

FLUMEN 모형을 이용한 개수로에서 흐름의 수치모의

정대진*, 장창래**, 정관수***

Dae-jin Jung, Chang-lae Jang, Kwan-sue Jung

요지

국내에서 홍수 범람과 농지침수 분석에 이용되는 FLUMEN 모형은 원형섬 주변 처오름 현상과 급변류 해석만이 검증되어 소개되었다. 따라서 FLUMEN 모형의 만곡부나 합류부 등 개수로에서 적용가능성을 파악하기 위해서 하상경사 급변화, 원형 교각 주변 흐름변화, 180° 만곡부 및 90° 합류부 실험 결과와 비교 검토를 수행하였다.

FLUMEN 모형은 유한 체적법을 이용한 수치 계산으로 천이구간에서 발생하는 불연속점에서도 수치 모의가 잘 이루어지며, 만곡 수로와 합류 수로에서 전체적인 수심 분포가 최대 6%미만의 오차를 보이고 있어 매우 양호한 수치 모의를 할 수 있다. 또한 임의의 기하학적 형상을 원하는 위치에 반영한 지형 격자망 생성이 가능하다. 따라서 FLUMEN은 교각 주변, 만곡부 및 합류부 흐름 특성을 비교적 정확한 모의가 가능하며, 실제 하천에 적용하기에 충분한 수치 모의 능력을 지닌 모형이라 판단된다.

핵심용어 : FLUMEN, 급변류, 원형교각, 만곡수로, 합류수로

1. 서론

홍수 범람도 작성과 파제, 농지침수 등을 모의하기 위해 현재 사용되는 FLUMEN 모형은 국내에 소개된 모형의 적용성 평가는 배용훈 등(2005)이 원형섬 주변 치오름 현상, 하상 경사 급변화에 따른 급변류 해석, 하폭 변화에 따른 급변류 해석만을 검증한 것이 전부이다. 따라서 본 연구에서 수행한 수치 해석 결과의 타당성을 입증하기 위해 급변류 흐름, 원형 교각 주변 흐름, 180° 만곡부 흐름 그리고 유량비에 따른 90° 합류 수로에서의 흐름을 모의하고, 실험 수로와 3차원 수치모의 결과와 비교 분석하였다.

2. 본론

2.1 지배방정식

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(Uh)}{\partial x} + \frac{\partial(Vh)}{\partial y} = 0 \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial(uh)}{\partial t} + \frac{\partial(uuh)}{\partial x} + \frac{\partial(uvh)}{\partial y} = -\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{gh^2}{2}\right) - gh\frac{\partial}{\partial x}(z_b) - \frac{1}{\rho}\tau_{bx} \quad (2.2)$$

$$\frac{\partial(vh)}{\partial t} + \frac{\partial(uvh)}{\partial x} + \frac{\partial(vvh)}{\partial y} = -\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{gh^2}{2}\right) - gh\frac{\partial}{\partial y}(z_b) - \frac{1}{\rho}\tau_{by} \quad (2.3)$$

여기서 U, V는 x, y 방향 수심 평균 유속, z_b 는 하상고, h는 수심, t는 시간, τ_b 는 하상전단응력, ρ 는 유체 밀도, g는 중력가속도이다.

* 정희원 · 충남대학교 토목공학과 석사 · E-mail : jdj@unitel.co.kr

** 정희원 · 한국수자원공사 수자원연구원 · E-mail : cljang@kwater.or.kr

*** 정희원 · 충남대학교 토목공학과 교수 · E-mail : ksjung@cnu.ac.kr

2.2 하상경사 변화에 따른 흐름특성 분석

Meselhe 등(1997)은 천이류 흐름 분석을 위해 1차원 수치해석을 하였으며, 직사각형 단면의 하폭 8m, Manning 조도계수는 0.015, 총 연장 1,000m 내에서 Table 2.1과 같은 경사를 가지는 수로를 가정하였다. Meselhe는 51개 노드, 20m 구간 간격으로 10초 단위 계산 시간간격으로 20 m^3/s 의 등류유량으로 하류단에서 수심 2.5m를 유지하는 정상상태 모의를 하였다. 본 연구에서는 137개노드를 이용했으며, 기타 조건은 모두 동일하게 모의하였다.

	Region-1	Region-2	Region-3
Length	300m	300m	400m
Bed Slope	0.002	0.009	0.001

Table 2.1 수로 구간별 길이 및 경사

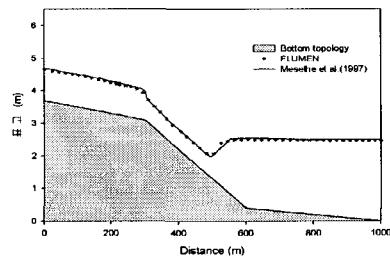


Figure 2.1 종방향 수심분포도

해석 해와 도수 발생지점이 일치하지만, 와(eddy)가 발생하는 천이구간에서 1차원 해석보다 수심이 높게 나타난다. 이는 지배방정식이 정수압 분포를 가정한 보존형 방정식이지만 도수가 발생하는 구간은 수면형이 급변하는 급변류 구간으로서 정수압 분포 가정을 적용할 수 없으며, 2차원 천수방정식은 수심방향 적분형 방정식으로 연직방향 성분 변화에 대한 항이 포함되어 있지 않아, 급변 구간에서 소산되어야 할 에너지가 보존되기 때문이다.

2.2 원형교각 주변에서의 흐름

2차원 천수방정식을 이용한 원형교각 주변 흐름 연구는 Yulistianto 등(1998)에 의해 수행되었으며, 난류응력과 확산응력이 포함된 2차원 천수방정식을 이용하여 수치 모의를 수행하였다.

Table 2.2 Yulistiyanto 등(1998) 수치모의 조건

Cylinder		Channel : Uniform Flow							
D (m)	R_D 10^5	B/L (m/m)	Q (m^3/s)	S_o 10^{-4}	n	U_∞ (m/s)	V_∞ (m/s)	h_∞ (m)	
0.22	1.48	2.0/4.0	0.248	6.25	0.012	0.67	0.000	0.185	Calculated
-	-	-	0.248	6.25	0.012	0.67	0.016	0.185	Measured

FLUMEN은 원형 교각 상류의 수위가 관측 수위에 비해서 대략 3%정도 크게 모의가 되며, 교각 주변 최저 수심은 관측 수위에 비해서 12.27% 더 낮게 결과가 나타났다. 또한 교각 하류단 경계 조건인 0.185m 수심으로 빠르게 회복하는 것으로 나타났다. Figure 2.3에 나타난 수심 오차는 지배방정식에서 확산 응력항이 포함되지 않아 교각 주변의 수심 분포 오차가 더 크게 나타나는 것으로 판단된다.

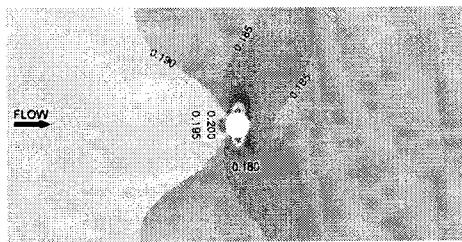


Figure 2.2 원형 교각 주변 수심 분포도

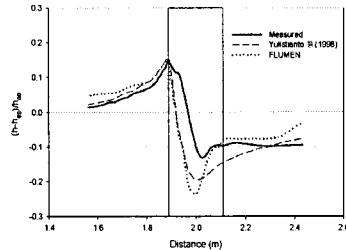


Figure 2.3 수로 중심선을 따른 수심 분포

2.3 180° 만곡부 흐름

180° 만곡수로에 대한 검증은 Rozovskii(1961)의 실험결과를 토대로 이루어졌으며, Rozovskii의 실험수로 제원은 Table 2.2와 같다. 180° 만곡수로는 2,377개의 격자로 구성되었으며, 제시된 Chezy계수를 상류단 초기조건을 이용하여 Manning 조도계수 0.012를 환산하였다.

Table 2.3 Rozovskii(1961)의 만곡수로 실험 조건

Width B (m)	Chezy factor ($m^{0.5}/s$)	Re	Bend radius (m)	Slope	Discharge Q (m^3/s)	Flow depth (m)
0.8	60	15,600	0.4/1.2	-	0.0123	0.058

Figure 2.4은 실험수로 결과와 Leschziner의 3차원 수치모의 결과를 비교한 것이다. 두 모의 결과에서 내측수로에서 실험치와 최대 오차가 발생하며, 최대 수심오차는 Leschziner의 계산결과는 2.3%, FLUMEN은 5.5%이다. 3차원 모형에 비해 내측수로에서는 수심 분포가 과소하게 나타나며, 외측 수로에서는 과대하게 나타난다. 특히 상류 유입부에서의 수심 계산 결과 3차원 결과는 매우 정확하게 나타나며, FLUMEN은 내·외측 각각 1.7%, 3.5% 높게 계산되고 있다. 하지만 하류부 출구점 부근에서는 내·외측 수로에서 모두 1% 미만의 수심 오차로 계산되어 매우 정확한 계산 결과를 보인다. Figure 2.5는 Rozovskii의 실험 결과를 이용한 2차원 수치모의 결과를 토대로 FLUMEN 계산 결과를 비교한 것이다. ADI scheme을 사용한 Molls와 Chaudhry의 결과와 two-step split-operator 방법을 사용한 Lien등의 결과 모두 상류 유입부에서 FLUMEN과 거의 동일한 수위를 계산하였다. 특히 Molls와 Chaudhry의 결과는 최대 수심 오차 역시 5.5%로 FLUMEN과 거의 일치하는 계산 결과를 보여주고 있다.

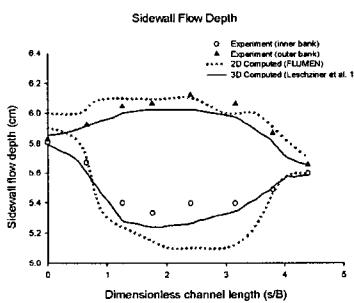


Figure 2.4 실험수로와 3차원 모형과의 수심

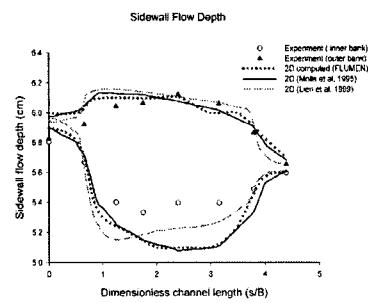


Figure 2.5 실험수로와 2차원 모형과의 수심

2.4 90° 합류부 흐름

Weber 등(2001)은 동일하폭 직사각형 단면수로가 90° 합류하는 경우에 대하여 주수로와 합류

수로의 유량 비에 따라서 합류부 주변의 수심 분포와 유속 분포를 제시하였다. Huang 등(2002)은 Weber의 수로실험 결과를 이용해 3차원 수치모형의 검증과 합류부 주변의 흐름을 살펴보았다. Weber는 무경사 조건에서 철제수로에서 실험을 수행하였으며, 조도계수는 Huang의 3차원 모의에 서도 명시하지 않았기 때문에 0.012로 추정하였으며, 8,563개의 격자로 구성되었다.

Table 2.4 Weber의 합류수로 실험 유량비

Main Channel Flow Rate	Branch Channel Flow Rate	유량비 $Q^* (Q_{\text{main}} / Q_{\text{total}})$
0.043	0.127	0.250
0.127	0.043	0.750

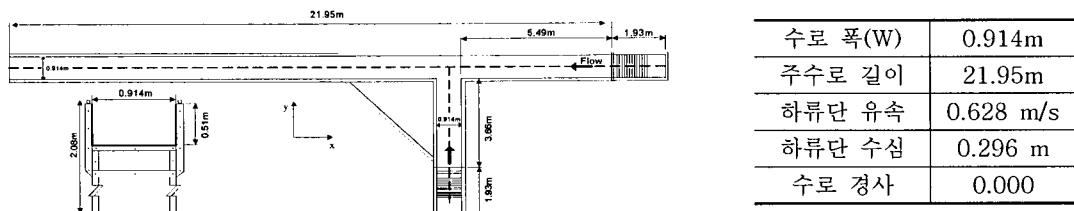


Figure 2.6 합류 실험 수로 제원 (Weber 등, 2001)

유량비(Q^*) 0.25와 0.75 두 경우에 대해서 모의를 수행한 결과, 합류 수로 실험치 및 유한 차적법을 이용한 3차원 수치모의 결과와 유사한 수심 분포 형태를 나타내고 있다. 합류 수로가 위치한 하류방향 좌측 수로 벽면에서 합류 후 흐름정체 구역에서 수심이 더 낮게 분포를 이루며, 우측 수로 벽면에서는 전체적으로 실험 수심 분포보다 높은 결과를 나타내었다. 하지만 그 오차는 좌우측벽면 근처에서는 0.005m 이내의 오차 범위를 나타나고 있다. 또한 유량비 0.75일 때, 합류 수로 출구점 우측에서 발생하는 유량비에 따라 변화하는 흐름정체 구역이 뚜렷이 나타나는 것을 확인할 수 있다.

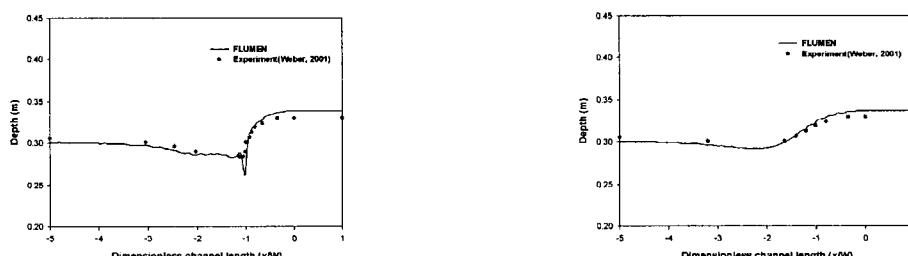


Figure 2.7 $Q^* = 0.25$ 실험 및 FLUMEN 수심 분포 비교 (좌) 좌측벽 (우)우측벽

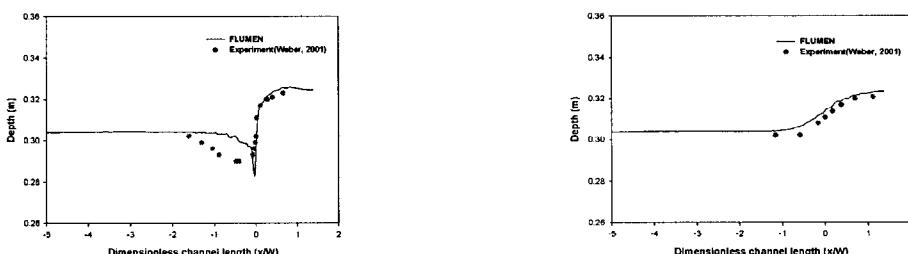


Figure 2.8 $Q^* = 0.75$ 실험 및 FLUMEN 수심 분포 비교 (좌) 좌측벽 (우)우측벽

3. 결 론

FLUMEN 모형에 대하여 천이류 흐름 수치분석 결과와 원형교각 주변, 180° 만곡수로, 합류수로 실험결과와 그 결과를 비교 분석해 보았다. FLUMEN의 지배 방정식은 보존형 방정식이므로 와(vortex)가 발생하는 천이구간에서 소산되어야 할 에너지가 보존되어 수위가 1차원 해석해보다 높게 나타난다. 하지만 도수 전후 수심 분포와 도수 발생 지점이 1차원 해석해와 거의 일치하는 높은 정확도를 나타내고 있다.

또한 FLUMEN 지배방정식은 확산 응력항이 무시되어 만곡수로에서는 내측 수심이 실험치보다 더 낮게 나타나고, 원형 교각 주변에서는 수위 저하부에서 확산응력을 고려한 2차원 수치 모의 결과보다 더 낮은 수심을 나타낸다. 그리고 합류 수로에서는 흐름 분리구역에서 수심이 급격히 낮아진 후 회복하는 현상이 유량비에 상관없이 나타나고 있다.

하지만 유한 체적법을 이용한 수치 계산으로 천이구간에서 발생하는 불연속점에서도 수치 모의가 잘 이루어지며, 만곡 수로와 합류 수로에서 전체적인 수심 분포가 최대 6%미만의 오차를 보이고 있어 매우 양호한 수치 모의를 할 수 있다.

지형 격자 생성 면에서 임의의 기하학적 형상을 원하는 위치에 정확한 제원을 반영한 지형 격자망 생성이 가능하기 때문에, 실제 하천에 설치된 교각 제원을 지형 격자망에 그대로 반영하여 수치모의를 할 수 있는 장점을 지니고 있다.

따라서 FLUMEN은 교각 주변, 만곡부 및 합류부 흐름 특성을 비교적 정확한 모의가 가능하며, 실제 하천에 적용하기에 충분한 수치 모의 능력을 지닌 모형이라 판단된다.

참 고 문 헌

1. 배용훈, 고덕구, 조용식 (2005). "FLUMEN 모형을 이용한 홍수범람 모의", 한국수자원학회 논문집, 제38권 제5호, pp.355-363
2. Chow, V. T. (1959). "Open-Channel Hydraulics", McGraw-Hill Book Company.
3. Graf, W. H. and Yulistiyanto, B. (1998). "Experiments of flow around a cylinder; the velocity and vorticity fields" J. of Hyd. Res., IAHR, Vol. 36, No. 4, pp. 637-653
4. Huang, Jianchun, Weber, Larry J. and Lai, Young G. (2002). "Three - dimensional numerical study of flows in open channel junctions" J. of Hyd. Eng., ASCE, Vol. 128, No. 3, pp. 268-280
5. Lien, H. C., Hsieh,T. Y., Yang, J. C., Yeh, K. C. (1999). "Bend-flow simulation using 2D depth-averaged model" J. of Hyd. Eng., ASCE, vol.125, No. 10, pp. 1097-1108
6. Molls, T. and Chaudhry, M. H. (1995). "Depth-averaged open channel flow model" J. of Hyd. Eng., ASCE, Vol. 121, No. 6, pp. 453-465
7. Rozovskii, I. L. (1961). "Flow of water in bends of open channels" The Israel Program Scientific Translations, Jerusalem.
8. Weber, Larry J., Schumate, Eric D. and Nicola Mawer (2001). "Experiments on flow at a 90° open-channel junction" J. of Hyd. Eng., ASCE, Vol. 127, No. 5, pp. 340-350
9. Yulistiyanto, B., Zech, Y., and Graf, W. H. (1998). "Flow around a cylinder: shallow-water modeling with diffusion-dispersion" J. of Hyd. Eng., ASCE, Vol. 124, No. 4, pp. 419-429