

# FLOW-3D를 이용한 우이천의 홍수특성 분석

## Analysis of the Flood Characteristics in the Woo-Ee Stream Using FLOW-3D

윤선권\* / 문영일\*\* / 김종석\*\*\* / 오근택\*\*\*\* / 이수곤\*\*\*\*\*

Yoon, Sun-kwon / Moon, Young-il / Kim, Jong-suk / Oh, Keun Taek / Lee, Su Gon

### Abstract

Recently, the frequency of unexpecting heavy rains has been increased due to abnormal climate and extreme rainfall. There was a limit to analyze one dimension or two dimension stream flow of domestic rivers that was applied simple momentum equation and fixed energy conservation. Therefore, hydrodynamics flow analysis in rivers has been needed three dimensional 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  $k-\epsilon$ , RNG  $k-\epsilon$  and LES. Those numerical analysis results have been illustrated to bends and junctions by the turbulence energy effects, velocity of flow distributions, water level pressure distributions and eddy flows.

**Keywords** : FLOW-3D, Turbulence Model, Bend, Junction

### 1. 서론

국내하천의 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,  $k-\epsilon$ , RNG  $k-\epsilon$ , LES 등의 난류모형을 적용하여 각각의 수치모의 결과를 비교·분석 하였다. 또한, 수치 해석을 통한 하천 만곡부와 합류점에서의 난류영향 및 유속분포, 수위·압력분포, 와류특성 등을 분석하였다.

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

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

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

\*\*\*\* 서울시립대학교 공과대학 토목공학과 석사과정 civil798@naver.com

\*\*\*\*\* 서울시립대학교 공과대학 토목공학과 부교수 sglee@uos.ac.kr

## 2. 본론

### 2.1 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 대부분직선 또는 완만한 만곡을 이루고 있으며, 대동천, 가오천, 화계천의 지류와 각각 만나 중랑천으로 흘러 들어가는 중랑천의 제1지류 하천이다. 다음 그림 1은 적용대상 유역의 위치 및 수계 모식도를 나타내었다.

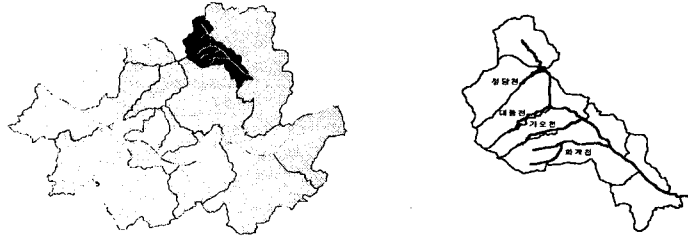


그림 1. 적용대상 유역의 위치 및 수계 모식도

### 2.2 수치모형의 이론적 배경

#### 2.2.1 FLOW-3D 모형의 개요

FLOW-3D는 유체와 가스의 열전달, 응결, 표면장력, 공동(空洞)현상 등과 같은 물리적인 거동을 해석하는 프로그램으로서, 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,  $k-\epsilon$ , RNG  $k-\epsilon$ , LES 모델 등의 총 5가지 난류모형을 적용할 수 있다.

#### 2.2.2 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.

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \left\{ \frac{\partial}{\partial x}(Fu) + \frac{\partial}{\partial y}(Fv) + \frac{\partial}{\partial z}(Fw) \right\} = FDIF + FSOR \quad \text{식(2.5)}$$

여기서, FDIF : Diffusion of Fluid Fraction  
 FSOR : Fluid Source/Sink

### 2.2.3 경계조건 및 입력자료

본 연구에서는 만곡부와 합류지점의 경우 수치지도를 이용하여 5×5 m Grid Metrics를 구성하여 각 지점별 x, y, z 자료를 추출한 후 FLOW-3D에서 불러들여 Topograph 3차원 형상을 구현하였으며, 격자망의 형태는 직사각형 모양의 직각격자(Cartesian coordinates: x, y, z)를 사용하였다. 상류단 경계조건으로 지점별 산정된 계획홍수량을 수위와 유속으로 환산한 값을 적용하였으며, 하류단 경계조건은 outflow로 주었다. 해석영역별 격자망의 구성과 x, y, z 방향의 격자수는 다음 그림 2, 표 1과 같다.

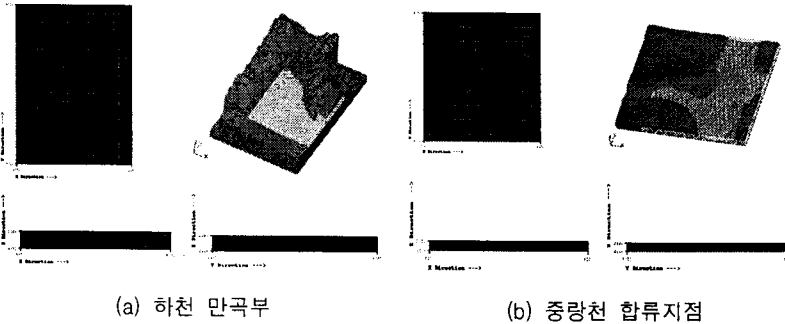


그림 2. 3차원 Topograph 형상 및 격자망의 구성

표 1. x, y, z 방향 격자수

형 태	x축	y축	z축	총 계
하천 만곡부	100	110	13	143,000
하천 합류점	100	112	14	156,800

### 2.2.4 적용 난류모형 및 기본 물리량

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

표 2. 입력 물성치

구 분	입 력 값	설 명
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	$k-\epsilon$ RNG $k-\epsilon$ LES	난류효과 고려
Surface Tension	Constant Surface Tension	표면장력 고려

## 2.3 수치모형 적용 결과 및 홍수특성 분석

### 2.3.1 하천 만곡부

하천 만곡부구간의 난류 모델별 수치모의 결과  $k-\epsilon$  모델과 RNG  $k-\epsilon$  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 20초 이후부터 120초까지의 수치모의를 이용 하였으며, 하천 만곡부에 대한 수치모의 결과는 다음 그림 3~그림 7과 같다.

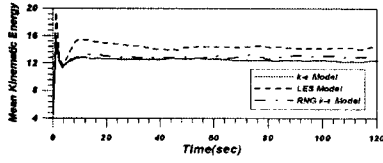


그림 3. 평균운동에너지의 변화

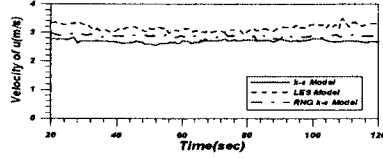


그림 4. 시간에 따른 유속변화

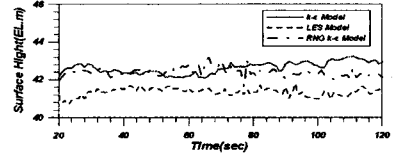


그림 5. 시간에 따른 수위변화

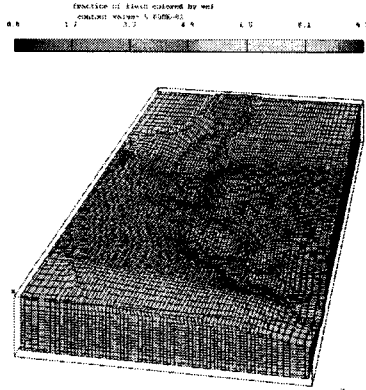


그림 6. 3차원 격자 유속분포

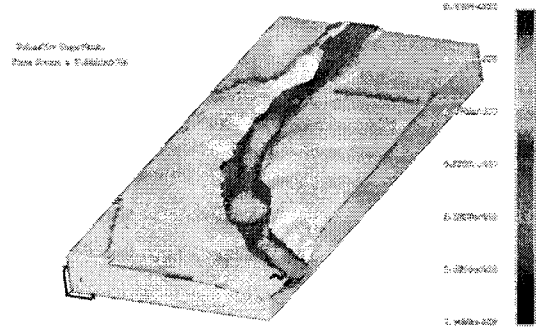


그림 7. 3차원 체적 유속분포

### 2.3.2 하천 합류점

하천 합류구간의 난류 모델별 수치모의 결과  $k-\epsilon$  모델과 RNG  $k-\epsilon$  모델은 비슷한 양상을 보였으며, LES 모델의 경우 평균운동에너지의 변화가 다소 크게 산정 되었다. 중랑천 지류인 우이천과 묵동천이 함께 합류하는 지점의 홍수흐름특성을 잘 모의하였고 와류특성과 흐름의 정체, 가속구간을 3차원 형상으로 모의할 수 있었다. 격자내부에서 계산된 평균운동에너지의 변화가 평형 상태를 나타내어 흐름장이 안정 상태를 이루는 120초까지의 수치모의를 이용 하였으며, 하천 합류점에 대한 수치모의 결과는 다음 그림 8~12와 같다.

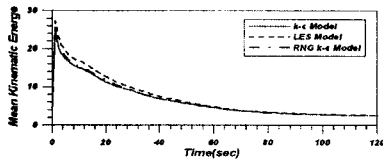


그림 8. 평균운동에너지의 변화

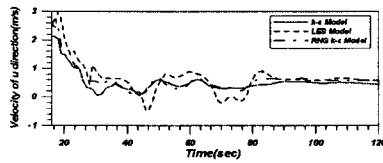


그림 9. 시간에 따른 유속변화

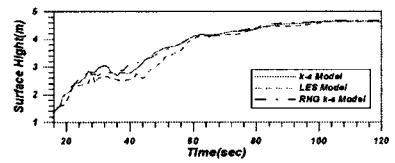


그림 10. 시간에 따른 수위변화

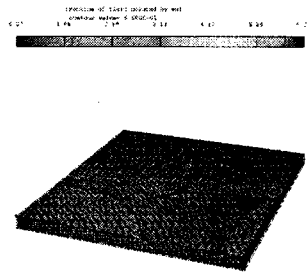


그림 11. 3차원 격자 유속분포



그림 12. 3차원 체적 유속분포

### 3. 결론

FLOW-3D에 의한 3차원 수치모의 결과 하천 만곡부와 합류부 등 총 2개 지점의 모의 구간에서 하도형상을 고려하는 실제 유체의 흐름거동 양상과 비교적 잘 일치하는 만족할 만한 결과를 도출해 낼 수 있었다. 하천 만곡부의 모의 결과 곡률반경 외측의 유속 및 수위가 다소 높게 산정되는 것을 확인할 수 있었으며, 하천 합류지점의 모의 결과 우이천과 묵동천의 계획빈도 홍수시 중랑천 합류에 의한 와류특성 현상을 잘 나타내었다. 난류 모델 적용 결과  $k-\epsilon$ , RNG  $k-\epsilon$  모델에 의한 수치모의결과는 비교적 잘 일치하는 것으로 나타났다. LES 모델의 경우 위의 두 모델과 비슷한 결과를 나타내었지만 값이 안정화되는데 걸리는 시간이 길었고 유속과 수위 변화 양상이 다소 크게 계산되었다.

FLOW-3D에 의한 3차원 수치해석 결과의 하천 적용 문제는 신중히 검토되어야 할 사항이며, 보다 정확한 하도 측량자료의 확보와 수공구조물 등의 정교한 제원, GIS 기반자료를 바탕으로 한 지형 Data 등이 제공된다면 보다 신뢰성 있는 결과를 도출해 낼 수 있으리라 사료된다. 현재까지는 유역전체의 홍수특성분석을 위해 FLOW-3D모형을 적용하기에는 다소 무리가 따르며, 국부적인 하도구간의 수리특성분석에의 활용이 가능하리라 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. 서울특별시, 2004 “우이천등 4개 하천 하천정비 기본계획”, 서울시.
3. 이길성, 김지영, 2003, “FLOW-3D를 이용한 교각 주위 국부세굴의 3차원 수치모의”, 대한토목학회 학술 발표회.
4. American Society of civil Engineers(ASCE), 1996, “Hydrology Handbook”, Second Ed., ASCE.
5. Flow Science, 2003, “FLOW-3D User’s Manual”, Los Alamos, NM, USA.