

# 3차원 수치모형을 이용한 도시하천의 흐름특성에 관한 연구

## A Study on the Flow Characteristics in Urban Stream Using 3-D Numerical Model

윤 선 권\* / 김 종 석\*\* / 문 영 일\*\*\* / 이 일 주\*\*\*\*

Yoon, Sun-kwon / Kim, Jong-suk / Moon, Young-il / Lee, Il-Ju

### Abstract

Recently, the frequency of unexpecting heavy rains has been increased due to abnormal climate and extreme rainfall. There was a limit to analyze 1D or 2D stream flow that was applied simple momentum equation and fixed energy conservation. Therefore, hydrodynamics flow analysis in rivers has been needed 3D numerical analysis for correct stream flow interpretation.

In this study, CFD model on FLOW-3D was applied to stream flow analysis, which solves three dimension RANS(Reynolds Averaged Navier-Stokes Equation) control equation to find out physical behavior and the effect of hydraulic structures. Numerical simulation accomplished those results was compared by using turbulence models such as  $k-\varepsilon$ , RNG  $k-\varepsilon$  and LES. Those numerical analysis results have been illustrated by the turbulence energy effects, velocity of flow distributions, water level pressure distributions and eddy flows around the piers at Jangwall bridge in urbarn stream.

**Keywords :** FLOW-3D, Turbulence Model, Numerical Model, RANS, Urban stream

### 1. 서 론

현재 우리나라 하천의 흐름해석 분야에서는 하천의 수위 및 하상변동 양상과 오염된 지류유입으로 인한 본류에서의 유속분포 양상 및 혼합과정 등의 실제적인 문제를 해결할 수 있는 1, 2차원적 하천흐름해석이 이루어지고 있으며, 이는 복잡한 하천을 균일화된 모양과 단순화된 방정식으로 일괄적으로 적용함으로써 많은 한계점을 나타내고 있다. 따라서 보다 정확한 하천의 지형 및 수공구조물의 특성과 x, y, z 방향 유속분포 및 흐름의 동수 역학적 거동 등을 동시에 정확하게 파악해 볼 수 있는 3차원 수치 모형의 적용이 필요하다. 현재까지 하천의 흐름특성 분석을 위한 3차원 수치모의의 적용 예는 드물며, 이길성 등(2003)은 FLOW-3D를 이용하여 안양천 고척교 지점 교각주위 국부세굴에 관한 연구를 한 바 있다. 본 연구에서는 서울시 관내 지방 2급 하천인 우이천 시험유역을 대상으로 하천의 물리적인 특성 변화에 따른 흐름해석을 수행하기 위하여 3차원 RANS를 지배방정식으로 하는 CFD모형인 FLOW-3D를 이용하였고,  $k-\varepsilon$ , RNG  $k-\varepsilon$ , LES 등의 난류 모델을 적용하여 각각의 수치모의 결과를 비교·분석 하였다. 또한, 수치 해석을 통한 서울시관내 도시하천인 우이천 장월교 지점의 교각주위에서의 난류영향 및 유속분포, 수위·압력분포, 와류특성 등을 분석하였다.

### 2. 본 론

#### 1. 2.1수치모형의 개요

FLOW-3D는 유체와 가스의 열전달, 응결, 표면장력, 공洞(空洞)현상 등과 같은 물리적인 거동을 해석하는 프

\* 서울시립대학교 공과대학 토목공학과 박사과정 skyoon@uos.ac.kr

\*\* 서울시립대학교 공과대학 토목공학과 박사수료 jongsuk@uos.ac.kr

\*\*\* 서울시립대학교 공과대학 토목공학과 교수 ymoon@uos.ac.kr

\*\*\*\* 서울시립대학교 공과대학 토목공학과 석사과정 gong9ri@nate.com

로그램으로서, 해석방법은 유체의 비정상 유동상태를 기본으로 하며, 연속방정식과 3차원 RANS를 지배방정식으로 사용한다. 또한 격자망의 구성은 FAVOR(Fractional Area Volume/Obstacle Representation Method)기법을 도입한 유한체적법(FVM)을 사용하며, 비산 및 쇄파의 복잡한 자유표면 해석을 위하여 VOF(Volume of Fluid)기법(Hirt and Nichols, 1981)을 이용한다. 대표적인 유체의 난류유동을 해석하는 Prandtl Mixing Length, Turbulent Energy,  $k - \varepsilon$ , RNG  $k - \varepsilon$ , LES 모델 등의 총 5가지 난류모델을 적용할 수 있다.

### 2.1.1 지배방정식

모형에 사용된 지배방정식은 연속방정식과 운동량 방정식이며, 연속방정식(Continuity Equation)은 아래 식 (2.1)과 같이 표현 된다.

$$V_F \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\rho u A_x) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho v A_y) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho w A_z) = 0 \quad \text{식(2.1)}$$

여기서,  $V_F$ 는 유체의 요소체적,  $\rho$ 는 유체의 밀도,  $u, v, w$ 는 각 방향 유속이며,  $A_x A_y A_z$ 는 각 방향 요소면적이다. 운동량 방정식(Momentum Equations)은 Navier-Stokes 방정식으로 아래 식(2.2)~(2.4)와 같이 표현 된다.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial u}{\partial x} + v A_y \frac{\partial u}{\partial y} + w A_z \frac{\partial u}{\partial z} \right\} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + G_x + f_x \quad \text{식(2.2)}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial v}{\partial x} + v A_y \frac{\partial v}{\partial y} + w A_z \frac{\partial v}{\partial z} \right\} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + G_y + f_y \quad \text{식(2.3)}$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial w}{\partial x} + v A_y \frac{\partial w}{\partial y} + w A_z \frac{\partial w}{\partial z} \right\} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + G_z + f_z \quad \text{식(2.4)}$$

여기서,  $G$ 는 체적력이고  $f$ 는 점성력을 나타낸다. 그리고 자유표면의 해석을 위한 한 격자 내의 단위체적당 유체의 체적은 VOF(Volume of Fluid)함수,  $F(x, y, z, t)$ 로 표현된다. 다음 식(2.5)는 일반적인 VOF함수를 나타내었다.

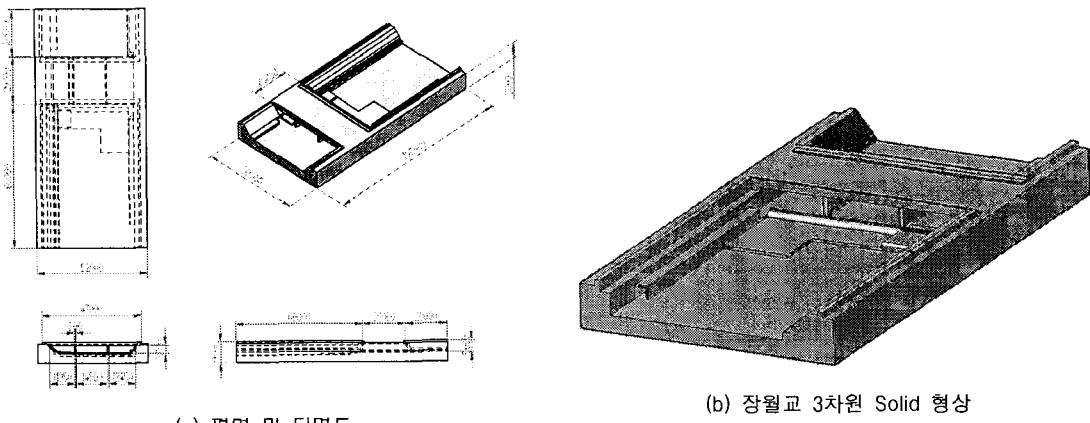
$$\frac{\partial F}{\partial t} + \left\{ \frac{\partial}{\partial x} (F_u) + \frac{\partial}{\partial y} (F_v) + \frac{\partial}{\partial z} (F_w) \right\} = FDIF + FSOR \quad \text{식(2.5)}$$

여기서, FDIF : Diffusion of Fluid Fraction

FSOR : Fluid Source/Sink

### 2.1.2 경계조건 및 입력자료

본 연구에서는 우이천의 장월교 지점을 대상으로 교각 주위의 흐름특성분석을 위하여 수치모의를 수행하였다. 대상영역의 Solid 형상은 실제 하천 단면의 측량자료와 구조물 계측자료를 최대한 활용하여 3차원 CAD프로그램으로 구현하였으며, 격자망의 형태는 직사각형 모양의 직각격자(Cartesian coordinates: x, y, z)를 사용하였고 교각주위 등 정밀한 흐름해석이 요구되는 지점에 대해서는 보다 더 세밀하게 격자간격을 분할하였다. 상류단 경계조건으로 지점별 산정된 계획홍수량을 수위와 유속으로 환산한 값을 적용하였으며, 하류단 경계조건은 outflow로 주었다. 대상영역의 3차원 Solid형상과 격자망의 구성은 다음 그림 1, 그림2와 같으며, x, y, z 방향의 격자수는 다음 표 1과 같다.



(a) 평면 및 단면도

(b) 장월교 3차원 Solid 형상

그림 1. 장월교 지점의 3차원 Solid 형상 구성

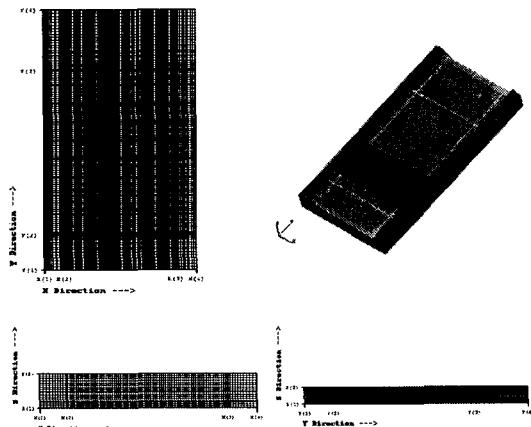


표 1. x, y, z 방향 격자수

| 형태     | x축 | y축  | z축 | 총계      |
|--------|----|-----|----|---------|
| 교량설치구간 | 95 | 116 | 15 | 165,300 |

그림 2. 교량 설치구간 격자구성

### 2.1.3 적용 난류모형 및 기본 물리량

본 연구의 대상영역은 자연하천 수로 내로써 교각의 설치부에서는 도수 및 와류, 난류가 발생할 수 있어 난류 모델을 적용 하였다. 비압축성 유체의 난류 적용에 있어 가장 중요한 특징인 도수, 흐름분리 형상 등이 발생하는 수로의 감세흐름 및 혼합흐름을 모의하기위해  $k-\varepsilon$ , RNG  $k-\varepsilon$ , LES 등 3가지 난류모델을 사용하였다. 또한 흐름해석에 사용된 유체의 기본적인 물리량은 다음 표 2와 같이 정의하였다.

표 2. 입력 물성치

| 구분                     | 입력 값  | 설명         |
|------------------------|---|------------|
| 점도( $\nu$ : viscosity) | 0.001 Pa/s                                  | 유체의 점성계수   |
| 밀도( $\rho$ )           | 1000 Kg/m <sup>3</sup>                      | 유체의 밀도     |
| 중력(g)                  | -9.8 m/s <sup>2</sup>                       | Z방향 중력가속도  |
| Wall shear             | -   | 유체와 지형의 저항 |
| Roughness Coef.        | 0.020~0.035                                 | 조도계수       |
| 난류모델                   | $k-\varepsilon$ , RNG $k-\varepsilon$ , LES | 난류모델과 고려   |
| Surface Tension        | Constant Surface Tension                    | 표면장력 고려    |

## 2.2 적용 대상 유역

본 연구의 적용 대상유역은 서울시 관내 지방 2급 하천인 우이천 유역으로 유역경계는 서쪽으로는 북한산, 북쪽으로 도봉산, 남쪽으로는 성북구와 경계를 이루고, 유역면적은 28.76 km<sup>2</sup>, 유로연장은 11.75 km이다. 유역상류의 산지부나 하류부 구간 등에서 부분적으로 사행을 이루지만 전반적인 중·하류 지역에서는 대부분 직선 또는 완만한 만곡을 이루고 있으며, 대동천, 가오천, 화계천의 지류와 각각 만나 중랑천으로 흘러 들어가는 중랑천의 제1지류 하천이다. 다음 그림 3은 적용대상 유역의 위치 및 수계 모식도를 나타내었다.

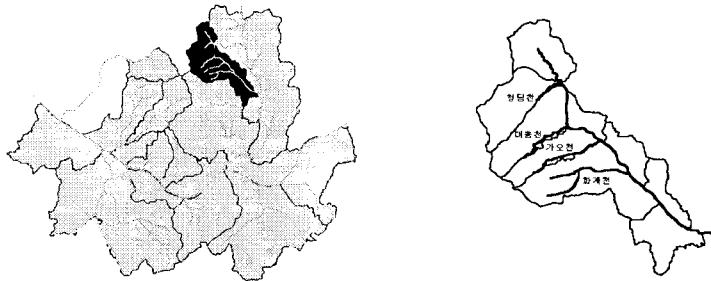


그림 3. 적용대상 유역의 위치 및 수계 모식도

## 2.3 수치모형 적용 결과 및 흐름특성 분석

### 2.3.1 흐름형상 및 유속분포

하천의 교각주위 흐름특성을 분석하기 위하여 대상구간의 난류 모델별 수치모의 결과  $k-\varepsilon$  모델과 RNG  $k-\varepsilon$  모델은 거의 비슷한 양상을 보였으며, LES 모델의 경우 유속의 변화가 다소 크게 수위는 작게 산정 되었다. 격자내부에서 계산된 평균 흐름의 전체 운동에너지 변화가 평형(Equilibrium) 상태를 나타내어 흐름장이 안정 상태를 이루는 60초 이후부터 120초까지의 수치모의를 이용 하였으며, 교각 주위의 수치모의 결과는 다음 그림 4~그림 8과 같다.

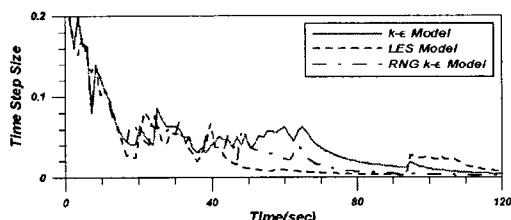


그림 4. 시간에 따른 Time Step Size의 변화

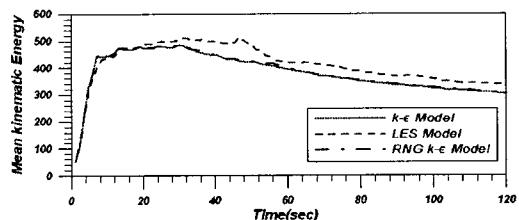


그림 5. 시간에 따른 평균운동에너지의 변화

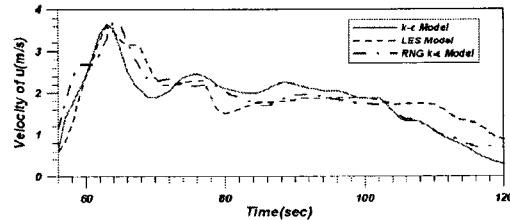
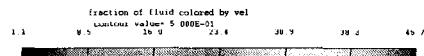


그림 6. 시간에 따른 유속변화



교각 전면부 3차원 흐름류 모의

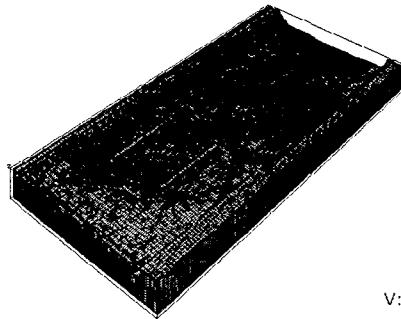


그림 7. 3차원 격자 유속분포

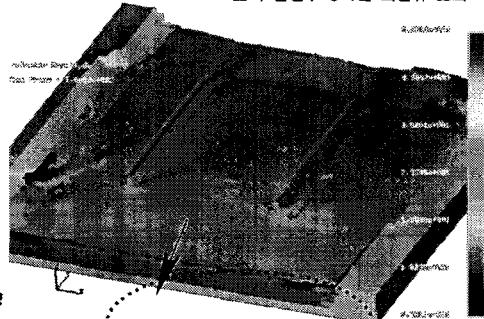


그림 8. 3차원 체적 유속분포

### 2.3.2 수위 및 압력분포

교량설치구간의 시간에 따른 난류에너지의 변화가  $k - \varepsilon$ , RNG  $k - \varepsilon$  모델 모두 70초 이후 안정적으로 변함을 확인할 수 있었고,  $k - \varepsilon$  모델의 경우 RNG  $k - \varepsilon$  모델에 비하여 시간에 따른 난류에너지의 변화가 크게 나타났다. 또한 시간에 따른 수위변화 양상을 살펴본 결과  $k - \varepsilon$ , RNG  $k - \varepsilon$ , LES모델 모두 비슷하게 계산 되었으며 교각의 영향을 받는 교각주위 유체의 흐름특성을 비교적 잘 모의 하는 것으로 나타났다. 다음 그림 9~그림 12는 시간에 따른 난류에너지의 변화 및 수위 변화, 3차원 압력분포 모의 결과를 나타내었다.

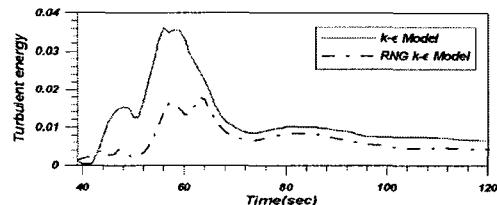


그림 9. 시간에 따른 난류에너지 변화

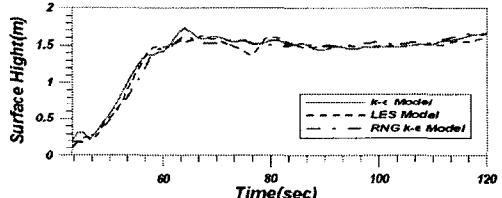


그림 10. 시간에 따른 수위변화



교각 후면부 3차원 무류 특성 모의

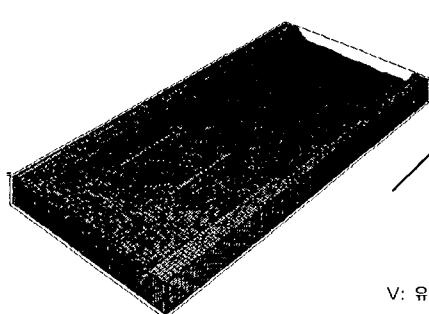


그림 11. 3차원 격자 압력분포

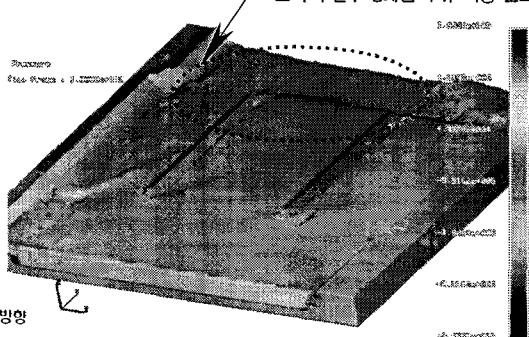


그림 12. 3차원 체적 압력분포

### 3. 결론

하천의 하도형상과 구조물의 영향을 고려하여 도시하천인 우이천 장월교지점 교각주위의 유체의 흐름거동을 3차원 CFD모형인 FLOW-3D를 이용하여 수치모의 한 결과 실제 유체의 흐름거동 양상과 비교적 잘 일치하는 만족할 만한 결과를 도출해 낼 수 있었다. 교각의 영향을 받는 구간의 유체의 시간에 따른 3차원 흐

름은 교각전면부에서 발생되는 회전류를 뚜렷하게 모의하였고, RNG  $k - \varepsilon$  모델의 경우 LES모델에 비하여 회전하는 흐름이 작게 나타남을 확인할 수 있었다. 이는 RNG  $k - \varepsilon$  모델의 등방성 난류 가정에 기인하는 것으로 판단된다. 또한  $k - \varepsilon$ , RNG  $k - \varepsilon$  모델에 의한 수치모의결과는 비교적 잘 일치하는 것으로 나타났으며, LES 모델의 경우 위의 두 모델과 비슷한 결과를 나타내었지만 값이 안정화되는데 걸리는 시간이 길었고 유속과 수위 변화 양상이 다소 크게 계산됨을 확인할 수 있었다.

FLOW-3D에 의한 3차원 수치해석 결과의 하천 적용 문제는 신중히 검토되어야 할 사항이며, 정확한 하도 측량자료의 확보와 수공구조물 등의 정교한 제원이 확보 된다면 보다 신뢰성 있는 결과를 도출해 낼 수 있으리라 사료된다.

### 감사의 글

이 연구는 소방방재청 자연재해저감기술개발사업(과제명 : 사면붕괴 예측 및 대응기술 개발) 연구비 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

### 참고문헌

1. 김대근, 이재형, 서일원, 2004, “교각이 설치된 월류형 여수로에서의 흐름에 대한 수치모의”, 한국수자원학회.
2. 이길성, 김지영, 2003, “FLOW-3D를 이용한 교각 주위 국부세굴의 3차원 수치모의”, 대한토목학회 학술발표회.
3. Flow Science, 2003, “FLOW-3D User's Manual”, Los Alamos, NM, USA.
4. Richardson, J.E., and Panchang, V. G. (1998) Three-dimensional simulation of scour-inducing flow at bridge piers, *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 124 No. 9, pp. 530-540.