

순환류의 특성에 관한 연구

박성윤* 윤병만**

1. 서론

하천이나 하구 또는 해안에서 수공 구조물이나 방파제 등에 의해 흐름이 급 확대 또는 축소될 경우 흐름은 크고 작은 순환류를 형성하게 되는데 이는 개수로 단면 급 확대부에서의 이동물질의 퇴적 및 침식, 조석류 순환에 따른 항내 수질오염, 도류제 등에 의한 해안선 변형 등에 큰 영향을 미치는 중요한 요소이다.

순환현상이 중요시되는 많은 경우에 있어 흐름은 2차원 수심적분된 방정식으로 나타낼 수 있는데, 해석과정에서 비선형 이류가속도항과 유체의 점성 및 난류효과에 의한 유효전단응력항을 적절히 처리해야하는 문제에 부딪히게 된다.

순환을 포함하지 않는 흐름에서는 이들 이류항 및 유효전단응력항을 무시하고 선형화된 천수 방정식을 풀어도 해에 큰 영향을 주지 않지만 순환류를 표현하기 위해서는 이들의 영향을 고려해야 함이 많은 연구결과 밝혀져 있다.

Kuipers와 Vreugdenhil(1973)은 이들 유효전단응력항을 직접 지배방정식에 포함시키지 않고 계산된 유속에 가중값을 주어 공간평균하는 과정을 도입함으로써 유효전단응력과 유사한 효과를 갖도록 시도하였다. Ponce와 Yabusaki(1981)도 이와 유사한 방법으로 2차원 순환류의 생성 과정과 이와 관련된 물리적, 수치적 요소들의 영향을 연구하였으며, 그 후 Tawatchai등(1991)이 수리 모형실험과 수치실험을 병행하여 유사한 연구를 수행하면서 공간평균 수치모형의 타당성을 입증한 바 있다.

유체의 흐름은 난류운동효과에 의하여 그 운동량을 가상경계면(전단면)에서 주고 받으며 이로 인해 큰 운동량을 갖는 유체는 상대적으로 작은 운동량을 갖는 유체를 구동시키게 된다. 이러한 연속적 운동량 전달을 통하여 유체가 갖는 에너지가 점차 소모되는 점으로 미루어 볼 때, 매 계산단계마다 계산된 유속을 공간평균함으로써 인위적으로 운동량을 전달시키는 방법은 상당히 타당성 있는 시도라 할 수 있다. 또한 이 방법은 간편하면서 수치해의 안정에도 기여한다는 면에서 그 활용가치가 매우 높다고 할 수 있다.

이러한 공간평균에 사용될 계수의 크기는 난류운동의 크기에 따라 달라질 것이므로 유체가 갖는 운동량과 흐름장의 기하형상 등에 따라 많은 차이가 있으리라 예측할 수 있으나, 이에 대한 연구는 매우 미흡한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 2차원 순환현상을 수치모의함에 있어 공간평균방법의 타당성을 확인하고 공간평균계수의 물리적 의미를 고찰하였다.

* 대림산업(주)

** 명지대학교 토목공학과

2. 수리실험 및 수치모형

2.1 지배방정식

연속방정식:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial(HU)}{\partial x} + \frac{\partial(HV)}{\partial y} = 0$$

운동방정식:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} = -g \frac{\partial \eta}{\partial x} + \epsilon_x \left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} \right) - \frac{gU(U^2+V^2)^{1/2}}{C_z^2 H}$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} = -g \frac{\partial \eta}{\partial y} + \epsilon_y \left(\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} \right) - \frac{gV(U^2+V^2)^{1/2}}{C_z^2 H}$$

여기서, $\eta(x,y,t)$ 는 수면변위, $h(x,y)$ 는 정수면에서 바닥까지의 수심이며,

$$H = \eta + h$$

$$U = \frac{1}{H} \int_{-h}^{\eta} \bar{u} dz$$

$$V = \frac{1}{H} \int_{-h}^{\eta} \bar{v} dz$$

이다.

2.2 수치모형

수치모형은 그림 1과 같은 Staggered grid상에서 ADI방법을 사용하였다(Leendertse, 1967). 운동방정식에서 유효점성항은 매시간 단계마다 계산된 유속을 다음과 같이 공간평균함으로써 그와 유사한 역할을 갖도록 함과 동시에 수치계산의 안정성을 증진시켰다.

$$U_{j,k}^* = U_{j,k}(1-\alpha) + \frac{\alpha}{4} (U_{j-1,k} + U_{j,k-1} + U_{j,k+1} + U_{j+1,k})$$

$$V_{j,k}^* = V_{j,k}(1-\alpha) + \frac{\alpha}{4} (V_{j-1,k} + V_{j,k-1} + V_{j,k+1} + V_{j+1,k})$$

여기서, $U_{j,k}^*$, $V_{j,k}^*$ 는 공간평균된 유속값들을, α 는 가중치를 나타낸다.

2.3 수리실험

본 연구에서는 순환류를 수치모의함에 있어 공간평균수치모형의 타당성을 확인하고 적절한 공간평균계수의 결정기준을 마련하기 위한 기초작업으로서, 단면급확대부 및 급축소부를 갖는 단순

한 형태의 개수로에 대해서 수리실험을 수행하였다.

그림 2는 수리실험장치의 제원 및 구성을 나타낸다. 장치의 크기는 유입수로가 폭 0.6m × 길이 1.8m, 유출수로가 폭 0.6m × 길이 1.0m이며 중앙의 확대부는 가로 2.4m × 세로 3.0m의 크기로 제작하였다. 벽체높이는 0.6m였으며 유입수로에서 단면유속분포가 균등하도록 유입수로의 길이를 비교적 길게하였고 유공필터를 이중으로 설치하였다.

경계처리는, 상류측은 일정유량을 하류측은 일정수위를 유지하도록 함으로써 정상상태를 만들 수 있도록 하였다.

3. 결과 및 분석

본 연구에서는 수리실험 결과를, 공간평균방법으로 유효전단응력을 고려한 수치계산 결과와 비교함으로써 수치모형의 타당성을 확인하였으며, 이를 기초로 수역의 기하학적 형상, 수심 등과 같은 여러 물리적 요소들과 공간평균계수와와의 상호관계를 살펴보았다. 아울러, 바닥마찰 및 벽마찰이 수치해에 미치는 영향 등도 고찰하였다.

3.1 실험결과의 비교분석

조정(calibration)을 거친 수치계산 결과를 수리 실험의 관측값들과 비교하였다. 그림 3은 수치계산 결과와 실측치를 동시에 나타낸 유속 벡터도이다. 대부분의 경우 20% 미만의 편차를 보이는 것으로 미루어 흐름장을 비교적 잘 재현하고 있음을 알 수 있다.

순환류를 발생시키는 동력원이 되는 유효전단응력은 유속의 공간평균방법으로 잘 나타낼 수 있다는 사실을 확인하였는데, 이때 유효전단응력 계수와 공간평균계수(α)와는 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$\varepsilon = \alpha \frac{\Delta x^2}{2 \Delta t}$$

유효전단응력의 크기는 흐름의 구성요소가 변하지 않는한 일정하다고 볼 수 있으며 이때 공간평균계수(α)의 크기는 동일한 유효전단응력을 갖도록 Δx , Δt 의 크기에 따라 달리 적용되어야 마땅하다. 이와는 달리, Δx 와 Δt 를 고정시켰을 경우에는 α 의 변화는 곧 유효전단응력의 변화를 의미하게 되며, α 가 커지면 유체는 마치 점성이 큰 유체처럼 거동하게 된다. 그림 4는 α 값을 변화 시켜 가면서 흐름 양상의 변화를 비교하여 본 것이다. α 값이 증가하면서 유출부쪽에 형성되었던 강한渦가 억제 되었으며 전반적으로 유속이 감소하고 있음을 볼 수 있다.

순환을 일으키는 유효전단응력은 흐름의 난류효과가 클 수록 그 영향이 커지게 되므로 수로의 형상이 복잡하거나 장애물이 많이있어 흐름의 급변화 및 굴곡이 잦은 경우는 보다 큰 α 값이 적용되어야함을 예상할 수 있다. 본 연구에서는 수리실험값이 존재하는 두가지 경우를 적절히 재현하는 α 값에 대하여, 수로의 기하형상 및 제반실험 조건과 연관지어 비교한 결과 복잡한 경우가 단순한 경우보다 α 값이 커야 한다는 사실을 확인할 수 있었다.

수치계산에서 Δx 가 고정된 상태에서는 수심이 클수록 난류전단응력이 작용하는 측면적이 커지게 된다. 따라서 인접한 물기둥사이에 교환되는 운동량이 증가될 것이므로, 평면적으로는 같

은 흐름 양상을 보이더라도 수심이 클수록 더 큰 α 값이 사용되어야 한다고 판단된다. 이러한 사실을 확인하기 위하여 동일한 경계조건과 수치변수를 사용하여 수심만을 8cm, 16cm, 32cm 로 2 배씩 크게하면서 평면적 유황이 서로 같게 되도록 하는 α 값들을 구하여 비교하였다. 수심이 증가할수록 α 값이 증가하는 경향을 알 수 있었으나, 수심과의 상호관계를 구체적인 함수관계로 나타내기는 곤란하였다. 이는 수심의 변화에 따라 α 뿐 아니라 바닥마찰 및 벽마찰의 영향 등이 복합적으로 작용하여 유효전단응력의 크기를 결정하기 때문이다.

바닥마찰계수의 변화가 흐름장에 어떠한 영향을 미치는가를 살펴보기 위해, 바닥마찰계수를 변화시켜 가면서 수치실험을 수행하여 그 결과를 비교하여 보았는데 바닥마찰계수가 클수록 전체적인 유속의 감소현상을 확인할 수 있었으며, 아울러 주 흐름이 단면 급확대부에서 측방향으로 퍼지고 있는 것을 볼 수 있었다.

한편, 바닥마찰이 유효전단응력과 다른점은 바닥마찰이 흐름장 전체의 유속을 감소시키는 역할을 하는데 반하여, 유효전단응력의 경우는 주흐름의 유속은 감소시키지만 인접한 유체의 유속은 증가시키는 즉, 에너지가 큰쪽에서 작은쪽으로 전달되면서 소모되도록 한다는 점이다. 유효전단응력의 이러한 에너지전달 역할은 바로 순환현상을 일으키는 원인이기도 하다.

수치모형으로 전체적인 흐름장을 보다 정확히 재현하기 위해서는 벽면 근처 유속의 크기에 벽마찰이 미치는 영향을 고려하여야 한다. 본 실험에서는 perfect-slip과 no-slip의 중간형태가 적절한 것으로 판단되었다. 그러나, 벽마찰의 영향은 수치모형의 분해능이 클수록 즉, 격자크기가 작을수록 커서 no-slip조건에 가까워지며 그 반대일수록 작아져 perfect-slip조건에 가까워지므로 격자크기에 따라 적절히 결정되어야 한다.

4. 결론

이상과 같은 연구로부터 얻은 내용을 간단히 정리하면 다음과 같다.

우선, 수치실험에서 관측된 순환류를 유속공간평균방법을 이용하여 유효전단응력을 고려한 수치모형으로써 잘 나타낼 수 있었다.

순환류를 수치모형으로 재현하는 과정에서 Ponce와 Yabusaki(1981)가 제안한 안정조건($C_r < 0.5$)이 잘 맞는것을 알 수 있었고, 공간평균계수(α)의 크기는 관계식 $\epsilon = \alpha (\Delta x^2 / 2 \Delta t)$ 에서 알 수 있듯이 시간중분 (Δt), 거리중분 ($\Delta x, \Delta y$)의 크기와 관련되어 대상흐름의 순환형상, 순환속도 등에 상응하는 적정 유효전단응력계수(ϵ)가 되도록 결정되어야 한다는 사실도 확인하였다.

실제 유황을 모의하는데는 벽마찰의 영향도 적절히 고려하여야 하며 이는 수치모형의 격자크기에 따라 달라져야 한다는 사실도 간과할 수 없다. 벽마찰의 고려는 수치해의 안정성을 증진시키는 효과도 갖는다. 다음으로는 대상수역의 기하형상이 복잡할수록, 수심이 커질수록 난류효과가 커지게 되므로 공간평균계수도 따라서 커져야 한다는 사실을 수치실험에 기초한 여러 수치실험 결과 알 수 있었다.

한편, 유효전단응력은 주흐름의 유속을 감소시키면서 대신 인접유체의 유속을 증가시키는 즉, 에너지를 전달하는 역할을 하는데 비해 바닥마찰의 존재는 흐름장 전체의 유속을 똑같이 억제한다는 점에서 그 성격이 다르다는 사실도 주목할 만 하다.

끝으로 본 연구를 수행하면서, 무엇보다도 순환류와 관련된 자료들을 많이 확보하고, 가능한

수리실험들을 통하여 유효전단응력계수와 공간평균계수의 적정크기를 경우에 따라 정량적으로 제시할 필요성을 절감하였다. 특히 경계처리 영향을 좀더 세밀히 확인하기 위한 연구와 유속과 공간평균계수 및 수치해의 안정성과의 상호관계에 관한 연구가 추가되어야 할 것으로 사료된다.

5. 참고문헌

Kuipers, J., and Vreugdenhil, C. B., *Calculation of Two-Dimensional Horizontal flows*, Report S 16301, Delft Hydraulics Laboratory, Delft, The Netherlands, Oct. 1973

Leendertse, J. J., *Aspects of a Computational Model for Long-Period Water Wave Propagation*, RM-5294-PR, The Rand Corporation, Santa Monica, Calif, May, 1967

Ponce, V. M. and Yabusaki, S. B. *Modeling Circulation in Depth-Averaged Flow*, Journal of the Hydraulics Division, ASCE, Vol.107, No. HY11, Proc. Paper 16640, Nov., 1981, pp. 1501-1516.

Tawatchai Tingsanchali & Bonchird Chirananont, *Investigation of Flow Circulation in a Channel Side Pool*, Journal of Environmental Hydraulics, 1991, pp. 467-472.

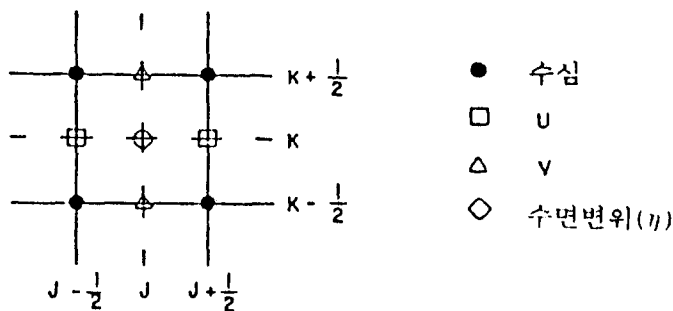


그림 1 Staggered grid

