

2차원 하천 흐름해석을 위한 난류 모형의 개발

Development of Turbulence Model for Two-Dimensional River Analysis

최승용*, 한건연**, 남기영***, 권택훈****

Seung Yong Choi, Kun Yeun Han, Ki Young Nam, Taek Hoon Kwon

요 지

최근의 기후변화는 강우강도의 증가로 인한 홍수의 빈도 및 홍수량의 증가로 인한 홍수 피해의 증가를 유발하고 있으며, 갈수기 및 평수기의 유량감소로 인한 수질의 악화와 부유사의 증가로 인한 피해가 증가하고 있는 실정이다. 이러한 피해에 대한 대책으로는 기후변화를 유발하는 전 지구적인 온난화의 대책이 가장 선행되어야 하겠으며, 또한 이수, 치수를 위한 정확한 하천해석을 통한 하천관리가 매우 중요한 실정이다. 하천관리는 경제·산업적 측면에서 중요한 분야이며, 바람직한 하천관리를 위해서는 하천의 거동에 대한 정확한 해석이 필수적이다. 많은 흐름 해석에서 섬이나 하천 구조물의 주위에서 복잡한 2차원적인 하천 흐름의 특성을 잘 나타낸다. 2차원 수치모형들은 이러한 불규칙한 경계면에서 발생하는 난류흐름을 처리하는데 어려움이 있다. 이는 대부분의 실제하천이나 홍수와 해석, 댐 붕괴류 해석, 조수영향과 같은 해안공학의 문제에서도 발생한다. 본 연구에서 개발한 난류해석기법의 적용성을 검증하기 위하여 내부경계가 존재하는 실험하도에 대한 수치모의를 수행하고 결과를 실험치, 해석해와 비교를 통하여 모형의 적용성과 적정 난류교환계수를 선정하였다. 실측치와 비교검토를 통하여 본 연구에서 개발된 2차원 난류해석을 유한요소모형의 적용성을 검증하였다.

핵심용어 : 유한요소모형, 난류해석기법, SU/PG 기법, Mixing Length 모형

1. 서 론

현재 전 세계적으로 지표수자원의 흐름·유사·오염물 관리를 위한 기술은 지구온난화와 이상 기후의 영향으로 자국의 수자원 확보와 국익추구의 관점에서 경쟁적으로 연구되고 있는 실정이다. 자연하천에서의 흐름특성에 대한 정확한 이해는 홍수예측, 홍수방어시설, 댐, 발전소, 취수구 등의 설계에 필수적일 뿐만 아니라 유사이송, 수질해석을 위해서 매우 중요하다. 그러나 한 국가에서의 하천 및 유역관리는 각 나라에서 지역적인 하천 수자원의 기본적 특성이 모두 다르기 때문에 선진국에서 개발된 기술만을 도입해서는 해결될 수 없는 고유한 특성을 가지고 있다. 특히 우리나라는 산지하천이 많이 분포되어 있고, 하상계수가 크게 나타나는 등 고유의 하천 수리·수문학적 특징을 가지고 있다. 뿐만 아니라 홍수 시 하천의 만곡부나 협착부에서의 흐름은 기본적으로 2차원 흐름으로서 이 경우 하천 흐름의 수위와 유속 분포는 1차원 하천 모형으로 모의할 수 없다. 특히

* 정회원 · 경북대학교 건축토목공학부 박사수료 · E-mail: ecofriend@knu.ac.kr

** 정회원 · 경북대학교 토목공학과 교수 · E-mail : kshanj@knu.ac.kr

*** 경북대학교 건축토목공학부 석사과정 · E-mail: nky0627@hotmail.com

**** 경북대학교 건축토목공학부 석사과정 · E-mail: babgrk@naver.com

우리나라와 같이 하천에 하구둑, 보, 기타 하천 구조물이 많은 경우에는 2차원적인 흐름 해석은 경우에 따라 필수적이다. 따라서 이러한 우리나라의 수리·수문상황에서 볼 때 지표수의 흐름, 유사, 오염물 해석기술의 확립이 매우 시급한 실정이다.

이러한 점을 감안하여 본 연구에서는 하천 흐름해석에서 복잡한 지형 조건과 불규칙한 경계조건을 가진 자연하천에서의 홍수류를 모의하는데 적합한 Streamline Upwind/Petrov-Galerkin 기법에 의한 유한요소모형을 기반으로 하여 난류해석기법을 개발하였다.

2. 난류해석모형의 개발

수심평균 혼합길이 모형(Mixing Length Model)은 다른 난류해석모형에 비하여 비교적 쉽게 표현된다. 이 방법의 기본적인 가정은 난류에 대하여 등방성이고 지역적으로 평형을 이룬다는 것이다. 흐름이 난류일 경우 운동량 방정식에서는 유동항의 시간 평균의 결과로 Reynolds 전단력이 나타나게 되며, 이 방법은 Jia and Wang에 의하여 하천흐름해석에 적용되었다(Jia and Wang(1999)). 와점성계수는 수평방향평균유속비와 하상 마찰에 의하여 다음과 같이 표현된다.

$$\nu_t = l_s \sqrt{2S_{ij}S_{ij} + \left(2.34 \frac{u_f}{\kappa h}\right)^2} \quad (1)$$

$$l_s = \min(0.267\kappa h, \kappa d_{wall}) \quad (2)$$

여기서, κ = von Kármán 상수($\kappa=0.41$)

u_f = 하상 마찰 속도($\tau_{\pi} = \rho u_f^2$)

l_s = 가장 가까운 벽과의 거리

S_{ij} = 변형을 벡터

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \quad (3)$$

3. 모형의 적용

3.1 인공하도에 대한 적용

실제적인 개수로 흐름에 대하여 2차원 수치모형을 수행할 때, 수공구조물이나 섬과 같은 지형적인 요인에 의하여 내부경계가 존재하기도 하며, 혼합 요소망을 적용하기도 한다. 이에 본 연구에서는 내부경계가 존재하는 혼합 요소망을 구축하고 이에 대하여 검증하고자 한다.

본 연구에서는 Yulistiyanto 등(1998)이 수행한 원형의 내부경계가 존재하는 실험하도에 대하여 동일한 모의조건으로 모형을 수행하고 실험치와 검증하고자 한다. 인공하도의 폭은 2 m, 길이는 4 m이며, 내부경계는 0.22 m의 원형의 형상이 존재한다. 조도계수는 0.012의 값을 적용하였으며, 경계조건으로는 상류단은 유량 경계조건을 적용하였으며, 하류단은 수위 경계조건을 적용하였다. 요소의 수는 1,976개, 절점의 수는 2,068개에 대하여 20개의 삼각형 요소와 1,956개의 사각형 요소로 구성된 혼합 요소망을 구축하였다. 계산시간은 Yulistiyanto 등(1998)의 적용과 동일한 4.2 sec

와 4.4 sec에 대하여 경계조건을 변화시켜 2가지 경우에 대하여 모의를 수행하였으며, 적용 요소망을 그림 1에 나타내었고 모의조건은 표 1과 같다.

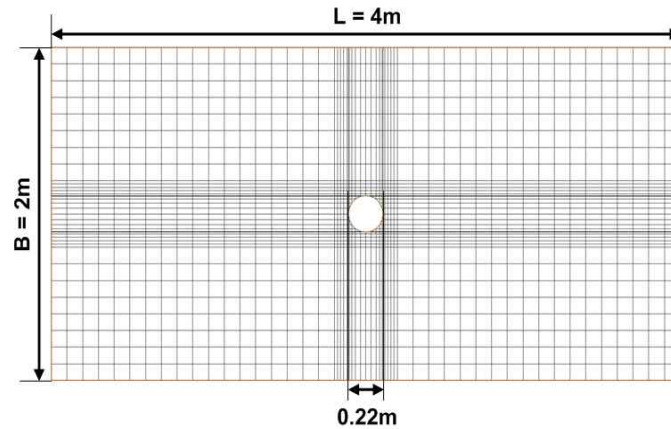


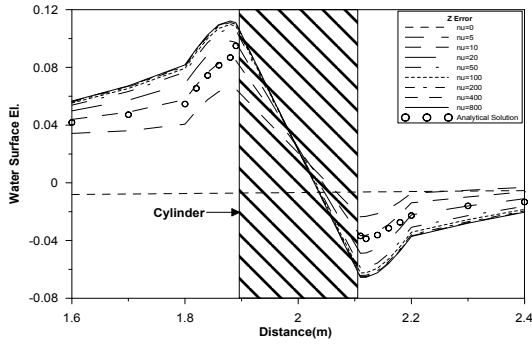
그림 1 내부경계가 존재하는 실험하도의 요소망

표 1 내부경계가 존재하는 실험하도의 모의조건

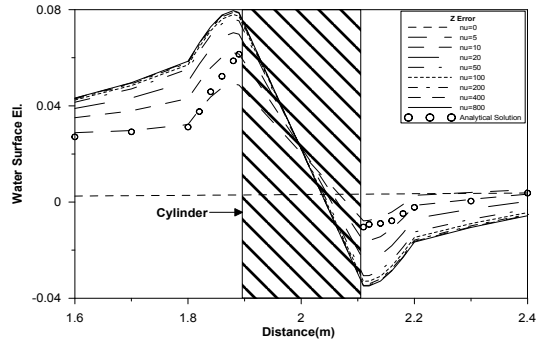
	D (m)	B/L (m/m)	S_0 (10^{-4})	n	요소수	절점수	상류단	하류단
							유량(m^3/s)	수위(m)
Case1	0.22	2/4	6.25	0.012	1,976	2,068	0.248	0.185
Case2			2.80				0.149	0.173

내부 경계가 존재하는 실험하도에 대하여 0 ~ 800 m^2/sec 사이 값의 와점성계수를 적용하여 와점성계수의 크기에 따른 수위에 대한 영향을 검토한 결과와 Yulistiyanto 등(1998)의 실험 결과를 그림 2와 같이 도시하였으며, 그림 2의 그래프에서 나타난 결과와 같이 와점성계수의 크기가 커질수록 내부 경계가 나타나기 전까지의 단면에서 수위가 증가하는 경향을 나타내었으며, 내부 경계가 나타나는 단면이후에는 와점성계수 값이 증가할수록 수위가 감소하는 경향이 나타났다. 또한 난류를 고려하지 않은 경우에는 내부경계의 영향이 거의 나타나지 않았으며, 와점성계수가 200 m^2/sec 이상인 경우 와점성계수의 변화에 따른 수위의 증가가 거의 없는 것으로 관찰되었다.

수위에 대한 수치모의 결과에 대하여 Yulistiyanto 등(1998)의 실험 결과와 비교한 결과, Case1의 경우는 내부 경계와 접촉되는 지점에 대해서는 20 m^2/sec 의 값을 적용한 경우 가장 가깝게 나타났으며, 전체적인 경향에 대해서는 10 m^2/sec 의 값을 적용한 것이 적절한 것으로 확인할 수 있다. Case2의 경우는 내부 경계와 접촉되는 지점에 대해서는 10 m^2/sec 의 값을 적용한 경우 가장 가깝게 나타났으며, 전체적인 경향에 대해서는 5 m^2/sec 의 값을 적용한 것이 적절한 것으로 확인할 수 있다. 이러한 모의 결과에 대하여 도시한 결과만으로 판단한다는 것은 매우 어려운 일이며, 오차의 정량적인 분석을 통해서 대상 하도에 대한 적절한 값을 도출할 수 있다고 판단된다. 이에 본 연구에서는 Yulistiyanto 등(1998)의 실험치와 본 연구개발모형의 수치모의 값에 대하여 정량적인 오차분석을 통하여 대상유역에 적절한 계수를 도출하고자 수위에 대한 오차분석 결과를 표 2 ~ 표 3에 나타내었다.



(a) Case1



(b) Case2

그림 2 내부 경계가 존재하는 하도에 대한 수치모의 결과

표 2 Case1 오차 분석결과

Eddy Viscosity	$L_1 error$	$L_2 error$	$L_\infty error$	mean error
0	4.999E-02	2.674E-01	3.795E-01	5.235E-04
5	2.380E-03	5.715E-02	1.400E-01	4.030E-05
10	3.216E-03	1.658E-02	7.890E-02	3.469E-06
20	5.498E-03	4.537E-02	1.672E-01	1.507E-05
50	3.406E-03	6.203E-02	2.047E-01	4.747E-05
100	2.868E-03	7.139E-02	2.284E-01	6.429E-05
200	3.428E-03	1.003E-01	3.162E-01	7.368E-05
400	2.496E-03	7.981E-02	2.499E-01	7.860E-05
800	2.401E-03	8.015E-02	2.505E-01	8.105E-05
1000	3.140E-03	1.056E-01	3.295E-01	8.164E-05
2000	2.385E-03	8.182E-02	2.553E-01	8.260E-05
4000	2.339E-03	8.117E-02	2.529E-01	8.313E-05

표 3 Case2 오차 분석결과

Eddy Viscosity	$L_1 error$	$L_2 error$	$L_\infty error$	mean error
0	4.054E-02	1.955E-01	2.206E-01	1.473E-04
5	1.443E-04	2.432E-02	6.305E-02	3.684E-06
10	4.948E-03	3.375E-02	1.532E-01	7.237E-06
20	7.560E-03	8.292E-02	3.187E-01	2.650E-05
50	5.245E-03	9.077E-02	3.181E-01	5.130E-05
100	4.761E-03	9.914E-02	3.381E-01	6.245E-05
200	5.809E-03	1.332E-01	4.490E-01	6.842E-05
400	4.454E-03	1.072E-01	3.592E-01	7.148E-05
800	4.359E-03	1.072E-01	3.584E-01	7.304E-05
1000	5.569E-03	1.380E-01	4.611E-01	7.335E-05
2000	4.353E-03	1.090E-01	3.636E-01	7.397E-05
4000	4.309E-03	1.082E-01	3.606E-01	7.432E-05

Case1의 오차분석결과 $L_1 error$ 를 제외하고 다른 오차분석기법의 적용에서 $10 m^2/sec$ 의 와점 성계수의 적용이 가장 우세하게 나타났으며, Case2의 오차분석결과 모든 오차분석기법의 적용에

서 $5 \text{ m}^2/\text{sec}$ 의 와점성계수의 적용이 가장 우세하게 나타났으며 내부경계가 존재하는 대상 하도에 대한 와점성계수의 적용은 $5 \text{ m}^2/\text{sec} \sim 20 \text{ m}^2/\text{sec}$ 사이의 값을 적용하는 것이 타당하다고 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 복잡한 지형 조건과 불규칙한 경계조건을 가진 자연하천에서의 홍수류를 모의하는데 적합한 Streamline Upwind/Petrov-Galerkin 기법에 의한 유한요소모형을 기반으로 하여 난류해석기법을 개발하였다. 본 연구의 주요 연구결과는 다음과 같이 요약될 수 있겠다.

- (1) 본 연구에서는 불규칙한 경계조건을 가진 자연하천에서의 2차원 흐름 거동을 모의하는데 적합한 SU/PG 기법에 의한 유한요소모형을 기반으로 난류해석기법을 개발하기 위하여 다양한 난류해석기법을 검토하고 적절한 모형으로 와점성이론에 기반한 Mixing Length 모형의 적용을 통하여 2차원 흐름 해석을 위한 난류해석기법을 개발하였다.
- (2) 본 연구에서 개발한 유한요소모형의 검증을 위해서 내부경계가 존재하는 실험하도에 대하여 수치모의를 수행하고 Yulistiyanto 등(1998)의 실험 결과와 비교하고 오차에 대하여 분석하였다. 모의결과 내부경계가 존재하는 하도에 대하여 적절한 와점성계수를 $5 \text{ m}^2/\text{sec} \sim 20 \text{ m}^2/\text{sec}$ 로 선정하였다. 와점성계수가 증가할수록 내부 경계후면의 와류가 나타나는 영역이 커지는 결과를 확인할 수 있으며, 내부경계 전 · 후의 수위차가 크게 나타남을 확인할 수 있다.
- (3) 난류해석기법의 적용을 통하여 경계의 불규칙부분에 대하여 좀 더 정확한 2차원 해석을 실시할 수 있도록 구성되어 있다. 특히 개발모형이 오염물질의 이송-확산해석, 토사이송해석 등과 연계되어 해석된다면 하천에서의 흐름 해석 및 생태 수리 분야에 효과적으로 응용될 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원(과제번호: 2-3-3; 과제명: RAMS 적용)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- 한건연, 김상호 (2000). "Petrov-Galerkin 기법에 의한 하천에서의 이송-확산 해석." 대한토목학회 논문집, 제20권, 제2-B호, pp. 251-259.
- 한건연, 김상호 (2000). "유한요소법에 의한 낙동강 유역에서의 2차원 수질해석." 대한토목학회논문집, 제20권, 제4-B호, pp. 525-533.
- Shiono, K., and Knight, D.W. (1991). "Turbulent open-channel flows with variable depth across the channel." J. of Fluid Mechanics, Vol. 222, pp. 617-646.