies. HEC-RAS model is also applied to the same site. There are no errors when velocities and water levels resulted from HEC-RAS model RMA2 model are compared with those of hydraulic model test on the straight channel. But, it is found that results of RMA2 model have a better agreement with those of hydraulic model test than those of HEC-RAS model on the curved channel with bridge piers. Additionally, RMA2 model can be predicted the eddy phenomena around bridge piers of the curved channel.

키워드 : 만곡부 하천, 교각, 수리모형실험, RMA2모형

Keywords : *curved channel, bridge piers, hydraulic model test, RMA2 model*

1. 서론

1.1 연구의 배경 및 목적

하천에는 교량, 댐, 보 등 다양한 수공구조물이 설치된다. 이러한 구조물은 최근까지 구조물의 경제적인 효과보다는 최소 비용으로 설치될 수 있는 방향으로 계획되었으나 최근에는 경제발전과 더불어 지형적인 여건과는 상관없이 이용자의 편의를 우선시하는 계획이 이루어지고 있는 추세이다.

이러한 경향에 따라서 수공구조물 설치를 위한 수리학적 특성을 해석하기 위한 방법이 점차적으로 고도화되고 정교해지고 있는 실정이다.

과거의 수공구조물 해석은 단순한 홍수위와 유속 등을 고려한 1차원적인 평면적 해석이나 수리모형실험을 통한 축소된 현상을 관찰하는 것에 국한되어 정확한 해석결과를 도출하기 힘들었다. 그러나 수치해석을 위한 여러 기법들이 개발되면서 여러 특수한 경우의 수공구조물의 해석이 가능하게 되었다. 이러한 일반적인 수치해석기법을 보면 국내의 경우 보편적으로 1차원 점변부정류 수치해석프로그램인 HEC-RAS 모형이 사용되었다. 그러나 하천의 국부적 흐름 변화특성 해석, 2차원 수질 오염해석 및 하상변동해석과 같은 정교한 흐름해석을 요구할 때에는 1차원 수치모형 적용이 어렵기 때문에 2차원 이상의 수치모형 적용 필요성이 제기되면서 2차원 모형인 미육군공병단의 SMS모형, 프랑스 EDF의 TELEMAC-2D모형, 덴마크 DHI의 MIKE2I모형, 미시시피대학의 CCHE2D모형, 영국 수리연구소의 FLOUT모형 등이 국내에 소개되어 적용되기 시작하였다.

* 강원대학교 토목공학과 교수, 공학박사

** 강원대학교 토목공학과 박사수료

*** 강원대학교 토목공학과 석사과정

이러한 2차원 해석모형 중 SMS모형을 본 연구에 적용하였다. SMS모형은 2차원 수리학적 현상을 모의하기 위한 전 처리 과정에 입력되는 자료 구축과 계산수행의 용이함, 그리고 해석결과와 출력을 표현하는데 있어서 사용자에게 편리한 기능을 가지고 있는 GUI환경을 제공하고 있다. 적용된 SMS 프로그램에서는 계산수행을 위한 전 처리단계인 GFGEN, 하천의 동수 역학적 흐름해석을 위한 RMA2, 오염물질의 거동해석을 위한 RMA4, 토사입자의 이동양상과 하상의 변화를 해석하는 SED2D의 프로그램으로 나누어진다. 이러한 여러 기능을 수행할 수 있는 장점과 자료입력의 편리성으로 인하여 최근 국내에서 여러 사례에 관한 연구 발표가 지속적으로 이루어지고 있는 실정이다.

본 연구는 일반적인 하천의 흐름이 아닌 댐의 인위적인 방류에 따른 하류의 수공구조물 즉 하천교각의 수리학적 특성을 RMA2모형을 이용한 해석을 실시하여 그 신뢰성을 모형실험과 비교함으로써 그 적용성의 범위와 한계를 검증하고자 한다.

2. 이론적 배경

2.1 RMA2모형의 주요 기능 및 특성

RMA2는 2차원 수리동력학적해석을 위한 중심평면, 자유수면, 유한요소모델이다. 교각신설 및 압거에 따른 수리영향, 수로망, 사행하천해석, 항구, 만, 하구, 습지, 불규칙한 홍수터에서의 흐름, 흐름분리 및 다른 복잡한 흐름에 대한 해석이 가능하다. 흐름의 경계 및 유한요소망의 각각의 절점에 대하여, 수위, 유속, 오염물질농도, 세굴 및 퇴적 등을 계산한다. 하상에 의한 마찰, 바람, 난류, 지구자전력 등의 효과도 고려할 수 있다. 유속분리 및 와류 또한 정확히 모의될 수 있다. 정상류 및 부정류 모두에 대하여 해를 구할 수 있으며, 부정류 모의 결과는 유입유량곡선에 따른 흐름의 요동, 조류의 영향, 해일 등을 해석하는데 쓰인다. 상류-사류가 혼합된 흐름영역에 대해서, 도수(hydraulic jump)가 발생하는 지점을 자동으로 결정해줄 수도 한다.

2.2 지배방정식

2차원 흐름해석을 위한 지배방정식으로 수심 적분된 질량보존법칙과 운동량보존법칙으로부터 유도된 2차원 천수방정식(shallow water equation)이 사용된다. 이는 난류 특성을 표현하는 Reynolds 형태로 표시되며, 비압축성, 균질유체에 대한 Navier-Stokes식을 tensor형으로 기술하면 연속방정식과 운동방정식은 각각 다음 식(1) 및 (2)와 같이 기술된다.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = g_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad \dots\dots\dots(2)$$

여기서, x_i = Cartesian 좌표계, u_i = 속도성분, ρ = 유체밀도, t = 시간, p = 압력, μ = 점성계수, g_i = 중력가속도 tensor (0, 0, -g)

2.3 RMA2모형의 구성

RMA2 모형은 SMS, GFGEN, RMA2 등 크게 3가지 공정으로 구성되며, 이를 정리하면 다음과 같다. 도면 또는 측량에 의해서 얻은 지형 자료를 이용하여 SMS 전처리 프로그램으로 격자망을 구성하고 ASCII 파일을 생성한다. 생성된 ASCII 파일을 GFGEN 프로그램을 이용하여 Binary 파일로 변환한다. RMA2 모형에서는 이렇게 변환된 Binary파일을 이용하여 지형 정보를 얻고 경계조건과 적절한 제어변수를 적용하여 수치해석을 수행한다. 이상과 같은 과정으로 계산된 해는 SMS 후처리 프로그램을 통하여 도시된다.

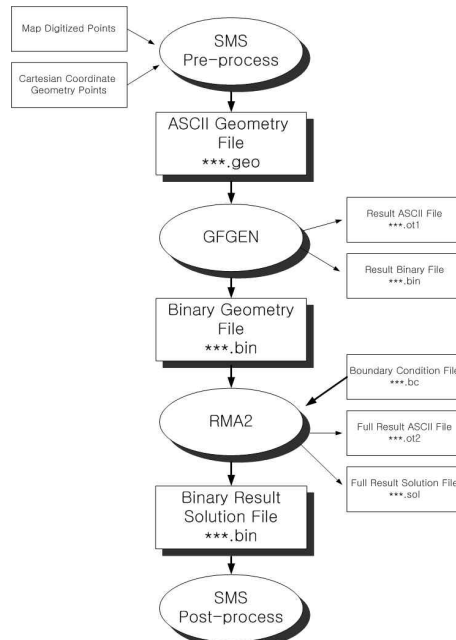


그림 1 RMA2 모형의 수행 흐름도

2.4 상사법칙

2.4.1 왜곡모형

축척이 매우 작은 모형의 경우 모형에서의 유속이 너무 작아지기 때문에 정확한 유속측정이 어려우며, 모형에서의 흐름이 층류가 되어 원형에서의 흐름상태와 상사성을 유지하기 힘들게 된다. 이러한 경우에 연직축척 Y_r 이 수평축척 X_r 보다 큰 왜곡모형을 사용하여 상기 문제점을 해결한다. 왜곡모형에서 경사축척 $S_r = Y_r / X_r$ 이며, 이 관계식을 Manning형의 평균 유속공식에 대입하면 다음 식(3)과 같다.

$$U_r = \frac{1}{n_r} R_r^{2/3} \left(\frac{Y_r}{X_r} \right)^{1/2} \dots\dots\dots(3)$$

왜곡 모형에서 속도는 중력에 의해 결정되므로 Froude 상사법칙에서 L_r 대신 Y_r 을 사용한다.

$$U_r = Y_r^{1/2} \dots\dots\dots(4)$$

위 식(3)으로부터 모형의 조도축척을 구하면 다음과 같다.

$$n_r = \frac{R_r^{2/3}}{X_r^{1/2}} \dots\dots\dots(5)$$

왜곡모형에서의 유량축척은 다음과 같다.

$$Q_r = A_r U_r = X_r Y_r^{3/2} \dots\dots\dots(6)$$

왜곡모형에서 왜곡도는 수평축척과 연직축척의 비를 나타내는 것으로 너무 크지 않아야 한다. 미국의 내무부 개척국에서 출간한 수리모형실험지침서(USBR, 1984)에서는 왜곡도를 2~7범위에서 조정하도록 권장하고 있다. 만약 왜곡도가 지나치게 큰 경우에는 하천사행부의 흐름과 같은 곡선흐름에서 유속 및 압력분포를 심각하게 변형시킬 우려가 있다.

3. 수리모형실험

3.1 연구대상 하천과 실험 유량

연구대상 하천은 북한강의 춘천댐에서부터 하류로 약 2km지점까지이며, 기본계획상의 측정번호는 No.166부터 No.169+350까지로 본 구간을 연구대상으로 하였다. 본 연구대상 하천의 실험유량은 「북한강 수계 하천정비기본계획, 2002」에 제시되어진 값을 사용하였고, 춘천댐의 홍수조절을 고려하여 산정된 홍수량을 기준으로 채택된 설계빈도 200년

에 해당되는 계획홍수량 11100CMS를 기준으로 본 실험을 실시하였다.

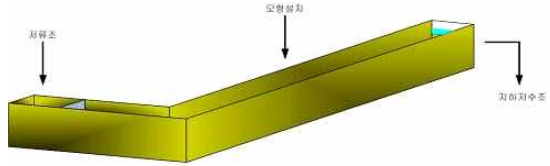


그림 2 모형설치 계략도

3.2 하천모형실험

본 연구에서는 하천의 X방향 200, Y방향 100의 왜곡 축척을 사용한 모형으로 제작하여 실험하였다. 이에 따른 유속비는 앞장에서 설명한 이론에 의해 10값을 얻었고, 조도계수비는 0.96값, 유량비는 200000값을 얻었다.

$$X_r = B_r = P_r = 200$$

$$Y_r = H_r = 100$$

$$V_r = \sqrt{Y_r} = 10$$

$$n_r = \frac{R_r^{2/3}}{X_r^{1/2}} = \left(\frac{X_r Y_r}{X_r + 2Y_r} \right)^{2/3} \cdot \frac{1}{\sqrt{X_r}} = 0.96$$

$$Q_r = A_r U_r = X_r Y_r^{3/2} = 200000$$



그림 3 모형제작과정과 실험과정

3.3 모형실험의 결과

표 1 구간별 유속측정성과 단위(m/s)

측선	구간	구간별 유속					6구간 좌안
		1구간 우안	2구간	3구간	4구간	5구간	
No.169+350		5.12	6.15	6.21	6.12		
No.169+346		5.32	6.18	6.27	6.25		
No.169+300		5.65	6.21	6.23	4.56		
No.169+250		4.98	6.04	6.07	4.67		
No.169+200		3.28	5.85	6.03	5.52	2.10	

<표1 계속>

No.169+150	3.12	5.98	5.75	5.59	3.12	
No.169+100	3.07	5.85	5.81	5.37	3.51	
No.169+050	3.21	5.92	6.02	5.66	3.22	
No.169+000	3.27	5.71	6.26	5.87	3.85	
No.168+495	2.85	5.63	6.46	5.40	3.22	
No.168+440	3.21	5.58	6.24	5.02	2.55	
No.168+385	3.12	5.79	6.13	4.87	2.04	
No.168+330	2.55	5.77	5.90	4.78	1.75	
No.168+275	2.54	5.81	5.78	4.57	1.79	
No.168+220	3.00	5.62	5.40	4.66	1.52	
No.168+165	2.32	5.68	5.35	4.45	1.85	
No.168+110	2.18	5.63	5.40	4.31	2.33	
No.168+055	2.21	5.55	5.41	4.35	2.13	
No.168+000	2.36	5.21	5.24	4.41	2.25	
No.167+480	2.37	5.38	5.14	4.21	2.16	
No.167+420	2.97	5.41	5.14	4.13	1.85	
No.167+360	2.96	5.27	5.02	4.10	2.22	
No.167+300	3.09	5.12	4.85	4.01	2.15	
No.167+240	2.74	4.98	4.69	3.85	2.11	
No.167+180	2.68	4.87	4.75	3.75	2.14	
No.167+120	3.25	4.97	4.48	3.85	2.32	1.92
No.167+060	3.16	4.85	4.55	4.11	1.95	1.55
No.167+000	2.64	4.78	4.39	3.88	3.02	1.99
No.166+440	2.35	4.48	4.52	3.85	3.03	1.80
No.166+380	2.52	4.52	4.46	3.95	3.57	1.85
No.166+320	2.65	4.55	4.25	3.81	3.12	1.98
No.166+260	2.84	4.51	4.16	3.85	3.52	2.16
No.166+200	3.15	4.38	4.38	4.05	2.85	2.03
No.166+140	3.11	4.25	4.60	4.15	3.32	2.12
No.166+080	2.78	4.32	4.33	4.10	3.85	2.11
No.166+000	2.84	4.28	4.22	4.14	3.85	2.24

표 2 구간별 수위 측정성과 단위(m)

측선	구간					
	1구간 우안	2구간	3구간	4구간	5구간	6구간 좌안
No.169+350	84.20	83.90	83.57	83.10		
No.169+346	84.20	83.85	83.35	82.55		
No.169+300	83.85	83.65	83.05	82.65		
No.169+250	83.90	83.50	83.15	82.65		
No.169+200	84.00	83.70	83.25	82.85	82.70	
No.169+150	84.05	83.70	83.35	82.70	82.60	
No.169+100	83.95	83.60	83.30	82.70	82.50	
No.169+050	83.85	83.50	83.20	82.60	82.35	
No.169+000	83.80	83.40	83.05	82.60	82.25	
No.168+495	83.70	83.35	83.10	82.50	82.10	
No.168+440	83.60	83.20	82.80	82.60	82.10	
No.168+385	83.50	83.15	82.85	82.60	82.20	
No.168+330	83.30	83.05	82.70	82.50	82.20	
No.168+275	83.15	82.80	82.70	82.55	82.25	
No.168+220	83.10	82.80	82.50	82.45	82.20	
No.168+165	82.90	82.70	82.50	82.35	82.25	

<표2 계속>

No.168+110	82.85	82.75	82.45	82.30	82.15	
No.168+055	82.80	82.50	82.40	82.20	82.15	
No.168+000	82.55	82.40	82.35	82.15	82.10	
No.167+480	82.70	82.40	82.30	82.10	82.05	
No.167+420	82.65	82.35	82.20	82.15	82.00	
No.167+360	82.60	82.45	82.10	82.05	82.00	
No.167+300	82.30	82.25	82.15	82.10	82.00	
No.167+240	82.35	82.30	82.15	82.15	82.05	
No.167+180	82.10	82.10	82.10	82.00	81.95	
No.167+120	82.10	82.05	82.10	81.85	81.90	81.90
No.167+060	82.05	82.05	82.00	81.90	81.90	81.90
No.167+000	82.00	82.00	81.90	81.90	81.85	81.85
No.166+440	81.90	81.90	81.85	81.85	81.85	81.75
No.166+380	81.80	81.80	81.75	81.80	81.80	81.70
No.166+320	81.85	81.70	81.70	81.80	81.85	81.70
No.166+260	81.80	81.70	81.65	81.60	81.60	81.55
No.166+200	81.70	81.60	81.60	81.55	81.55	81.60
No.166+140	81.60	81.50	81.50	81.45	81.55	81.60
No.166+080	81.50	81.45	81.45	81.40	81.45	81.45
No.166+000	81.40	81.35	81.35	81.35	81.20	81.25

표 3 교각부 유속, 수위 측정성과

교각번호	유속 (m/s)	수위 (m)
1	1.65	82.65
2	1.58	82.75
3	1.56	82.85
4	1.52	82.85
5	1.28	82.90
6	1.25	82.95
7	1.35	83.00
8	1.62	83.10
9	1.88	83.10
10	1.92	83.15
11	1.86	83.30
12	1.54	83.35
13	1.49	83.40
14	2.15	83.50
15	2.31	83.65
16	2.57	83.65
17	2.85	83.70
18	3.15	83.95
19	3.11	83.90
20	3.05	83.95
21	2.54	83.90
22	2.84	83.95
23	2.67	84.00
24	2.45	84.10
25	2.18	84.15
26	1.82	84.05
27	1.95	84.00

<표3 계속>

28	1.85	83.95
29	1.35	83.90

4. 수치해석

4.1 1차원 해석(HEC-RAS모형 해석결과)

Steady Flow Data에 계획홍수량 11100CMS의 유량자료를 입력하여 다음과 같은 결과를 도출하였다.

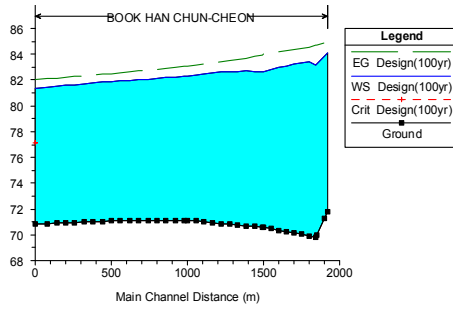


그림 4 HEC-RAS모형의 홍수위 종단

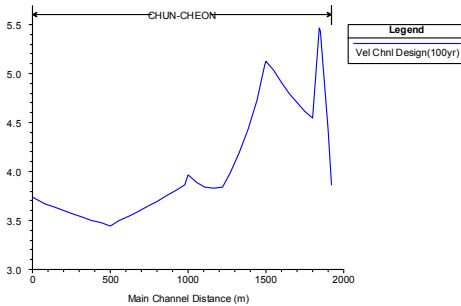
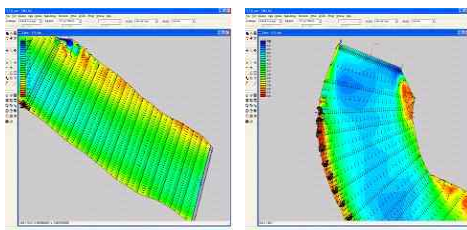


그림 5 HEC-RAS모형의 유속분포도

4.2 2차원 해석(RMA2모형 해석결과)



상류 하류
 그림 6 유속 vector도

위와 같이 유속의 흐름 방향에 대하여 교각부근에서의 Vector 방향을 살펴보면 와류가 형성된다

는 것을 알 수 있다.

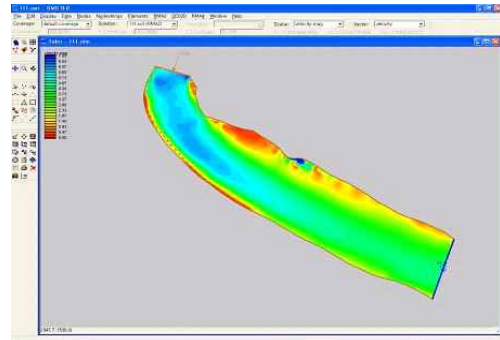


그림 7 유속 분포도

유속의 분포를 보면 춘천댐에서 방류하는 직하류 부분에 대해서 상당히 높은 유속이 발생한다는 것을 알 수 있고, 교각부나 우안에 형성된 산과 좌안의 비교적 높은 지대에서의 유속은 현저히 작게 나타난 것을 알 수 있다. 그리고 하류로 내려갈수록 우안에서 좌안의 유속 분포가 일정해짐이 나타났다.

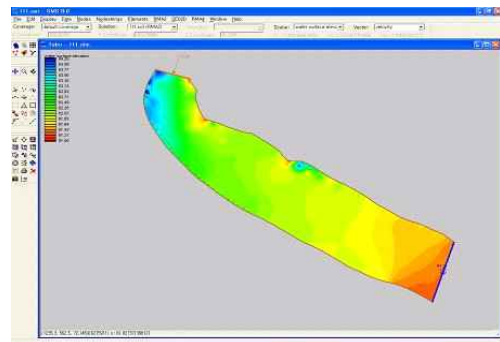
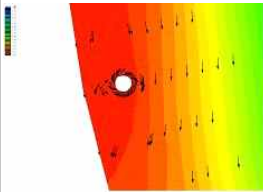
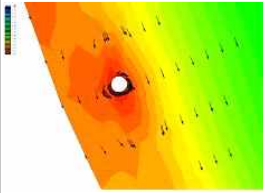
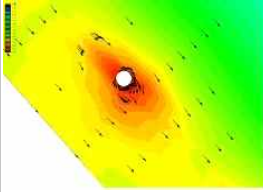
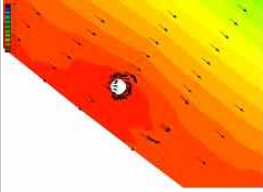


그림 8 수위 분포도

표 4는 주요 교각에 있어서 유속 Vector도와 분포도, 유속범위, 수위범위를 나타내었다.

표 4 주요 교각의 특성

교각 번호	교각부 유속 Vector도와 분포도	유속 범위 (m/s)	수위 범위 (m)
26		0.01 ~ 0.24	83.66 ~ 83.85
24		0.07 ~ 0.95	83.64 ~ 83.92
17		0.06 ~ 1.63	82.24 ~ 83.45
6		0.01 ~ 0.44	82.13 ~ 82.56

5. 결과 분석

5.1 유속 비교분석

No.168+275~No.169+300 측선구간은 본 연구대 상지점 중 만곡부에 해당되는 지점으로서 중점적으로 연구하였다.

각 측선에 대하여 해석방법별로 유속을 비교한 결과 표 5와 같았으며, 상류부의 만곡부가 시작하는 No.169+300지점과 No.169+250지점에서 모형실험 유속값과 수치해석값의 오차가 가장 크게 발생하였다. 두 수치모형과 모형실험과의 평균오차를 확인한 결과 RMA2모형의 평균오차가 0.17이고, HEC-RAS모형의 평균오차는 0.37로 RMA2모형이 전반적으로 더 작은 오차를 보였다.

표 5 해석방법별 유속비교 단위(m/s)

측선	유속	실험 평균 유속	RMA 2 평균 유속	HEC -RAS 유속	실험 평균 유속 - RMA 2 평균 유속	실험 평균 유속 - HEC -RAS 유속	RMA 2 평균 유속 - HEC -RAS 유속
No.169+350	5.91	5.62	5.43	0.29	0.48	-0.19	
No.169+346	6.01	5.85	5.47	0.16	0.54	-0.38	
No.169+300	5.72	5.20	4.55	0.51	1.17	-0.65	
No.169+250	5.58	5.06	4.62	0.52	0.96	-0.44	
No.169+200	4.87	4.82	4.70	0.05	0.17	-0.12	
No.169+150	5.03	4.79	4.80	0.25	0.23	0.01	
No.169+100	4.93	4.87	4.91	0.06	0.02	0.04	
No.169+050	5.01	4.95	5.03	0.06	-0.02	0.08	
No.169+000	5.11	5.04	5.13	0.07	-0.02	0.09	
No.168+495	4.93	4.96	5.09	-0.03	-0.16	0.13	
No.168+440	4.79	4.76	4.72	0.04	0.07	-0.04	
No.168+385	4.77	4.57	4.43	0.20	0.34	-0.14	
No.168+330	4.60	4.47	4.19	0.13	0.41	-0.28	
No.168+275	4.54	4.37	3.99	0.16	0.55	-0.38	
No.168+220	4.41	4.36	3.84	0.05	0.57	-0.52	
No.168+165	4.32	4.24	3.82	0.08	0.50	-0.42	
No.168+110	4.29	4.09	3.84	0.19	0.45	-0.25	
No.168+055	4.22	4.05	3.88	0.18	0.34	-0.17	
No.168+000	4.12	4.03	3.97	0.10	0.15	-0.06	
No.167+480	4.09	4.00	3.87	0.09	0.22	-0.13	
No.167+420	4.15	4.00	3.81	0.14	0.34	-0.19	
No.167+360	4.12	3.98	3.75	0.14	0.37	-0.23	
No.167+300	4.03	3.92	3.70	0.11	0.33	-0.22	
No.167+240	3.85	3.86	3.64	0.00	0.21	-0.22	
No.167+180	3.79	3.73	3.59	0.06	0.20	-0.14	
No.167+120	3.65	3.61	3.54	0.04	0.11	-0.07	
No.167+060	3.57	3.57	3.49	0.00	0.08	-0.08	
No.167+000	3.63	3.48	3.45	0.14	0.18	-0.03	
No.166+440	3.52	3.46	3.47	0.06	0.05	0.01	
No.166+380	3.64	3.48	3.50	0.16	0.14	0.02	
No.166+320	3.53	3.50	3.53	0.03	0.00	0.03	
No.166+260	3.64	3.49	3.56	0.16	0.08	0.07	
No.166+200	3.60	3.58	3.60	0.02	0.00	0.02	
No.166+140	3.70	3.55	3.63	0.15	0.07	0.08	
No.166+080	3.71	3.62	3.68	0.09	0.03	0.06	
No.166+000	3.84	3.73	3.73	0.10	0.11	0.00	
SSE				1.07	5.00	1.89	
평균오차				0.17	0.37	0.23	

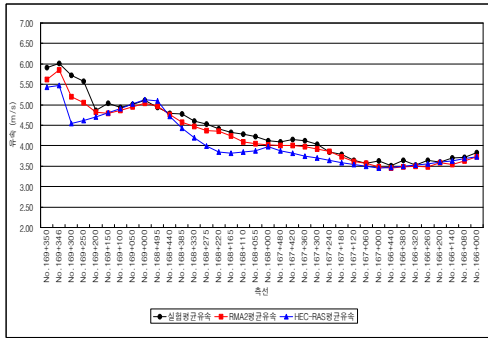


그림 9 해석방법별 유속비교 분포도

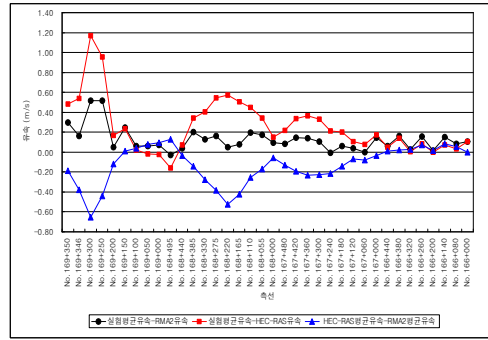


그림 11 해석방법별 유속 편차분포도

그림 9는 표 5에 대한 분포를 나타낸 그림이다. 전반적으로 하류부분에서 두 수치모형과 모형실험의 유속이 비슷한 경향을 나타내지만 상류부에서는 편차가 크게 발생함을 확인 할 수 있다.

그림 10은 대표적인 측선에 대하여 좌안에서 우안까지 일정한 구간으로 나누어 해석방법별로 유속을 비교한 그림이다. 그림에서 보는 바와 같이 모형실험평균유속과 RMA2모형의 평균유속이 대체로 유사한 값을 나타내고 있으나 HEC-RAS모형은 각 구간별로 유속의 변화를 반영하지 못함으로써 각 구간별로 편차가 크게 발생함을 확인할 수 있었다.

그림 11은 해석방법별 유속 편차분포를 나타내는 그림으로 각 방법별 유속의 편차를 시각적으로 확인하여 보았다. 그림에서 보는 바와 같이 모형실험과의 유속에 대한 편차가 작게 발생하는 해석방법이 RMA2모형임을 알 수 있다.

5.2 수위 비교분석

각 측선에 대하여 해석방법별로 수위를 비교한 결과 <표 5.6>와 같았으며, 모형실험과 두 수치모형과의 비교에서 만곡부인 상류부에서의 오차가 직선부인 하류부의 오차보다 크게 나타났다. 또한 두 수치모형과 모형실험과의 평균오차를 확인한 결과 RMA2모형의 평균오차가 0.35이고, HEC-RAS모형의 평균오차는 0.16로 HEC-RAS모형이 더 작은 오차를 보였다.

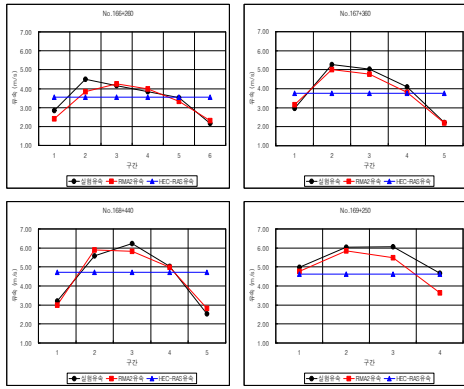


그림 10 주요 측선별 구간유속비교 분포도

표 6 해석방법별 수위비교

측선	수위 실험 평균 수위	RMA 2 평균 수위	HEC- RAS 수위	실험 평균 수위 - RMA 2 평균 수위		실험 평균 수위 - HEC- RAS 수위		RMA 2 평균 수위 - HEC- RAS 수위
				0.62	0.47	0.30	0.15	
No.169+350	83.69	83.07	83.22	0.62	0.47	0.15		
No.169+346	83.49	82.99	83.19	0.50	0.30	0.20		
No.169+300	83.30	82.77	83.45	0.53	-0.15	0.68		
No.169+250	83.30	82.87	83.35	0.43	-0.05	0.48		
No.169+200	83.30	82.99	83.23	0.31	0.07	0.24		
No.169+150	83.28	82.93	83.10	0.35	0.18	0.17		
No.169+100	83.21	82.80	82.95	0.41	0.26	0.15		
No.169+050	83.10	82.59	82.80	0.51	0.30	0.21		
No.169+000	83.02	82.38	82.64	0.64	0.38	0.26		
No.168+495	82.95	82.35	82.65	0.60	0.30	0.30		
No.168+440	82.86	82.39	82.68	0.47	0.18	0.29		

<표6 계속>

No.168+385	82.86	82.26	82.68	0.60	0.18	0.42
No.168+330	82.75	82.25	82.68	0.50	0.07	0.43
No.168+275	82.69	82.24	82.67	0.45	0.02	0.43
No.168+220	82.61	82.18	82.65	0.43	-0.04	0.47
No.168+165	82.54	82.18	82.58	0.36	-0.04	0.40
No.168+110	82.50	82.17	82.51	0.33	-0.01	0.34
No.168+055	82.41	82.12	82.42	0.29	-0.01	0.30
No.168+000	82.31	82.06	82.30	0.25	0.01	0.24
No.167+480	82.31	82.05	82.30	0.26	0.01	0.25
No.167+420	82.27	82.03	82.24	0.24	0.03	0.21
No.167+360	82.24	81.99	82.19	0.25	0.05	0.20
No.167+300	82.16	81.98	82.13	0.18	0.03	0.15
No.167+240	82.20	81.96	82.08	0.24	0.12	0.12
No.167+180	82.05	81.95	82.03	0.10	0.02	0.08
No.167+120	81.98	81.89	81.98	0.09	0.00	0.09
No.167+060	81.97	81.87	81.94	0.10	0.03	0.08
No.167+000	81.92	81.85	81.90	0.07	0.02	0.05
No.166+440	81.85	81.82	81.83	0.03	0.02	0.01
No.166+380	81.78	81.77	81.77	0.00	0.01	0.00
No.166+320	81.77	81.72	81.70	0.05	0.07	-0.02
No.166+260	81.65	81.66	81.64	-0.01	0.01	-0.02
No.166+200	81.60	81.55	81.57	0.05	0.03	0.02
No.166+140	81.53	81.48	81.49	0.06	0.04	0.01
No.166+080	81.45	81.41	81.42	0.04	0.03	0.01
No.166+000	81.32	81.30	81.31	0.01	0.01	0.01
SSE				4.46	0.87	2.56
평균오차				0.35	0.16	0.27

그림 12는 각 방법별로 수위 자료값을 도시화 한 것으로 그림에서 보는 바와 같이 만족부의 수로에서는 실험과 각 방법별로 차이가 발생하고 있으나 직선부의 하류부분은 각 방법에서 차이가 작게 발생함을 확인 할 수 있었다.

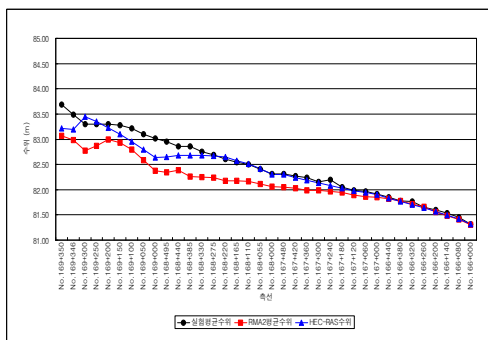


그림 12 해석방법별 수위비교 분포도

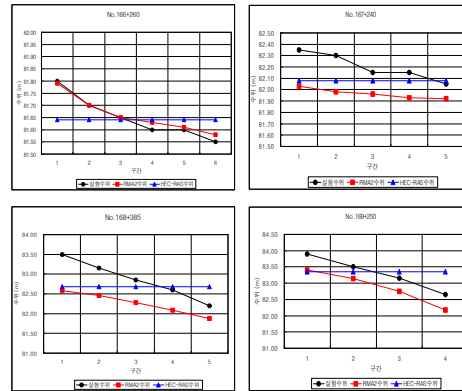


그림 13 주요 측선별 구간수위비교 분포도

그림 13은 대표적인 측선에 대하여 좌안에서 우안까지 일정한 구간으로 나누어 해석방법별로 수위를 비교한 그림이다. 그림에서 보는 바와 같이 모형실험평균수위와 RMA2모형의 평균수위는 유사한 경향은 보이고 있지만 상대적으로 RMA2모형의 수치가 작게 나타나는 현상을 관찰할 수 있었다.

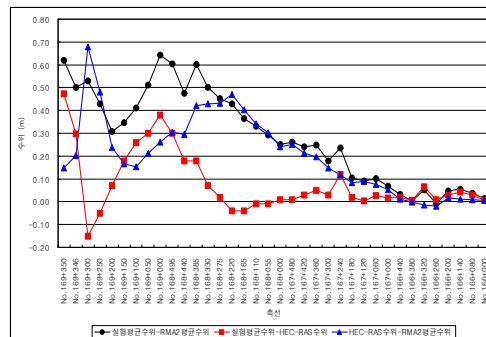


그림 14 해석방법별 수위 편차분포도

그림 14는 해석방법별 수위 편차분포를 도시화 한 것으로 앞서 비교한 유속과는 상이하게 수위에 대한 편차가 RMA2모형에서 더 크게 실험값과 차이가 발생함을 나타내고 있다. 그러나 실제 모형실험에서 측정되는 장비의 오차 등을 고려할 때 유속의 정밀하게 측정할 수 있는 다방향 전자유속계를 사용한 반면에 수위는 숫자가 적혀있는 포인트 게이지로 사람의 육안에 의하여 측정됨으로 하천 모형의 축척 등을 고려할 때 전체 측점에 대한 비교보다는 국부적으로 구조물이 설치되는 측정점의 수위 오차가 얼마나 발생하는 지가 더 중요한 항목이라고 하겠다. 따라서 각 측선에 대한 구간별 오차를 확인한 결과 다음 표 및 그림과 같은 결과를 확인할 수 있었다.

5.3 교각부의 비교분석

본 연구에서 중점적으로 분석을 실시한 교각부에 대한 결과를 보면 다음 표 및 그림과 같은 결과를 확인 할 수 있었다.

표 7 해석방법별 교각부 유속

교각 번호	수리모형실험 유속 (m/s)	RMA2 유속 (m/s)	HEC-RAS 유속 (m/s)
1	1.65	0.88	3.97
2	1.58	0.79	3.88
3	1.56	0.72	3.88
4	1.52	0.58	3.84
5	1.28	0.36	3.84
6	1.25	0.44	3.82
7	1.35	0.41	3.82
8	1.62	0.61	3.84
9	1.88	0.87	3.84
10	1.92	0.85	3.99
11	1.86	0.59	3.99
12	1.54	0.44	4.19
13	1.49	0.53	4.19
14	2.15	1.33	4.43
15	2.31	1.45	4.43
16	2.57	1.70	4.72
17	2.85	1.63	5.09
18	3.15	1.63	5.13
19	3.11	1.32	5.13
20	3.05	1.66	5.03
21	2.54	1.99	5.03
22	2.84	1.59	4.91
23	2.67	1.15	4.91
24	2.45	0.95	4.8
25	2.18	0.69	4.8
26	1.82	0.24	4.7
27	1.95	0.21	4.7
28	1.85	0.39	4.62
29	1.35	2.27	4.62

그림 15에서 보는 바와 같이 각 교각별 유속의 편차는 HEC-RAS모형이 교각부의 유속을 과하게 산정하고 있는 것으로 보여주고 있으며, RAM2모형은 실험값보다 작은 값을 나타내는 경향을 보여 주었다. 이는 RMA2모형에서 교각부의 와류로 인하여 유속이 상당히 감소하는 것으로 유속분포경향을 보여주었으며, 실제의 와류에 대한 발생경향을 보여줌으로써 하부기초의 안정성에 영향을 주는 세굴에 대한 측면을 부각시켜 주어 하부기초의 안정성 검토에서 필요한 와류의 발생 경향을 확인할 수 있다는 점에서 RMA2모형의 유속이 HEC-RAS모형이나 모형실험보다는 작게 산정되나 이러한 요소들은 모형실험과 HEC-RAS모형에서는 확인하기 힘든 점이므로 자료의 제공수준에서는 RMA2모형이 더 구체적이라는 것을 확인 할 수 있었다.

표 8 해석방법별 교각부 수위

교각 번호	수리모형실험 수위 (m)	RMA2 수위 (m)	HEC-RAS 수위 (m)
1	82.65	82.37	82.30
2	82.75	82.34	82.42
3	82.85	82.33	82.42
4	82.85	82.43	82.51
5	82.90	82.41	82.51
6	82.95	82.56	82.58
7	83.00	82.43	82.58
8	83.10	82.29	82.65
9	83.10	82.42	82.65
10	83.15	82.50	82.67
11	83.30	82.49	82.67
12	83.35	82.71	82.68
13	83.40	83.17	82.68
14	83.50	82.69	82.68
15	83.65	82.85	82.68
16	83.65	83.34	82.68
17	83.70	83.45	82.65
18	83.95	84.72	82.64
19	83.90	83.83	82.64
20	83.95	83.44	82.80
21	83.90	84.43	82.80
22	83.95	83.76	82.95
23	84.00	83.79	82.95
24	84.10	83.89	83.10
25	84.15	84.11	83.10
26	84.05	83.78	83.23
27	84.00	83.63	83.23
28	83.95	83.37	83.35
29	83.90	84.34	83.35

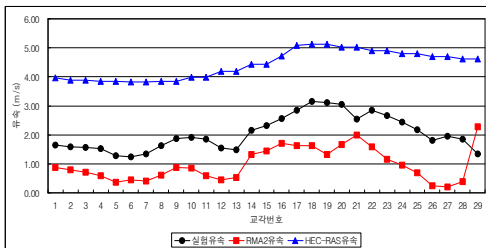


그림 15 해석방법별 교각부 유속분포도

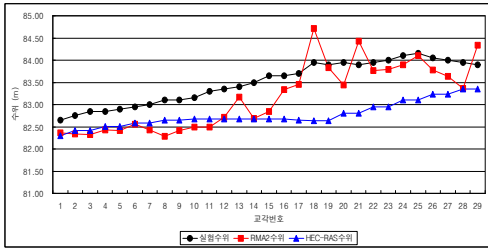


그림 16 해석방법별 교각부 수위분포도

그림 16은 각 교각별 수위 결과로 그림에서 보는 바와 같이 HEC-RAS모형은 교각부의 수위를 RMA2모형보다 더 작게 산정하고 있음을 쉽게 확인할 수 있다. 이는 상부 슬라브에 대한 교량의 형하공간을 수위에 대하여 여유고를 감안하여 산정한다는 면에서 수위가 작게 산정됨으로써 여유고 실제보다는 더 작다는 것을 의미한다고 하겠다. 특히 상류 만곡부의 경우 HEC-RAS모형의 수위는 편차가 더 크게 발생하는 반면에 RMA2모형은 모형실험값과의 편차가 줄어드는 경향을 보여서 1차원모형과 2차원모형의 차이를 극명하게 보여주고 있었다.

5.4 해석방법별 통계학적 검정

5.4.1 유속에 대한 통계학적 검정

앞 절에서는 표와 그림으로 각 해석방법별 특성을 파악하였으나 본 절에서는 구체적인 통계 값으로 각 방법별 차이점을 확인하여 보았다. 일반적인 통계량은 <표 5.1>과 같으며 각 방법별로 단순 상관분석을 실시하여 보았다. 실험자료 값에 대하여 RMA2모형이 유속에 대하여 상관성이 가장 크게 나타남을 확인할 수 있었다.

표 9 모형실험-수치해석 통계분석(유속)

	비교대상	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
Pair 1	실험평균유속	36	4.1514	0.73608	0.12268
	RMA2평균유속	36	4.2406	0.66161	0.11027
Pair 2	실험평균유속	36	4.1514	0.73608	0.12268
	HEC-RAS유속	36	4.1097	0.62052	0.10342
Pair 3	RMA2평균유속	36	4.2406	0.66161	0.11027
	HEC-RAS유속	36	4.1097	0.62052	0.10342

표 10 모형실험-수치해석 상관분석(유속)

	N	Correlation
Pair 1	36	0.974
Pair 2	36	0.923
Pair 3	36	0.958

표 11 전구간 모형실험-수치해석 통계분석(유속)

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
실험평균유속-RMA2평균유속	36	-0.0883	0.17598	0.02933
실험평균유속-HEC-RAS유속	36	0.0417	0.28904	0.04817
RMA2평균유속-HEC-RAS유속	36	-0.1308	0.19010	0.03168

5.4.2 수위에 대한 통계학적 검정

수위에 대한 검정 결과 실험값에 대하여 HEC-RAS모형과 RMA2모형의 상관성이 같게 분석되었다. 이는 본 검정이 각 측정별 평균값에 대하여 상관성을 분석한 것으로 일반적인 경향을 확인하기 위하여 비교분석한 것으로 두 수치모형이 같게 나온다는 것에 대하여 본 연구가 만곡부의 교각에 대하여 중점을 두고 실시하는 것으로 본 연구에서는 큰 의미를 부여할 필요가 없을 것으로 판단되어 진다.

표 12 모형실험-수치해석 통계분석(수위)

	비교대상	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
Pair 1	실험평균수위	36	82.4506	0.64329	0.10722
	RMA2평균수위	36	82.1631	0.46962	0.07827
Pair 2	실험평균수위	36	82.4506	0.64329	0.10722
	HEC-RAS수위	36	82.3686	0.58402	0.09734
Pair 3	RMA2평균수위	36	82.1631	0.46962	0.07827
	HEC-RAS수위	36	82.3686	0.58402	0.09734

표 13 모형실험-수치해석 상관분석(수위)

	N	Correlation
Pair 1	36	0.981
Pair 2	36	0.981
Pair 3	36	0.970

표 14 전구간 모형실험-수치해석 통계분석(수위)

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
실험평균수위-RMA2평균수위	36	0.2872	0.20509	0.03418
실험평균수위-HEC-RAS수위	36	0.0819	0.13380	0.02230
RMA2평균수위-HEC-RAS수위	36	0.2058	0.17102	0.02850

5.4.3 교각부의 유속에 대한 통계학적 검정

본 연구에서 중점적으로 분석을 실시한 교각부 유속에 대한 통계적인 검정값을 살펴보면 앞 절의 표와 그림에서 살펴본 바와 같이 RMA2모형이 실험값의 경향을 잘 표현해주고 있음을 알 수 있었다.

표 15 모형실험-수치해석 통계분석(교각부 유속)

	비교대상	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
Pair 1	실험유속	29	2.0462	0.59176	0.10989
	RMA2 유속	29	0.9748	0.56788	0.10545
Pair 2	실험유속	29	2.0462	0.59176	0.10989
	HEC-RAS 유속	29	4.4186	0.48639	0.09032
Pair 3	RMA2 유속	29	0.9748	0.56788	0.10545
	HEC-RAS 유속	29	4.4186	0.48639	0.09032

표 16 모형실험-수치해석 상관분석(교각부 유속)

	N	Correlation
Pair 1	29	0.864
Pair 2	29	0.854
Pair 3	29	0.601

5.4.4 교각부의 수위 대한 통계학적 검정

교각부 수위에 대한 검정 결과는 RMA2모형이 HEC-RAS의 값보다 실험값의 경향을 잘 반영하고 있음을 명확히 보여주고 있다.

표 17 모형실험-수치해석 통계분석(교각부 수위)

	비교대상	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
Pair 1	실험수위	29	83.5052	0.48243	0.08959
	RMA2 수위	29	83.1679	0.74654	0.13863
Pair 2	실험수위	29	83.5052	0.48243	0.08959
	HEC-RAS 수위	29	82.7638	0.27967	0.05193
Pair 3	RMA2 수위	29	83.1679	0.74654	0.13863
	HEC-RAS 수위	29	82.7638	0.27967	0.05193

표 18 모형실험-수치해석 상관분석(교각부 수위)

	N	Correlation
Pair 1	29	0.887
Pair 2	29	0.797
Pair 3	29	0.652

6. 결론

본 연구를 통하여 모형실험값과 1, 2차원 수치모형을 비교하여 각 수치모형의 특성을 관찰해 보았으며, 특히 연구 대상하천을 각 축선별로 구분하여 비교하였고, 각 축선을 좌안에서 우안으로 일정 간격의 구간으로 나누어 각 경향과 오차를 알아보았다. 각 방법별로 비교 분석한 결과 다음과 같은 결론을 확인할 수 있었다.

1. 본 연구 결과 각 수치모형의 유속값을 모형실험 유속값과 비교해 보았을 때 HEC-RAS모형의 유속평균오차 0.29이고, RMA2모형의 유속평균 오차는 0.20으로 RMA2모형의 오차가 더 작게 발생되었다. 각 축선별로 좌안에서 우안으로 나누어진 구간 유속값을 비교한 결과 RMA2모형의 유속값은 대체로 실험 유속값과 유사한 경향을 나타냈으나 HEC-RAS모형의 유속값에서는 편차가 크게 발생하였다.

2. 수위에 대하여 비교한 결과, 하류 직선부의 경우에는 각 비교항이 상호 유사한 경향을 보였으나, 상류 만곡부에서는 RMA2모형의 수위값과 HEC-RAS모형의 수위값 모두 모형실험의 수위값과 상이한 값을 보였다. 하지만 대체로 두 수치모형과 모형실험의 결과값을 비교한 결과 RMA2모형이 모형실험과 유사한 경향을 보이고 있는 것으로 분석되었다.

3. 교각부의 경우를 비교 분석한 결과 유속값과 수위값 모두 HEC-RAS모형과 모형실험의 오차가 RMA2모형과 모형실험과의 오차보다 크게 발생함을 확인하였다. 또한 교각이 상류 만곡부에 설치되는 경우에 RMA2모형값과 모형실험값과의 편차가 더욱 미소하게 발생하였다.

4. 모형실험과 각 수치해석과의 통계학적 상관관계를 분석한 결과 유속은 RMA2모형이 HEC-RAS모형보다 상관성이 높았고, 수위는 RMA2모형과 HEC-RAS모형이 같게 분석되었다. 또한 교각부에서의 상관관계를 분석한 결과 유속과 수위 모두 RMA2모형이 HEC-RAS모형보다 상관성이 높게 나타났다. 따라서 전체적인 유속의 분포 및 수위, 특히 교각부의 수리학적 특성에 대한 통계적인 분석결과, 모형실험값의 경향을 최대한 반영해주고 있는 것은 RMA2모형임을 확인하였다.

5. 본 연구 대상과 유사한 만곡형태의 하천이나 교각과 같은 수공구조물이 하천에 설치될 경우 2차원수치해석모형인 RMA2모형을 통해 신뢰할 수

있는 해석이 가능할 것으로 분석되었으며, 모형실험과 HEC-RAS모형의 경우 교각부의 와류발생 현상을 확인하기 매우 힘들었으나 RMA2모형은 와류 현상 관찰이 용이하였다.

[15] Hydrologic Engineering Center, US Army Corps of Engineers(2001), "HEC-RAS User's Manual"

참 고 문 헌

- [1] 건설교통부 원주지방국토관리청(2002), "북한강 수계 하천정비기본계획"
- [2] 안승철, 이재원, 최원(2000), 수리통계학의 이해, 교우사
- [3] 안상진, 최계운(2001), "소하천에서 유로변경에 따른 수리특성 분석", 한국수자원학회논문집, Vol.34 No.5
- [4] 용창진, 박남희, 김철(2003), "1차원 및 2차원 모형을 이용한 하천의 흐름 해석과 결과의 비교", 대한토목학회 발표논문집 pp. 2673-2679
- [5] 윤용남 (2003), 수리학(기초와 응용), 청문각
- [6] 장성환, 박상우, 오경두, 김민규(2003), "하천내 교량의 영향에 의한 2차원 수리해석", 대한토목학회 발표논문집, pp. 2746-2750
- [7] 정재욱, 정현수, 이종설, 윤세의(2000), "RMA2 모형을 이용한 만곡수로의 흐름특성 분석", 대한토목학회, 제20권, 제4-B호, pp. 479-489
- [8] 최민하, 이춘선, 안재현, 윤용남(2001), "2차원 수치모형을 이용한 하상변동 분석", 대한토목학회 발표논문집, pp. 1-4
- [9] 한건연 외(2002), 수공학 워샵 교재(2차원 지표수흐름 해석, SMS를 중심으로), 한국수자원학회
- [10] Quintela A. C. (1980), "Flow Aeration to Prevent Cavitation Erosion", Water Power & Dam Construction, pp. 17-22
- [11] Chow V.T.(1959), Open Channel Hydraulics, Mcgraw-Hill, pp. 439-522
- [12] Civil eng Guidelines for Planning and Designing Hydroelectric Developments, Volum1, pp. 2~43
- [13] Edited by Ian R. Wood(1991), "Air Entertainment In Free-Surface Flows", University of Canterbury, Christchurch, New Zealand, A.A. Balkema, Rotterdam, Brookfield
- [14] Godunov S. K. (1959), "A Difference Method for the Numerical Calculation of Discontinuous Solutions of Hydrodynamic Equations", Mat. Sbornik 47, 3, pp. 271~306, Translated as JPRS 7225 by US Dept. of Commerce, November 1960.