

흐름 메카니즘에 의한 깔따구의 분포 (II) - 수치계산 -

이상호 · 이정민* · 김태원* · 박종표*

부경대학교 건설공학부
*(주)웹솔루스 수자원부

The Distribution of Chironomids by flow Mechanisms - Numerical Computation -

Sang-Ho Lee · Jung-Min Lee* · Tae-Won Kim* · Jong-Pyo Park*

Department of Civil and Construction Engineering, Pukyong National University

*Department of Water Resources, Websolus Co., Ltd.

(Received 25 October 2005, Accepted 23 November 2005)

Abstract

Numerical simulation of turbulence flow in a circulating channel was performed. The RNG k- ϵ model and Reynolds stress model of the FLUENT was used for evaluating the flow mechanisms. The simulation results were compared with the experimental data measured by a ADV (Acoustic Doppler Velocimeter). The distribution of chironomids was analyzed by the computational results. They distributed at the region of lower velocities and lower turbulence intensity. In the case of a hemisphere structure being located on the straight section, chironomids lived in the upstream and downstream area of the hemisphere. The secondary currents also affected the distribution of chironomids. In conclusion, the computational fluid dynamic techniques can be inexpensively applied for analysing the relationship between flow characteristics and distribution of benthic macroinvertebrates.

keywords : Chironomid, FLUENT, RNG k- ϵ model, Secondary flow, Turbulence intensity

1. 서 론

1.1. 연구배경 및 목적

깔따구(chironomids)는 하천에서 출현하는 빈도가 높은 저서생물(benthos)이다(Armitage et al., 1995). 깔따구는 유기물을 분해하여 하상이 혐기상태가 되는 것을 방지함으로써 하천 수질환경 개선에 기여할 수 있다(한국건설기술연구원, 1998). 이러한 깔따구의 서식환경은 흐름특성에 따라서 달라진다(Naiman et al., 1998). 따라서 하천에서 깔따구의 분포경향을 파악하기 위한 선결과제는 흐름특성을 분석하는데 있다.

흐름특성을 파악하기 위한 방법은 유속측정과 수치모의에 의한 방법이 있다. 유속측정에 의한 방법은 실제 현상을 비교적 정확하게 파악 할 수 있으나 많은 시간과 비용이 소요되므로 수치모의는 그 대안이 될 수 있다. 흐름구조 해석을 위한 3차원 수치모의의 개발은 1970년대 이후 지속적으로 수행되었다. Leschziner 등(1979)은 비선형 k- ϵ 모형을 적용하여 만곡수로에 대하여 유한차분법을 이용하여 이차류를 재현하였다. Demuren 등(1986)은 Reynolds 응

력 모형을 이용하여 사행하천 내의 흐름 구조 파악과 오염물 거동에 대하여 계산하였다. Freitas(1995)는 개수로에서 이차류 재현이 가능한 범용 전산유체 프로그램을 소개하였으며, 만곡수로에 대하여 전산유체 프로그램이 제공하는 난류모형을 이용하여 흐름구조를 비교분석하였다.

이와 같은 기존의 연구는 수리학 분야에 국한된 연구가 대부분이었다. 생태학 분야에서 Statzner 등(1988)이 수리학 적 인자가 저서생물의 군집특성에 미치는 영향을 연구한 바가 있으나, 현재까지 유동특성과 저서성 무척추동물의 분포경향을 접목한 심도 있는 연구는 미진하다.

본 연구에서는 수치모의에 의하여 순환수로 내의 흐름특성을 파악하고 이로부터 저서성 대형무척추동물인 깔따구의 분포 경향을 분석하고자 한다.

1.2. 연구내용 및 범위

깔따구의 분포경향에 지배적인 영향을 주는 흐름특성을 분석하고자 상용코드인 FLUENT(1998)로 수치모의를 수행하였다. 깔따구의 분포경향은 이차류와 밀접한 관계를 가지므로 이를 재현하기 위해서 비등방성 난류모형을 사용하는 것이 좋다. 또한 비정상상태 모의는 많은 시간이 소요되므로 정상상태 모의가 가능한 난류모형을 사용하는 것이 대

* To whom correspondence should be addressed.
andrew4502@magin.com

안이 될 수 있다.

이와 같은 점을 고려하여, 본 연구에서는 FLUENT에서 제공하는 비등방성 난류모형 중 정상상태 모의가 가능한 RNG $k-\varepsilon$ 모형과 Reynolds Stress 모형을 선택하여 수치모의를 수행하였다. 수치모의는 육상트랙과 같은 평면 형상을 가지는 순환수로에 반구구조물을 설치하지 않은 경우와 설치한 경우에 대하여 각각 수행되었다.

수치모의 결과는 실제와 부합되지 않을 수도 있다. 그러므로 수치모의의 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) - 인공수로 실험”에 상세히 기술되어있다.

2. FLUENT 모형의 개요

FLUENT 모형은 FLUENT사에서 개발된 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics, CFD) 상용 코드로 정상·비정상 유동해석, 층류 및 난류해석, 뉴턴 및 비뉴턴 유체 계산, 압축성 및 비압축성 유체계산, 열전달 해석 등이 가능하며, 사용자 편의환경이 우수하다. FLUENT에서 사용하는 지배방정식으로 연속방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

여기서, U_i 는 평균유속이다. 운동량 방정식으로 Reynolds-Averaged Navier-Stokes 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \overline{u_i u_j} \right) + g_i \quad (2)$$

여기서, t 는 시간, ρ 는 밀도, P 는 압력, ν 는 동점성 계수, $\overline{u_i u_j}$ 는 Reynolds 응력항 그리고 g_i 는 중력이다. 지배 방정식에 대한 난류완결문제(turbulent closure problem)는 난류모형을 통해 이루어진다. Boussinesq 근사는 다음과 같다.

$$-\overline{u_i u_j} = \frac{\mu_t}{\rho} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \quad (3)$$

여기서, μ_t 는 난류 점성계수(turbulent viscosity), k 는 난류 운동에너지 그리고 δ_{ij} 는 Kronecker 델타이다.

FLUENT에서 제안하는 난류모형은 와점성 개념을 이용하는 1-방정식 모형, standard $k-\varepsilon$ 모형 그리고 RNG (renormalization group theory) $k-\varepsilon$ 모형과 와점성 개념을 사용하지 않는 Reynolds Stress 모형, LES(large eddy simulation) 모형이 있다.

난류의 이방성 때문에 생성되는 이차흐름을 정확히 재현

하기 위해서는 비등방성 난류모형인 RNG $k-\varepsilon$ 모형, Reynolds Stress 모형, LES 모형을 사용하여야 한다. RNG 모형은 순간적인 Navier-Stokes 방정식으로부터 유도할 수 있으며, “renormalization group” (RNG) 방법을 사용하였다. 이는 표준 $k-\varepsilon$ 모형과는 다른 매개변수를 사용하고 있으며, 비선형성의 영향을 고려할 수 있도록 항을 추가시켰다. Reynolds Stress 모형은 난류에 의해 발생하는 레이놀즈 응력을 난류점성계수를 가정하지 않고 직접 수송방정식으로부터 구한다. LES 모형은 지배방정식을 시간평균화한 것이 아니라 공간적인 평균화 과정을 수행한 후, 유동장을 격자로 해상할 수 있는 성분과 그 이하의 작은 성분으로 분리하여 전자는 직접 계산하고 후자는 모형화하여 유동장을 해석하는 방법이다. LES 모형은 비정상상태 모의만 가능하다.

FLUENT에서 지원하는 수치기법은 First-Order Upwind Scheme, PowerLaw Scheme, Second-Order Upwind Scheme 그리고 QUICK 기법 등이 있다. 그리고 압력과 속도항의 결합에 대해 SIMPLE, SIMPLEC, PISO 알고리즘을 사용할 수 있다. 노(2001)는 장방향 침전지내 흐름을 모의하기 위해서 FLUENT를 이용하였다. 수치모의 결과 SIMPLE과 SIMPLEC 알고리즘에 의한 결과가 거의 일치하였으며, 수렴속도에 있어서 SIMPLE 알고리즘이 비교적 빠르다고 제안하였다.

본 연구에서는 First-Order Upwind Scheme과 SIMPLE 알고리즘을 선택하여 순환수로 내의 흐름모의를 수행하였다.

3. 수치모형 구성

모형을 구성하기 위하여 상용프로그램인 GAMBIT를 이용하였다. GAMBIT는 FLUENT사에서 개발한 프로그램으로 지형 및 격자를 구성을 위한 전처리도구이다. 반구구조물을 설치하지 않은 경우에 대해서는 구조적 격자를 사용하였다. 반구구조물을 설치한 경우는 반구구조물의 영향으로 구조물 주위에서 구조적 격자를 만들 수 없기 때문에 비구조적 격자를 사용하였다(Fig. 1, 2). 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 하였다. 수치모의 조건은 Table 1과 같다.

4. 수치모의 결과

4.1. 난류모형의 비교 분석

RNG $k-\varepsilon$ 과 Reynolds Stress 모형을 이용하여 수치모의를 수행한 결과와 측정 결과에 대하여 상관관계를 분석하였다. 반구구조물을 설치하지 않은 경우, ADV를 이용하여 실측한 지점은 총 4개 단면 112개 지점이다. 반구구조물을 설치한 경우는 반구구조물의 하류 6.5 cm 지점에 대하여 비교하였다.

Table 1. Grid and boundary condition

Hemisphere structure	Grid generation			Boundary condition				Simulation	Convergence condition	Remarks
	X	Y	Z	Inlet	Wall	Outlet	Free surface			
Non-exist	196	29	80	Mean velocity	No-slip	Outflow	Symmetry	Steady	0.001	Fig. 1
Exist	196	14	10							Fig. 2

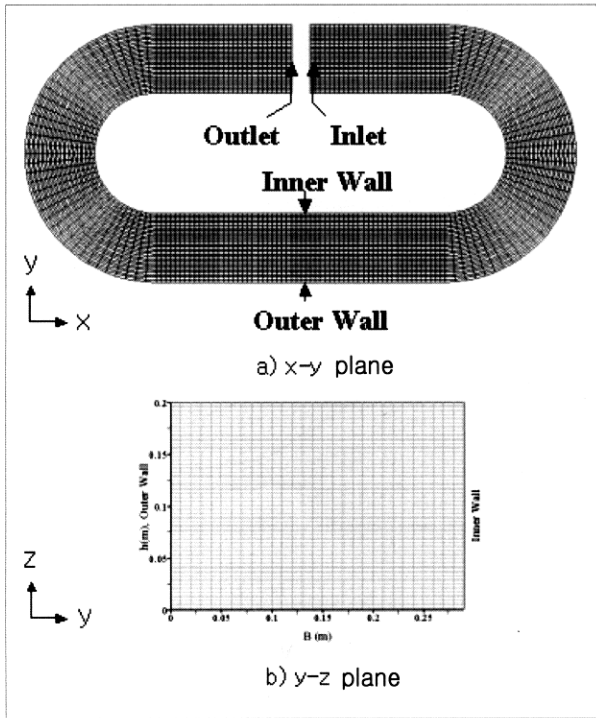


Fig. 1. Grid and boundary condition for the case of non-installation of hemisphere structure.

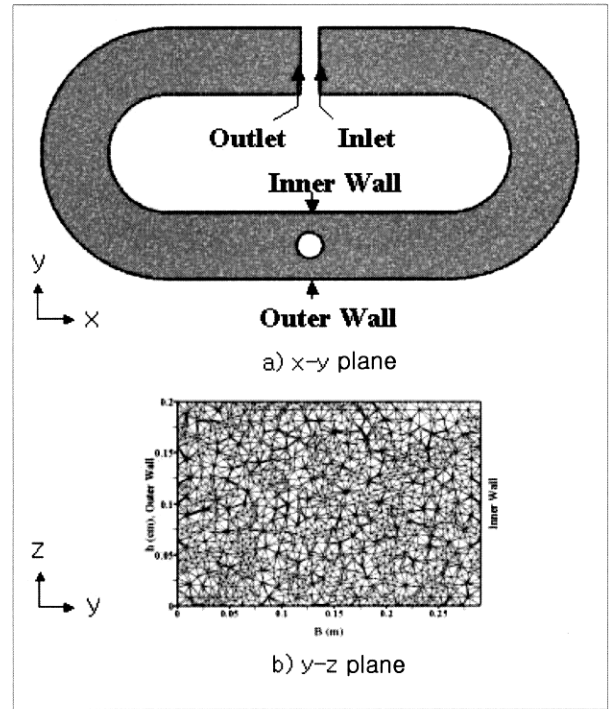


Fig. 2. Grid and boundary condition for the case of installation of hemisphere structure.

반구구조물을 설치하지 않은 경우에 대한 측정 결과와의 상관계수는 RNG $k-\epsilon$ 모형의 경우에 0.63이고 Reynolds Stress 모형은 0.60이다(Fig. 3). 반구구조물을 설치한 경우의 상관계수는 RNG $k-\epsilon$ 모형의 경우 0.75이고 Reynolds Stress 모형의 경우 0.78이다(Fig. 4). 각각의 난류모형에 대한 상관계수와 반복회수는 Table 2와 같다.

RNG $k-\epsilon$ 과 Reynolds Stress 모형의 계산 결과 두 모형의 상관성은 큰 차이가 없었다. 그러나 반복회수의 경우 RNG $k-\epsilon$ 모형이 Reynolds Stress 모형에 비하여 2~5배 정도 빠르다. 두 모형의 결과가 크게 차이가 나지 않으므로 모의시간이 빠른 RNG $k-\epsilon$ 모형을 선택하여 순환수로 내의 흐름특성을 분석하였다.

4.2. 반구구조물을 설치하지 않은 경우

수치모의를 수행한 인공순환수로의 평면도는 Fig. 5와 같다. 반구구조물을 설치하지 않은 경우는 B-C 구간 사이에

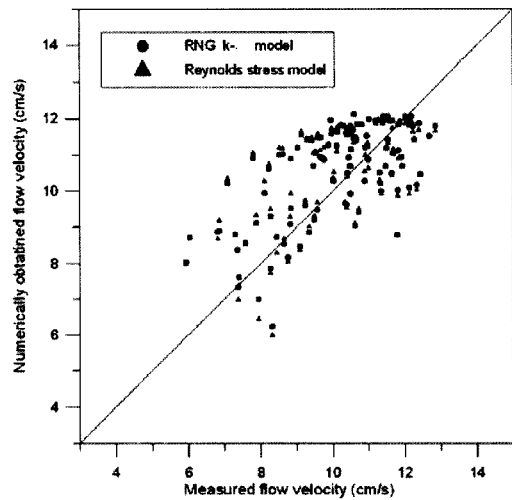


Fig. 3. Correlation of simulated and observed results for the case of non-installation of hemisphere structure.

Table 2. Estimation of turbulence model

Turbulence model	Non-installation of structure		Installation of structure	
	Correlation coefficient	Number of computation	Correlation coefficient	Number of computation
RNG $k-\epsilon$ model	0.63	180	0.75	63
Reynolds stress model	0.60	383	0.78	276

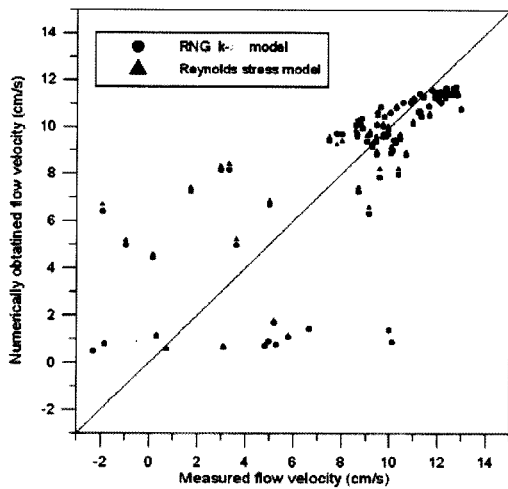


Fig. 4. Correlation of simulated and observed results for the case of installation of hemisphere structure.

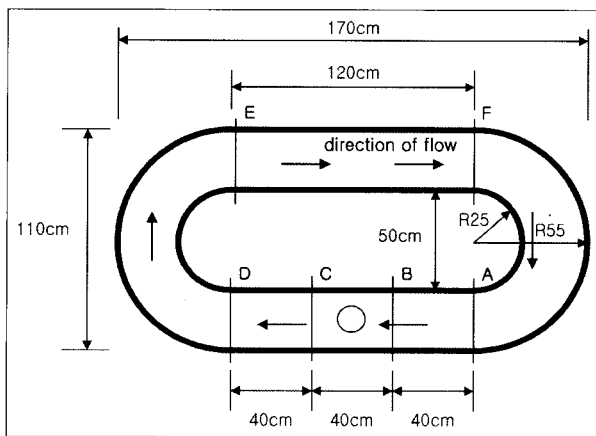


Fig. 5. Artificial circulating channel used for the study.

반구구조물이 없다.

4.2.1. 유속 및 이차류

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(Fig. 6, 7). 이는 만곡부 유출부 바깥쪽 근처에서 유속이 빠르며, 유입부 안쪽 근처에서 유속이 빠르다고 제안한 Callander(1978)의 결과와 일치한다.

Fig. 8은 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.

A와 D 단면과 대칭인 E와 F 단면에 대한 이차류의 경향을 Fig. 9에 도시하였다. A, D 단면의 이차류 방향은 반시계방향이며, E 단면의 경우 안쪽벽면의 하상 근처에서는

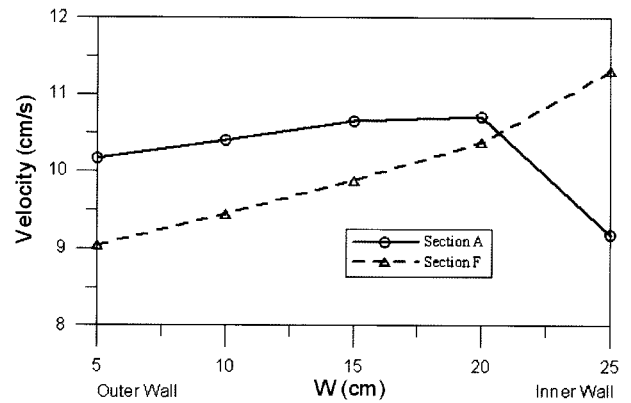


Fig. 6. Depth-averaged velocity of the main flow direction for the cross section A and F.

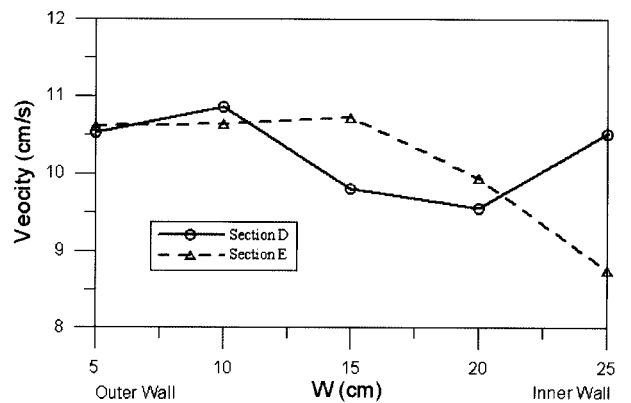


Fig. 7. Depth-averaged velocity of the main flow direction for the cross section D and E.

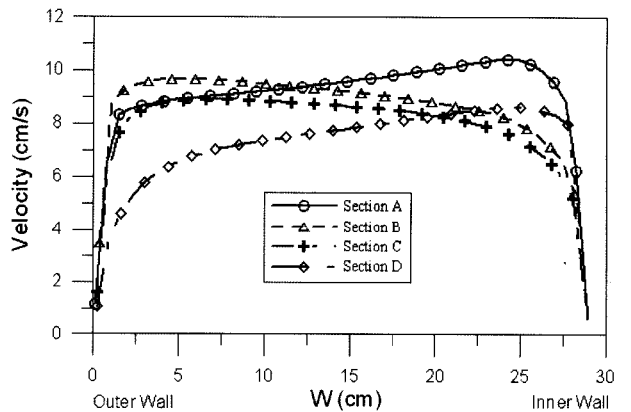


Fig. 8. Velocity of the main flow direction near river bed.

반시계방향, 바깥쪽 벽면의 수면 근처에서는 시계방향의 유속이 발생한다. 각 단면에서 하상 근처는 바깥쪽에서 안쪽 벽면으로 이차류가 형성된다.

하상 근처의 횡 방향 유속의 크기를 Fig. 10에 도시하였다. 그림에서 양(+)의 유속의 의미는 흐름이 안쪽벽면을 향함을 의미한다. 단면 A에서 안쪽 벽면으로의 횡방향 유속이 가장 크다. B~D 단면의 경우 바깥쪽 보다 안쪽 벽면에서 횡방향 유속이 크다. 그리고 직선구간인 B~C 단면을 지나면서 횡방향 유속은 작아지다가 만곡부 진입 직전인 D 단면에서 유속은 다시 커진다.

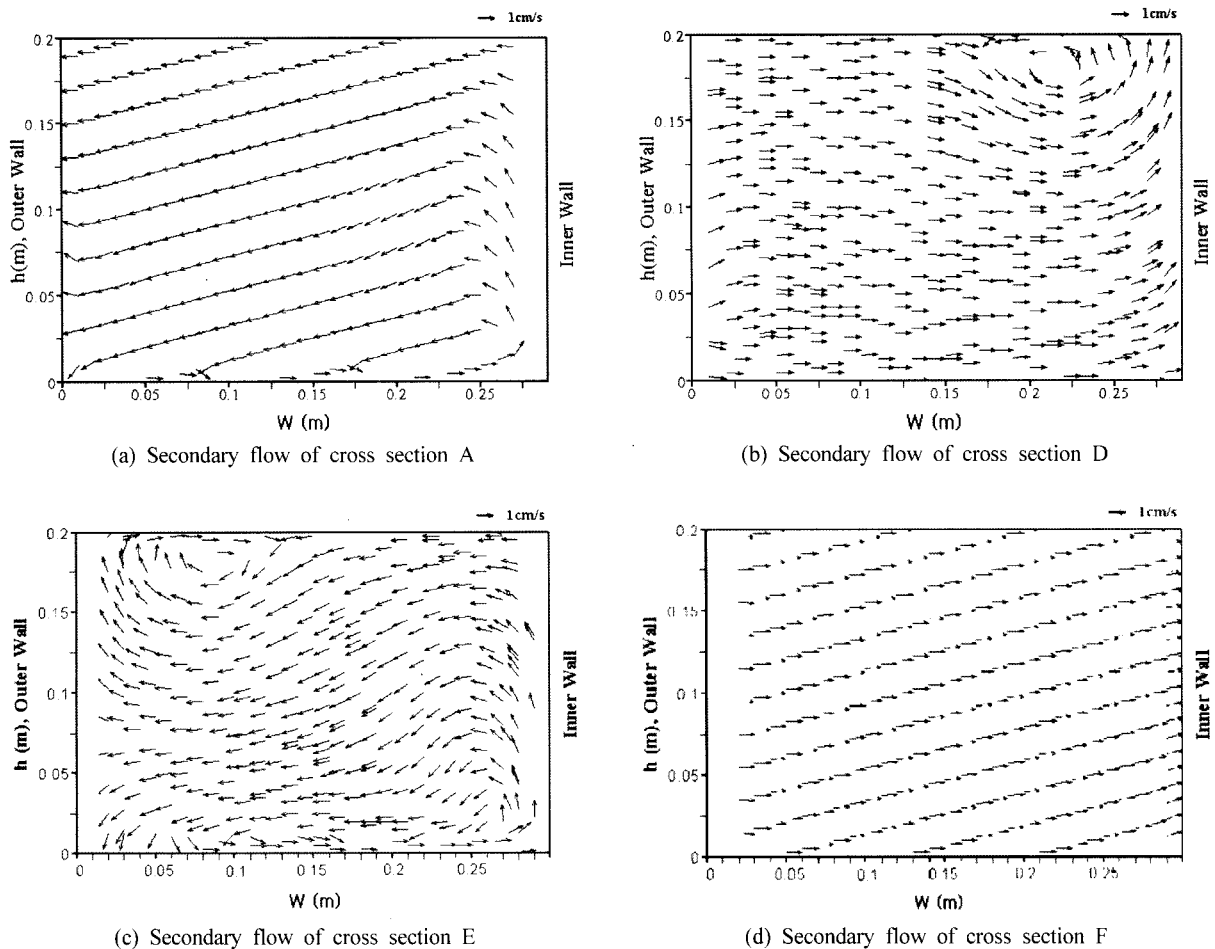


Fig. 9. Secondary flow vector for the case of non-installation of hemisphere structure.

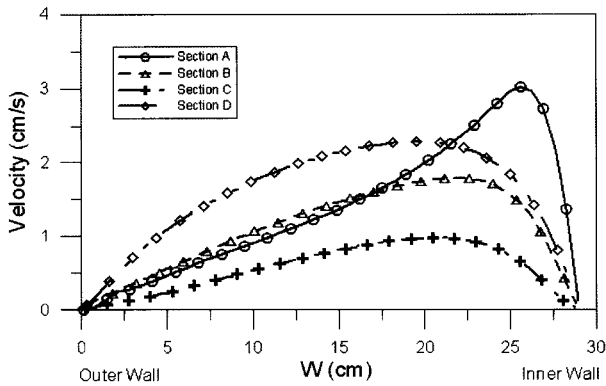


Fig. 10. Velocity distribution of the cross direction near river bed.

“흐름 메카니즘에 의한 깔따구의 분포(I) - 인공수로 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 (Fig. 7), 이곳에 깔따구가 분포하였다. Fig. 6을 보면 F 단면에서 바깥쪽 보다 안쪽 벽쪽에서 유속이 빠르게 형성되

고 있지만 이차류도 안쪽을 향하고 있다(Fig. 9). 즉 깔따구는 상대적으로 유속이 강하더라도 이차류에 의하여 안쪽으로 분포한 것으로 해석할 수 있다.

4.2.2. 난류강도

난류강도는 식 (4)와 같다.

$$u = \frac{1}{T} \int_T^0 u^2 dt \tag{4}$$

여기서, u 는 유속의 변동 성분으로 다음과 같이 정의된다.

$$u = \tilde{u} - U \tag{5}$$

Fig. 11은 하상근처의 난류강도를 나타낸 것이다. 난류강도의 경우 A와 B 단면에서는 안쪽벽면 근처가 크고 C와 D 단면에서는 안쪽보다 바깥쪽 벽면 근처에서 컸다.

4.3. 반구구조물을 설치한 경우

4.3.1. 유속

반구구조물 주위에서의 주 흐름방향 유속분포 등고선도를 Fig. 12에 도시하였다. 반구구조물 근처로 갈수록 상·

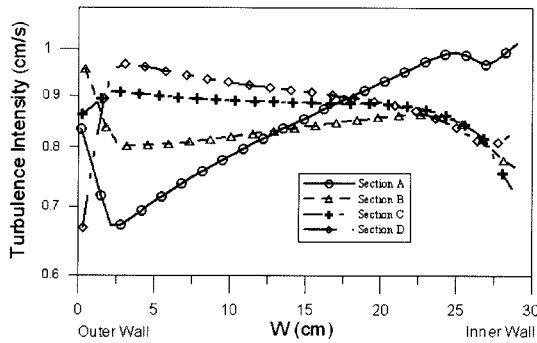


Fig. 11. Turbulence intensity near river bed.

하류 방향의 유속은 영(零)에 가깝게 된다. 또한, 각 단면의 흐름방향 유속은 바깥쪽이 안쪽 벽면 근처보다 빠르다.

반구구조물 중심으로부터 상류 6.5 cm 와 9.0 cm 단면의 경우, 하상 근처 주 흐름방향 유속분포를 Fig. 13에 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 단면의 경우, 반구구조물 중심부 근처부터는 하류로 갈수록 유속이 빨라진다. 그러나 양쪽 벽면의 경우에는 하류로 갈수록 유속이 느려진다(Fig. 14).

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

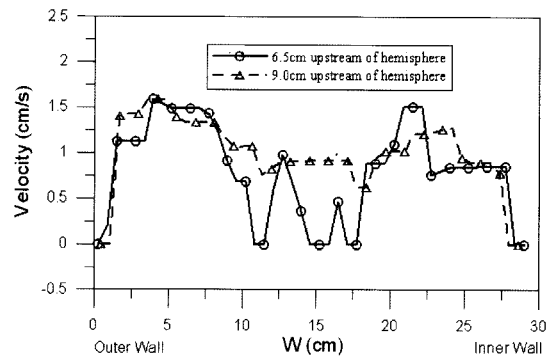


Fig. 13. Velocity distribution of the main flow direction near river bed of 6.5 cm and 9.0 cm upstream from hemisphere structure.

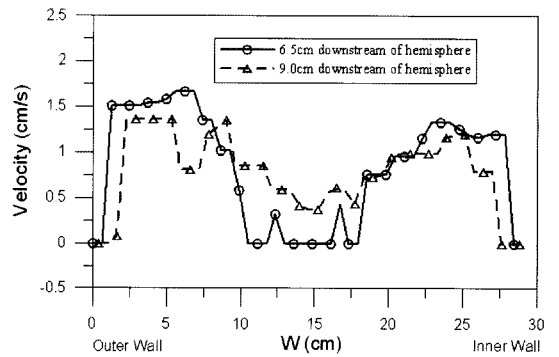
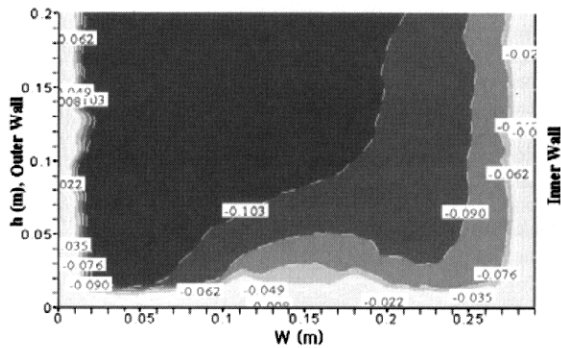
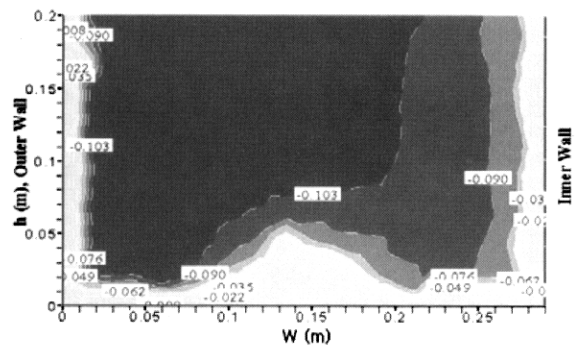


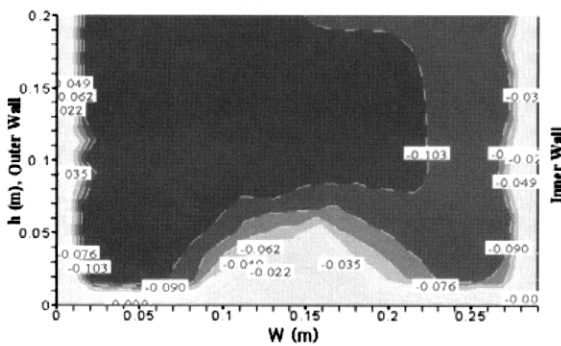
Fig. 14. Velocity distribution of the main flow direction near river bed of 6.5 cm and 9.0 cm downstream from hemisphere structure.



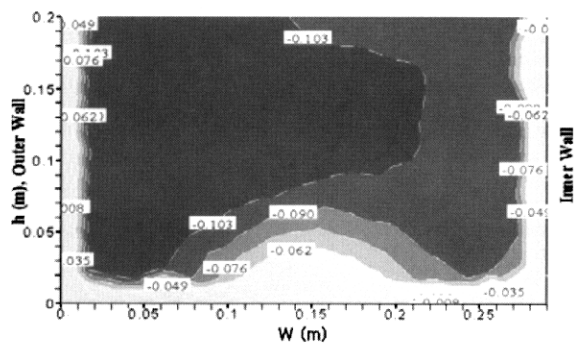
(a) Velocity distribution of 9.0 cm upstream from the hemisphere structure



(b) Velocity distribution of 6.5 cm upstream from the hemisphere structure



(c) Velocity distribution of 6.5 cm downstream from the hemisphere structure



(d) Velocity distribution of 9.0 cm downstream from the hemisphere structure

Fig. 12. Velocity distribution contour of the main flow direction around the hemisphere structure (unit : m/s).

흐름단면의 중심부로부터 양쪽으로 퍼진다. 반구구조물의 하류에서는 이와 반대의 흐름이 발생하며 흐름단면의 중심부로부터 안쪽으로 흐름이 모인다(Fig. 15).

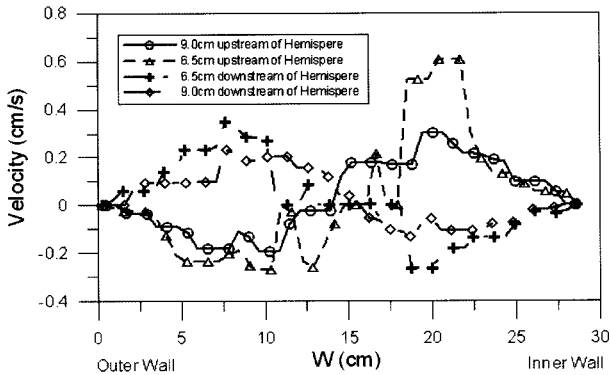


Fig. 15. Velocity distribution of the cross direction near river bed.

4.3.2. 난류강도

하상 근처의 난류강도 분포는 Fig. 16과 같다. 바깥쪽의 난류강도가 안쪽보다 크며 구조물의 중심부에서는 난류강도가 작다. 또한, 구조물의 경계면 주변에서 난류강도가 가장 크다.

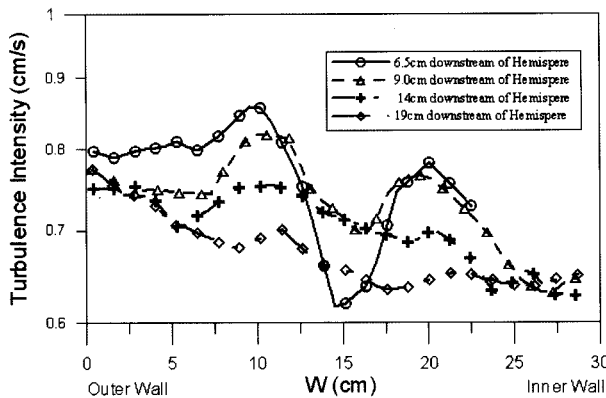


Fig. 16. Turbulence intensity near river bed.

“흐름 메카니즘에 의한 깔따구의 분포(I) - 인공수로 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.

5. 결론

유동특성에 의한 깔따구의 분포경향을 엄밀하게 파악하기 위해서는 정확한 유속측정이 요구된다. 그러나, 유속측정은 많은 비용과 시간이 요구되며, 측정장비의 제약으로

결측 지점이 존재할 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 실측치의 상관관계 분석을 하였다. 상관관계 분석결과 두 모형의 상관관계수가 비슷하였으므로 본 연구에서는 수렴속도가 빠른 RNG $k-\epsilon$ 모형으로 흐름특성을 해석하였다. 흐름특성 분석결과는 측정결과와 유사하였으며 깔따구의 분포경향 분석에 활용되었다. 유속측정에 비하여 비교적 가격이 저렴한 전산유체역학 코드를 효과적으로 적용한다면 저서성 대형 무척추동물의 분포와 흐름특성의 관계를 저렴한 비용으로 분석할 수 있을 것으로 기대된다.

사 사

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

- 노성진, CFD를 이용한 장방형 침전지내 흐름의 수치모의, 서울대학교 석사학위논문 (2001).
- 한국건설기술연구원, 국내 여건에 맞는 자연형 하천 공법의 개발, 환경부, pp. 85-100 (1998).
- Armitage, P. D., Cranston, P. S. and Pinder, L. C. V., *The Chironomidae*, Chapman and Hall, pp. 341-364 (1995).
- Callander, R. A., River meandering, *Annual Review of Fluid Mechanics*, **10**, pp. 129-158 (1978).
- Demuren, A. O. and Rodi, W., Calculation of Flow and Pollutant Dispersion in Meandering Channels, *Journal of Fluid Mechanics*, **172**, pp. 63-92 (1986).
- Fluent Incorporated, *FLUENT User Guide*, Centerra Resources Park, 10 Cavendish Court, Lebanon, NH 03766 (1998).
- Freitas, C. J., Perspective: Selected Benchmarks from Commercial CFD Codes, *Transactions of the ASME*, **117**, pp. 208-218 (1995).
- Leschziner, A. and Rodi, W., Calculation of Strongly Curved Open Channel Flow, *Journal of Hydraulic Division, ASCE*, **105**(10), pp. 1297-1314 (1979).
- Naiman, R. J. and Bilby, R. E., *River Ecology and Management*, Springer, pp. 345-376 (1998).
- Statzner, B., Gore, J. A. and Resh, V. H., Hydraulic Stream Ecology: Observed Patterns and Potential Applications, *Journal of the North American Benthological Society*, **7**(4), pp. 307-360 (1988).