

## 도시하천의 교각 및 횡단 월류형 구조물에 의한 수리영향 분석

Analysis of Hydraulic effects on Piers and Transverse  
Overflow Type Structures in Urban Stream

윤 선 권\* / 전 시 영\*\* / 문 영 일\*\*\* / 김 종 석\*\*\*\*

Yoon, Sun kwon / Chun, Si young / Moon, Young il / Kim, Jong suk

## Abstract

Recently, stream flow analysis has been accomplished by one or two dimensional equations and was applied by simple momentum equations and fixed energy conservations which contain many condition limits. In this study, FLOW-3D using CFD (Computational Fluid Dynamics) was applied to stream flow analysis which can solve three dimensional RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes Equation) control equation to find out physical behaviors and the effect of hydraulic structures. Numerical simulation accomplished those results was compared by using turbulence models such as  $k - \epsilon$ , RNG (Renormalized Group)  $k - \epsilon$  and LES (Large Eddy Simulation). Numerical analysis results have been illustrated by the turbulence energy effects, velocity of flow, water level pressure and eddy flows around the piers and transverse overflow type structures. These results will be able to used by basis data that catch hold of effects on long-term bed elevation changes, sediment accumulations, scours and water aggravations by removal of obsolete transverse over flow type structures in urban stream.

**keywords** : FLOW-3D, Turbulence Model, Transverse overflow type structure, Urban stream

## 요 지

최근 하천의 흐름해석 분야에서는 수위 및 하상변동 양상과 오염된 지류유입으로 인한 본류에서의 유속분포 양상 및 혼합과정 등의 실제적인 문제를 해결할 수 있는 1, 2차원적 해석이 이루어지고 있으며, 이는 복잡한 하천을 균일화된 모양과 단순화된 방정식으로 일괄 적용함으로써 많은 한계점을 나타내고 있다. 본 연구에서는 서울시 관내 지방 2급 하천인 우이천 시험유역을 대상으로 하천의 물리적인 특성 변화에 따른 흐름해석을 수행하기 위하여 3차원 RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes Equation)를 지배방정식으로 하는 CFD (Computational Fluid Dynamics)모형인 FLOW-3D를 이용하였고,  $k - \epsilon$ , RNG (Renormalized Group)  $k - \epsilon$ , LES (Large Eddy Simulation) 등의 난류모형을 적용하여 각각의 수치모의 결과를 비교·분석 하였다. 또한, 수치 해석을 통한 교각

\* 서울시립대학교 공과대학 토목공학과 박사과정

Ph.D Student, Dept. of Civil Engineering, The University of Seoul, Seoul, 130-743, Korea.

(e-mail: skyoon@uos.ac.kr)

\*\* 원광대학교 공과대학 토목환경도시공학부 교수

Professor, Division of Civil, Environmental &amp; Urban Engineering, Wonkwang University, Iksan, Chonbuk, 570-749, Korea.

(e-mail: chunsy@wonkwang.ac.kr)

\*\*\* 교신저자, 서울시립대학교 공과대학 토목공학과 교수

Corresponding Author, Professor, Dept. of Civil Engineering, The University of Seoul, Seoul, 130-743, Korea.

(e-mail: ymoon@uos.ac.kr)

\*\*\*\* 서울시립대학교 공과대학 토목공학과 박사수료

Ph.D Completion, Dept. of Civil Engineering, The University of Seoul, Seoul, 130-743, Korea.

(e-mail: jongsuk@uos.ac.kr)

설치부와 하류 횡단월류형 구조물에서의 난류영향 및 유속분포, 수위·압력분포, 와류특성 등을 분석하였고, 구조물의 철거에 의한 영향을 비교하여 분석하였다. 이는 향후 도시하천의 기능을 상실한 횡단 구조물 철거에 의한 장기적인 하상변동과 토사의 퇴적, 세굴 및 수질악화 등의 영향을 파악해 볼 수 있는 기초자료로 활용될 수 있으리라 사료된다.

**핵심용어** : FLOW-3D, 난류 모형, 횡단 월류형 구조물, 도시하천

## 1. 서 론

최근 들어 하천의 기능에 대한 인식이 과거 홍수소통원활과 용수확보 등의 이·치수적인 목적에서 인간과 다양한 생명체가 공존하는 서식처로서의 기능을 할 수 있는 생태 환경적 개념으로 변화하는 추세이며, 특히 도시하천의 경우 자전거도로와 하도내 체육시설 등이 조성되어 하루에도 수많은 시민들이 하천을 찾고 있다. 그러나 하도내에 설치되어있는 기능을 상실한 하천횡단 구조물(낙차공, 우수관 매설, 보, 소형댐 등)에 의하여 장기적인 토사의 퇴적과 수질악화, 하천생태통로의 차단, 수변 생물서식처의 변화, 경관훼손 등의 문제가 새롭게 수반되고 있으며, 근래 들어 빈번히 발생하고 있는 이상기후적인 강우특성과 돌발홍수 등에 의한 대책은 미흡한 편이다. 현재 우리나라 하천의 수위유지나 용수취수 목적으로 사용되는 크고 작은 보·소형댐은 약 18,000여개에 달하며, 도시화 등으로 인한 농경지의 감소와 대형 저수지의 축조, 양수장 시설 증가 등으로 인해 매년 50~150개의 보가 기능을 상실하고 있다(국립방재연구소, 2004).

하도내 기능을 상실한 보 철거에 의한 흐름특성 변화분석을 위한 연구는 현재 2차원 모의까지 수행되고 있으며, 이배성 등 (2006)은 HEC-RAS모형과 RMA-2모형을 이용하여 보 철거 후의 하도내 흐름특성 변화를 분석하였고, 윤병만 등 (2007)은 GSTARS모형을 이용하여 보철거에 의한 하천의 물리적 변화를 연구한바 있다. 외국의 경우에도 노후화되어 용도가 없어진 보의 경우 사회 문제로 부각되는 경우가 많아 이에 대한 연구가 활발히 진행 되어 왔다. Evans et al. (2002)는 Ohio 주에 있는 Ballville 댐의 철거에 따른 유사이동을 GIS와 연계하여 예측했으며, Barber and Perkins (2002)는 HEC-RAS를 이용하여 보 철거에 따른 유사량을 줄이고 준설량을 최소화하는 안정적인 하도 형태를 구성하는 방법을 제시하였다. 현재까지 하천의 흐름 특성 분석을 위한 3차원 수치모의의 국내 적용 예는 드물며, 국부적인 하천구간과 정형화된 수리모형실험에 대한 수치모의가 실시되고 있다. 양원준과 최성욱

(2002)은 LES를 이용하여 교각주위 국부세굴의 3차원 수치모의를 실시하여 RNG  $k-\epsilon$ 모형의 결과와 비교·분석한 바 있으며, 이길성과 김지영 (2003)은 FLOW-3D를 이용하여 안양천 고척교 지점 교각주위의 흐름특성 및 국부세굴에 관한 연구를 하였다. 김대근 등 (2004)은 FLOW-3D를 이용하여 교각이 설치된 월류형 여수로에서의 흐름에 대한 수치모의를 수행하였으며, 김대근과 김용근 (2007)은 사다리꼴 단면을 가진 광정 횡월류위어에서의 흐름특성을 3차원 수치모의를 통해 분석하였다. 외국의 경우 Olsen and Kjellesving (1998)은 댐 여수로에서의 흐름특성을 해석하기 위하여 RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes Equation)와  $k-\epsilon$ 난류모형을 지배방정식으로 하여 수치모의를 수행하여, 수면변위와 유량계수에 대한 적절한 수치모의 결과는 흐름을 해석하는 데에 수치모형이 효과적으로 이용될 수 있음을 보여주었다. Savage and Johnson (2001)과 Ho et al. (2001)은 FLOW-3D를 이용하여 유체의 수면변위와 압력분포 등을 계산하였으며, 흐름해석 시 수치모형을 이용하는 것이 경제성과 정확성의 측면에서 합리적인 검토방법이 될 수 있음을 보여주었다.

본 연구에서는 하천의 수위 및 하상변동 양상과 오염된 지류유입으로 인한 본류에서의 유속분포 양상 및 혼합과정 등의 실제적인 문제를 해결할 수 있는 3차원 RANS를 지배방정식으로 하는 CFD (Computational Fluid Dynamics)모형을 이용하여 서울시 관내 지방 2급 하천인 우이천 시험유역을 대상으로 하천의 물리적인 특성 변화에 따른 하천 흐름 해석과 하천 횡단월류형 구조물이 설치되어있는 교각주변에서의 3차원 흐름 해석을 실시하였다. 또한 월류형 구조물이 철거 되었을 경우 수리학적 영향을 비교·분석하였다. 적용 난류모형은  $k-\epsilon$ , RNG (Renormalized Group)  $k-\epsilon$ , LES (Large Eddy Simulation)로 3가지 난류모형을 적용하였다. 또한, 수치모의 결과로 모형의 유속 및 수심, 등류속도와 와류 형태 등을 도시하여 우이천 시험유역에서의 가상 홍수특성에 따른 홍수위를 분석하고 하천 시설물에 의한 흐름특성 변화 구간과 홍수위 영향 분석을 실시하였다. 본 연구의 결과는 도시하천의 기능을 상실

한 하천 횡단 구조물의 장기적인 하상변동과 토사의 퇴적, 세굴 및 수질 등의 영향을 파악해 볼 수 있는 기초 자료로 활용이 가능하리라 사료된다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 수치모형

FLOW-3D는 미국 Flow Science, Inc.에서 개발한 상용 CFD 모형으로 Los Alamos National Laboratory에서 개발된 MAC (Marker and Cell) 방법과 SOLA-VOF (Volume of Fluid)방식을 기초로 하고 있다(Flow Science, 2003). 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: Finite Volume Method)을 사용하며, 비산 및 쇄파의 복잡한 자유표면 해석을 위하여 VOF기법(Hirt and Nichols, 1981)을 이용한다.

#### 2.1.1 지배방정식

모형에 사용된 지배방정식은 연속방정식과 운동량 방정식이며, 연속방정식은 Eq. (1)과 같이 표현 된다.

$$V_F \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\rho u A_x) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho v A_y) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho w A_z) = 0 \quad (1)$$

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 방정식은 Navier-Stokes 방정식으로 Eqs. (2)~(4)와 같이 표현된다.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left( u A_x \frac{\partial u}{\partial x} + v A_y \frac{\partial u}{\partial y} + w A_z \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + G_x + f_x \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left( u A_x \frac{\partial v}{\partial x} + v A_y \frac{\partial v}{\partial y} + w A_z \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + G_y + f_y \quad (3)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left( u A_x \frac{\partial w}{\partial x} + v A_y \frac{\partial w}{\partial y} + w A_z \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + G_z + f_z \quad (4)$$

여기서,  $G$ 는 체적력이고  $f$ 는 점성력을 나타낸다. 그리고 자유표면의 해석을 위한 한 격자 내의 단위체적당 유체의 체적은 VOF함수,  $F(x, y, z)$ 로 표현된다. Eq. (5)는 일반적인 VOF함수를 나타내었다.

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \left\{ \frac{\partial}{\partial x} (Fu) + \frac{\partial}{\partial y} (Fv) + \frac{\partial}{\partial z} (Fw) \right\} = FDIF + FSOR \quad (5)$$

여기서,  $FDIF$ 는 Diffusion of Fluid Fraction이며,  $FSOR$ 은 Fluid Source/Sink이다.

### 2.2 난류 모형

Navier-Stokes 방정식을 풀기 위해서는 가장 기본적인 벽 경계, 입구경계, 출구경계 및 대칭경계에 대한 조건을 알아야 한다. 특히, 난류유동을 고려하기 위해서는 대표적인 난류해석 모형을 선택하여 벽경계조건을 적용해 주어야 한다. FLOW-3D에서 사용되는 대표적인 난류모형으로는 Prandtl의 혼합거리모형(Mixing-length Model), One-equation 난류모형,  $k-\epsilon$ 모형, RNG  $k-\epsilon$ 모형, LES모형 등이 있다. 본 연구에서는 위의 5가지 난류 해석 모형 중 활용빈도가 높고 복잡한 난류 유동장의 해석을 보다 정확히 수행할 수 있는  $k-\epsilon$ 모형, RNG  $k-\epsilon$ 모형, LES모형을 적용하였으며, 각 난류 해석 모형별 특성과 지배방정식은 다음과 같다.

#### 2.2.1 $k-\epsilon$ Model

난류의 운동에너지( $k$ : turbulent kinematic energy)와 난류운동에너지의 소산률( $\epsilon$ : dissipation rate)을 이용하여,  $k$ 와  $\epsilon$ 을 수송방정식으로부터 풀면 난류의 모형이 완성된다. 이러한  $k-\epsilon$ 모형은 Launder and Spalding (1974)에 의해 상세히 토의되었으며 지배방정식은 다음과 같다.

$$\nabla \cdot \left( \rho u k - \frac{\mu_t}{Pr_k} \nabla k \right) = G - \rho \epsilon \quad (6)$$

$$\nabla \cdot \left( \rho u k - \frac{\mu_t}{Pr_k} \nabla k \right) = C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} G - \rho C_{\epsilon 2} \frac{\epsilon^2}{k} \quad (7)$$

여기서, 난류점성계수( $\mu_t$ )는  $\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}$ 이며, 난류확산계수( $\Gamma_\phi^t$ )는  $\Gamma_\phi^t = \frac{\mu_t}{Pr_\phi}$ 이다.  $Pr_k$ 는 온도나 엔탈피에 대한 난류 Prandtl 수이고,  $\beta$ 는 열팽창계수이다.

위의 Eqs. (6) and (7)에서  $C_\mu$ ,  $C_{\epsilon_1}$ ,  $C_{\epsilon_2}$ 와  $P_{r_\phi}$ 는 모두 경험적인 상수이며,  $G$ 는 난류운동에너지의 생성율로 Eq. (8)과 같이 정의된다.

$$G = \tau_{ij}^t \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x^j} = \mu_t \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} \quad (8)$$

본 연구에서 경험상수는  $C_\mu=0.09$ ,  $C_{\epsilon_1}=1.44$ ,  $C_{\epsilon_2}=1.92$ ,  $P_{r_k}=1.0$ ,  $P_{r_\epsilon}=1.3$ 의 값을 사용하였다.

### 2.2.2 RNG $k-\epsilon$ Model

RNG  $k-\epsilon$ 모형은  $k-\epsilon$ 모형의 단점을 보완하기 위하여 Yakhot et al. (1992)이 개발한 모형으로 통계적인 기법을 도입하여 얻은 모형상수를 적용하므로 모형상수에 민감하지 않은 결과를 보이는 것으로 알려져 있다. 또한 전통적인  $k-\epsilon$ 모형에 비해 복잡한 난류유동장의 해석을 정확하게 수행할 수 있으며, 특히 낮은 레이놀즈수(low Reynolds number)와 고전단 흐름(high shear flow)의 수치모의에 적합한 것으로 알려져 있다 (Versteeg and Malasekera, 1995). 운동량보존방정식을 RNG이론에 입각하여 표현하여보면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) \\ &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu_{eff} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{\partial p}{\partial x_i} \end{aligned} \quad (9)$$

그리고,  $k$ 와  $\epsilon$ 의 수송방정식 역시 RNG이론에 맞춰 표시하면,

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i k) \\ &= \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + \mu_t S^2 - \rho \epsilon \end{aligned} \quad (10)$$

와

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \epsilon) \\ &= \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \alpha_\epsilon \mu_{eff} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right) + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} \mu_t S^2 - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} - R \end{aligned} \quad (11)$$

로 나타난다. 여기서  $\alpha_\epsilon$ 와  $\alpha_k$ 는  $\epsilon$ 과  $k$ 에 대한 Prandtl 수의 역이고, 이들 수는 RNG이론에 따라 Eq. (12)와 같이 표시될 수 있다.

$$\left| \frac{\alpha - 1.3929}{\alpha_0 - 1.3929} \right|^{0.6321} \left| \frac{\alpha + 2.3929}{\alpha_0 + 2.3929} \right|^{0.3679} = \frac{\mu_{mol}}{\mu_{eff}} \quad (12)$$

여기서,  $\alpha_0 = 1.0$  이다.

$S$ 는 strain tensor평균을  $S_{ij}$ 의 계수로서, 다음과 같이 정의된다.

$$S_{ij} = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}} \quad (13)$$

$\epsilon$ 방정식 안의  $R$ 은 다음과 같이 주어진다.

$$R = \frac{C_\mu \rho \eta^3 (1 - \eta/\eta_0) \epsilon^2}{1 + \beta \eta^3} \frac{\epsilon^2}{k} \quad (14)$$

여기서,  $\eta \equiv Sk/\epsilon$ ,  $\eta_0 \approx 4.38$ ,  $\beta = 0.012$ 이다.

### 2.2.3 LES Model

LES의 지배방정식은 Navier-Stokes 방정식에 공간적인 여과를 실시하여 얻을 수 있다. 시간평균이 아닌 공간에 대한 여과이기 때문에 변동속도의 시간에 대한 변동은 무시되고, Navier-Stokes 방정식으로부터 다음과 같은 LES의 지배방정식인 연속방정식과 운동량 방정식을 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (15)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \bar{U}_i \bar{U}_j = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} \quad (16)$$

여기서,  $\nu$ 는 물의 점성계수,  $\rho$ 는 물의 밀도,  $\bar{p}$ 는 공간 여과된 수정 압력항,  $\bar{u}$ 는 여과 속도, 그리고  $U$ 는 순간 속도이다.

지배방정식의 완결문제를 해결하기 위해서는 비등방성 잔여응력항에 대한 모형화가 필요하다. 비등방성 잔여응력항에 대한 모형은 여러 가지가 있지만, Smagorinsky (1963)가 제안한 방법을 사용하여 운동량 방정식의 비등방성 잔여응력항을 표현하면 Eq. (17)과 같다.

$$\tau_{ij}^r = -2 \nu_r \bar{S}_{ij} \quad (17)$$

여기서,  $\bar{S}_{ij}$ 는 여과 속도에 대한 변형률,  $\nu_r$ 은 잔여유속

의 난류점성계수이다. 잔여유속의 난류점성계수를 정의하기 위해 혼합거리 모형을 사용하면 난류 점성계수는 다음과 같다.

$$\nu_r = l_s^2 \bar{S} \quad (18)$$

$$l_s = C_s \Delta \quad (19)$$

여기서,  $l_s$ 는 Smagorinsky 특성길이,  $\bar{S} = (2\overline{S_{ij}} \overline{S_{ij}})^{1/2}$ 는 여과된 특성변형률,  $\Delta$ 는 필터의 크기, 그리고  $C_s$ 는 Smagorinsky 상수이다.

### 3. 모형의 적용

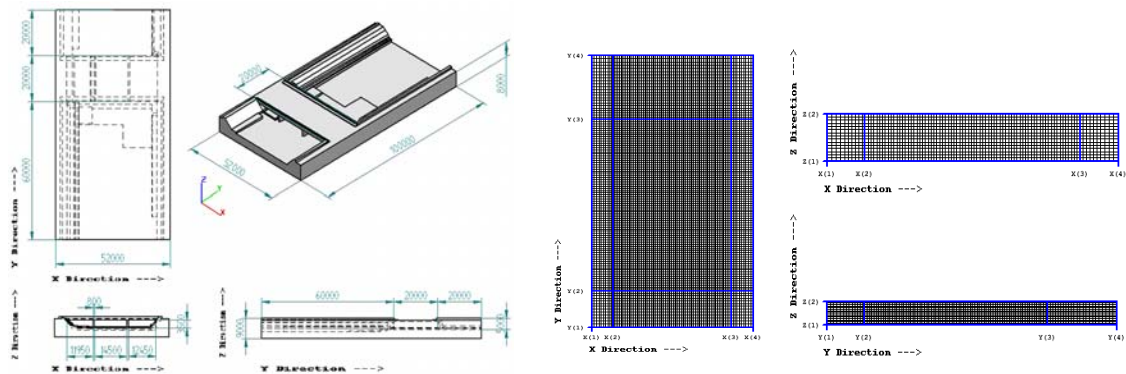
#### 3.1 경계조건 및 입력자료

대상 영역은 직사각형 모양의 구조물 상, 하(바닥), 좌안, 우안, 상류, 하류 6개의 경계면이 형성되는데 모든 경계면에 대하여 경계조건이 주어져야 한다. 기본적으로 모든 대상영역의 상부( $Z_{max}$ )는 대기압 ( $p=0$ )이 작용하는 영역으로 고려하였으며, 바닥 부분인 하( $Z_{min}$ )는 지형·지물의 경계로 발생하는 벽면(Wall)으로 하여 흐름이 발생하지 않는 조건으로 고려하였다. 기본적으로 FLOW-3D에서는 유체흐름의 상류단 경계조건을 유속 (m/s)항으로 주어지게 되어있으며, 이를 유량으로 환산하기 위한 단면적( $A: m^2$ )을 계산함으로써 유량경계조건

을 입력하여 줄 수 있다. 또한 시간에 따른 유속의 변화를 고려해주는 기능과 압력(p: pascal)의 변화를 고려해주는 기능이 내장되어 있다. 본 연구에서는 접근유속을 1m/s로 고정하여 수치모의를 실시하였으며, 과거 실측 호우사상에 대하여 시간에 따른 유량변화를 단면적으로 환산한 값을 적용하여 상부 경계면의 입력 자료로 구성하였다. 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 유출조건으로 주었다. 대상영역의 3차원 Solid형상과 격자망의 구성은 Fig. 1과 같으며, 적용 난류 모형별 x, y, z방향의 격자수는 Table 1과 같다.

#### 3.2 적용 난류모형 및 기본 물리량

본 연구의 대상영역은 자연하천 수로 내로써 교각과 횡단 월류형 구조물 등의 설치 부에서는 도수 및 와류가 발생할 수 있으며, 유속이 빨라지는 구간에서는 난류가 발생할 수 있어 난류 모형을 적용 하였다. 비압축성 유체의 난류 적용에 있어 가장 중요한 특징인 도수, 흐름분리 형상 등이 발생하는 수로의 감세흐름 및 혼합



(a) Plane figures of 3D Solid shape(Unit: mm)

(b) Grid composition of numerical analysis area

Fig. 1. 3-D Solid Shape and Grid Composition of Numerical Analysis Area

Table 1. Number of Grid at x, y, z Direction

Turbulence Models	x-D	y-D	z-D	Total Number of Cells	Smallest cell dimensions x×y×z(m)
$k - \epsilon$ Model	59	141	21	174,699	0.475×0.406×0.208
RNG $k - \epsilon$ Model	77	123	19	179,979	0.543×0.650×0.289
LES Model	67	133	21	187,131	0.633×0.650×0.289

흐름을 모의하기 위해  $k - \epsilon$ , RNG  $k - \epsilon$ , LES모형을 사용하였다. 이 모형은 거의 모든 흐름조건에 만족하는 크고 작은 레이놀즈수를 제공한다. 특히 LES모형의 경우 비등방성 잔여응력항에 대한 고려로 교각과 횡단월류형 구조물 설치 구간에서의 난류모의를 효과적으로 실시 할 수 있으리라 사료된다. 또한 흐름해석에 사용될 유체의 기본적인 물리량을 다음과 같이 정의하였다. 유체는 비압축성이며, 밀도는 물의 밀도( $1,000 \text{ kg/m}^3$ )를 사용하였고, 점성계수는  $0.001 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 를 적용하였으며, 중력가속도는 z방향의 역방향으로  $9.8 \text{ m/s}^2$ 을 사용하였다. 그리고 대상영역의 구조물 및 지형의 고체표면은 세굴이 일어나지 않는 강성체이며, 조도계수(Roughness Coefficient)는 “우이천 등 4개 하천정비기본계획 (서울특별시, 2004)” 보고서에 근거하여  $n=0.030$ 을 적용하였다. 흐름해석에 사용된 유체의 기본적인 물리량은 Table 2와 같다.

### 3.3 횡단 월류형 구조물 철거 전·후의 형상

장월교 지점의 교각과 하단 횡단월류형 구조물의

철거에 의한 배수위 및 통수능의 영향검토를 위하여 현장 사진 촬영 자료와 실제 하천 단면의 측량자료 및 구조물 계측자료를 최대한 활용하여 3차원 CAD프로그램인 Solid Edge를 이용하여 형상을 구현하다. Table 3은 장월교 지점의 횡단 월류형 구조물 철거 전·후의 현장사진과 Solid Edge를 이용하여 구현한 3차원 형상이다.


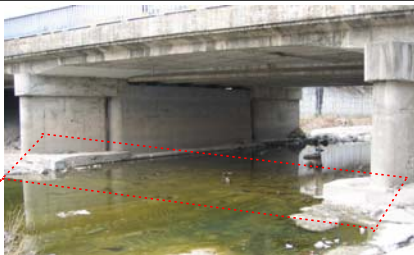
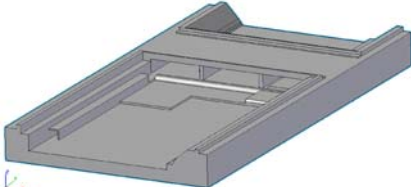
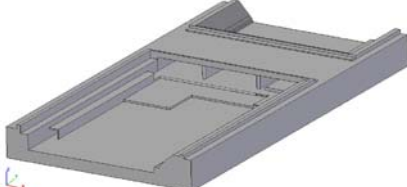
### 3.4 적용 대상 유역

적용 대상유역은 서울시 관내 지방 2급 하천인 우이천 유역으로 유역경계는 서쪽으로는 북한산, 북쪽으로는 도봉산, 남쪽으로는 성북구와 경계를 이루고, 유역면적은  $28.76 \text{ km}^2$ , 유로연장은  $11.75 \text{ km}$ 이다. 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. Fig. 2는 적용대상 유역의 위치 및 수계모식도를 나타내었다.

Table 2. Physical Input Data

Classification	Model Input Data	Explanation
Viscosity( $\nu$ )	0.001 Pa/s	Viscosity of Fluid
Density( $\rho$ )	1000 kg/m <sup>3</sup>	Density of Fluid
Gravity(g)	-9.8 m/s <sup>2</sup>	z-D Acceleration of Gravity
Wall Shear	-	Fluid and Topography Resistance
Roughness	0.030	Roughness Coefficient
Turbulence Model	$k - \epsilon$ , RNG $k - \epsilon$ , LES	Consideration of Turbulence Effect
Surface Tension	Constant Surface Tension	Consideration of Surface Tension

Table 3. Before and After Shape of Removing Overflow Type Structures

Classification	Before Removal of Structures	After Removal of Structures
Field Study Pictures		
Numerical Analysis Area of 3D Solid Shapes		



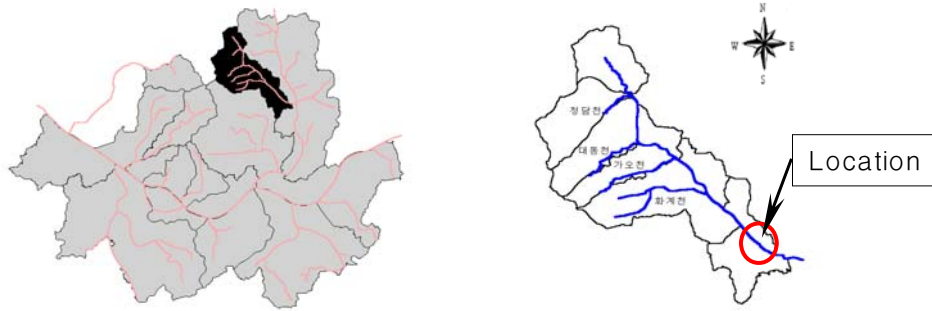


Fig. 2. Location of Study Basin

### 3.5 대상지점 과거실측호우 사상

적용 대상하천인 우이천은 하천 하류부 장월교 지점에 자기수위 관측기(T/M)가 설치 운영되고 있으며, “대학과 연계한 하천 관리에 대한 연구용역 (서울특별시, 2007)”의 일환으로 실측호우가 관측되고 있다. 본 연구에서는 과거 7년 동안의 관측된 실측호우사상 중 규모가 큰 4개를 선정하여 하천 흐름특성을 분석하였으며, 과거관측 수위(W.S.E : Water Surface Elevation)는 2006년 7월 12일에 18.42 EL.m로 최고수위를 기록하였고, 이때의 최대유속은 4.08 m/s였다(Table 4). Fig. 3은 장월교 지점의 수위-유량 관계곡선이며, 2007년 까지 개발된 수위-유량곡선식은  $Q = 81.52(H - 16.1514)^{1.635047}$ , ( $16.24 \leq H \leq 18.42$ )이며, 결정계수( $R^2$ )는 0.916으로 분석되었다(Table 5). 여기서, H는 관측수위(EL.m)이며, Q는 계산유량( $m^3/s$ )을 의미한다.

Fig. 4는 장월교 지점 과거 실측 호우사상 중 규모가 큰 Event 1 (2006년 7월 12일 호우사상)과 Event 2 (2006년 7월 16일 호우사상)를 선정하여 관측 홍수위에 대한 수치해석모형의 검·보정을 실시한 결과이다. 과거 실측호우사상에 대하여 시간에 따른 유량변화를 단

면적으로 환산한 값(관측유속)을 상부 경계면의 입력 자료로 적용하여 수치해석을 실시하였다. 마름모는 관측치를, 실선과 점선, 일점쇄선은 본 연구에 의한 수치 계산 결과이다. 2006년 7월 12일 호우사상은 관측치와 계산치에 대하여 모형을 보정한 결과이며, 난류모형별로 초기값이 불안정하여 관측치에 비하여 값이 다소 크게 산출되었고, 관측지점에서의 전반적인 수면변동에 있어서 계산치가 비교적 잘 재현하고 있음을 알 수 있다. 2006년 7월 16일 호우사상으로 모형을 검정한 결과 난류모형별 불안정한 초기값으로 관측치를 잘 표현하지 못하였지만 이후에는 값이 안정적으로 계산되어 관측치에 근사하게 수렴해 감을 알 수 있다. 세 가지 난류 모형 중  $k - \epsilon$ 모형이 관측치를 가장 잘 재현하고 있으며, LES모형의 경우 값이 다소 크게 계산되었고, RNG  $k - \epsilon$ 모형은 관측치에 비하여 다소 작게 계산되었다. 본 연구에서는 실측호우 사상을 통한 모형의 검·보정을 실시하여 적용성을 높였으며, 모형의 물리적인 매개변수들을 실제 호우사상과 대상영역에 맞게 최적화를 실시하였다. 따라서 대상영역인 도시하천의 가상호우사상에 대하여 실제와 근사한 수치모의가 가능하도록 하였다.

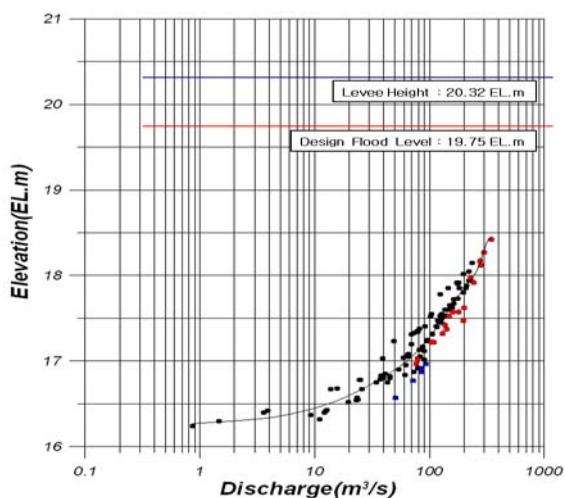


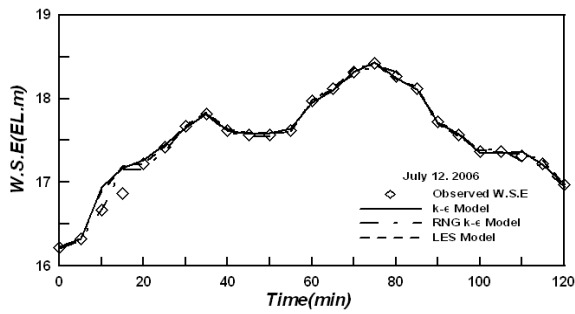
Fig. 3. Rating Curve

Table 4. Observed Rainfall Events

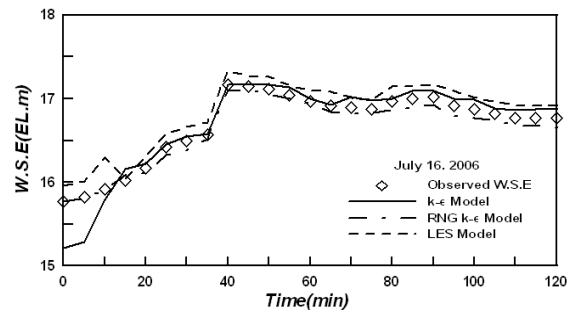
Division	Rainfall Events	W.S.E (EL.m)	Velocity (m/s)	Discharge ( $m^3/s$ )
Event 1	July,12,2006	18.42	4.08	344.37
Event 2	July,16,2006	18.38	3.92	338.12
Event 3	Aug,07,2003	18.15	2.11	237.11
Event 4	July,30,2001	17.94	1.95	219.29

Table 5. Calculated Rating Curve Eqn.

Observed years	Rating Curve Eqn.	$R^2$
2000 yr ~ 2007 yr	$Q = 81.52(H - 16.1514)^{1.635047}$ [ $16.24 \leq H \leq 18.42$ ]	0.916



(a) Rainfall Event 1 (July 12, 2006)



(b) Rainfall Event 2 (July 16, 2006)

Fig. 4. Comparison Between Observed and Calculated W.S.E

#### 4. 수치모의 결과

본 연구에서는 우이천 시험유역의 교량 설치 구간간의 흐름 특성과 횡단 월류형 구조물의 철거시 수리특성에 대한 3차원 분석을 수행하였다. 난류에 대한 모의기법은 등방성 난류가정에 기인한  $k-\epsilon$  모형과 RNG  $k-\epsilon$  모형을 사용하였고, 교각과 횡단월류형 구조물이 존재하는 대상영역의 복잡한 수로구조물 주변흐름해석을 보다 효과적으로 수행하리라 사료되는 비등방성 잔여응력항을 고려한 LES모형을 적용하여 수치모의 하였다. 대상영역에 대한 수치모의는 Time step size의 크기가 일정하게 감소하다 안정화 되며, 격자내부의 평균 운동에너지(Mean kinematic energy)의 변화가 평형(Equilibrium)상태를 나타내는 20~120초까지의 모의 결과를 이용하였다.

##### 4.1 횡단 월류형 구조물 철거 전

횡단 월류형 구조물 철거 전의 장월교 지점 교량 설치구간의 난류 모형별 수치모의 결과 교각전면부의 배수위 영향과 후면부에서의 후류 특성을 잘 표현해 주고 있으며, 장월교 직하류 횡단 월류형 구조물이 설치되어 있는 지점의 유속이 가속화되고 수위가 급격히 감소하는 양상을 효과적으로 파악할 수 있었다. 횡단 월류형 구조물의 설치 지점의 시간에 따른 수위 변화 양상은 격자내의 평균운동에너지가 안정화 되는 20초 이후부터  $k-\epsilon$  모형과 RNG  $k-\epsilon$  모형의 적용결과가 거의 비슷한 양상으로 수치모의 되었고, LES모형의 경우 수위변화가 다소 크게 계산되었다. 시간에 따른 난류에너지의 변화역시  $k-\epsilon$  모형과 RNG  $k-\epsilon$  모형의 적용결과가 비슷한 양상으로 수치모의 되었고 LES모형의 경우 다소 작게 나타난 후 점차 안정화 되었다. 이는 RNG  $k-\epsilon$  모형이  $k-\epsilon$  모형에 기반하여 보완된 모형이며, 통계적인 기법을 도입하여 얻은 모형상수를 적용하므로 모형상수에 민감하지 않은 결과를 보이는 것으로 사료

되며, LES 모형의 경우 비등방성 잔여응력항에 대한 난류모의를 실시하기 때문에 등방성 난류 가정에 기인한 RNG  $k-\epsilon$  모형이나  $k-\epsilon$  모형에 비하여 값이 크게 계산되는 것으로 판단된다.

Fig. 5는 적용 난류모형별 교각주위의 횡단 유속 분포(x-z Plane)와 월류형 구조물주변의 횡단유속 분포(x-z Plane)를 도시하였고, Fig. 6는 적용 난류모형별 하천 종방향 유속분포(y-z Plane)이다. 효과적인 도시를 위하여 난류모형별 유속 Vector의 크기를 1/10로 왜곡하였으며, 컬러바(Color bar)는 y방향 유속의 크기이다. Fig. 7은 난류모형별 3차원 체적유속분포를 나타내었으며,  $k-\epsilon$  모형과 RNG  $k-\epsilon$  모형은 LES모형에 비하여 교각 전면부에서 발생하는 회전류가 뚜렷하게 나타나지 않았으며, 횡단월류형 구조물에 의한 복잡한 난류 유동장의 해석결과가 작게 계산 되었다. 이는  $k-\epsilon$  모형과 RNG  $k-\epsilon$  모형의 등방성 난류 가정에 기인한 것으로 판단된다.

횡단월류형 구조물의 철거 전 교각과 월류형 구조물에 의한 배수고( $h_a$ )를 산정한 결과 난류모형별 평균 0.55 m로 계산되었으며, 3차원 모의 시 교량상부의 수위가 상당부분 상승함을 확인할 수 있었다. 난류모형별 유속분포의 분석결과 LES모형에서 가장 크게 발생하였으며, 최대유속( $V_{max}$ )에 대한 평균유속( $V_{mean}$ )의 비는 교각전면부(FOP: Front of Pier)에서 평균 1.04, 교각후면부(BOP: Back of Pier)에서 1.01로 계산되었다. 일반적으로 교각 설치부를 통과할 때 통수면적의 감소로 유속이 다소 빨라지는 현상과 반하는 결과인데 이는 교각 직하류부에 설치되어 있는 횡단월류형 구조물에 의한 배수위 영향으로 접근유속이 감소되었기 때문으로 분석된다. 또한 횡단월류형 구조물 상단부(WCR: Weir Crest)에서는 최대유속에 대한 평균유속의 비가 1.15로 나타나 횡단월류형 구조물이 존재하는 구간에서 유속이 상당부분 빨라짐을 확인할 수 있었다. 그리고 난류 모형별 최고수위( $H_{max}$ )는 좌안(Left), 중앙(Channel), 우안



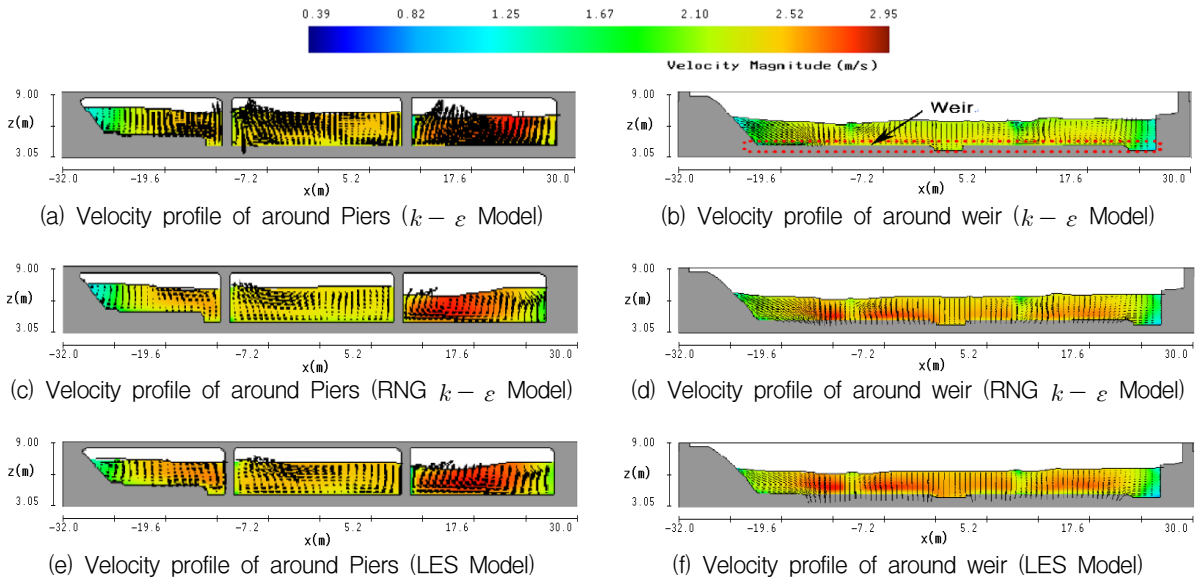


Fig. 5. Numerical Simulation Results on x-z Plane (Before)

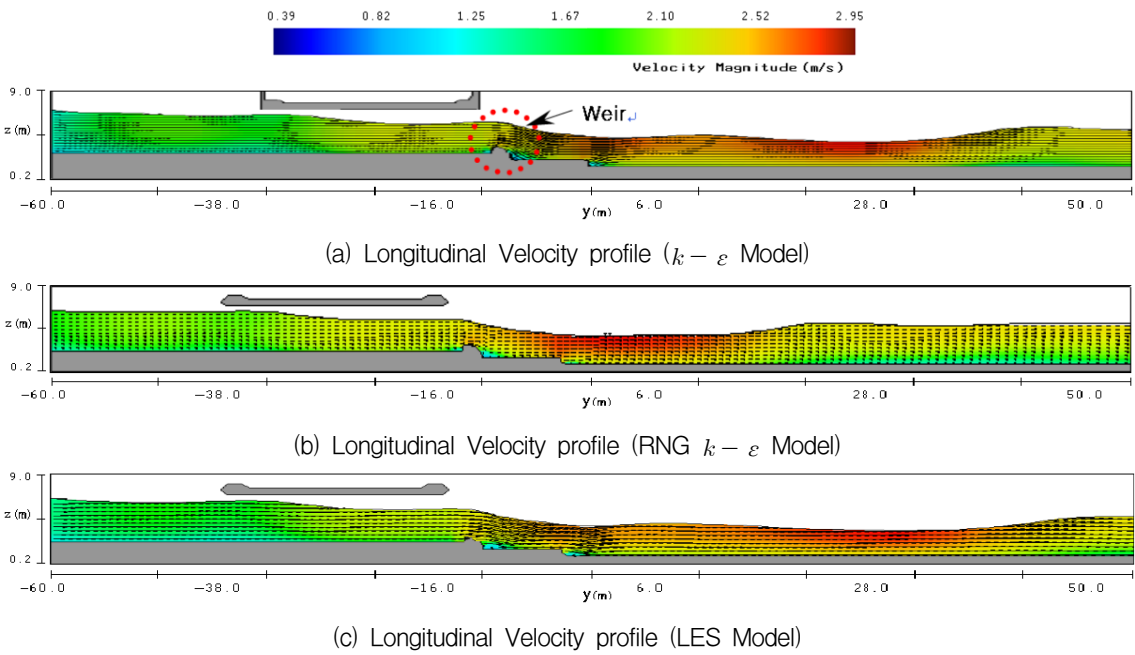


Fig. 6. Numerical Simulation Results on y-z Plane (Before)

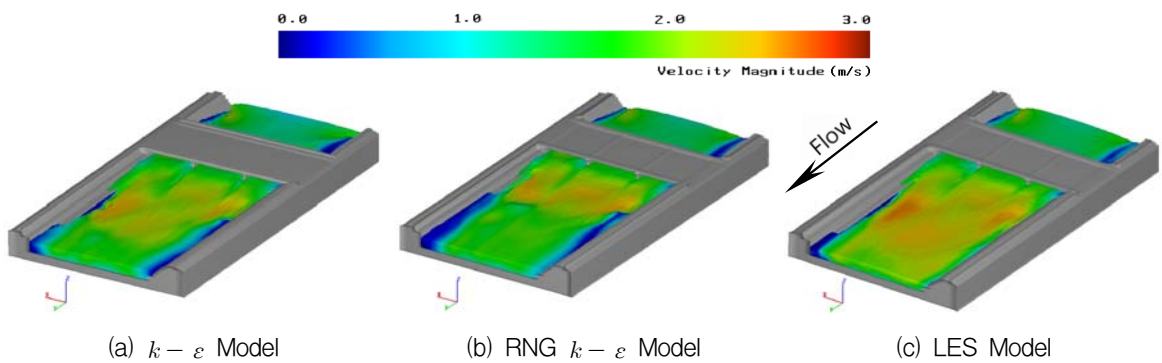


Fig. 7. 3-D Flow Profiles and Volume Velocities (Before), t=120sec

(Right)의 평균값을 취하여 분석한 결과 FOP에서 3.14 m로, BOP에서 2.94 m로, WCR에서 2.64 m로 나타나, 최고수위는 모두 좌안에서 발생하였다. 이는 좌안의 교량하부 불필요한 콘크리트 구조물에 의한 수위 상승의 영향으로 분석되며, 이로 인하여 통수능이 불규칙한 모습을 보이고 있다.

#### 4.2 횡단 월류형 구조물 철거 후

횡단 월류형 구조물 철거 후의 장월교 지점 교량 설치구간의 난류 모형별 수치모의 결과 교각전면부의 배수위 영향과 후면부에서의 후류 특성을 잘 표현해 주었다. 횡단 월류형 구조물의 설치 지점의 시간에 따른 수위 변화 양상은  $k-\epsilon$ 모형과 RNG  $k-\epsilon$ 모형, LES모형의 적용결과가 모두 비슷하게 계산되었다. LES모형의 경우 수위변화가 다소 크게 산정 되었다. 시간에 따른 난류에너지의 변화 또한 세 난류모형에서 비슷한 양상으로 계산되었다. 이는 전술한 바와 같이 RNG  $k-\epsilon$ 모형이  $k-\epsilon$ 모형에 기반하여 보완된 모형이기 때문으로 사료되며, LES모형의 경우 비등방성 잔여응력항에 대한 난류모의를 실시하지만 횡단월류형 구조물이 제거되어 흐름해석구간의 복잡한 난류유동장이 발생지 않았기 때문에 세 난류 모형의 계산결과가 비교적 일치하는 것으로 판단된다.

Fig. 8은 난류모형별 교각주위의 횡단 유속과 월류형 구조물주변의 횡단유속을 도시하였고, Fig. 9은 난류모형별 하천 종방향 유속분포이다. 효과적인 도시를 위하여 난류모형별 유속 Vector의 크기를 1/10로 왜곡하였으며, 컬러바는 y방향 유속의 크기이다. Fig. 10은 횡단

월류형 구조물의 제거시 난류모형별 3차원 체적유속분포를 나타내었으며, 전술한 바와 같이  $k-\epsilon$ 모형과 RNG  $k-\epsilon$ 모형은 LES모형에 비하여 교각 전면부에서 발생하는 회전류가 뚜렷하게 나타나지 않았으며, 횡단 월류형 구조물의 제거에 의한 흐름유속의 변화값이 다소 작게 계산되었다. 이는 LES모형의 비등방성 잔여응력항에 대한 고려에 기인한 것으로 판단된다. 따라서 교각주위에서와 같이 비등방성이 강한 흐름을 수치모의할 경우 LES난류 모형을 사용하는 것이  $k-\epsilon$ 모형과 RNG  $k-\epsilon$ 모형의 결과에 비하여 정확할 것으로 사료된다.

횡단월류형 구조물의 철거 후 교각에 의한 교량상류부 배수위를 산정한 결과 배수고는 난류모형별 평균 0.38 m로 나타났고, 철거 전 배수고(0.55 m)에 비하여 0.17 m정도 감소하는 것으로 나타나 교량 설치부 직하류 월류형 구조물에 의한 배수위 영향이 줄었음을 확인할 수 있다. 난류모형별 유속분포의 분석결과 철거 전과 마찬가지로 LES모형에서 가장 크게 발생하였으며, 최대유속에 대한 평균유속의 비는 FOP에서 1.14, BOP에서 1.16으로, WCR에서는 1.05로 계산되어, 횡단월류형 구조물의 철거 시 교각상류부에서는 유속이 8.77 % 증가하였고 구조물이 존재했던 구간에서는 유속이 9.52 % 감소함을 확인할 수 있었다. 또한 난류 모형별 최고수위의 분석결과 FOP에서 2.98 m, BOP에서 2.78 m, WCR에서 2.35 m로 계산되었다. 이는 횡단월류형 구조물의 철거 시, 철거 전에 비하여 평균 0.2 m 정도 수위가 저감되어 제방의 여유고를 확보할 수 있어 치수적으로 유리한 단면을 기대할 수 있다.

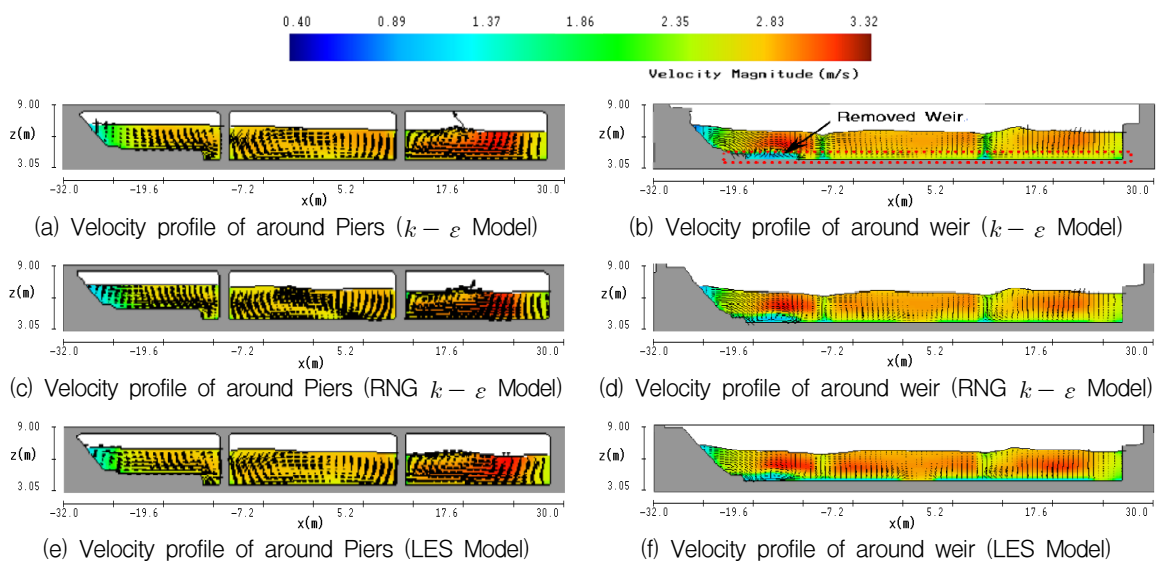


Fig. 8. x-z Plane Velocity profile around Pier and Weir (After)

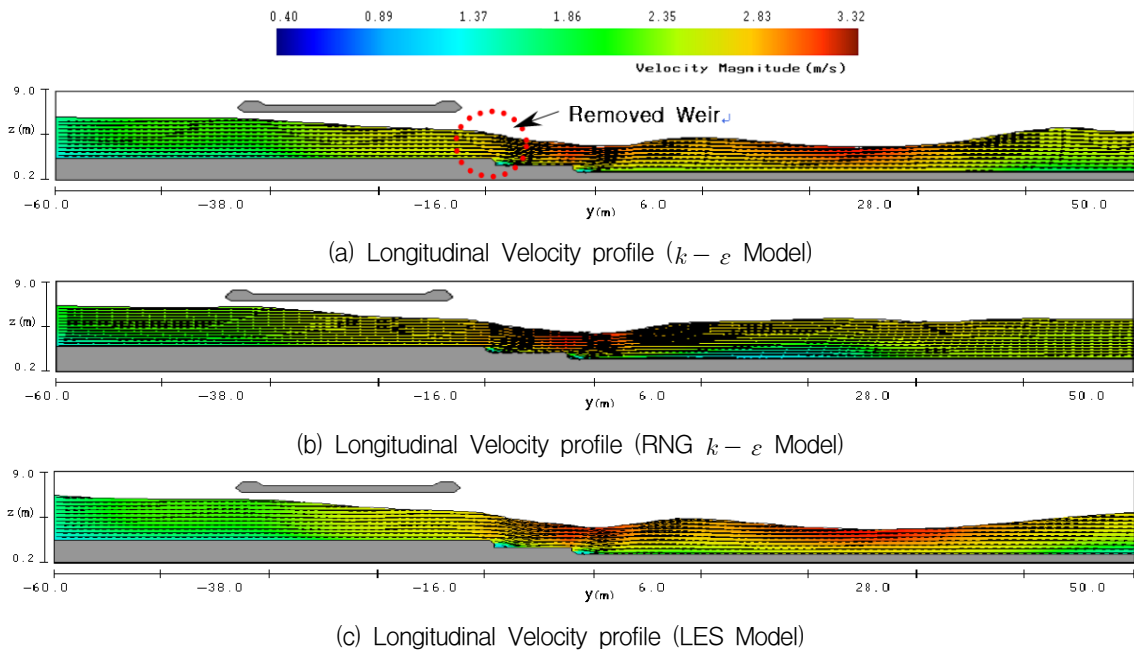


Fig. 9. y-z Plane profile of Longitudinal Velocity (After)

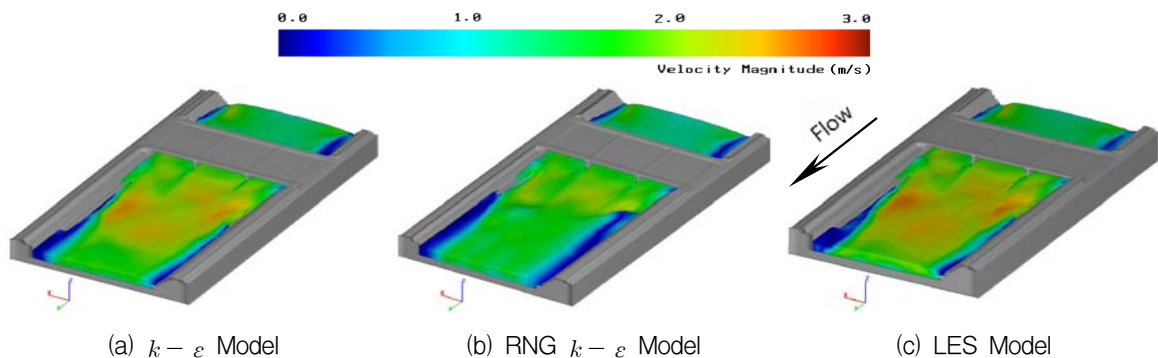


Fig. 10. 3-D Flow Profiles and Volume Velocities (After),  $t=120\text{sec}$

### 4.3 비교 및 고찰

#### 4.3.1 철거 전·후 유속 영향 검토

교량통과 부분인 교각 상·하부 사이의 유속은 교각의 두께만큼 하폭이 감소하여 유속은 빨라지고 수위가 하강하는 효과를 잘 모의하였다. Fig. 11은 난류모형별 교각 상류부(FOP)과 하류부(BOP), 월류형 구조물 상류부(WCR)에서의 무차원 수심( $y/y_0$ )에 대한 무차원 유속( $v/v_0$ )의 변화를 비교하여 나타내었으며, Table 6는 횡단월류형 구조물 철거 전·후의 유속분포 결과와 변화율이다. 횡단월류형 구조물 철거 전·후의 최대유속에 대한 평균유속의 변화가 난류모형별 평균  $-0.10 \sim 0.10$ 으로 계산되었으며, FOP와 WCR에서의 유속변화는 LES모형의 결과가 각각 0.141과  $-0.136$ 으로 가장 크게 발생하였고, BOP에서의 유속변화는 RNG  $k - \varepsilon$ 모형의 결과가 0.225로 가장 크게 발생하였다.

또한 횡단월류형 구조물 철거 후 FOP에서의 유속은 난류모형별 5.7~11.9 %, BOP에서의 유속은 8.9~19.2 % 빨라졌다. 하지만 구조물이 존재 하였던 위치인 WCR에서의 유속분포 분석결과  $k - \varepsilon$ 모형의 경우 9.4 %, RNG  $k - \varepsilon$ 모형의 경우 6.3 %, LES모형의 경우 13.0 %의 유속저감 효과가 있는 것으로 분석되었다. 이는 하도내에 설치되어있는 기능을 상실한 하천횡단 구조물(낙차공, 우수관 매설, 보, 소형댐 등)의 철거시 하천 상류부의 유속이 상당부분 빨라지므로 장기적인 토사의 퇴적과 수질악화 등의 문제를 해결 할 수 있을 것으로 사료되며, 도시하천의 갈수시 악취유발과 경관훼손 등의 문제를 아울러 해결할 수 있을 것으로 사료된다. 그렇지만 상류부의 빠른 유속에 의한 교각 및 저수호안 기초부 등 수공구조물에 대한 세굴의 영향은 보다 신중히 검토되어야 할 것으로 사료된다.

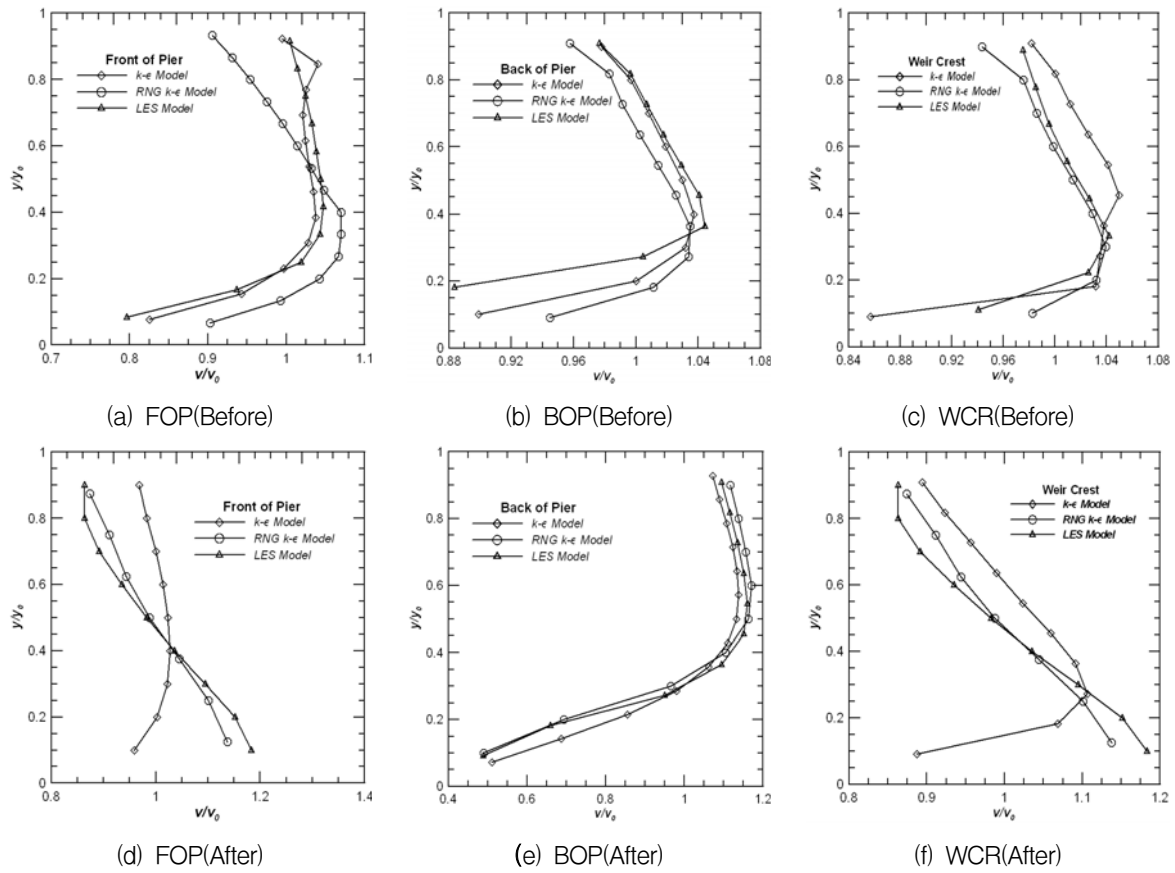


Fig. 11. Before and After Dimensionless Velocity Distribution at Removal of Weir

Table 6. Summary of Numerical Simulation Results (velocity)

Location	$k - \varepsilon$ model			RNG $k - \varepsilon$ model			LES model		
	Before	After	Changes (%)	Before	After	Changes (%)	Before	After	Changes (%)
	( $v/v_0$ )ma x	( $v/v_0$ )ma x		( $v/v_0$ )ma x	( $v/v_0$ )ma x		( $v/v_0$ )ma x	( $v/v_0$ )ma x	
FOP (Front of Pier)	1.050	1.107	5.7	1.039	1.137	8.6	1.042	1.183	11.9
BOP (Back of Pier)	1.037	1.138	8.9	0.945	1.170	19.2	1.044	1.161	10.1
WCR (Weir Crest)	1.138	1.040	-9.4	1.137	1.070	-6.3	1.183	1.047	-13.0

#### 4.3.2 철거 전·후 수위 영향 검토

하천에서 교량은 수로의 단면을 축소시켜 상류에 배수효과 즉, 수위상승을 일으키며, 또한 교량에 의한 흐름과 측벽간의 와류로 인한 에너지 손실을 유발하게 된다(Henderson, 1966). 만약 흐름이 사류라면 수심을 하류로 분산시키고 와류를 발생시키는 역할은 하나 상류로는 아무런 영향을 미치지 않는다. 그러나 대부분의 자연하천에서처럼 흐름이 상류이면 교각단면에서의 단면축소로 인해 상류방향으로는 M1(Mild slope, Type-1)형의 배수곡선을 그리게 되고 교각과 교각사이에서는 흐름이 가속되면서 수심이 저하되게 되며 하류부에서는

흐름의 단면이 회복되어 수심도 약간 증가하나 와류손실 등으로 완전한 회복은 되지 않는다. 교각에 의한 배수영향으로 인해 교각상류의 수면은 상당한 구간까지 상승하게 되어 홍수시에 범람의 위험을 초래할 경우가 있으므로 수면상승고와 유량 사이의 관계는 대단히 중요하다(윤용남, 2001). 광폭수로(Wide Rectangular Channel:  $b \gg y$ )에서의 점변류(Gradually Varied Flow)의 수면곡선은 점변류 기본방정식의 변형된 형태인 Eq. (20)과 같이 나타낼 수 있다.  $dy/dx$ 는 하천바닥을 기준으로한 수심의 변화율이며, 흐름방향으로 수심이 증가함을 의미하는  $dy/dx > 0$ 이고,  $y > y_0 > y_c$  일 때 M1형

의 배수위곡선(backwater curve)을 이룬다.

$$\frac{dy}{dx} = S_0 \frac{1 - \left(\frac{K_0}{K}\right)^2}{1 - \left(\frac{Z_c}{Z}\right)^2} = S_0 \frac{1 - \left(\frac{y_0}{y}\right)^{10/3}}{1 - \left(\frac{y_c}{y}\right)^3} \quad (20)$$

여기서,  $K_0$ 와  $K$ 는 각각 등류와 부등류가 흐를 때의 통수능이며,  $Z_c$ 와  $Z$ 는 수로내의 한계류에 대응하는 단면계수(section factor)와 개수로단면의 단면계수이다.  $y_0$ 는 등류수심,  $y_c$ 는 한계수심이며,  $y$ 는 점변류의 수심이다.

본 연구에서는 장일교 지점 교각 하류 횡단월류형 구조물의 철거에 따른 종단 수위 분포를 분석하였다. 흐름의 해석단면 전구간에 대한 자료 분석은 실질적으로 어려움이 있어 좌안과 중앙, 우안의 흐름특성을 대표할 수 있는 단면을 선정하여 분석하였다. Fig. 12는 횡단구조물 철거 전·후의 난류 모형별 교각 주위의 수

위변화이며, 좌안과 중앙, 우안 부분별 적용 난류모형에 따른 종단 25 m 구간의 수면형(Stream Line)을 나타내었다. 월류형 구조물의 철거전 교각 상류의 수위가 높아져 M1형의 수면형이 발생 하였으며, 평균 0.017~0.469 m의 배수고가 발생하였다. 또한 월류형 구조물의 철거 후에는 구간에 따라 최고 평균 0.038~1.38 m의 수위가 저감되는 것으로 나타났다. Table 7은 난류모형별 하천의 좌안과 중앙, 우안 부분에서의 횡단월류형 구조물의 철거 전·후의 지점별 최대 수위와 난류모형별 변화율을 비교하여 나타낸 것이며, 분석결과 월류형 구조물의 철거시 난류모형별 수위는  $k-\epsilon$ 모형의 경우 최고 33.3 %, RNG  $k-\epsilon$ 모형의 경우 25.7 %, LES모형의 경우 31.2 %의 수위가 저감되는 효과가 있는 것으로 나타났다. 이는 도시하천의 수질악화와 토사의 퇴적 경관훼손 등의 문제를 유발할 수 있는 기능을 상실한 보 및 횡단 월류형 구조물 철거에 따른 홍수시 수위저감 등의 치수안정적인 측면의 효과와 더불어 수질정화, 경관개선 등의 효과를 기대할 수 있을 것으로 사료된다.

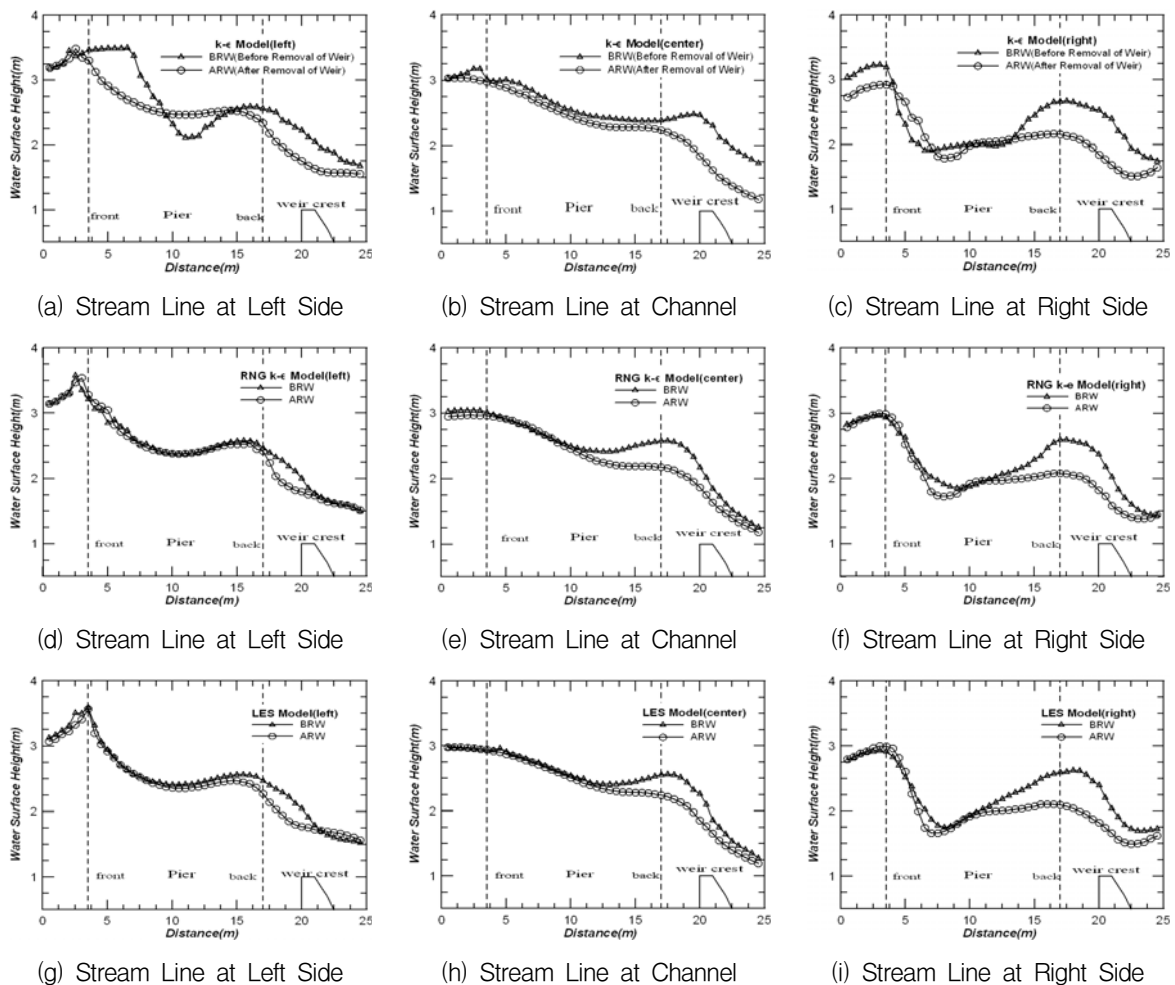


Fig. 12. Before and After Surface Height each Turbulence Model

Table 7. Summary of Numerical Simulation Results

Turbulence Models	Location	Left Side			Channel			Right Side		
		Before	After	Changes (%)	Before	After	Changes (%)	Before	After	Changes (%)
		H <sub>max</sub>	H <sub>max</sub>		H <sub>max</sub>	H <sub>max</sub>		H <sub>max</sub>	H <sub>max</sub>	
<i>k-ε</i>	FOP	3.467	3.486	0.5	3.180	3.034	-4.8	3.467	2.925	-18.5
	BOP	3.498	3.127	-11.9	3.008	2.950	-2.0	2.964	2.895	-2.4
	WCR	2.619	1.965	-33.3	2.486	2.112	-17.7	2.382	2.076	-14.7
RNG <i>k-ε</i>	FOP	3.578	3.542	3.0	3.047	2.969	-2.6	2.966	2.994	0.9
	BOP	3.068	3.162	-17.4	2.977	2.952	-0.8	2.844	2.938	3.2
	WCR	2.277	1.939	-0.5	2.520	2.069	-21.8	2.555	2.033	-25.7
LES	FOP	3.589	3.570	-0.5	2.965	2.982	0.6	2.936	3.000	2.1
	BOP	3.323	3.197	-3.9	2.964	2.921	-1.5	2.837	2.968	4.4
	WCR	2.292	1.946	-17.8	2.517	2.133	-18.0	2.621	1.997	-31.2

### 5. 결론

본 연구에서는 우이천 시험유역을 대상으로 하천의 물리적인 특성 변화에 따른 흐름해석의 수치모의를 수행하기 위하여 3차원 RANS를 지배방정식으로 하는 FLOW-3D를 이용하였고, 적용 난류모형별 수치모의 결과를 비교 하였다. 또한 하천 횡단 월류형 구조물의 철거에 따른 수리영향을 분석하였다. 본 연구의 결과를 정리하면 다음과 같다.

- 1) 하천의 하도형상과 구조물의 물리적인 특성변화를 고려하여 교각과 횡단 월류형 구조물의 영향을 받는 구간의 3차원 수치모의 결과 LES모형이 교각 전면부에서 발생하는 회전류를 뚜렷하게 모의하였고, 복잡한 난류유동장의 해석을 효과적으로 수행하였다. *k-ε*모형과 RNG *k-ε*모형의 경우 LES모형에 비하여 회전하는 흐름이 작게 나타났다. 이는 RNG *k-ε*모형의 등방성 난류 가정에 기인하는 것으로 판단된다.
- 2) *k-ε*, RNG *k-ε*모형에 의한 수치모의결과는 비교적 잘 일치하였다. 이는 근본적으로 RNG *k-ε*모형이 *k-ε*모형에 기반하여 보완된 모형이기 때문으로 사료된다. 또한 LES모형의 경우 위의 두 모형과 비슷한 결과를 나타내었지만 격자내부에서 계산된 평균흐름의 전체 운동에너지 변화가 평형 상태를 이루어 값이 안정화되는데 걸리는 시간이 길었고 유속과 수위 변화 양상이 크게 계산되었다. 이는 LES모형의 비등방성 잔여응력항에 대한 고려에 기인한 것으로 판단된다. 따라서 교각 및 횡단월류형 구조물 주위에서와 같이 비등방성이 강한 흐름을 수치모의할 경우 LES난류 모형을

사용하는 것이 *k-ε*모형과 RNG *k-ε*모형의 결과에 비하여 정확할 것으로 사료된다.

- 3) 횡단 월류형 구조물 철거시 상부 교각 주변에서의 유속이 5.7~11.9 %정도 빨라짐을 확인할 수 있었다. 하지만 구조물 제거 구간의 유속분포 분석결과 6.3~13.0 %의 유속 저감 효과가 있는 것으로 분석 되었다. 따라서 보 및 횡단 월류형 구조물 철거시 구조물 설치 상부의 수공구조물에 대한 세굴 등의 영향이 보다 신중히 검토되어야 할 것으로 사료된다.
- 4) 횡단 월류형 구조물의 철거전 구조물 주변의 홍수소통이 불규칙한 모습을 확인할 수 있었고 교각 상류 쪽의 수위가 높아져 M1형의 수면형이 발생 하였으며, 철거후 교각 설치부의 흐름이 원활해지고 배수위가 상당부분 저감되는 효과가 있었다. 좌안, 중앙, 우안부의 수위는 난류모형별 최고 25.7~33.3 %의 저감 효과가 있는 것으로 분석되었다. 이는 도시하천의 기능을 상실한 보 및 횡단 구조물을 철거함으로써 홍수시 수위저감과 통수능 확보 등의 치수안정적인 측면의 효과와 더불어 상류부 수질악화와 토사의 퇴적, 경관훼손 등의 문제를 해결할 수 있는 효과를 기대할만한 결과로 사료된다.

본 연구는 하도 내에 설치되어있는 교량 등의 수공 구조물에 의한 영향과 횡단 월류형 구조물 (낙차공, 우수관 매설, 보, 소형댐 등)의 설치나 철거 시 국부적인 수리영향 분석에의 활용이 가능하리라 사료된다. 아직 까지 수치모형의 신뢰도는 물리모형의 신뢰도에 비하여 상대적으로 낮은 수준이지만 수치 모형은 전 구간에 대하여 유속 및 압력분포를 구할 수 있고, 결과를 시각화

할 수 있으며, 막대한 시간과 비용을 줄일 수 있는 장점이 있다. FLOW-3D에 의한 3차원 수치해석 결과의 하천 적용 문제는 신중히 검토되어야 할 사항이며 보다 정확한 하도 측량자료의 확보와 수공구조물의 정교한 제원이 확보된다면 교각 및 낙차공 설치부, 수제공 설치부 등의 국부적인 하도구간 수리특성분석에 있어 보다 신뢰성 있는 결과의 도출이 가능하리라 사료된다.

## 감사의 글

본 논문의 두 번째 저자는 2005년도 원광대학교 교비지원을 받아 본 연구 성과에 기여하였으며, 연구비 지원에 감사를 드립니다.

## 참고 문헌

- 국립방재연구소 (2004). “기능을 상실한 보 철거를 통한 하천생태 통로 복원”, **방재연구지**, 제6권, 제3호, pp. 72~73.
- 김대근, 이재형, 서일원 (2004). “교각이 설치된 월류형 여수로에서의 흐름에 대한 수치모의”, **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제37권, 제5호, pp. 363~373.
- 김대근, 김용근 (2007). “3차원 수치모의를 이용한 광정 횡월류유어의 흐름특성 해석”, **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제40권, 제3호, pp. 277~286.
- 서울특별시 (2004). “우이천등 4개 하천 하천정비 기본 계획 보고서”, pp. 593.
- 서울특별시 (2007). “대학과 연계한 하천관리에 관한 연구용역 2단계 2차년 보고서”, pp. I-27.
- 양원준, 최성욱 (2002). “LES를 이용한 교각주위 국부 세굴의 3차원 수치모의”, **대한토목학회 논문집**, 대한토목학회, 제22권, 제4-B호, pp. 437~446.
- 윤병만, 고택조, 류권규, 전경수 (2007). “보 철거에 의한 하천의 물리적 변화 연구”, **한국수자원학회 학술발표회 논문집**, 한국수자원학회, pp. 1084~1088.
- 윤용남 (2001). 수리학 기초와 응용. 청문각, pp. 373~375.
- 이길성, 김지영 (2003). “FLOW-3D를 이용한 교각 주위 국부세굴의 3차원 수치모의”, **대한토목학회 학술발표회 논문집**, 대한토목학회, pp. 761~776.
- 이배성, 정소영, 정동국, 이상진 (2006). “보 철거 후 하도내 흐름특성 변화”, **한국수자원학회 학술발표회 논문집**, 한국수자원학회, pp. 1686~1690.
- Barber, M.E., and Perkins, D.F., (2002). “Evaluation stream restoration option after dam removal using HEC-RAS.” *Building Partnerships-2000 Joint Conference on Water Resource Engineering & Water Resource Planning & Management*, Section 86, Chapter 3.
- Evans, J.E., Levine, N.S., Roberts, S.J., and Gottgens, J.F., (2002). “Assessment using GIS and sediment routing of the proposed removal of Ballville Dam, Sandusky River, Ohio.”, *Journal of the American Water Resources Association*, Vol. 38, No.6, pp. 1549~1565.
- Flow Science, (2003). “FLOW-3D User’s Manual”, Los Alamos, NM, USA.
- Henderson, F.M., (1966). “Open Channel Flow”, Macmillan Company.
- Hirt, C.W., and Nichols, B.D., (1981). “Volume of Fluid(VOF) Method for Dynamics of Free Boundaries”, *J.Comp.Physics*, 39, 201.
- Ho, D.K.H, Boyes, K.M., and Donohoo, S.M., (2001). “Investigation of spillway behavior under increased maximum flood by computational fluid dynamics technique”, *14th Australasian Fluid Mechanics Conference*, Adelaide University, Adelaide, Australia.
- Lauder, B.E., and Spalding, D.B. (1974). “The numerical computation of turbulent flow.” *Computational Methods in Applied Mechanics*, Vol. 63, No. 3, pp. 537~566
- Olsen, N.R, and Kjellesving, H.M., (1998). “Three-dimensional numerical flow modeling for estimation of spillway capacity”, *Journal of Hydraulic Research*, IAHR, Vol. 36, No. 5, pp. 775~784.
- Savage, B.M., and Johnson, M.C., (2001). “Flow over ogee spillway : Physical and numerical model case study”, *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 127, No. 8, pp. 640~649.
- Smagorinsky, J. (1963). “General circulation experiments with the primitive equations: I. The basic equations”, *Monthly Weather Review*, Vol. 91, pp.2217~2226.
- Versteeg, H.K., and Malasekera, W., (1995). “An Introduction to Computational Fluid Dynamics; The Finite Volume Method, 3rd Edition”, *Longman Group Ltd.*, Edinburg, England.
- Yakhot, V., Orszag, S.A., Thangam, S., Gatski, T.B.,



and Speziale, C.G., (1992) "Development of turbulence models for shear flows by a double expansion technique", *Physics of Fluids*. Vol. 4

No. 7, pp. 1510~1520.

(논문번호:08-02/접수:2008.01.04/심사완료:2008.01.18)