

# 흐름 메카니즘에 의한 깔따구의 분포 (II) - 수치계산

## The Distribution of Chironomids by flow Mechanisms - Numerical Computation

박종표\*, 이상호\*\*, 김태원\*\*\*  
Jong Pyo Park, Sang Ho Lee, Tae Won Kim

### 요 지

인공순환수로 실험구간에 반구구조물을 설치하지 않은 경우와 설치한 경우의 흐름특성을 분석하기 위하여 수치모의를 수행하였다. 수치모의는 FLUNET가 제공하는 RNG  $k-\epsilon$  모형과 Reynolds Stress 모형을 사용하였으며 음파유속계(ADV)를 이용하여 측정된 결과와 비교분석 하였다. 수치모의와 실험결과의 상관성을 분석한 결과, RNG  $k-\epsilon$ 과 Reynolds Stress 모형의 계산결과와 실측값의 상관계수는 반구구조물을 설치하지 않은 경우 0.60 - 0.63, 반구구조물을 설치한 경우 0.75 - 0.78로 큰 차이가 없었다. 그러나 계산반복회수의 경우 RNG  $k-\epsilon$  모형이 Reynolds Stress 모형에 비하여 2 - 5배 정도 빠르다. 두 모형의 결과가 크게 차이가 나지 않으므로 순환수로 내의 흐름특성을 분석하기 위한 모형으로 수렴속도가 빠른 RNG  $k-\epsilon$  모형을 선정하였다. 수치모의 결과와 “흐름 메카니즘에 의한 깔따구의 분포(I) - 실험”의 깔따구 분포경향을 비교한 결과 깔따구는 전반적으로 유속과 난류강도가 작은 곳에 분포하였으며 실험구간에 반구구조물이 있는 경우에는 구조물의 상·하류에 깔따구가 분포하였다. 이차류 또한 깔따구의 분포에 영향을 미친다. 향후 흐름특성에 따른 저서생물의 분포경향을 분석을 위하여 전산유체역학의 기법들을 적용하면 깔따구 등의 저서성 대형무척추 동물의 분포와 흐름특성의 관계를 저렴한 비용으로 분석할 수 있을 것이다.

**핵심용어 : 깔따구, 이차류, 난류강도, RNG  $k-\epsilon$  모형, FLUENT**

### 1. 서론

깔따구는 유기물을 분해하여 하상이 혐기상태가 되는 것을 방지함으로써 하천 수질환경 개선에 기여할 수 있다(한국건설기술연구원, 1998). 이러한 깔따구의 서식환경은 흐름특성에 따라서 달라진다(Naiman, 1998). 따라서 하천에서의 깔따구 분포경향 파악을 위한 선결과제는 흐름특성을 분석하는데 있다.

흐름특성을 파악하기 위한 방법은 유속측정과 수치모의에 의한 방법이 있다. 측정에 의한 방법은 실제 현상을 비교적 정확하게 파악 할 수 있으나 많은 시간과 비용이 소요되므로 수치모의는 그 대안이 될 수 있다. 본 연구에서는 흐름특성을 분석하고자 상용코드인 FLUENT로 수치모의를 수행하였다. 깔따구의 분포 경향은 이차류와 밀접한 관계를 가지므로 이를 재현하기 위해서 비등방성 난류모형을 사용하는 것이 좋다. 또한 비정상상태 모의는 많은 시간이 소요되므로 정상상태 모의가 가능한 난류모형을 사용하는 것이 대안이 될 수 있다. 위와 같은 점을 고려하여, 본 연구에서는 FLUENT에서 제공하는 비등방성 난류모형 중 정상상태 모의가 가능한 RNG  $k-\epsilon$  모형과 Reynolds Stress 모형을 선택하여 수치모의를 수행하였다. 수치모의

\* 정회원 · (주)웹솔루스 수자원부 대리 · E-mail : pjp@websolus.co.kr

\*\* 정회원 · 부경대학교 건설공학부 부교수 · E-mail : peterlee@pknu.ac.kr

\*\*\* 정회원 · 서울대학교 지구환경시스템공학부 박사과정 · E-mail : kimtw97@snu.ac.kr

는 육상트랙과 같은 평면 형상을 가지는 순환수로에 반구구조물을 설치하지 않은 경우와 설치한 경우에 대하여 각각 수행되었다.

수치모의 결과는 실제와 부합되지 않을 수도 있다. 그러므로 수치모의 수행결과와 유속측정 결과를 비교 분석하여 상용코드 활용의 적합성 여부를 확인하였다. 또한 유속, 이차류, 난류강도 분포에 의한 깔따구의 분포 경향을 간략하게 기술하였다. 흐름특성에 의한 깔따구의 분포경향은 “흐름 메카니즘에 의한 깔따구의 분포(I) - 실험”에 상세히 기술되어 있다.

## 2. 수치모형 구성

순환수로 내의 유동장을 계산하기 위해서 GAMBIT을 이용하여 격자를 구성하였다. 반구구조물을 설치하지 않은 경우에 대해서는 구조적 격자(196×29×80)를 사용하였고 반구구조물을 설치한 경우는 반구구조물의 영향으로 구조물 주위에서 구조적 격자를 만들 수 없기 때문에 비구조적 격자(196×14×10)를 사용하였다. 경계조건으로는 유입부에서 Velocity Inlet 조건, 즉 흐름방향으로 평균 유속 10 cm/s, 유출부는 Outflow 조건을 부여하였고 모의 구간의 수심은 20 cm이다. 자유수면은 Symmetry 조건을 벽면은 No-slip 조건을 부여하였다. 수렴조건으로는 수치해의 상대오차가 0.001에서 수렴하도록 하였으며 수치기법은 FLUENT에서 지원하는 First-Order Upwind Scheme과 SIMPLE 알고리즘을 선택하여 정상상태 흐름모의를 수행하였다.

## 3. 수치모의 결과

### 3.1 난류모형의 비교 분석

RNG  $k-\epsilon$ 과 Reynolds Stress 모형을 이용하여 수치모의를 수행한 결과와 측정 결과에 대하여 상관관계를 분석하였다.

반구구조물을 설치하지 않은 경우에 대한 측정 결과와의 상관계수는 RNG  $k-\epsilon$ 모형의 경우에 0.63이고 Reynolds Stress 모형은 0.60이다(그림 1). 반구구조물을 설치한 경우의 상관계수는 RNG  $k-\epsilon$  모형의 경우 0.75이고 Reynolds Stress 모형의 경우 0.78이다(그림 2). 즉 두 모형의 계산결과, 상관성은 큰 차이가 없다. 그러나 반복회수의 경우 RNG  $k-\epsilon$  모형이 Reynolds Stress 모형에 비하여 2 ~ 5배 정도 빠르므로 본 연구에서는 RNG  $k-\epsilon$  모형을 선정하여 순환수로 내의 흐름특성을 분석하였다.

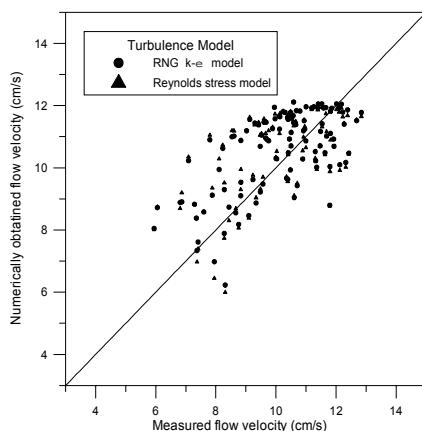


그림 1. 반구구조물을 설치하지 않은 경우 수치모의와 측정결과의 상관성

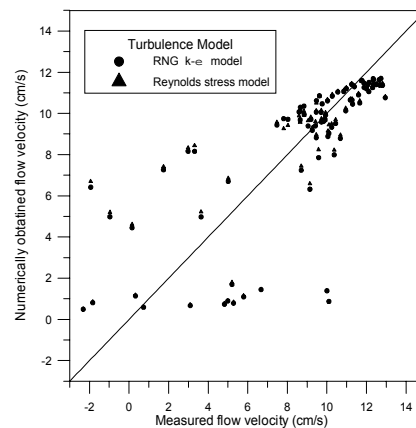


그림 2. 반구구조물을 설치한 경우 수치모의와 측정결과의 상관성

### 3.2 반구구조물을 설치하지 않은 경우 : 유속과 이차류 분포

수치모의를 수행한 인공순환수로의 평면도는 그림 3과 같다. 반구구조물을 설치하지 않은 경우는 B-C 구간 사이에 반구구조물이 없다. 반구구조물을 설치하지 않은 경우, 주 흐름 방향 유속의 수심평균값은 만곡부 유출부 A와 E 단면에서 바깥쪽의 유속이 안쪽벽면 근처의 유속보다 비교적 빠르게 나타났다. 만곡부 유입부 F 단면의 경우는 이와 반대로 안쪽의 유속이 바깥쪽 벽면 근처에 비하여 빠르다. 또한 만곡부 유입부 D 단면의 경우는 다소 다른 경향을 보이지만 수로 중앙으로부터 안쪽으로 유속이 커지고 있다(그림 4과 5). 이는 만곡부 유출부 바깥쪽 근처에서 유속이 빠르며, 유입부 안쪽 근처에서 유속이 빠르다고 제안한 Callander(1978)의 결과와 일치한다. 그림 6은 하상으로부터 0.5 cm 떨어진 위치의 주 흐름방향 유속이다. 단면 A와 D에서는 전반적으로 바깥쪽보다 안쪽벽면 근처의 유속이 빠르지만, B와 C 단면의 경우 반대의 경향을 보인다.

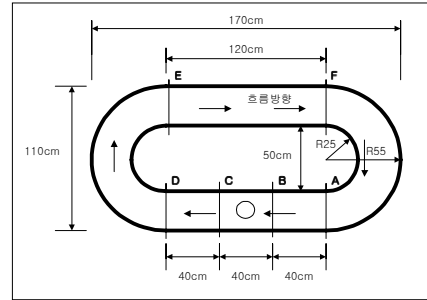


그림 3. 인공순환수로의 평면도

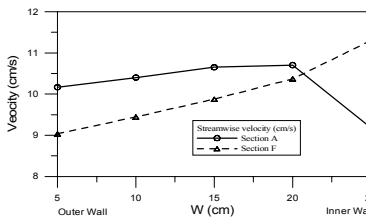


그림 4. 주 흐름 방향 유속의 수심평균값 (A, F 단면)

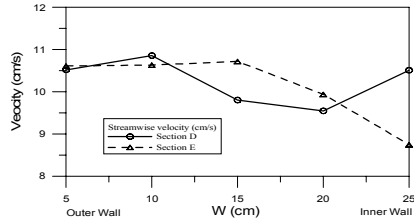


그림 5. 주 흐름 방향 유속의 수심평균값 (D, E 단면)

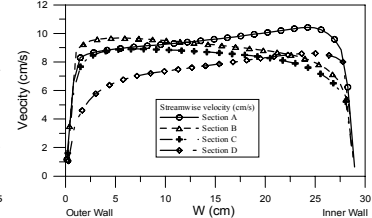
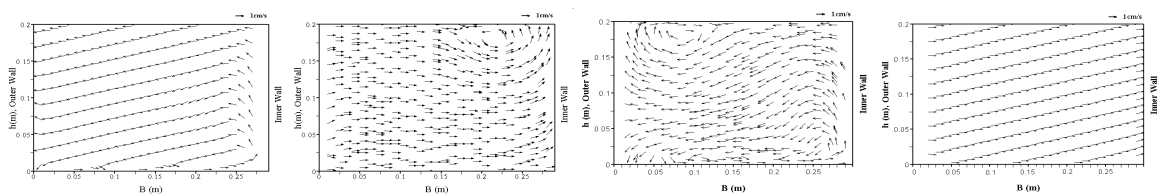


그림 6. 하상 근처의 주 흐름 방향 유속

A와 D 단면과 대칭인 E와 F 단면에 대한 이차류의 경향을 그림 7에 도시하였다. A, D 단면의 이차류 방향은 반시계방향이며, E 단면의 경우 안쪽벽면의 하상 근처에서는 반시계방향, 바깥쪽 벽면의 수면 근처에서는 시계방향의 유속이 발생한다. 각 단면에서 하상 근처는 바깥쪽에서 안쪽 벽면으로 이차류가 형성된다.



(a) A 단면의 이차류 (b) D 단면의 이차류 (c) E 단면의 이차류 (d) F 단면의 이차류

그림 7. 반구구조물 미설치시 이차류 벡터도

“흐름 메카니즘에 의한 깔따구의 분포(I) - 실험” 논문의 연구에서는 E와 F 단면에서 유속을 측정하지 않았다. 그러므로 E와 F 단면의 안쪽에 분포한 깔따구 군집에 대하여 흐름 특성을 관련지어 설명하지 못하였다. 그렇지만, 본 논문의 수치모의 결과로부터 E와 F 단면의 안쪽에 위치한 깔따구의 분포경향을 설명할 수 있다. 단면 E에서는 바깥쪽 보다 안쪽 벽면에서 유속이 작게 나타났고(그림 5) 이 곳에 깔따구가 분포하였다. 그림 4을 보면 F 단면에서 바깥쪽 보다 안쪽 벽쪽에서 유속이 빠르게 형성되고 있지만 이차류도 안쪽을 향하고 있다(그림 7). 즉 깔따구는 상대적으로 유속이 강하더라도 이차류에 의하여 안쪽으로 분포한 것으로 해석할 수 있다.

### 3.3 반구구조물을 설치한 경우 : 유속, 난류강도 분포

반구구조물 중심으로부터 상류 6.5 cm 와 9.0 cm 단면에서의 하상 근처 주 흐름방향 유속분포를 그림 8에 도시하였다. 반구구조물 상류 9.0 cm 지점에서 상류 6.5 cm 지점으로 이동할수록 반구구조물 중심부 근처에서는 유속이 작아진다.

반구구조물 중심으로부터 하류 6.5 cm 와 9.0 cm 단면에서의 경우, 반구구조물 중심부 근처로 부터 하류로 갈수록 유속이 빨라진다. 그러나 양쪽 벽면의 경우에는 하류로 갈수록 유속이 느려진다(그림 9).

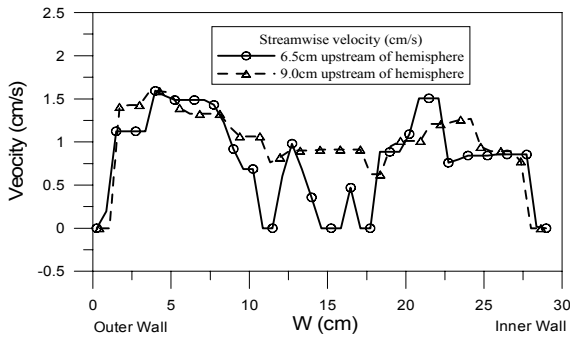


그림 8. 반구구조물의 중심으로부터 상류 6.5 cm, 9.0cm 단면의 하상 근처 주 흐름방향 유속

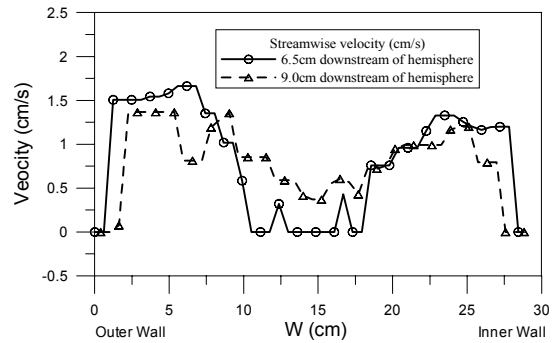


그림 9. 반구구조물의 중심으로부터 하류 6.5 cm, 9.0cm 단면의하상 근처 주 흐름방향 유속

하상 근처의 횡 방향 유속의 경우, 반구구조물 상류에서 반구구조물을 중심으로 바깥쪽 벽면 근처에서는 음(-)의 값이고, 안쪽 벽면 근처에서 양(+)의 값을 가진다. 즉, 유속은 흐름단면의 중심부로부터 양쪽으로 퍼진다. 반구구조물의 하류에서는 이와 반대의 흐름이 발생하며 흐름단면의 중심부로부터 안쪽으로 흐름이 모인다(그림 10). 하상 근처의 난류강도 분포는 그림 11과 같다. 바깥쪽의 난류강도가 안쪽보다 크며 구조물의 중심부에서는 난류강도가 작다. 또한, 구조물의 경계면 주변에서 난류강도가 가장 크다.

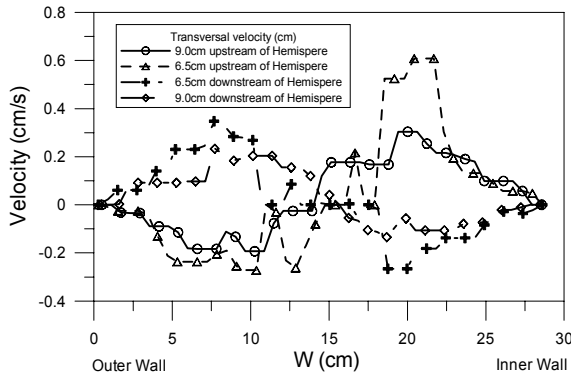


그림 10. 구조물 주위 하상 근처의 횡 방향 유속

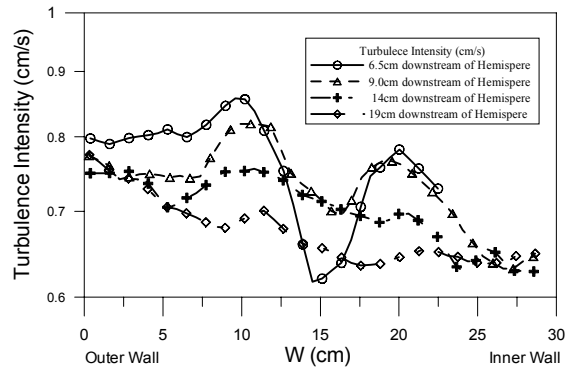


그림 11. 구조물 주위 하상 근처의 난류강도

“흐름 메카니즘에 의한 깔따구의 분포(I) - 실험” 논문에서 인공순환수로의 직선구간 중심부에 반구구조물을 설치한 경우, 반구구조물 직 상류, 하류와 인공수로의 안쪽벽면 부근에 깔따구들이 서식하였다. 수치모의 결과 안쪽 벽면 부근이 상대적으로 유속이 느리고, 난류강도도 작았다. 또한, 반구구조물 직 상·하류는 유속이 영(零)에 가까웠다. 즉, 깔따구는 반구 구조물 상·하류의 유속이 작은 곳과 구조물 주변의 난류강도가 작은 곳에 분포하였다.

#### 4. 결론

유동특성에 의한 깔따구의 분포경향을 엄밀하게 파악하기 위해서는 정확한 유속측정이 요구된다. 그러나, 유속측정은 많은 비용과 시간이 요구되어지며, 측정장비의 제약으로 결측 지점이 존재 할 가능성이 있다. 본 연구에서는 이러한 제약을 극복하기 위한 대안으로 수치모의를 수행하였다. 인공순환수로 내의 이차류를 재현하기 위해서 3차원 모의가 가능한 FLUENT를 이용하였으며, 난류모형은 RNG  $k-\epsilon$ 모형과 Reynolds Stress 모형을 사용하였다. 또한 모의결과와 실측치와의 상관관계 분석을 하였다. 상관관계 분석결과 두 모형의 상관계수가 비슷하였으므로 본 연구에서는 수렴속도가 빠른 RNG  $k-\epsilon$ 모형을 흐름특성을 해석하였다. 흐름특성 분석결과는 측정결과와 유사하였으며 깔따구의 분포경향 분석에 활용되었다. 유속측정에 비하여 비교적 가격이 저렴한 전산유체역학 코드를 효과적으로 적용한다면 저서성 대형 무척추동물의 분포와 흐름 특성의 관계를 저렴한 비용으로 분석할 수 있을 것으로 기대된다.

#### 감사의 글

본 연구는 한국과학재단 특정기초연구(과제번호 : R01-2001-000-00087-0) “생태-수리-전산학의 다학제 접근을 통한 오염하천의 통합적 친생태형 수질관리 모델개발” 에 의해 수행되었습니다. 연구비 지원에 심심한 감사의 뜻을 표합니다. 인공순환수로를 제작에 도움을 주신 인제대학교 박재현 교수께 감사드립니다.

#### 참고문헌

- 한국건설기술연구원 (1998). 국내 여건에 맞는 자연형 하천 공법의 개발. 환경부.
- Armitage, P.D., Cranston, P.S., and Pinder, L.C.V. (1995). *The Chironomidae*. Chapman and Hall.
- Callander, R.A. (1978). "River meandering." *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol. 10, pp. 129-158.
- Demuren, A.O., and Rodi, W. (1986). "Calculation of flow and pollutant dispersion in meandering channels." *Journal of Fluid Mechanics.*, Vol. 172, pp. 63-92.
- Freitas, C.J. (1995). "Perspective: Selected benchmarks from commercial CFD codes." *Transactions of the ASME*, Vol. 117, pp. 208-218.
- Fluent Incorporated (1998) *FLUENT User Guide*. Centerra Resources Park, 10 Cavendish Court, Lebanon, NH 03766.
- Leschziner, A., and Rodi, W. (1979). "Calculation of strongly curved open channel flow." *Journal of Hydraulic Division, ASCE*, Vol. 105, No. 10, pp. 1297-1314.
- Naiman, R.J., and Bilby, R.E. (1998). *River ecology and management*. Springer.
- Statzner, B., Gore, J. A., and Resh, V. H. (1988). "Hydraulic stream ecology: observed patterns and potential applications". *Journal of the North American Benthological Society*, vol. 7(4), p.307-360.