산업기술연구(강원대학교 산업기술연구소 논문집), 제27권 A호, 2007.
Journal of Industrial Technology, Kangwon Natl. Univ., Korea, No. 27 A, 2007.

수리모형과 수치해석을 통한 만곡부 하천의 수리학적 특성 비교 고찰

A Comparative Study on Hydraulic Characteristics of Curved Channel by Hydraulic Model Experiments and Numerical Analysis

서 동 일* 최 한 규**
Seo, Dong-Il Choi, Han-Kuy

Abstract

This study, regarding curved channel, was performed to compare and analyze hydraulic characteristics and the speed of water and water level for left bank and right bank through hydraulic model experiments and numerical analysis.

Real channels that had characteristics of curved channel were selected as objectives. In order to easily operate one and two dimensional numerical analysis and comparison for total 2.4Km model channel, measuring point was set up as 200m. HEC-RAS model was applied as one dimensional numerical analysis program and SMS model was used as two dimensional numerical analysis program. In respect of speed of water, the average speed of water for right bank recorded 8.33m/s in a model experiment and 3.08m/s, 8.57m/s were average speed of water for right bank in one dimensional and two dimensional numerical analysis. The average speed of water of two dimensional numerical analysis was quite similar to that of model experiments. Also, as for water level, maximum observational errors between one and two dimensional numerical analysis for right and left bank of model experiments were 0.66m, 0.84m and 0.28m, 0.48m for each. It was found that two dimensional numerical analysis had a similar result to hydraulic model experiments. Accordingly, from the result of this study, two dimensional numerical analysis should be used rather than one dimensional numerical analysis, when numerical analysis for curved channel is conducted.

키워드 : *만곡부, 수리모형실험, 수치해석, 수리학적 특성*
Keywords : *curved channel, Hydraulic Model Experiments, Numerical Analysis, Hydraulic Characteristics*

1. 서론

인간이 하천을 이용하며 살아가는 동안 하천에 가하는 변화들, 즉 댐의 건설이나 하도의 개수, 하구언 설치, 제방 축조 등은 하천을 불안정한 상태로 만들고 또한 흐름변화에 따른 거동을 발생시키는 등 여러 가지 문제점을 야기 시키고 있다. 특히 우리나라의 경우는 홍수기의 집중호우로 인하여 발생하는 홍수피해가 빈번하며, 근래에는 이상 기후, 하천주변의 제내지 지역 및 홍수터에서의 토지

* 강원대학교 대학원 토목공학과 석사과정
** 강원대학교 토목공학과 교수, 공학박사

이용도 증가, 소하천 유역의 개발 등과 같은 원인으로 인해 홍수로 인한 재해 및 재해 위험도가 증가하고 있는 실정이다. 홍수 피해에 대한 재해 및 위험도를 감소시키기 위한 노력으로 각종 수공구조물의 건설등과 같은 구조적 방안과 제한구역의 설정, 홍수 예·경보 시스템 개발 등의 비구조적인 방안 등이 다양한 방면으로 제시되어 적용되고 있다. 홍수위 산정을 위하여 이용되는 기법은 평균적인 홍수위 산정이 가능한 일차원모형과 하천 좌우의 수심 편차까지 산정이 가능한 이차원모형 및 수심에 대한 변동까지 해석이 가능한 삼차원 모형으로 구분된다. 이중에서 기본계획 수립시 사용되는 모형은 일차원 수치해석모형으로 하천 단면별로 평균 홍수위만을 산정하고 있다.

홍수시 하천의 만곡부나 협착부에서의 흐름은 기본적으로 이차원 흐름의 형태를 보임으로써 하천 흐름의 수위와 유속 분포는 일차원 하천 모형으로 모의하기에는 상당한 어려움이 있다. 또한 자연하천은 주수로와 홍수터로 구성된 복잡단면을 가지고 있으며 어느 정도의 사행성을 가지고 있는 것이 보편적이고, 홍수시 홍수범람의 거동을 해석하는 것은 하천계획 및 관리에 있어서 중요한 정보가 될 수 있다.

기본계획은 하천 정비를 위한 기본적인 사항을 언급하는 계획이나 기본계획상의 계획홍수위 및 법선에 의거하여 하천정비가 이루어지고 있는 실정에 가장 중요한 사항이라고 하겠다. 그러나 일차원 수치해석만을 사용하여 계획을 수립하고 있는 실정에서 만곡부로 된 하천에서는 원심력으로 인하여 하천의 좌안, 우안의 수위차 및 유속의 차이가 발생하게 되나 평균적인 홍수위 산정을 실시하여 계획을 수립하는 경우에는 실제 발생 가능한 홍수위보다 작거나 크게 산정되는 오류가 발생하게 된다.

따라서 본 연구의 목적은 일차원 및 이차원 수치해석에 대해서 수리모형실험을 통하여 각 지점 좌안, 우안의 수리학적특성인 유속과 수위를 비교분석하여 일차원 수치해석의 만곡부하천의 문제점을 찾아내고 이차원 수치해석의 만곡부 하천에 대한 사용성을 알아보는 것이 본 연구의 목적이라 하겠다.

2. 이론적 배경

2.1 모형이론 및 상사법칙

수리모형실험을 위해서는 수리특성을 왜곡하지 않은 범위에서 모형을 제작하여야 한다. 이를 위한 이론적 근거가 상사법칙이다. 상사법칙은 축척되는 구조물의 수리특성별로 여러 상사 법칙이 수립되고 있으며 본 연구 하천과 같은 경우 중력에 의하여 유수가 흐르게 되므로 이에 따른 특성 해석이 가능한 상사법칙을 수립하여 본 연구 하천 모형에 적용하였다.

가) 일반 상사법칙

흐름의 상사성의 첫 조건은 원형과 모형의 기하학적 상사(Geometric similarity)를 만족하여야 한다는 것이다. 즉, 흐름의 경계의 각 대응점에서 길이의 비가 같아야 한다. 기하학적 상사성이 만족된다면 원형과 모형의 대응점에서 두 흐름의 특성에 대해 논하는 것이 의미를 갖는다. 한 흐름의 변수가 다른 흐름의 대응점의 변수와 비례관계에 있으면 두 흐름은 동역학적 상사성(Dynamic similarity)을 갖는다고 정의될 수 있다.

동역학적 상사성의 충분조건을 결정하는데 있어서 문제를 단순화하기 위하여 일정한 점성을 가지나 밀도는 일정하지 않은 비압축성 유체의 동력학에 대해 고려한다. 운동의 지배 방정식 즉, Navier-Stokes방정식, 비압축성 유체에 관한 식, 그리고 연속방정식을 무차원화하면 다음과 같다.

$$\rho'\left(\frac{\partial}{\partial t'}+u_k'\frac{\partial}{\partial x_k'}\right)u_j' = -\frac{\partial p'}{\partial x_j'}+\frac{\rho' L}{U^2}f_i+\frac{v}{UL}\frac{\partial^2 u_j'}{\partial x_i'\partial x_i'} \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho'}{\partial t'}+u_k'\frac{\partial \rho'}{\partial x_k'}=0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial u_k'}{\partial x_k'}=0 \quad (3)$$

여기서 v는 동점성계수이며, 체적력으로서 중력만을 고려한다면f_1 =f_2= 0,f_3=-g가 되며 무차원 변수들은 다음과 같다.

$$u_j'=\frac{u_j}{U},\ \rho'=\frac{\rho}{\rho_0},\ p'=\frac{p}{\rho_0 U^2},\quad x_j'=\frac{x_j}{L}t'=\frac{tU}{L} \quad (4)$$

여기서u_j는 각 방향유속, U는 기준유속, ρ는 밀도,ρ_o 는 기준밀도, p는 압력, x_j는 각 방향 길이, t는 시간, 그리고 L은 기준길이 이다.

기하학적 상사성이 성립되면 동력학적 상사를 만족시키기 위하여 한 흐름에서 식 (2)의 무차원 변수들이 다른 흐름의 해당 변수와 같아야 한다. 즉, 식 (1)~(4)에서 알 수 있듯이 두 흐름에서u_j', ρ',p'의 초기값이 어디에서나 같고 흐름 경계에서의 그 이후의 값들이 같을 뿐만 아니라 두 무차원 변수 gL/U^2와 v/UL가 같아야만 동역학적 상사성이 만족된다는 것을 알 수 있다. 초기조건과 경계조건

의 상사성이 만족되었다고 가정했을 때 $F=U/\sqrt{gL}$와$R_e \equiv UL/\nu$ 이 두 흐름에서 같으면 두 흐름은 상사하다. 여기서 F는 Froude수, 그리고R_e는 Reynolds수이다. 따라서 식 (2)는 다음과 같이 식 (5)처럼 쓰여 질 수 있다.

$$\rho' \frac{D}{D_t} u_j' = -\frac{\partial p'}{\partial x_j'} - \frac{\rho'}{F^2}\delta_{j3} + \frac{1}{R_e}\nabla^2 u_j' \qquad (5)$$

여기서 Froude수는 관성력과 중력의 비, 그리고 Reynolds수는 관성력과 점성력의 비를 나타내므로 이들 두 수가 같아야 한다는 조건은 한 흐름에 작용하는 힘들의 비와 다른 흐름에서 상응하는 힘들의 비가 같아야 한다고 말할 수 있다.

위에서 논의된 Naivier-Stokes 방정식은 비압축성, 체적력으로서 중력, 그리고 표면력(surface force)으로서 점성력만을 고려하였다. 그러나 이 외에도 다른 힘들과 연관된다면 Mach수, 그리고 표면장력에 관계하여 Weber수 등을 들 수 있다.

2.2 일차원 수치해석의 이론

일차원 수치해석의 지배방정식은 그림 1과 같은 점변류의 수면 경사식은 수로를 따른 흐름의 전수두의 변화율을 구해봄으로써 유도된다.

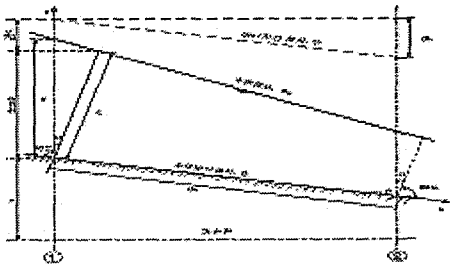


그림 1 점변류의 수면경사

그림 1에서 흐름의 임의 단면에서의 전수두(total head)는 다음과 같다.

$$H = z + d\cos\theta + \alpha\frac{V^2}{2g} \qquad (6)$$

개수로에서의 θ 는 통상 작은 값을 가지므로 $d\cos\theta \simeq y$ 라 가정할 수 있고 $\alpha \simeq 1$ 이라는 가정도 받아들여진다. 따라서 식 (5)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$H = z + y + \frac{V^2}{2g} \qquad (7)$$

여기서, H : 전수두
z : 위치수두
d : 수심(수로 바닥에 수직으로 측정)
θ : 바닥경사
α : 에너지 보정계수
V : 평균유속

수로 바닥을 x축으로 잡고 식 (7)을 x에 관해 미분하면 다음과 같다.

$$\frac{dH}{dx} = \frac{dz}{dx} + \frac{dy}{dx} + \frac{d}{dx}\left(\frac{V^2}{2g}\right) \qquad (8)$$

식 (8)에서 $\frac{dH}{dx} = -S_f$, $\frac{dz}{dx} = -S_0$, 이며 $\frac{dy}{dx}$ 는 수로 바닥을 기준으로 한 수면경사이고 마지막 항은 다음과 같이 표시된다.

$$\frac{d}{dx}\left(\frac{V^2}{2g}\right) = \frac{d}{dx}\left(\frac{Q^2}{2gA^2}\right) = \frac{d}{dx}\left(\frac{Q^2}{2gA^2}\right)\frac{dy}{dx}$$
$$= \left[-\frac{Q^2}{gA^3}\frac{dA}{dy}\right]\frac{dy}{dx}$$
$$= \left[-\frac{Q^2 T}{gA^3}\right]\frac{dy}{dx} \qquad (9)$$

이상을 식 (9)에 대입하면 다음과 같다.

$$-S_f = -S_0 + \frac{dy}{dx} - \frac{Q^2 T}{gA^3}\frac{dy}{dx}$$

따라서

$$\frac{dy}{dx} = \frac{S_0 - S_f}{1 - \frac{Q^2 T}{gA^3}}$$
$$= \frac{S_0 - S_f}{1 - F^2} \qquad (10)$$

식 (10)는 수로 바닥을 기준으로 한 점변류 수심의 변화율을 표시하는 것으로서 점변류의 수면곡선을 구하기 위한 기본방정식이다.

그리고 기본 방정식을 변형하여 풀어보면 식 (10)의 분모항에 수로내의 한계류에 대응하는 단면계수 Z_c 에 대하여 식 (11)을 나타낸다.

$$1 - \frac{Q^2 T}{gA^3} = 1 - \left(\frac{Z_c}{Z}\right)^2 \qquad (11)$$

수로경사 S_0 와 에너지선의 경사 S_f 를 각각 다음과 같이 표시한다.

$$S_0 = \left(\frac{nQ}{A_n R^{\frac{2}{3}} n}\right)^2 = \left(\frac{Q}{K_n}\right)^2 \qquad (12)$$

$$S_f = \left(\frac{nQ}{AR^{2/3}}\right)^2 = \left(\frac{Q}{K}\right)^2 \qquad (13)$$

식 (12),(13)에서 K_n 및 K 는 각각 수로단면 내에 등류 및 부등류가 흐를 경우의 통수능이다. 식 (13),(13)을 식 (10)의 분자항에 대입하면 다음과 같다.

$$S_0 - S_f = S_0(1-\frac{S_f}{S_0}) = S_0[1-(\frac{K_n}{K})^2] \qquad (14)$$

따라서 식 (10)에 식 (11) 및 식 (14)을 대입하여 다시 쓰면 다음과 같다.

$$\frac{dy}{dx} = S_0 \frac{1-(\frac{K_n}{K})^2}{1-(\frac{Z_c}{Z})^2} \qquad (15)$$

식 (15)이 임의 단면을 가진 개수로내에서 발생가능한 점변류의 수면곡선형을 판별하기 위한 기본식이 된다.

2.3 이차원 수치해석의 이론

가) 지배 방정식

수심평균을 취한 이차원 천수방정식은 자유수면을 가진 물의 운동을 기술하는 삼차원 Navier-Stokes 방정식의 일반식을 수심방향으로 적분함으로써 유도될 수 있는데 이를 위해서는 연직방향의 가속도항은 무시하여 압력항을 정수압 분포로 처리하며, 유체는 비압축성이라고 가정한다. 이차원 천수방정식의 연속방정식과 운동량방정식은 다음과 같다.

1) 연속방정식

$$\frac{\partial h}{\partial t} + h\left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y}\right) + u\frac{\partial h}{\partial x} + v\frac{\partial h}{\partial y} = 0 \qquad (16)$$

2) 운동량 방정식

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u\frac{\partial u}{\partial x} + v\frac{\partial u}{\partial y} - \frac{1}{\rho}\left(\epsilon_{xx}\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \epsilon_{xy}\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}\right) + g\frac{\partial a}{\partial x} + g\frac{\partial h}{\partial x} + \tau_x = 0 \qquad (17)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u\frac{\partial v}{\partial x} + v\frac{\partial v}{\partial y} - \frac{1}{\rho}\left(\epsilon_{yx}\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \epsilon_{yy}\frac{\partial^2 v}{\partial y^2}\right) + g\frac{\partial a}{\partial y} + g\frac{\partial h}{\partial y} + \tau_y = 0 \qquad (18)$$

여기서, x, y, t : 좌표축과 시간
g : 중력가속도
u, v : x, y방향의 수심 평균유속
ρ : 물의 밀도
h : 수심
a : 하상표고
τ_x, τ_y : x, y 방향을 작용하는 부응력
ϵ : 확산계수

$$\tau_x = \frac{gu}{C^2 h}\sqrt{(u^2+v^2)} - \frac{\zeta}{h}V_a^2\cos\psi - 2wv\sin\phi \qquad (19)$$

$$\tau_y = \frac{gv}{C^2 h}\sqrt{(u^2+v^2)} - \frac{\zeta}{h}V_a^2\sin\psi + 2wu\sin\phi \qquad (20)$$

여기서, C : Chezy 계수
ζ : 경험적인 바람 전단응력 계수
V_a : 풍속
ψ : 풍향
w : 지구의 각속도
ϕ : 적용대상 구간의 평균위도

식(17) 와 식(18)에 h를 곱하여 정리하면 다음과 같다.

$$h\frac{\partial u}{\partial t} + hu\frac{\partial u}{\partial x} + hu\frac{\partial u}{\partial y} - \frac{h}{\rho}\left(\epsilon_{xx}\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \epsilon_{xy}\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}\right) + gh\left(\frac{\partial a}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial x}\right) + \frac{gu}{C^2}\sqrt{(u^2+v^2)} - \zeta V_a^2\cos\psi - 2hwv\sin\phi = 0$$

$$h\frac{\partial v}{\partial t} + hv\frac{\partial v}{\partial x} + hv\frac{\partial v}{\partial y} - \frac{h}{\rho}\left(\epsilon_{xx}\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \epsilon_{xy}\frac{\partial^2 v}{\partial y^2}\right) + gh\left(\frac{\partial a}{\partial y} + \frac{\partial h}{\partial y}\right) + \frac{gv}{C^2}\sqrt{(u^2+v^2)} - \zeta V_a^2\cos\psi + 2huw\sin\phi = 0 \qquad (21)$$

3. 수리모형실험

3.1 하천모형제작

모형을 제작하기 위해서는 지형자료 및 수문자료

의 수집 및 이에 따른 계획이 수립되어야 한다. 또한 하천 단면을 실제 하천 동일하게 제작하기 위해서는 모형제작 후 모형이 실제하천 단면의 수리특성 확보가 가능한지 유무를 검증하여 적합한 것으로 판별되는 경우에 본 연구를 위한 실험 작업을 수행하게 된다.

가) 모형제작구간

본 연구를 위하여 선정한 하천은 강원도 정선군 정선읍 용탄리 일원에 위치한 한강이다. 우리나라의 대표 하천인 한강은 하류지역은 완만한 경사의 대하천의 모습을 보이나 본 연구지점과 같은 상류지역은 강원도 상류지역에 산재하고 있는 만곡하천의 전형적인 모습을 보여주고 있다. 따라서 그림 3.1에서 보는 바와 같은 구간의 2.8km 구간을 연구 구간으로 설정하여 모형을 제작하였다. 모형제작을 위하여 필요한 자료는 한강 하천정비 기본계획 및 현장조사 등을 실시하여 모형을 제작하기 위한 지형자료를 수집하였으며, 이에 따른 대표 하천 단면이 그림 2으로 그림에 보는 바와 같이 자연하천의 단면형을 나타내고 있다.

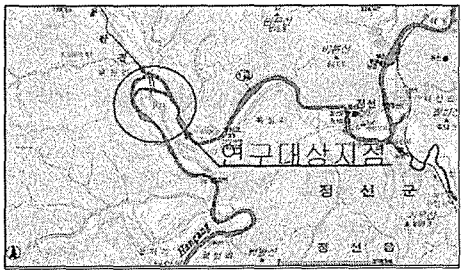


그림 2 연구대상지점

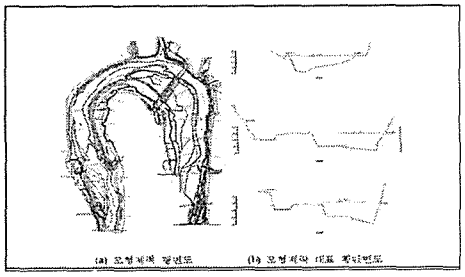


그림 3 모형제작 대표 단면도

나) 모형축척비 결정

본 연구를 위한 모형의 축척비 결정에서 하천연장에 비하여 수심의 값은 상당히 작은 값이라고 하겠다. 따라서 정상모형을 사용하게 되는 경우 수리특성 값을 확인 할 수 있는 수심 및 유속의 측정에 문제점이 발생할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 수평축척은 대축척을 사용하고, 연직축척은 소축척으로 사용하는 왜곡모형을 사용하였다.

왜곡모형에 적용한 축척은 평면축척 Xr, Yr = 1/200 연직축척 Z=1/66.7이며 이에 따른 각각의 축척비는 다음 표 1과 같다.

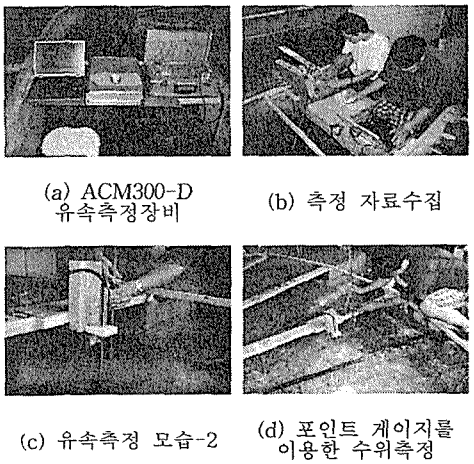
표 1 수리량 환산비 및 축척

수리량 환산비	환산식	축척비
평면축척(Xr,Yr)	Xr = Yr	200
수심축척(Zr)	Zr	66.7
면적비, Ar	Xr·Yr	13,340
속도비, Vr	$Y_r^{1/2}$	8.167
유량비, Qr	$Xr \cdot Yr^{2/3}$	108947.87
왜곡비,Sr	Yr/Xr	3
조도계수비, nr	$Xr^{-1/2}Yr^{2/3}$	1.163

3.2 수리모형실험 결과

가) 수리모형실험

모형제작 및 검증작업이 완료 후 본 연구를 위한 실험을 실시하였다. 본 모형의 실험에서는 각 지점에 대하여 측정을 실시할 경우 측정의 편차를 최소화하기 위하여 채택 유량에 대하여 전체를 1회씩 측정하는 것을 수회 반복하여 측정을 실시하였다. 아래 그림 4는 모형실험의 광경을 그림으로 나타내었다.



(a) ACM300-D 유속측정장비 (b) 측정 자료수집

(c) 유속측정 모습-2 (d) 포인트 게이지를 이용한 수위측정

그림 4 수리모형실험 광경

1) 수리모형실험 결과

수리모형 실험을 통하여 얻어진 각각 단면의 유속과 수위 값은 표 2에 나타내었다.

좌안과 우안에서 유속 및 수위 차이를 보였으며, 좌안과 우안의 평균 유속은 5.79(m/s), 6.57(m/s)로 우안의 유속이 평균0.78(m/s)로 높았으며, 유속은 전반적으로 좌안 부분에서는 작게 나타나고 우안, 중간부분에서 크게 나타났다.

수위는 좌안의 평균수위가 291.161(m), 우안의 평균수위가 291.696(m)였으며, 수위 또한 좌안보다 우안의 수위가 평균 0.535(m)으로 높게 나타났다.

표 2 각 단면에서의 수위 및 유속측정결과

측점	수 위(EL. M)			유속(M/SEC)			비고
	좌안	중간	우안	좌안	중간	우안	
385	288.542	288.560	288.632	1.72	5.34	5.78	
386	288.630	288.715	288.753	3.01	5.18	6.81	
387	289.252	288.997	289.123	4.11	6.35	6.95	
388	289.560	290.197	290.477	6.98	7.52	8.11	
389	290.150	290.730	291.597	7.13	7.82	7.35	
390	291.150	291.650	291.735	7.62	8.72	7.43	
391	291.210	291.670	291.803	5.49	8.75	8.69	
392	291.750	291.750	291.880	5.91	10.95	4.67	
393	291.790	291.830	292.017	10.68	10.89	3.81	
394	291.837	292.017	292.070	8.39	7.35	11.15	
395	292.077	292.357	292.490	4.87	5.06	4.65	
396	292.157	293.050	293.463	4.51	4.81	4.49	
397	292.570	293.437	293.637	4.83	4.97	5.93	
398	293.337	293.450	293.783	6.33	6.15	7.72	
399	293.397	293.530	293.977	5.28	5.19	4.97	

4. 수치해석

4.1 일차원 수치해석

가) 일차원 수치해석의 자료입력

일차원 수치해석 자료입력을 위하여 사용된 HEC-RAS 프로그램은 지형자료, 홍수자료, 기점 홍수위를 입력하도록 되어 있다. 따라서 입력된 지형자료는 앞 절에 설명한 바와 같은 단면과 홍수량을 입력하였으며, 홍수 산정을 위하여 입력된 기점 홍수위 288.72m를 하류단면에 입력하였다.

나) 일차원 수치해석의 결과

Stead Flow Data에 계획홍수량 7035CMS의 유량자료를 입력하여 그림 5와 그림 6과 같은 결과를 도출하였다. 일차원 수치해석 결과 지점별 유속은 그림 5에 도시하였으며, 만곡부가 커지는 지점에서 유속이 급격히 증가함을 알 수 있었다. 또한 지점별 수위는 그림 6과 같으며 No.390까지의 수위 변화는 완만한 경사를 보이나 그다음 만곡부가 커지는 지점부터는 급경사를 이루고 있다.

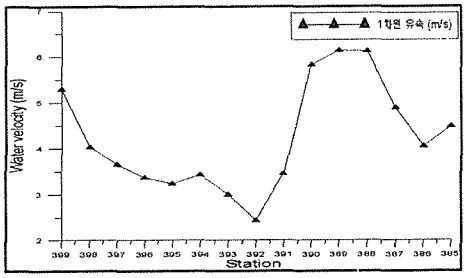


그림 5 일차원 수치해석의 지점별 유속

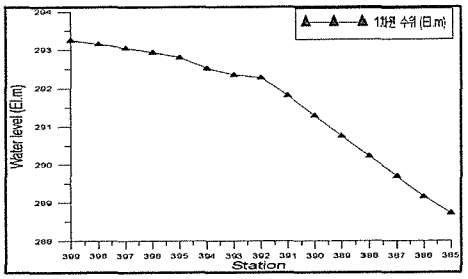


그림 6 일차원 수치해석의 지점별 수위

4.2 이차원 수치해석

가) 격자망 생성

연구지점에 대하여 횡단측량 자료를 x좌표와 y좌표로 추출하여 실측 횡단 데이터 z좌표와 함께 이차원 수치해석의 모형상 격자를 만들기 위한 지형 파일을 만들어 그림 7과 같이 격자를 형성한다.

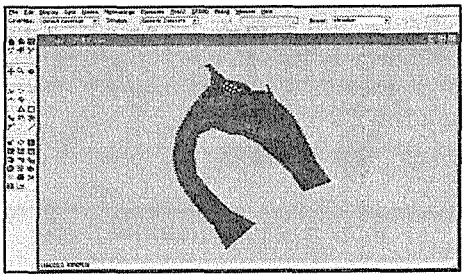


그림 7 지형 격자망

나) 경계조건 입력

1) 유량, 수위조건 입력

유량과 수위는 그림 8과 같이 계획홍수량의 7035CMS를 상류단 경계조건에 입력하고, 하류부의 수위에는 수위 288.72m를 하류단 경계조건에 입력하면 그림 9와 같이 경계조건이 모두 입력된다.

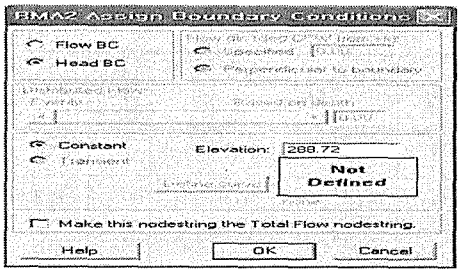


그림 8 경계조건 입력

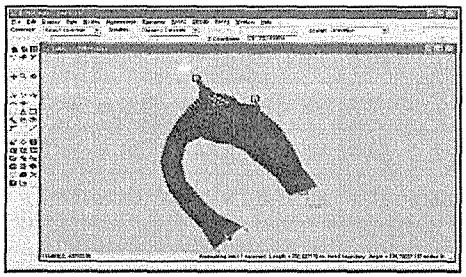


그림 9 입력된 경계조건

2) 조도계수 입력

조도계수는 한강 수계 하천정비 기본계획 및 일차원 수치해석모형에서 적용한 0.032를 채택하여 이차원 수치해석모형에도 적용시켰으며, 와점성계수의 평면흐름의 적용범위인 500 ~ 5000을 참고하여 와점성계수 ε값을 $4000\mathrm{N}\cdot\mathrm{sec}/m^2$로 정의하여 그림 10과 같이 입력하였다.

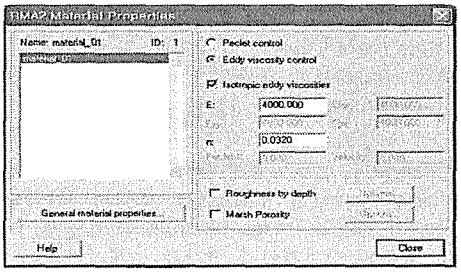


그림 10 조도계수와 난류환산계수

3) 수치모의 결과

GFGEN을 수행한 다음, RMA2를 수행하면 해석이 완료된다.

5. 자료 분석

5.1 해석방법에 따른 유속

본 연구의 해석방법별 유속 결과를 표 3에 나타내었다. 일차원 수치해석 및 이차원 수치해석과 모형실험을 통하여 만곡부지점에 대하여 우안과 좌안의 유속을 측정하고, 수리모형실험에서 삼차원 유속계로 측정한 유속 값과 일차원 수치해석 및 이차원 수치해석의 값을 아래 표3에 정리하였다.

표 3 해석방법별 유속

측점	일차원 수치해석	모형실험유속 (m/s)			이차원수치해석 유속(m/s)		
		좌안	중간	우안	좌안	중간	우안
No.399	5.30	5.28	5.19	4.97	5.04	5.04	5.47
No.398	4.04	6.33	6.15	7.72	6.37	6.00	5.89
No.397	3.65	4.83	4.97	5.93	4.71	4.86	6.96
No.396	3.37	4.51	4.81	4.49	4.28	4.67	8.22
No.395	3.23	4.87	5.06	4.65	4.81	4.95	8.34
No.394	3.43	8.39	7.35	11.15	7.90	7.20	8.66
No.393	3.00	10.68	10.89	8.81	9.12	10.73	9.07
No.392	2.44	5.91	10.95	4.67	6.54	10.88	7.47
No.391	3.45	5.49	8.75	8.69	6.2	9.07	9.07
No.390	5.83	7.62	8.72	7.43	7.65	8.59	8.89
No.389	6.14	7.13	7.82	7.35	6.64	8.09	4.86
No.388	6.12	6.98	7.52	8.11	6.75	7.76	4.96
No.387	4.89	4.11	6.35	6.95	4.44	6.14	5.51
No.386	4.05	3.01	5.18	6.81	3.06	5.29	6.25
No.385	4.49	1.72	5.34	5.78	2.26	5.09	5.02

가) 해석방법에 따른 각 지점의 유속분석

그림 11은 일차원 수치해석 및 이차원 수치해석과 모형실험의 각 지점에 대한 좌안과 우안의 유속을 그래프로 도시하였다. 전반적으로 일차원 수치해석의 유속은 모형실험에 비해 작게 산정 되었으며, 이차원 수치해석의 경우 모형실험과 유사한 경향을 보였다.

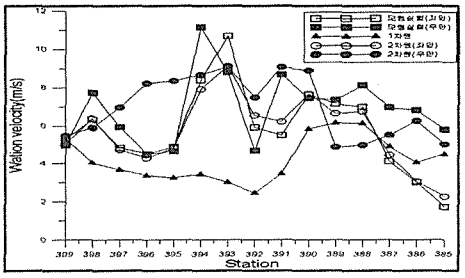


그림 11 유속분포 그래프

아래 표 4는 하천 수공구조물에서 가장 피해가 잦은 우안지점에 대해서 모형실험의 우안과 일차원 및 이차원 수치해석의 우안편차를 나타내었다. 일차원 수치해석의 만곡부(No.394 ~ No.391)지점에서 가장 큰 편차의 분포를 보였으며 평균편차는 5.25m/s로 나타났으며, 이차원 수치해석에서는 평균편차는 1.48m/s로 나타났다. 이 지점은 그림 12

에 해당하는 지점으로 이차원 수치해석 우안의 평균유속은 8.57m/s, 모형실험은 8.33m/s, 일차원 수치해석은 3.08m/s로 2차원 수치해석이 모형실험 값과 근사한 값을 보이는 것을 알 수잇다.

표 4 우안지점의 모형실험과의 편차

측점	일차원 수치해석	이차원 수치해석
No.399	-0.33	-0.50
No.398	3.68	1.83
No.397	2.28	-1.03
No.396	1.12	-3.73
No.395	1.42	-3.69
No.394	7.72	2.49
No.393	5.81	-0.26
No.392	2.23	-2.80
No.391	5.24	-0.38
No.390	1.60	-1.46
No.389	1.21	2.49
No.388	1.99	3.15
No.387	2.06	1.44
No.386	2.76	0.56
No.385	1.29	0.76

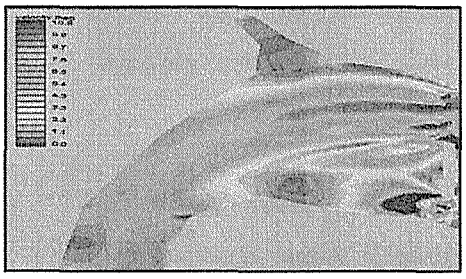


그림 12 이차원 수치해석의(No.394 ~ No.391)지점의 유속분포

5.2 해석방법에 따른 수위

본 연구의 해석방법별 수위 결과를 표 5에 나타내었으며, 1차원 수치해석 및 이차원 수치해석과 모형실험을 통하여 만곡부지점에 대하여 우안과 좌안의 수위를 측정하고, 모형실험에서 측정한 수위값과 1차원 수치해석 및 2차원 수치해석 표6에 나타내었다.

표 5 해석방법별 수위

측점	일차원 수치해석	모형실험수위 (El.m)			이차원 수치해석수위 (El.m)		
		좌안	중간	우안	좌안	중간	우안
No.399	293.2	293.3	293.5	293.9	294.3	294.1	294.4
No.398	293.1	293.3	293.4	293.7	293.3	293.3	293.6
No.397	293.0	292.5	293.4	293.6	292.4	292.8	293.5
No.396	292.9	292.1	293.0	293.4	292.8	293.0	293.4
No.395	292.8	292.0	292.3	292.4	292.1	292.2	292.4
No.394	292.5	291.8	292.0	292.0	291.8	291.6	292.3
No.393	292.3	291.7	291.8	292.0	291.4	291.5	292.2
No.392	292.2	291.7	291.7	291.8	291.9	291.5	292.1
No.391	291.8	291.2	291.6	291.8	291.3	291.4	291.5
No.390	291.2	291.1	291.6	291.7	291.4	291.3	291.8
No.389	290.7	290.1	290.7	291.5	290.1	290.9	291.1
No.388	290.2	289.5	290.1	290.4	289.6	290.1	290.5
No.387	289.6	289.2	288.9	289.1	288.8	288.5	288.9
No.386	289.1	288.6	288.7	288.7	288.5	288.5	288.4
No.385	288.7	288.5	288.5	288.6	288.7	288.7	288.7

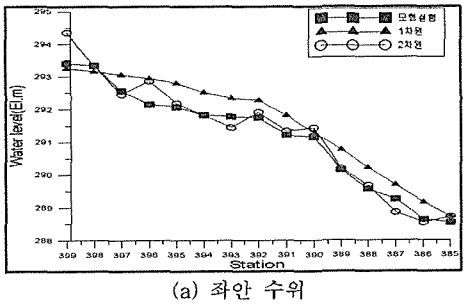
가) 해석방법에 따른 각 지점의 수위 분석

표 5.4는 해석방법에 모형실험에 따른 일차원 및 이차원 수치해석의 편차를 나타내었으며, 그림 13은 일차원 수치해석 및 이차원 수치해석과 모형실험의 각 지점에 대한 좌안과 우안 수위를 그래프로 나타내었다. 모형실험에 대한 일차원 및 이차원 수치해석의 좌안의 평균편차는 0.44.m, 0.24.m 이며, 우안의 경우는 0.44m, 0.19.m이다. 좌안과 우안 모두 일차원 수치해석의 편차가 크게 나타났음을 확인 하였다.

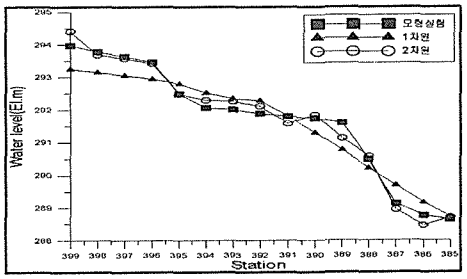
그림 13의 우안지점의 도시한 모형실험의 곡선과 이차원 수치해석의 곡선이 유사한 경향성을 보이는 것을 확인 할 수 있다. 모형실험과의 수위편차는 아래 그림 6에 나타내었다.

표 6 모형실험과의 수위편차

측점	일차원 편차(좌안)	이차원 편차(좌안)	일차원 편차(우안)	이차원 편차(우안)
No.399	0.15	-0.96	0.73	-0.43
No.398	0.19	0.02	0.63	0.10
No.397	-0.48	0.11	0.59	0.07
No.496	-0.78	-0.70	0.52	0.04
No.395	-0.72	-0.11	-0.31	0.01
No.394	-0.68	0.02	-0.45	-0.23
No.393	-0.56	0.34	-0.33	-0.24
No.392	-0.53	-0.17	-0.40	-0.23
No.391	-0.61	-0.13	-0.02	0.22
No.390	-0.14	-0.28	0.44	-0.12
No.389	-0.61	-0.04	0.84	0.48
No.388	-0.66	-0.11	0.26	-0.09
No.387	-0.44	0.40	-0.57	0.18
No.386	-0.53	0.09	-0.41	0.30
No.385	-0.18	-0.18	-0.09	-0.07



(a) 좌안 수위

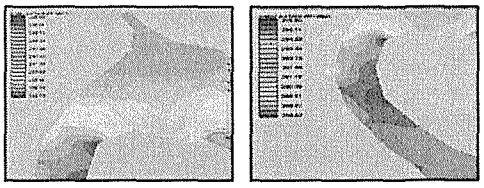


(b) 우안 수위

그림 13 만곡부(좌안, 우안)수위 분포 그래프

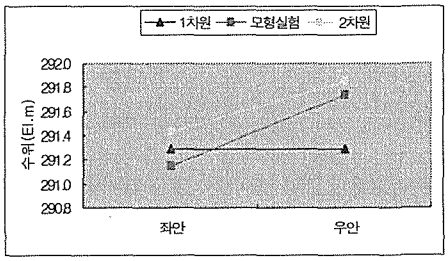
그림 14는 이차원 수치해석의 만곡부 하류부 지점을 색으로 구분하였으며, 빨간색에서 녹색으로 갈수록 수위가 높아진다.

그림 15는 해석방법에 따른 각 지점의 수위를 도시하였으며, 만곡부 하류부 지점에서 일차원 수치해석의 평균수위를 이차원 수치해석과 모형실험을 통하여 오차를 확인 할 수 있었으며, 이차원 수치해석의 좌안과 우안의 최대오차가 0.28m, 0.48m 이었다. 반면 일차원 수치해석의 경우 0.66m, 0.84m오차를 확인 할 수 있었다.

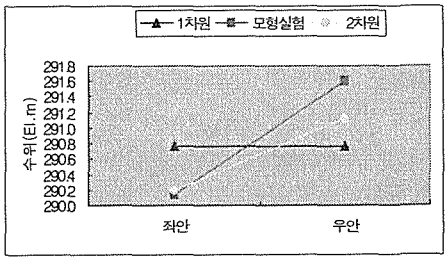


(a) 만곡부지점 수위 (b)만곡부하류지점 수위

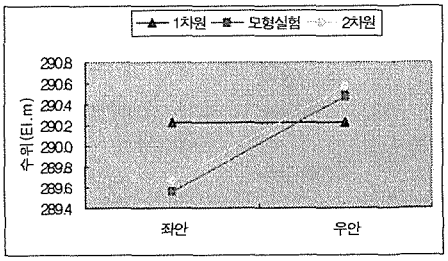
그림 14 이차원 수치해석 수위 분포



(a) No.390 해석방법별 수위



(b) No.389 해석방법별 수위



(c) No.388 해석방법별 수위

그림 15 만곡부 하류지점 우안-좌안의 수위

5. 결론

본 논문에서는 만곡부하천의 수리학적 특성을 일차원 및 이차원 수치해석과 모형실험을 통하여 분석을 실시하였다. 모형실험을 통한 일차원 및 이차원 수치해석의 유속과 수위에 대하여 분석을 하였으며, 이차원 수치해석의 경우 우안과 좌안으로 나누어 모형실험과의 경향성을 분석하여 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

1) 우안지점(No.394~No.391)에서 평균유속은 일차원 수치해석 3.08m/s, 이차원 수치해석 8.57m/s, 모형실험 8.33m/s로 이차원 수치해석의 값이 모형실험과 유사한 값을 나타냈다.

2) 만곡부 좌안과 우안지점에서 모형실험에 대한 일차원 수치해석의 편차는 0.44와 0.44이었으며, 이차원 수치해석의 편차는 0.24, 0.19로 나타났으며, 이는 이차원 수치해석의 경우 수리모형실험과 유사한 결과가 나타났음을 알 수 있다.

3) 만곡부 하류부에서 모형실험에 대한 좌안과 우안의 최대오차가 일차원 수치해석은 0.66m, 0.84m이었으며, 이차원 수치해석의 경우 0.28m, 0.48m로 수리모형실험과 유사한 결과를 나타내었다.

본 논문에서는 모형실험을 통해 일차원 수치해석의 좌안, 우안의 유속 및 수위편차를 확인하였으며, 이차원 수치해석 편차가 적게 나타나므로 만곡부하천의 수치해석은 이차원 수치해석을 실시하여야 할 것이다.

참 고 문 헌

[1] 윤용남, 공업수문학, 1986
[2] 한강 용탄교지점 수리모형실험 보고서(2005),-정선군, 2005
[3] 지정환, 수리실험의 기초원리와 방법, 1998.
[4] 이길성, 천수방정식의 유한차분 특성, 1989.
[5] 조홍연, 이길성, 직교곡선격자를 이용한 흐름모형의 구성 및 적용 팔당호 유황분석을 중심으로, 대학토목학회논문집, 1995
[6] 이계윤 댐하류 만곡부 하천에 대한 수리학적 특성 연구, 2005.
[7] 손영한, 중소하천의 수로크기와 하천흐름의 특성, 1988.
[8] 김경구, 하천정비 기본계획의 문제점 및 개선방안 연구, 2002.
[9] 이양수, 수리모형을 이용한 하천수리모형상 모의에 관한 연구, 2003.
[10] 소동영, 자연형 하천정비 계획과정의 개선방안에 관한 연구, 2004.
[12] 정의근, 하천 구조물에 의한 수리영향 분석, 2004.
[13] 윤수인, 만곡하천합류에서의 수공구조물 설치시 흐름특성 분석, 1997.
[14] 우일석, 소유역 하천에서의 HEC-RAS 적용, 2001.
[15] 이현구, HEC-RAS 모형에 의한 도시통과 하천에서의 수면곡선 해석, 1999.
[16] 임채만, 중.소규모 하천에서의 제방 비탈 경사에 따른 수리특성 연구, 2005.
[17] 이동기, 만곡하천에서 이차류에 관한 연구, 2004.
[18] Chaudhry, M. F., "Open-channel Flow", Prentice-hall, Inc, 1993.
[19] Hanger Willi H., "Transitional Flow in Channel Junctious", J. of Hydraulic Div", ASEC, Vol.115, No.2 Feb, 1989.