

3차원 수치모형을 이용한 수제 주변 흐름의 수치모의

Three Dimensional Numerical Simulation of Flows around Spur-Dike

최성욱*, 양원준**

Sung-Uk Choi, Wonjun Yang

요 지

수제는 하천 흐름을 적극적으로 제어하여 수심을 유지하고, 소류력을 증가시키는 한편 수세를 줄여 토사의 침전을 유도하고자 하는 하천 시설물이다. 수제에 의한 역흐름장 (diverse flow fields) 혹은 수제역 (spur-dike zone)의 형성은 다양한 수중생물의 서식환경을 조성하거나 홍수 시 어류의 피난처로 사용될 수 있기 때문에 최근 중시되고 있는 자연형 하천 공법에 수제가 도입되고 있다.

따라서 본 연구에서는 3차원 수치모형을 이용하여 수제 주변 흐름을 수치모의 하여 Rajaratnam과 Nwachukwu (1983)의 수리실험 자료 및 Tingsanchali와 Maheswaran (1990)의 2차원 수치모의 결과와 비교하였다. 수치모의 결과 이차흐름과 역방향 흐름이 크게 나타나는 수제 안쪽 및 제방과 가까운 지점에서는 수치모의 자료와 실험자료가 잘 일치하지 않는 결과를 보였으며, 이러한 지점을 제외한 다른 지점에서는 실험자료와 유사한 결과를 나타내고 있음을 확인하였다. 단일 수제에 의한 재순환영역 (recirculation zone)은 수제길이의 약 10배 지점인 것으로 나타났으며, 이는 기존의 연구결과와 유사하였다. 또한 수제 뒤편에 형성되는 와의 중심이 수면에 가까운 지점일수록 뒤로 이동하는 것을 확인하였다. 이는 Tominaga 등 (2001)의 실험결과와 유사한 것으로서 수심에 비례하여 수제 뒷부분에 형성되는 와의 크기가 커지는 것을 파악하였다.

핵심용어: 수제, 수제역, 재순환영역

1. 서 론

수제는 하천 흐름을 적극적으로 제어하여 수심을 유지하고, 소류력을 증가시키는 한편 수세를 줄여 토사의 침전을 유도하고자 하는 목적의 하천 시설물이다. 수제의 공학적인 기능은 하천 흐름에 의한 하상 세굴 방지, 하도내 유향 조절 및 하도 고정과 같은 공학적 기능을 갖고 있다. 또한 수제는 역흐름장 (diverse flow fields)이나 수제역 (spur-dike zone)을 형성하여 흐름과 유속에 변화를 줌으로서 수중생물의 다양한 서식환경 조성, 홍수 시 어류의 피난처 제공 등의 환경 기능을 가지고 있다. 따라서 최근 중시되고 있는 하천식생의 번식 및 어류의 서식처 조성 등의 순기능을 가지고 있는 수제가 자연형 하천공법에 도입되어야 한다. 하지만 수제의 설치에 따른 하천의 통수능을 감소시켜 수제 상류부에 홍수피해가 발생할 우려가 있으며, 설치된 수제 자체에 세굴이 발생할 수 있으므로 이에 대한 충분한 검토가 이루어져야 한다.

수제 주변의 복잡한 흐름장을 모의하기 위해서는 3차원 수치모형을 사용하여야 한다. 본

* 정회원 · 연세대학교 사회환경시스템공학부 토목 · 환경공학전공 부교수 · E-mail: schoi@yonsei.ac.kr

** 정회원 · 연세대학교 대학원 토목공학과 박사과정 · E-mail: pulip@yonsei.ac.kr

연구에서는 3차원 수치모형인 FLOW-3D 모형 (Sicilian 등, 1995)을 이용하여 수제 주변의 흐름을 재현하고 수제가 하천흐름에 미치는 영향을 분석하고자 한다. FLOW-3D에서는 난류 완결문제 (turbulence closure problem)를 해결하기 위하여 혼합거리 모형, 난류 에너지 모형, $k-\epsilon$ 모형, RNG $k-\epsilon$ 모형, LES의 5 개의 모형을 사용한다. 이 중 $k-\epsilon$ 모형은 다양한 연구자들에 의해 사용되었으며, 좋은 결과를 나타내는 것으로 알려져 있다 (Versteeg와 Malasekera, 1995). 따라서 본 연구에서는 3차원 $k-\epsilon$ 모형을 사용하여 수치 모의를 수행하고자 한다.

2. 연구동향

Rajaratnam과 Nwachukwu (1983)은 실험을 통하여 수제에 의한 흐름특성의 변화를 연구하였다. 이들은 유속의 측정을 위해 pitot tube와 3-yaw probe를 사용하였으며, 수제가 상류측으로는 짧은 거리에 하류측으로는 먼 거리까지 흐름을 교란시킨다는 것을 알아내고, 최대 전단력이 수제의 선단부에서 발생한다고 하였다.

Tingsanchali와 Maheswaran (1990)은 Rajaratnam과 Nwachukwu (1983)과 Francis 등 (1968)의 실험자료를 바탕으로 수심적분된 2D $k-\epsilon$ 모형으로 수치모의를 수행하였다. 유선의 곡률과 수제에 의한 흐름의 3차원 효과를 반영하기 위하여 보정계수를 $k-\epsilon$ 모형에 적용하고 이들의 수치모형이 실험자료와 유사하게 나타난다고 하였다.

Molls 등(1995)은 수심적분된 천수방정식을 통하여 수제주변의 흐름을 수치모의 하였다. 이들은 수치모의의 방법으로 ADI implicit scheme과 MacCormack explicit scheme을 사용하였으며, 벽에 대해서는 no-slip 조건과 수제에 대해서는 free-slip 조건을 주었다. 이들은 모형을 단순화하기 위하여 와점성계수를 상수로 주어 수치모의를 수행하였으며 수치모의의 결과가 Rajaratnam과 Nwachukwu (1983)의 실험자료와 유사함을 알아내었다. 그리고 수제 주변에서 와점성계수를 얻을 수 있다면 더 진보된 난류 모형과 유사한 결과를 나타낸다고 하였다.

Mizumura와 Yamasaka (2002)은 완도 (embayment)에서의 흐름 특성을 2차원으로 수치 모의하고 실험을 통해 직사각형 완도와 정사각형 완도의 흐름특성을 비교하였다. 이들은 유속의 실험 값과 수치모의한 값의 비율과 각의 크기의 차이를 비교하기 위해 통계적인 기법을 도입하였으며, 계산 결과 완도의 중심에서는 수치모의한 값과 실험으로 구한 값에서 그 차이가 크게 발견되지 않았으나 완도의 벽면에서는 큰 차이가 있었다. 이들은 이러한 벽면에서의 오차가 이들이 사용한 2D 모형의 한계를 나타낸다고 하였으며, 완도의 설계나 퇴적 율 등을 추정하기 위해서는 3D 모형을 적용해야한다고 주장하였다.

3. 수제 주변 흐름의 3차원 수치모의

본 연구에서는 FLOW-3D 모형을 이용하여 수제 주변의 평균유속 분포 및 난류량을 수치모의 하였다. FLOW-3D 모형이 제공하는 난류모형 중 본 과업에서는 $k-\epsilon$ 모형을 이용하여 수치모의 하였다. Rajaratnam과 Nwachukwu (1983)의 실험자료를 이용하여 FLOW-3D 모형을 검증하였다.

Rajaranam과 Nwachukwu (1983)의 실험은 비월류 단일 직각 수제의 설치에 의한 흐름 특성을 알아보기 위하여, 길이가 36.58 m, 폭 0.9144 m의 수로에서 수제의 길이와 유속 등을 변화시키면서 흐름 특성을 살펴보았다. 유속을 측정하기 위하여 Prandtl type의 pitot tube와 3-yaw probe를 사용하였으며, 본 연구에서는 Rajaranam과 Nwachukwu의 A1 실험의 자료를 바탕으로 수치모의를 하였다.

3.1 모형 적용 결과

본 연구에서는 FLOW-3D의 모형을 이용하여 얻은 유속자료를 통해 실험자료와 비교를 수행하였다. 수심적분된 유속과 각 지점에서의 유속크기 (velocity magnitude)는 다음 식과 같다.

$$U = \frac{1}{h} \int u dz, V = \frac{1}{h} \int v dz \quad (1)$$

$$W = \sqrt{U^2 + V^2} \quad (2)$$

여기서 h 는 수심, U 는 수심적분된 흐름 방향 유속, u 는 흐름 방향 유속, V 는 수심적분된 횡방향 유속, v 는 횡방향 유속이다.

그림 1에서 가로축은 흐름방향 (x-방향) 무차원 거리를 나타내며, 세로축은 유속비를 나타낸다. 그림을 살펴보면 초기유속에 대한 유속비가 실험결과와 유사함을 확인할 수 있는데, Tingsanchali와 Maheswaran (1990)의 결과 또한 비슷한 경향을 나타내고 있다. 그리고 $y/b=1.0$, $y/b=1.5$ 인 그림을 보면 수체의 상류부에서 유속비가 약간 감소하다가 수체 부근에서 급격히 증가하고, 수체의 하류부에서 다시 감소하다가 원래의 초기유속을 찾아가는 것을 확인할 수 있다. 이는 수체와 인접한 곳에서 하폭이 줄어들어 유속이 증가하다가 하류부에서 와가 형성된 결과로 여겨진다. 또한 $y/b > 2.0$ 인 경우 수체 부근 유속비가 1.0 이상으로 나타나고, 하류부로 갈수록 초기유속을 찾아가는 것을 확인할 수 있다.

그림 2는 수체 주변의 유선과 재순환 영역 (recirculation zone)의 길이를 나타낸 것이다. Tingsanchali와 Maheswaran (1990)은 수치모의를 통하여 재순환 영역이 수체길이의 약 12배 지점까지 나타남을 보였으며, 그림에서 볼 수 있듯이 Molls 등 (1995)의 수치모의에서는 재순환 영역의 길이가 수체 길이의 12배가 되는 것으로 나타났다. 그리고 본 수치모의의 결과를 나타낸 그림 2(b)을 보면 수체의 선단에서 유선이 큰 곡률을 갖고 휘게 되는 것을 확인할 수 있었으며, 재순환 영역이 수체길이의 약 10배되는 위치까지 나타났다.

그림 3은 x-y 평면의 유속 벡터도이다. 그림에서 가로축은 수체로부터의 x-방향 거리를 나타내고 세로축은 수체가 있는 제방에서부터의 y-방향 거리를 나타낸다. 그림을 살펴보면 수체 후면부에서 역방향 흐름이 생기는 것을 확인할 수 있으며, 수체 선단부에서 유속이 증가하는 것과 유향의 변화가 뚜렷이 나타났다. 각각의 그림을 비교해보면 수면에 가까워질수록 와류의 중심 (center of vortex)이 하류로 이동되는 것을 확인할 수 있었고, 그 영역의 범위도 확대된 것을 알 수 있었다. 이것은 Tominaga 등(2001)의 결과와 유사한 것이다.

4. 결론

본 연구에서는 FLOW-3D 모형을 이용하여 수체가 설치된 직사각형 개수로 흐름을 3차원 수치모의 하였으며, 난류 완결식으로 많은 적용 사례를 가지고 좋은 결과를 얻는 것으로 알려진 k-ε 모형을 사용하였다. 수치모의 자료를 기존 Rajaratnam과 Nwachukwu (1983)의 실험자료, Tingsanchali와 Maheswaran (1990)의 2차원 수치모의 결과와 비교하여 본 연구에서 사용한 난류모형이 수체 주변 흐름을 정확하게 수치모의 하는지를 확인하였고, 수치모의 자료를 이용하여 수체에 의한 주변 흐름장의 변화에 대해 살펴보았다.

본 연구의 수치모의 자료를 기존 연구자료 (Rajaratnam과 Nwachukwu, 1983; Tingsanchali와 Maheswaran, 1990)와 비교하였다. 흐름방향에 다른 유속 크기 분포와 흐름 방향 유속의 횡방향 분포를 실험자료와 비교하였을 경우, 이차흐름 (secondary current)과 역방향 흐름이 크게 나타나는 수체 안쪽과 제방과 가까운 지점에서는 수치모의 자료와 실험자료가 잘 일치하지 않는 결과를 보였다. 이것은 본 연구에서 사용한 k-ε 난류모형이 등방성 모형이기 때문인 것으로 판단된다. 그러나 이러한 지점을 제외한 다른 지점에서는 실험

자료와 유사한 결과를 나타내고 있음을 확인하였다.

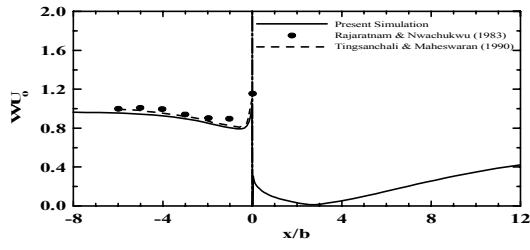
단일 수제가 영향을 미치는 영역인 재순환 영역 (recirculation zone)의 길이를 살펴보았다. 본 연구의 수치모의 결과는 재순환 영역의 길이가 수제길이의 약 10배로 나타났으며, 이에 대한 기존의 연구인 Tingsanchali와 Maheswaran (1990)와 Molls 등 (1995)의 수치모의 결과 또한 유사한 것을 확인하였다. 그리고 수제 뒤편에 형성되는 와의 중심이 수면에 가까워질수록 뒤로 이동하는 것을 확인하였다. 이는 Tominaga 등 (2001)의 실험결과와 유사한 것으로서 수심에 비례하여 수제 뒷부분에 형성되는 와류의 크기가 커지는 것을 보여주는 결과이다.

감사의 글

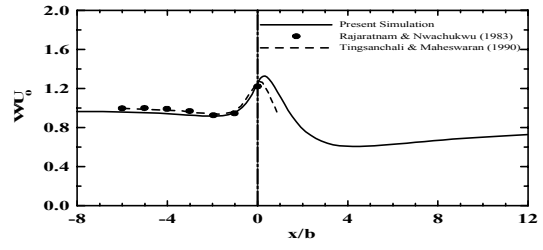
본 연구는 환경부의 “차세대 핵심환경기술개발사업(Eco-Technopil 21)” 지원에 의해 수행되었으며, 지원에 감사드립니다.

참고문헌

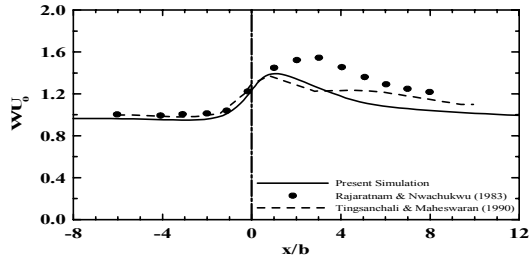
- 이원환 (1996). 하천공학, 동명사
- Elawady, E., Michiue, M., and Hinokidani, O. (2001). "Characteristics of scour around repelling spur-dikes." Proceedings of the XXIX IAHR Congress, IAHR, Beijing, China, CD-ROM.
- Liu, J., Tominaga, A., and Nagao, M. (1994). "Numerical simulation of the flow around the spur dikes with certain configuration and angles with bank." Journal of Hydroscience and Hydraulic Engineering, 12(2), 85-100.
- Mizumura, K. and Yamasaka, M. (2002). "Flow in Open-Channel Embayments." Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 128, No.12, 1098-1101.
- Molls, T., Chaudhry, M. H., and Khan, K. W. (1995). " Numerical simulation of two-dimensional flow near a spur-dike." Advances in Water Resources, Vol. 18. No.4, 227-236.
- Rajaratman, N. and Nwachukwu, B.A. (1983). "Flow near groin-like structures." Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 109(3), 463-480.
- Tingsanchali, T. and Maheswaran, S., (1990). "2-D depth-averaged flow computation near groyne." Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 116, No.1, 71-86.
- Tominaga, A., Ijima, K., and Nakano, Y. (2001). "Flow structures around submerged spur dikes with various relative height." Proceedings of XXIX IAHR Congress, Beijing, China, CD-ROM.



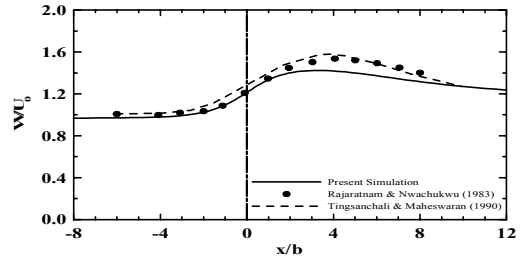
(a) $y/b=1.0$



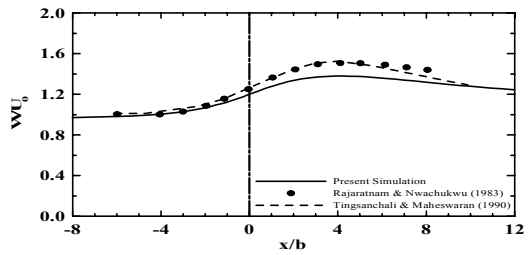
(b) $y/b=1.5$



(c) $y/b=2.0$

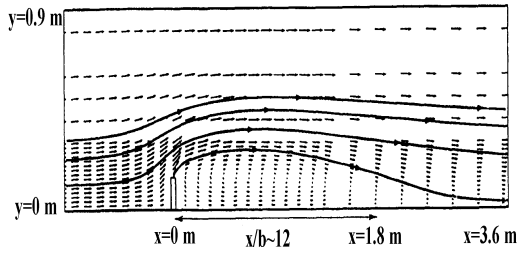


(d) $y/b=3.0$

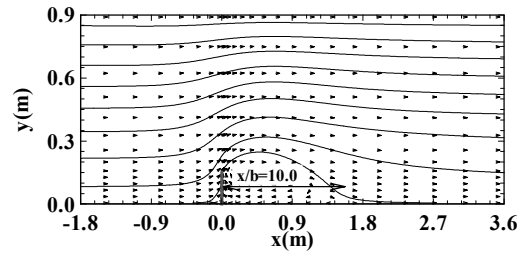


(e) $y/b=4.0$

그림 1 각 지점에서의 수심 적분된 유속과 초기유속의 비

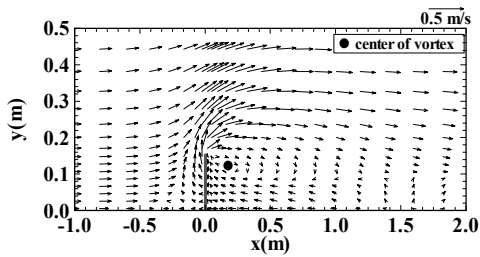


(a) Molls 등 (1995)

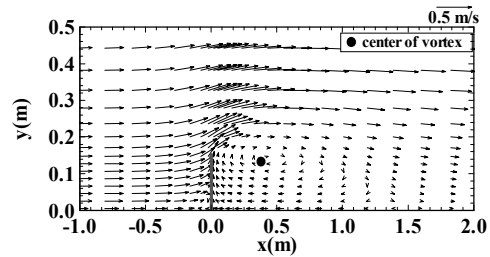


(b) present study

그림 2 수제 주변 유선 및 재순환 영역 길이



(a) $z/h=0.03$ 일 때의 유속 벡터



(b) $z/h=0.5$ 일 때의 유속 벡터

그림 3 x-y 평면상의 유속벡터도