

# 수심평균 혼합거리 난류 모형의 개발 및 와점성계수의 평가

최 승 용\* / 한 건 연\*\* / 황 재 홍\*\*\*

## Development of Depth-averaged Mixing Length Turbulence Model and Assessment of Eddy Viscosity

Choi, Seung Yong\* / Han, Kun Yeun\*\* / Hwang, Jae Hong\*\*\*

**요약** : 본 연구의 목적은 개수로에서 난류모의를 위한 2차원 모형을 개발하는데 있다. 연구모델은 Streamline Upwind / Petrov-Galerkin 유한요소법과 Boussinesq의 와점성이론을 기초로 하였는데, 수심적분을 취한 혼합거리 모형과 난류의 이방성과 국부평형의 조건을 적용하였다. 모형의 보정과 검증을 위해서 해석해와 관측자료를 활용하였다. 몇 가지 수치모의를 수행함으로써 난류모형의 민감도와 계산수행 능력을 확인할 수 있었다. 본 연구 모형은 자연하천에서의 모형 적용성 확인을 위해서 한강유역에 적용하였고 모의치는 실측자료와 비교하였다. 개발된 모형은 자연하천에서의 관측자료와 비교적 잘 일치하는 것으로 나타났다. 결론적으로 본 연구의 2차원 유한요소모형은 개수로에서의 난류모의에 기초한 흐름분포에 있어 신뢰할만한 결과를 제공하는 것으로 나타났다.

**핵심용어** : 유한요소모형, SU/PG 기법, Boussinesq 와점성이론, 혼합거리모형

**Abstract** : The objective of this study is to develop an accurate and robust two-dimensional finite element method for turbulence simulation in open channels. The model is based on Streamline Upwind/Petrov-Galerkin finite element method and Boussinesq's eddy viscosity theory. The method developed in the study is depth-averaged mixing length model which assumes anisotropic and local equilibrium state of turbulence. The model calibration and validation were performed by comparing with analytical solutions and observed data. Several numerical simulations were carried out, which examined the performance of the turbulence model for the purpose of sensitivity analysis. The uniform channels that appear horizontal flow and vertical flow were carried out. The model was also applied to the Han river was in for the applicability test. The results were compared with the observed data. The suggested model displayed reasonable flow distribution compare to the observed data in natural river flow. As a result of this study, the two-dimensional finite element model provides a reliable results for flow distribution based on the turbulence simulation in open channels.

**Keyword** : finite element model, SU/PG method, Boussinesq's eddy viscosity theory, mixing length model

### 1. 서 론

수자원의 지속적 확보를 위해서는 강우-유출, 댐 운영관리 등이 종합적으로 필요하나, 이중 가장 현실적이고 실제적인 것이 지표수자원관리이

다. 따라서 지표수자원의 효율적인 관리를 위해서는 하천의 흐름특성, 하상변동 양상, 오염물의 거동 등에 관한 물리적인 현상이 정확하게 규명될 수 있어야 한다. 국내에서도 한정된 지표수자원을 효율적으로 이용할 수 있는 국내 자체의 지표수

+ Corresponding author : kshanj@knu.ac.kr

\* 정회원 · 국립방재연구원 책임연구원 · Principal Researcher, National Disaster Management Institute. Seoul. 121-719, Korea  
E-mail : ecofriend@korea.kr

\*\* 정회원 · 교신저자 · 경북대학교 공과대학 건축 · 토목공학부 교수 · E-mail : kshanj@knu.ac.kr

\*\*\* 비회원 · 한국수자원공사 경남1지구건설단 · E-mail : hwang4004@kwater.or.kr

모델링 기술이 축적된다면 매년 반복적으로 겪고 있는 수자원의 수량 및 수질 문제에 있어서 공학적인 대안에 의한 해결이 가능하게 될 것으로 판단된다.

현재 국내에서는 측량자료 이용과 모형적용의 용이성을 이유로 1차원 점변부정류 해석프로그램인 HEC-RAS 모형을 많이 사용하고 있으며 대부분의 하천정비기본계획수립에 있어서도 1차원 해석모형을 적용하고 있는 실정이다. 하지만 지류합류지점, 교량, 보 등의 다양한 수공구조물이 존재하는 경우 또는 하도형상의 변화에 따른 국부적인 흐름의 변화양상의 해석, 2차원 수질오염 해석 및 하상변동해석과의 연계 등 보다 정교한 흐름해석 결과에 대한 공학적 필요성을 위해서 2차원 모형의 적용이 필요하게 되었다.

개수로의 동역학적 흐름해석에서 난류에 대한 고려에서 King과 Norton (1978)은 Boussinesq 가정에 근거하여 2차원 유한요소모형인 RMA-2 모형에 대하여 난류해석기법을 적용하였으며, Violeau 등(2002)은  $k-\omega$  등의 난류모형을 하구부 조건에 적용하여 각 모형의 매개변수 추정의 중요성을 연구하였다. Olsen(2003)은  $k-\epsilon$  모형을 이용하여 난류를 해석하고 난류확산에 의한 부유사의 이동을 모의하는 수치모형을 개발하여 다른 물리모형과 비교하였다. 그 결과  $k-\epsilon$  모형을 이용한 유사 이동모형이 수로의 만곡에 따른 여러 특성들을 잘 모사한다는 결론을 도출하였다. Rameshwaran와 Naden(2003) 역시  $k-\epsilon$  모형을 이용하여 복단면 수로에서의 정상류 흐름을 계산하였다. 모의결과 저수로와 고수부 모두에서 주 흐름의 분포 하상 전단력 등이 신뢰할수 있을 수준으로 계산되었다. Ewertowski(2006)는 King과 Norton(1978)이 개발한 Smagorinski 모형과 Peclet Number를 이용하여 와점성계수의 자동할당기법의 효율성에 대한 검토를 수행하였다. Vazquez-Cendon과 Cea 등(2007)은 수공구조물 주변에서의 흐름해석을 위한 난류 모형을 개발하고 이에 대한 적용성을 검증하였고 Cea 등(2007)은 Mixing Length 모형,  $k-\epsilon$  모형, ASM(algebraic stress model)과 2차원

shallow water 모형을 결합하고 Puertas 등(2004)의 실험자료와 비교를 통하여 평가하였다.

국내에서의 난류해석에 대한 수치해석기법에 대한 연구로는 최홍식(1997)이 난류모형을 이용한 개수로 급축소부 흐름에 대하여 수치해석을 수행하였으며, 정영훈 등(2004)은 저 레이놀즈 수 개수로에 대하여 난류흐름의 직접수치모의를 수행하였다. 또한 강형식과 김규호(2009)는  $k-\epsilon$  난류모형을 이용하여 식생수로 흐름에 대하여 수치모의를 수행하였다.

본 연구에서는 2차원 수심평균 유한요소모형에서 수심평균 난류해석모형을 개발하였다. 이를 위해 다양한 난류해석기법에 대하여 검토하고 개발된 SU/PG 유한요소모형에 적합한 난류해석모형을 검토 하였다. 검토결과 본 연구에서는 Boussinesq 가정에 근거하여 다른 난류해석모형에 비하여 비교적 쉽게 표현되며 계산의 효율성이 높은 수심평균 혼합거리 모형을 개발하고자 하였으며, 와점성계수의 자동계산 기법의 경우에 격자 크기와 시간간격, 즉 Courant 수에 민감하게 작용하므로 모형의 범용성을 위하여 난류응력에 대한 항이 지배방정식에 바로 도입되도록 모형을 개발하고 이를 인공하도 및 자연하천에 적용하여 다양한 흐름에 대하여 적절한 와점성계수의 값을 제안하였다.

## 2. 모형의 이론

### 2.1 수심평균 혼합거리 난류모형

난류 모델은 기본적으로 난류 전단 응력과 유동 특성간의 선형 함수 관계를 가정한 Boussinesq 가정에 기반을 두고 있다. 여기에는 와점성계수(Eddy viscosity)가 매우 중요하다. 흐름에서 난류응력 또는 Reynolds 응력을 모의하기 위한 가장 오래된 방법이 Boussinesq의 와점성 이론이며 현재 대부분의 실제적인 난류모형의 이용에 있어서 상당한 중요한 부분을 차지하고 있다. 와점성 모델의 단점은 해석하려는 문제에 따라 적합한 난류 모델이 사용되지 않는다면, 그 결

과가 실제와 큰 차이를 보일 수 있다는 것이다. 그러나 Boussinesq 가정이 가지는 명쾌함과 단순성 그리고 많은 실제 유동 문제에 대해 비교적 성공적인 예측 결과를 보여 왔다는 점으로 인해 중요하게 여겨진다. 또한 와점성 모형은 난류 전단 응력의 계산에 다른 모형에 비해 상대적으로 계산 비용이 적게 든다는 장점을 가지고 있다.

수심평균 혼합거리 모형(Mixing Length Model)은 다른 난류해석모형에 비하여 비교적 쉽게 표현된다. 이 방법의 기본적인 가정은 난류에 대하여 등방성이고 지역적으로 평형을 이룬다는 것이다. 흐름이 난류일 경우 운동량 방정식에서는 유동항의 시간 평균의 결과로 Reynolds 전단력이 나타나게 되며, 와점성계수는 수평 방향 평균유속 비와 하상 마찰에 의하여 다음과 같이 표현된다.

$$\nu = l_s \sqrt{2S_{ij}S_{ij} + \left(2.34 \frac{u_f}{\kappa h}\right)^2} \quad (1)$$

$$l_s = \min(0.267\kappa h, \kappa d_{wall}) \quad (2)$$

여기서  $\nu$ 는 와점성계수,  $h$ 는 수심,  $\kappa$ 는 von Kármán 상수( $\kappa=0.41$ ),  $u_f$ 는 하상 마찰 속도,  $l_s$ 는 가장 가까운 벽과의 거리,  $S_{ij}$ =변형률 벡터를 나타내고 있다.  $S_{ij}$ 를 다시 나타내면 식 (3)과 같다.

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (3)$$

여기서  $u_i$ 는 공간의 한 지점에서  $x_i$ 좌표 방향에 대한 시간평균 흐름속도를 나타낸다.

## 2.2 기본 방정식

본 모형의 기본이 되는 2차원 천수 방정식에 대하여 난류항을 포함한 Navier-Stokes 방정식에서 3차원 Reynolds 방정식을 수심에 대해 적분하고, 하상과 자유수면에 의해 만들어지는 질량 및 운동량 보존 원리를 적용함으로써 구할 수 있

는데, 수심평균 혼합거리 이론을 적용하여 와점성계수의 영향을 고려한 모형의 지배방정식은 식 (4)~(6)과 같다.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial y} + i = 0 \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{p^2}{h} + \frac{gh^2}{2} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial z_o}{\partial x} \\ + gn^2 \frac{p(p^2 + q^2)^{\frac{1}{2}}}{h^{7/3}} - \frac{p}{h} \left( \frac{i}{2} \right) - \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{h}{\rho} \tau_{xx} \right) \\ - \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{h}{\rho} \tau_{xy} \right) = 0 \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{q^2}{h} + \frac{gh^2}{2} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial z_o}{\partial y} \\ + gn^2 \frac{p(p^2 + q^2)^{\frac{1}{2}}}{h^{7/3}} - \frac{q}{h} \left( \frac{i}{2} \right) - \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{h}{\rho} \tau_{yx} \right) \\ - \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{h}{\rho} \tau_{yy} \right) = 0 \end{aligned} \quad (6)$$

여기에서  $h$ 는 흐름 수심을 나타내고  $p = uh$ ,  $q = vh$ 로  $u, v$ 는  $x, y$ 방향으로의 유속을 나타낸다.  $z_o$ 는 바닥 경사를  $i$ 는 침투능,  $g$ 는 중력 가속도 성분을 나타내며  $\rho$ 는 밀도를 나타낸다.

식 (4)~(6)에서 포함된 전단응력항은 Boussinesq의 가정에 의하여 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \tau_{xx} &= \rho \widehat{\nu}_{xx} \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial x} \right), \\ \tau_{xy} &= \tau_{yx} = \rho \widehat{\nu}_{xy} \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right), \\ \tau_{yy} &= \rho \widehat{\nu}_{yy} \left( \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \end{aligned} \quad (7)$$

여기서  $\widehat{\nu}_{xx}$ ,  $\widehat{\nu}_{xy}$ ,  $\widehat{\nu}_{yx}$ ,  $\widehat{\nu}_{yy}$ 는 2차원 평면상의 와점성계수를 나타내고 있다.

식 (4)~(6)에 식 (7)를 대입하여 다시 쓰면,

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial y} + i = 0 \quad (8)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{p^2}{h} + \frac{gh^2}{2} - \widehat{\nu}_{xx} h \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial x} \right) \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{pq}{h} - \widehat{\nu}_{xy} h \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right) + gh \frac{\partial z_0}{\partial x} \\ & + gn^2 \frac{p(p^2 + q^2)^{\frac{1}{2}}}{h^{7/3}} - \frac{p}{h} \left( \frac{i}{2} \right) - \frac{\partial}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial y} = 0 \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{q^2}{h} + \frac{gh^2}{2} - \widehat{\nu}_{yy} h \left( \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{pq}{h} - \widehat{\nu}_{yx} h \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right) + gh \frac{\partial z_0}{\partial y} \\ & + gn^2 \frac{p(p^2 + q^2)^{\frac{1}{2}}}{h^{7/3}} - \frac{q}{h} \left( \frac{i}{2} \right) = 0 \end{aligned} \quad (10)$$

위의 식을 Matrix 형태로 나타내면,

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial x} + \frac{\partial G}{\partial y} + D = 0 \quad (11)$$

여기에서  $U, F, G, D$  행렬을 다음과 같다.

$$\begin{aligned} U &= \begin{pmatrix} h \\ p \\ q \end{pmatrix}, \\ F &= \begin{pmatrix} p \\ \frac{p^2}{h} + \frac{gh^2}{2} - \widehat{\nu}_{xx} h \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial x} \right) \\ \frac{pq}{h} - \widehat{\nu}_{yx} h \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \end{pmatrix}, \\ G &= \begin{pmatrix} q \\ \frac{pq}{h} - \widehat{\nu}_{xy} h \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \\ \frac{q^2}{h} + \frac{gh^2}{2} - \widehat{\nu}_{yy} h \left( \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \end{pmatrix}, \\ D &= \begin{pmatrix} i \\ gh \frac{\partial z_0}{\partial x} + gn^2 \frac{p(p^2 + q^2)^{1/2}}{h^{7/3}} \\ gh \frac{\partial z_0}{\partial y} + gn^2 \frac{q(p^2 + q^2)^{1/2}}{h^{7/3}} \end{pmatrix} \end{aligned}$$

식 (11)에 미분 연쇄 법칙을 적용하면 아래와 같이 정리될 수 있다.

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial U} \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial G}{\partial U} \frac{\partial U}{\partial y} + D = 0 \quad (12)$$

혹은,

$$\frac{\partial U}{\partial t} + A \frac{\partial U}{\partial x} + B \frac{\partial U}{\partial y} + D = 0 \quad (13)$$

여기에서 이송 행렬을 정리하면 아래와 같다.

$$\begin{aligned} A = \frac{\partial F}{\partial U} &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -\frac{p^2}{h^2} + gh - \widehat{\nu}_{xx} \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial x} \right) \frac{2p}{h} & 0 \\ -\frac{pq}{h^2} - \widehat{\nu}_{yx} \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) & \frac{q}{h} \frac{p}{h} \end{bmatrix} \\ B = \frac{\partial G}{\partial U} &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ -\frac{pq}{h^2} - \widehat{\nu}_{xy} \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) & \frac{q}{h} \frac{p}{h} \\ -\frac{q^2}{h^2} + gh - \widehat{\nu}_{yy} \left( \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) & 0 & \frac{2q}{h} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (14)$$

공간가중함수  $N_i$ 를 적용하지 않고 SU/PG 기법에 의한 상향가중함수가 적용된 가중잔차식은 식 (15)와 같이 나타나며, 식 (15)를 정리하면 식 (16)과 같이 표현할 수 있다.

$$\int_{\Omega} W^T \left( \frac{\partial \hat{U}}{\partial \tau} - \frac{\partial x}{\partial \tau} \frac{\partial \hat{U}}{\partial x} - \frac{\partial y}{\partial \tau} \frac{\partial \hat{U}}{\partial y} \right) d\Omega = 0 \quad (15)$$

$$\int_{\Omega} W^T \left( \frac{\partial \hat{U}}{\partial \tau} + A_* \frac{\partial \hat{U}}{\partial x} + B_* \frac{\partial \hat{U}}{\partial y} + D \right) d\Omega = 0 \quad (16)$$

여기서,  $W^T$ 는 상향가중함수이고,  $A_* = A - IW_x$ ,  $B_* = B - IW_y$ 이며,  $W_x = \frac{\partial x}{\partial \tau}$ ,  $W_y = \frac{\partial y}{\partial \tau}$ ,  $I$ 는 단위행렬이다.

SU/PG 기법의 적용을 위한 연속 방정식과 운동량방정식을  $E_1, E_2, E_3$ 로 정리하면 식 (17)~(19)과 같다.

$$E_1 = \frac{\partial h}{\partial t} - W_x \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial p}{\partial x} - W_y \frac{\partial h}{\partial y} + \frac{\partial q}{\partial y} + i \quad (17)$$

$$E_2 = \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial h}{\partial x} \left( -\frac{p^2}{h^2} + gh - \widehat{\nu}_{xx} \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial x} \right) \right) \quad (18)$$

$$+ \frac{\partial p}{\partial x} \left( \frac{2p}{h} - W_x \right) + \frac{\partial h}{\partial y} \left( \frac{pq}{h} - \widehat{\nu}_{xy} \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right)$$

$$+ \frac{\partial p}{\partial y} \left( \frac{q}{h} - W_y \right) + \frac{\partial q}{\partial y} \left( \frac{p}{h} \right) + gh \frac{\partial z_0}{\partial x}$$

$$+ gn^2 \frac{p(p^2 + q^2)^{\frac{1}{2}}}{h^{7/3}} - \frac{p}{h} \left( \frac{i}{2} \right)$$

$$E_3 = \frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial h}{\partial x} \left( -\frac{pq}{h^2} - \widehat{\nu}_{yx} \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right) \quad (19)$$

$$+ \frac{\partial p}{\partial x} \left( \frac{q}{h} - W_x \right) + \frac{\partial q}{\partial x} \left( \frac{p}{h} - W_x \right)$$

$$+ \frac{\partial h}{\partial y} \left( \frac{q^2}{h} + gh - \widehat{\nu}_{yy} \left( \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \right)$$

$$+ \frac{\partial q}{\partial y} \left( \frac{2q}{h} - W_y \right) + gh \frac{\partial z_0}{\partial y}$$

$$+ gn^2 \frac{q(p^2 + q^2)^{\frac{1}{2}}}{h^{7/3}} - \frac{q}{h} \left( \frac{i}{2} \right)$$

위와 같이 나타난 비선형 방정식의 경우 Newton-Raphson 기법으로 연립 방정식의 해를 풀 수 있다. 이는 매트릭스를 연산함으로써 선형 또는 2차 삼각형, 사각형 요소에 대한 해를 구할 수 있다. 구성된 계수 매트릭스는 전 해석 영역에 대해서 전체 매트릭스를 구성하게 되며, 적절한 경계 조건에 대해 허용오차 범위 내에 들 때까지 계산이 수행되고 완료된다.

### 3. 실험하도에 대한 모형의 검증

#### 3.1 내부 경계가 존재하는 실험하도

외부 경계의 불규칙에 대한 개발 모형의 적용

표 1. 실험수로 모의 조건

	D (m)	B/L (m/m)	S <sub>0</sub> (10 <sup>-4</sup> )	n	요소수	절점수	상류단	하류단
							유량(m <sup>3</sup> /s)	수위(m)
Case1	0.22	2/4	6.25	0.012	1,976	2,068	0.248	0.185
Case2			2.80				0.149	0.173

성과 와점성계수가 수치모형에 미치는 영향을 검토하였다. 본 연구에서는 내부경계가 존재하는 혼합 요소망을 구축하고 이에 대한 검증은 수행하였다. Yulistiyanto 등(1998)은 원형의 내부경계가 존재하는 실험하도를 구축하고 수치모의를 수행한 바 있다. 본 연구에서도 Yulistiyanto 등(1998)이 수행한 모의조건과 동일하게 모형을 수행하고 실험치와 검증하고자 한다. 인공하도의 폭은 2m, 길이는 4m이며, 내부경계는 0.22m의 원형의 형상이 존재한다. 조도계수는 0.012의 값을 적용하였으며, 경계조건으로는 상류단은 유량 경계조건을 적용하였으며, 하류단은 수위 경계조건을 적용하였다. 요소의 수는 1,976개, 절점의 수는 2,068개에 대하여 20개의 삼각형 요소와 1,956개의 사각형 요소로 구성된 혼합 요소망을 구축하였다. 계산시간은 Yulistiyanto 등(1998)의 적용과 동일한 4.2sec와 4.4sec에 대하여 경계조건을 변화시켜 2가지 경우에 대하여 모의를 수행하였으며, 적용 요소망을 그림 1에 나타내었고 모의조건은 표 1과 같다.

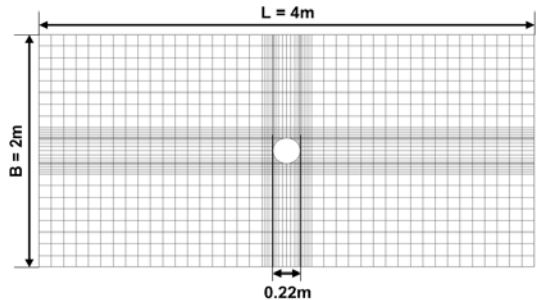


그림 1. 격자망의 구성  
(내부경계를 가지는 실험수로)

모의 결과의 수렴성과 최종 계산결과의 정확도를 확인하기 위하여, 다음과 같은 세 가지의 기준을 사용하였다. 일반적으로 오차  $e$ 는 근사치  $\psi$ 와 정확치  $\hat{\psi}$ 의 차이( $e_{i,j} = \psi_{i,j} - \hat{\psi}_{i,j}$ )로 표현된다. 그러나  $(i, j)$ 지점에서의 오차정의는 전 구간에서의 오차 측정에 적절하지 않으며, 좀 더 일반적인 오차 측정방법이 필요하다. 따라서 다양한 오차 평균(norm)이 오차를 측정하기 위하여 도입된다. 특히 식 (20)과 같은  $L_p$  norm은 이러한 오차측정의 가장 일반적인 표현법이다.

$$\|e\|_p = \left( \sum_{i=1}^m |e_{i,j}|^p \right)^{1/p} \quad p \geq 1 \quad (20)$$

여기서,  $m$ 은 자료수를 의미한다. 실제적인 적용에서, 오차 평균은 관심 있는 특정 물성치의 양에 초점을 맞추어 적절히 선택되어야 한다. 결과적으로 다양한  $p$ 를 사용하여 오차의 지역성에 초점을 두고 계산결과의 최대오차를 강조하거나 전체 구간에서 오차의 대표성에 초점을 두고 오차의 평균값을 더 강조할 수 있다.

①  $L_1$  error (절대값평균 오차)

이 방법은 식 (21)과 같이 계산 영역 내에서 오차의 평균을 의미한다.

$$\|e\|_{L_1} = \frac{1}{m} \left( \frac{1}{\psi_{\max}} \sum_{i=1}^m |e_{i,j}| \right) \quad (21)$$

이 방법은 다음에 소개될  $L_2$ 오차의 대안으로 사용될 수 있으나,  $L_2$ 오차 측정이 더 일반적인 방법이다.

②  $L_2$  error (제곱평균제곱근 오차)

이 방법은 전체 오차를 측정하는 기본적인 오차평균이다. 계산 전 영역에서 오차의 제곱을 평균함으로써 오차를 측정하는 방법으로 식 (22)와 같다.

$$\|e\|_{L_2} = \left[ \frac{1}{m} \left( \frac{1}{\psi_{\max}^2} \sum_{i=1}^m |e_{i,j}|^2 \right) \right]^{1/2} \quad (22)$$

여기서  $\psi_{\max}$ 는  $\psi_i$ 값을 정규화하기 위한  $\psi_i$ 의 최대값이다.

③  $L_\infty$  error (최대 오차)

이 방법은 계산 영역 내에서 발생하는 최대오차에 초점을 맞추는 경우 유용한 방법으로 식 (23)와 같이 정의되며, 수치해석과정에서 국부적인 오차가 중요할 경우 사용되어지는 방법 이다.

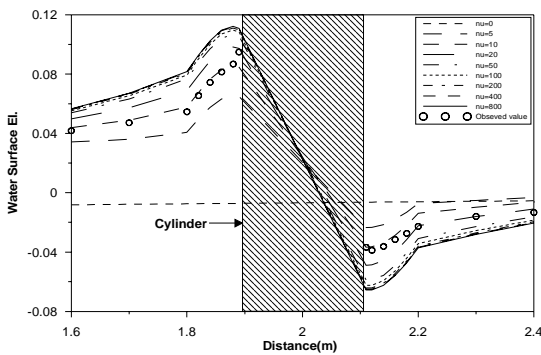
$$\|e\|_{L_\infty} = \frac{1}{\psi_{\max}} \max |e_{i,j}| \quad (23)$$

내부 경계가 존재하는 실험하도에 대하여 0~800m<sup>2</sup>/sec 사이 값의 와점성계수를 적용하여 와점성계수의 크기에 따른 수위에 대한 영향을 검토한 결과와 Yulstiyanto 등(1998)의 실험 결과를 그림 2와 같이 도시하였으며, 그림에서 나타난 결과와 같이 와점성계수의 크기가 커질수록 내부 경계가 나타나기 전까지의 단면에서 수위가 증가하는 경향을 나타내었으며, 내부 경계가 나타나는 단면이후에는 와점성계수 값이 증가할수록 수위가 감소하는 경향이 나타났다. 또한 난류를 고려하지 않은 경우에는 내부경계의 영향이 거의 나타나지 않았으며, 와점성계수가 200m<sup>2</sup>/sec 이상인 경우 와점성계수의 변화에 따른 수위의 증가가 거의 없는 것으로 관찰되었다.

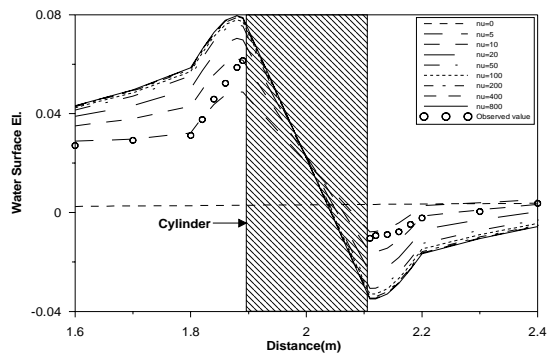
수위에 대한 수치모의 결과에 대하여 Yulstiyanto 등(1998)의 실험 결과와 비교한 결과, Case 1의 경우는 내부 경계와 접촉되는 지점에 대해서는 20m<sup>2</sup>/sec의 값을 적용한 경우 가장 가깝게 나타났으며, 전체적인 경향에 대해서는 10m<sup>2</sup>/sec의 값을 적용한 것이 적절한 것으로 확인할 수 있다. Case 2의 경우는 내부 경계와 접촉되는 지점에 대해서는 10m<sup>2</sup>/sec의 값을 적용한 경우 가장 가깝게 나타났으며, 전체적인 경향에 대해서는 5

$m^2/sec$ 의 값을 적용한 것이 적절한 것으로 확인 할 수 있다. 이러한 모의 결과에 대하여 도시한 결과만으로 판단한다는 것은 매우 어려운 일이며, 오차의 정량적인 분석을 통해서 대상 하도에 대한 적절한 값을 도출할 수 있다고 판단된다. 이에 본 연구에서는 Yulistiyanto 등(1998)의 실험치와 본 연구개발모형의 수치모의 값에 대하여 정량적인 오차분석을 통하여 대상유역에 적절한 계수를 도출하고자 수위에 대한 오차분석 결과를 표 2~표

3에 나타내었다. Case1의 오차분석결과  $L_1error$ 를 제외하고 다른 오차분석기법의 적용에서  $10 m^2/sec$ 의 와점성계수의 적용이 가장 우수하게 나타났으며, Case2의 오차분석결과 모든 오차분석기법의 적용에서  $5m^2/sec$ 의 와점성계수의 적용이 가장 우수하게 나타났으며 내부경계가 존재하는 대상 하도에 대한 와점성계수의 적용은  $5 m^2/sec \sim 20m^2/sec$  사이의 값을 적용하는 것이 타당하다고 판단된다.



(a) Case1



(b) Case2

그림 2. 내부경계가 존재하는 수로에 대한 수치모의결과

표 2. Case1 오차 분석결과

Eddy Viscosity	$L_1 error$	$L_2 error$	$L_{\infty} error$	meanerror
0	4.999E-02	2.674E-01	3.795E-01	5.235E-04
5	2.380E-03	5.715E-02	1.400E-01	4.030E-05
10	3.216E-03	1.658E-02	7.890E-02	3.469E-06
20	5.498E-03	4.537E-02	1.672E-01	1.507E-05
50	3.406E-03	6.203E-02	2.047E-01	4.747E-05
100	2.868E-03	7.139E-02	2.284E-01	6.429E-05
200	3.428E-03	1.003E-01	3.162E-01	7.368E-05
400	2.496E-03	7.981E-02	2.499E-01	7.860E-05
800	2.401E-03	8.015E-02	2.505E-01	8.105E-05
1000	3.140E-03	1.056E-01	3.295E-01	8.164E-05
2000	2.385E-03	8.182E-02	2.553E-01	8.260E-05
4000	2.339E-03	8.117E-02	2.529E-01	8.313E-05

표 3. Case2 오차 분석결과

Eddy Viscosity	$L_1$ error	$L_2$ error	$L_\infty$ error	meanerror
0	4.054E-02	1.955E-01	2.206E-01	1.473E-04
5	1.443E-04	2.432E-02	6.305E-02	3.684E-06
10	4.948E-03	3.375E-02	1.532E-01	7.237E-06
20	7.560E-03	8.292E-02	3.187E-01	2.650E-05
50	5.245E-03	9.077E-02	3.181E-01	5.130E-05
100	4.761E-03	9.914E-02	3.381E-01	6.245E-05
200	5.809E-03	1.332E-01	4.490E-01	6.842E-05
400	4.454E-03	1.072E-01	3.592E-01	7.148E-05
800	4.359E-03	1.072E-01	3.584E-01	7.304E-05
1000	5.569E-03	1.380E-01	4.611E-01	7.335E-05
2000	4.353E-03	1.090E-01	3.636E-01	7.397E-05
4000	4.309E-03	1.082E-01	3.606E-01	7.432E-05

### 3.2 지류유입이 있는 수로

지류유입이 있는 수로에서의 흐름은 하천 및 환경수리학에서 상당히 중요하게 고려되고 있다. 지류유입지점에서의 흐름에 대한 동수역학은 지형이 단순할지라도 매우 복잡한 형태를 나타내기 때문에 수리실험과 수치모형의 검증에 대해 많이 적용되고 있고 본 연구에서도 개발된 모형의 정확성에 대한 검증을 위해 그림 3과 같은 형태의 수로를 구성하여 적용하였다.

본류와 지류에 대한 수로의 폭은 0.914m이고 본류는 합류부로부터 상류로 10.973m의 길이를 가지고 지류는 9.144m의 길이를 가지며, 합류부로부터 하류로 6.401m를 가진다. 그림 3은 본 연구에서 이용되는 수평면에 대한 유한요소망을 나타내며 경사가 없는 평면하도에서 1,161개의 절점과 352개의 요소로 구성하였다. 모의는 표 4와 같이 두 가지의 경우에 대해서 수행되었는데 표에서  $Q_m$ 은 본류에 대한 유량,  $Q_b$ 는 지류에 대한 유량, H는 하류단에서의 수위,  $q^*$ 는 총 유량에 대한

본류 유량의 비( $Q_m/Q$ )를 나타낸다. 모형의 검증을 위한 비교는 Shumate(1998)의 실험자료를 기초로 해서 수위에 대해서 이루어졌으며 실험결과는 그림 4와 같다.

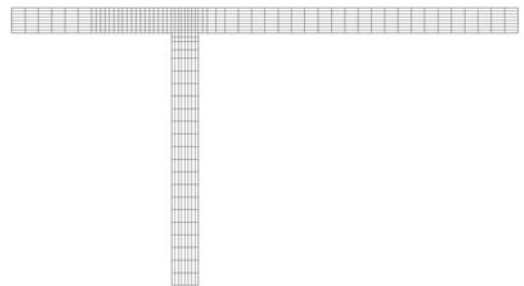


그림 3. 격자의 구성(지류 유입이 있는 수로)

표 4. 지류가 있는 수로의 흐름 조건

	$Q_m (m^3/s)$	$Q_b (m^3/s)$	H(m)	$q^*$
Case 1	0.127	0.043	0.3100	0.75
Case 2	0.043	0.127	0.3054	0.25



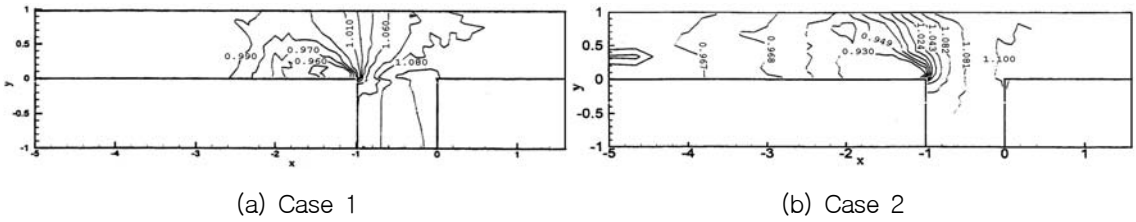


그림 4. Shumate 실험결과

와점성계수 값에 따른 모의결과 파악하기 위해 앞선 모의에서와 동일하게 12가지의 와점성계수에 대해 모의를 수행하였다. 이들 모의 결과를 Shumate(1998)의 실험결과와 비교한 결과, Case 1의 경우에는 와점성계수의 값이  $10m^2/sec$ 인 경우의 모의결과가 Shumate 실험결과와 가장 유사한 수위형상을 나타내었고, Case 2의 경우에는 와점성계수의 값이  $20m^2/sec$ 인 경우가 Shumate 실험결과와 가장 유사한 것으로 나타났다. 총 유

량에 대한 본류의 유량의 비가 0.75인 경우에는  $10m^2/sec$  정도의 와점성계수를 사용하는 것이 적합하다고 판단되며, 총 유량에 대한 본류의 유량의 비가 0.25인 경우에는  $20m^2/sec$  정도의 와점성계수가 적정하다고 판단된다. 그러나 이러한 결과는 지류의 유입이 본류와 직각을 이루는 경우에 한정되고 자연하천의 지류 유입부에서의 적정 와점성계수에 대한 연구는 향후 진행되어야 할 것으로 판단된다.

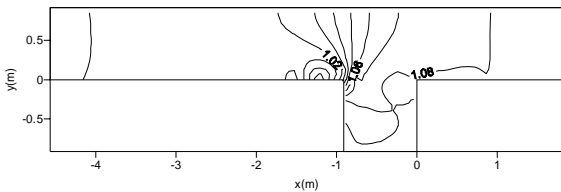


그림 5. 수치모의 결과 (  $\nu=10, q^*=0.75$  )

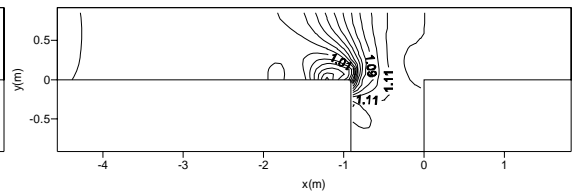


그림 6. 수치모의 결과 (  $\nu=20, q^*=0.25$  )

#### 4. 실제유역에 대한 적용

다양한 인공하도의 개수로 흐름에 대하여 다양한 와점성계수를 적용하여 수치모의를 수행하고, 연구된 결과를 토대로 자연하천에 대하여 적절한 대상 유역을 선정하고 2차원 흐름 해석을 통하여 본 개발모형의 적용성과 적절한 와점성계수의 크기에 대하여 연구하였다.

##### 4.1 대상유역의 선정 및 2차원 유한요소망의 구성

수치모형의 적용 유역은 수계 내에 많은 인공 하도와 재산이 존재하며, 각 중 산업의 중심이 되는

한강을 적용 유역으로 선택하였다. 한강에 대한 적용구간은 한강 본류의 중랑천 합류부 직하류부터 안양천 합류부 직상류까지 약 15.4km의 구간을 적용 구간으로 선정하였다. 다음의 대상구간은 하도 내부에 노들섬, 밤섬, 선유도 등의 높은 지형과 주하도 주변에 고수부지가 존재하므로 하천 수위의 변화에 따라 마름/젖음 현상이 발생하며, 본 모형에서는 마름/젖음 처리에 대하여 요소 재구성 기법을 적용하여 외부 경계의 불규칙과 내부경계가 동시에 존재하므로 본 연구에서 개발한 모형의 적용성을 검토하기에 타당한 구간으로 판단되었다. 또한 구간 내에 한강대교 수위관측소와 잠수교 수위관측소의 두 지점의 수위 관측소가 위

치하고 있어 모의를 통해 얻은 결과를 실측수위와 비교하여 정확성을 검증할 수 있는 요건을 갖추고 있다. 그림 7은 적용대상구역의 평면도를 나타내고 있으며 모의를 위한 2차원 격자의 구성을 위해 한강하천정비기본계획의 측량 자료를 GIS를 이용하여 입력자료의 구축을 위한 수치지도를 작성하여 2차원 유한요소망을 구성하였다.

2차원 수치해석을 위해서는 정확한 계수를 선정하고, 실제지형과 거의 일치하는 지형자료 구축을 통하여 모의를 수행하는 것이 가장 정확한 방법이다. 그러나 2차원해석의 안정성에 영향을 주는 가장 큰 요인중하나가 유한요소망의 적정성이며 대부분의 2차원모형은 정방형에 가까울수록 안정적인 모의를 수행한다. 따라서 그림 8과 같이

불규칙간격으로 2차원 상에 도출된 단면자료를 직접적으로 이용하여 유한요소망을 구성하는 방법 보다는 적절한 형태의 유한요소망을 구축할 수 있도록 수정이 필요하다고 여겨진다.

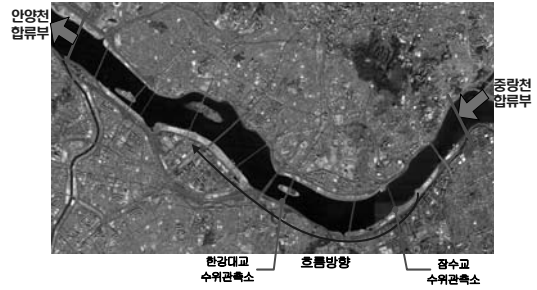


그림 7. 대상구역

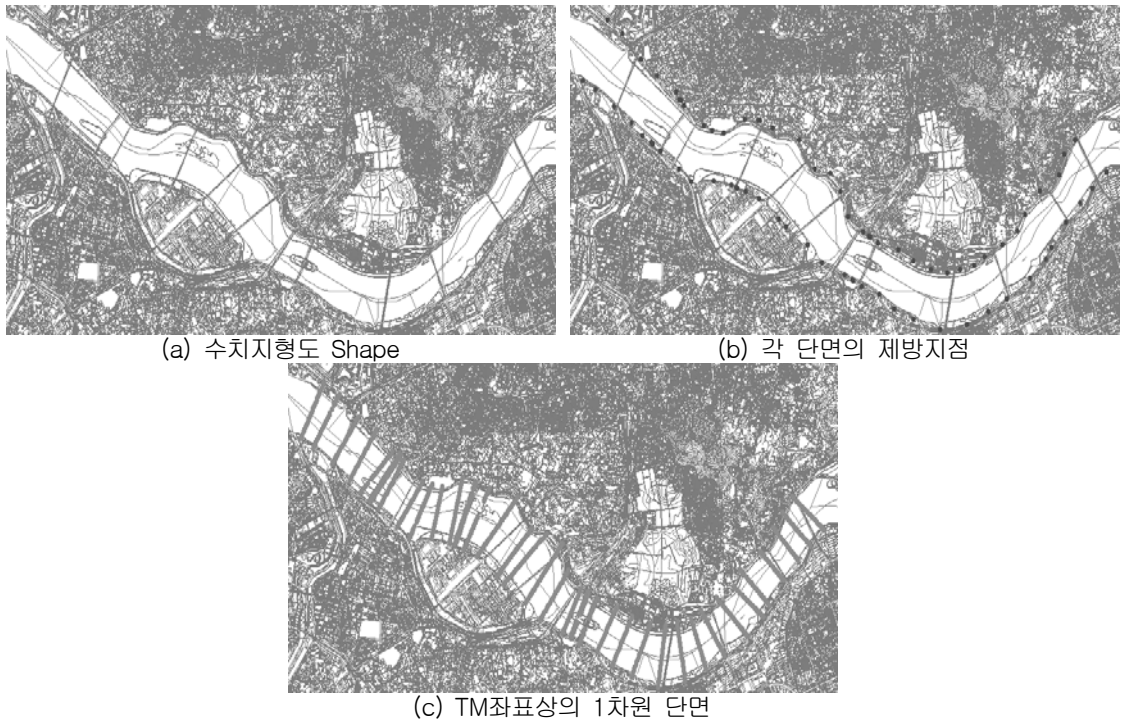


그림 8. 1차원 지형자료 변환과정

또한 본 연구의 대상구간은 하천과 제내지를 포함한 구간이 아닌 하천내부만을 대상으로 모의를 수행하고자 하므로 그림과 같이 불규칙간격으로 2차원 상에 도출된 단면자료를 통하여 모의대

상 하천구간에 대하여 불규칙삼각망(TIN)을 구축하였고, 각 단면에 대하여 등간격 혹은 모형의 안정성에 영향을 미치지 않고 지형을 반영할 수 있는 간격으로 필요한 node를 생성하였다. TM좌표

가 입력된 node들은 SMS의 전처리 기능을 이용하여 유한 요소망을 구축하였다. 위에서 언급된 GIS를 이용한 2차원 유한요소망 구축순서는 다음과 같다.

- ① 대상단면의 수치지도 선정.
- ② 수치지도상에 하천정비기본계획의 Hec단면의 양안제방좌표 입력.
- ③ 양안제방의 좌표에 대한 정보를 HEC-RAS 상에 입력하고, HEC-geoRAS를 이용하여 1차원 HEC단면을 2차원 수치지형도 상에 표출.
- ④ 모의안정성을 위하여 불규칙간격의 point로 구성된 대상구간내에서 모형을 안정성에 영향을 미치지 않고 지형을 반영할 수 있는 간격으로 node 생성.
- ⑤ 대상구간내의 불규칙간격의 point를 이용하여 불규칙삼각망(TIN)을 구축
- ⑥ 생성된 node에 TIN의 지형표고정보를 추출
- ⑦ 범용 프로그램의 전처리 기능을 이용 2차원 유한요소망 구축

#### 4.2 경계조건 설정

본 연구에서 경계조건은 태풍 ‘루사’ 내습시의 홍수 사상에 대하여 적용하고 실측수위와 검증하고자 한다. 태풍 ‘루사’는 대한민국 건국 이래 최악이라 할 만한 피해를 낸 태풍으로 한반도에 상륙한 최강의 태풍으로 꼽히는 2003년의 14호 태

풍 ‘매미’나 1987년의 5호 태풍 ‘셀마’의 수준에는 다소 미치지 못하였으나 당시 평년보다 높았던 해수 온도 등이 태풍의 쇠약을 저지하면서 대단히 오랜 기간 동안 세력을 유지하였다. 태풍 루사는 당시 한반도 주변의 기상 상황에 의해 전향 시점이 늦어졌고, 이는 태풍의 이동속도를 늦추는 효과를 가져와 전향을 시작한 2002년 8월 31일 자정 즈음 이후에는 태풍의 이동속도는 약간 빨라졌으나 이미 태풍이 한반도에 상륙한지 10시간가량이 지난 뒤였다. 이 때문에 태풍이 9월 1일 오전 9시경 강원도 속초 부근에서 열대저압부로 약화될 때까지 한반도 내륙에 머무른 시간은 약 18시간정도이며 전국 대부분의 지방에서 강풍과 폭우가 장시간 지속되는 결과로 이어졌다. 이에 본 연구에서는 태풍 ‘루사’ 내습시의 한강유역에서 유량과 수위가 최고조에 달했던 2002년 9월 1일 17시에서 2002년 9월 2일 8시까지 16시간에 걸쳐 부정류모의를 실시하였다. 대상구간의 상·하류단 경계에 대한 실측값이 존재하지 않기 때문에 한강 상류부인 팔당댐에서부터 하류부인 행주대교 지점에 대하여 2002년 9월 1일 11시부터 9월2일 8시까지의 사상에 대해 HEC-RAS 모의를 수행하고 모의결과를 실측치와 검증하였다.

그림 9는 HEC-RAS 모의에 사용된 상·하류단 경계조건이며, 그림 10은 팔당대교, 잠수교, 한강대교 지점에서의 실측수위와 HEC-RAS 모의결과를 도시한 것으로 모의결과와 실측수위가 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

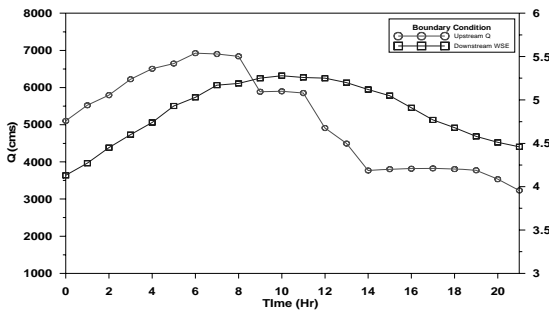


그림 9. HEC-RAS 모형의 경계조건

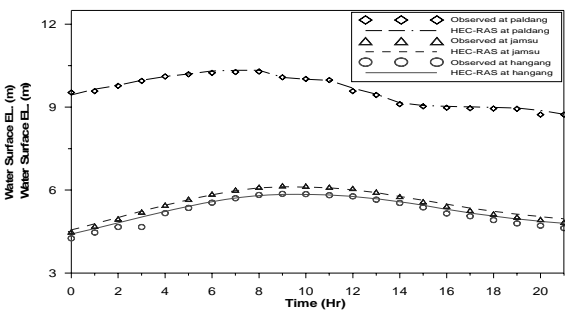


그림 10. 시간별 실측수위와 HEC-RAS 모의결과 비교

HEC-RAS 모형에 대한 정확성을 검증한 후 1차원 모의결과 나타난 대상구간의 상·하류단 경계조건을 선정하여 입력하였으며, 본 수치모의에 사용된 경계조건은 그림 11과 같다.

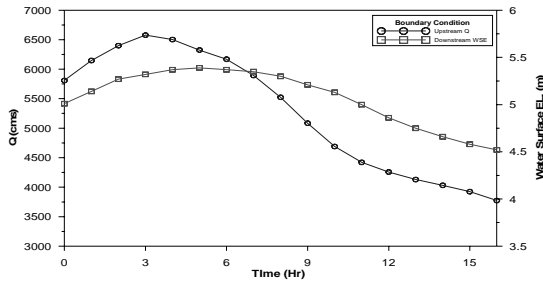
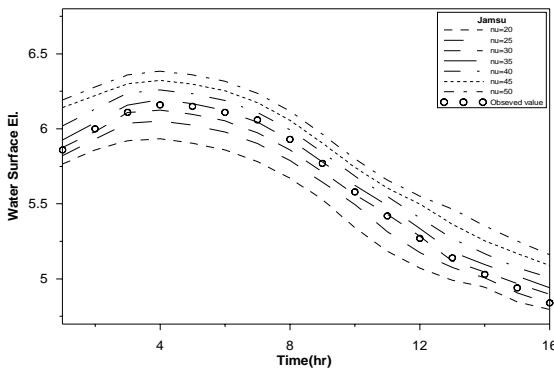


그림 11. 2차원 모형의 경계조건

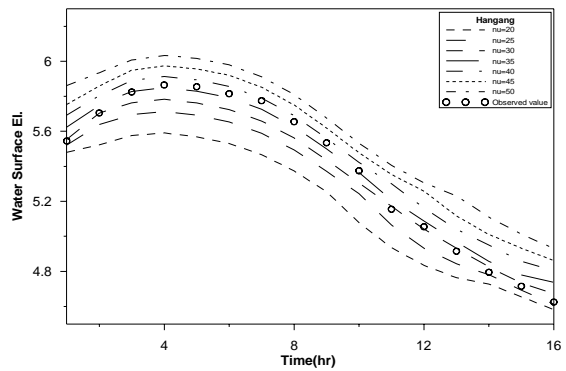
### 4.3 한강에 대한 난류해석 기법의 적용

실제하천에서의 복잡한 흐름에 관한 수치 모형화 과정에 있어서는 대상시스템의 지형학적 특성

을 정확하게 반영하여 모의수행을 실시하기위하여 대상구간에 대한 하천지형자료 및 상, 하류단 경계조건 자료를 조사하여 본 연구모형에 적용하여 모형의 적용성을 입증하고자 한다. 본 모의에 사용된 절점 수는 4,262개, 요소 수는 3,995개, 경계 절점의 수는 557개로 유한요소망을 구성하였다. 해석구간 내의 하도는 하도 중심부와 하도 외측의 고수부지 부분에서 지형이 급변하며, 마름/젖음 현상이 나타나는 영역이 넓게 존재하는 복합 단면의 양상을 띠고 있으며, 본 연구에서는 하천 단면의 지형학적 변화에 따른 흐름 특성을 효과적으로 파악하기 위해 지형이 급변하는 부분에 대한 요소망을 조밀하게 구성하였다. 한강유역의 대상구간에 대하여 0~150m<sup>2</sup>/sec 사이 값의 와점성계수를 적용하여 와점성계수의 크기에 따른 수위에 대한 영향을 실측지점에서의 실측수위와 검토한 결과를 20~50m<sup>2</sup>/sec의 범위에 대하여 그림 12와 같이 도시하였다.



(a) 잠수교 지점



(b) 한강대교 지점

그림 12. 실측수위와 수치모의 결과 비교

난류교환에 대하여 고려하지 않은 경우와 150 m<sup>2</sup>/sec인 경우 수치모의 결과와 실측수위와의 편차가 상당히 크게 나타났으며, 또한 와점성계수가 150m<sup>2</sup>/sec 보다 큰 값을 적용한 경우에는 대한 모의수행을 완료할 수 없었다. 이는 부적절한 와점성계수는 모의 수행에 있어서 불안정을 야기하며 난류교환에 대한 고려는 2차원 모형에 있어서

반드시 필요하며, 대상유역에 대한 연구를 통하여 도출된 적절한 값을 적용해야 할 것이다.

앞에서 검증한 결과와 같이 그림 12의 그래프에서 나타난 결과, 와점성계수의 크기가 커질수록 수위가 증가하는 경향을 나타내었으며, 30~40 m<sup>2</sup>/sec사이의 값을 적용한 경우 편차가 가장 작게 나타났음을 확인할 수 있다. 그러나 이러한 모

의 결과에 대하여 도시한 결과만으로 판단한다는 것은 매우 어려운 일이며, 오차의 정량적인 분석을 통해서 대상 하도에 대한 적절한 값을 도출할 수 있다고 판단된다. 이에 본 연구에서는 정량적

인 오차분석을 통하여 대상유역에 적절한 계수를 도출하고자 수위에 대한 오차분석 표 5~표 6에 나타내었다.

표 5. 잠수교 수위오차 분석결과

Eddy Viscosity	$L_1$ error	$L_2$ error	$L_\infty$ error	mean error
20	4.949E-03	1.334E-02	7.246E-03	1.412E-01
25	2.251E-03	6.351E-03	6.608E-04	6.552E-02
30	4.445E-04	2.757E-03	9.306E-03	1.310E-02
35	1.082E-03	3.368E-03	1.631E-02	3.224E-02
40	2.855E-03	7.484E-03	2.668E-02	8.595E-02
45	4.743E-03	1.229E-02	4.444E-02	1.442E-01
50	6.334E-03	1.626E-02	5.216E-02	1.945E-01

표 6. 한강대교 수위오차 분석결과

Eddy Viscosity	$L_1$ error	$L_2$ error	$L_\infty$ error	mean error
20	5.787E-03	1.599E-02	7.870E-03	1.556E-01
25	2.896E-03	8.373E-03	2.100E-03	7.957E-02
30	9.913E-04	4.499E-03	8.300E-03	2.757E-02
35	5.434E-04	3.482E-03	1.932E-02	1.529E-02
40	2.376E-03	6.956E-03	3.010E-02	6.757E-02
45	4.037E-03	1.079E-02	3.967E-02	1.160E-01
50	5.830E-03	1.532E-02	5.237E-02	1.692E-01

오차분석결과 한강유역에 대한 와점성계수는  $35m^2/sec$ 가 적절하다고 판단되며, 유역에 따라  $30\sim 40m^2/sec$ 의 값을 적용하는 것이 적합하겠다. 그러나 자연하천의 경우 조도계수, 지형 등 대상유역에 따라 흐름에 영향을 미치는 매개변수와 조건이 상이하므로 다른 유역에 적용시에는 본 연구의 와점성계수는 참고 자료로만 사용하는 것

이 적절할 것으로 판단된다. 향후 매개변수와의 관계 및 흐름조건 등을 고려한 적정 와점성계수에 대한 연구가 진행되어야 할 것으로 판단된다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 복잡한 지형 조건과 불규칙한 경

계조건을 가진 자연하천에서의 홍수류를 모의하는데 적합한 Streamline Upwind/Petrov-Galerkin 기법에 의한 유한요소모형을 기반으로 하여 난류 해석기법을 개발하였다. 본 연구 모형은 난류해석 기법의 적용성을 검증하기 위하여 다양한 흐름이 발생하는 인공하도 및 자연하도에 적용하고 그 결과를 실측치 또는 해석해와의 비교검토를 통하여 모형의 적용성을 입증하였으며, 본 연구의 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 본 연구에서는 SU/PG 기법에 의한 유한요소모형을 기반으로 난류해석기법을 개발하기 위하여 다양한 난류해석기법을 검토하고 적절한 모형으로 와점성이론에 기반한 수심 평균 혼합거리 난류 모형의 적용을 통하여 2차원 흐름해석을 위한 난류해석기법을 개발하였다.
- (2) 본 연구에서 개발한 유한요소모형의 검증을 위해서 내부경계가 존재하는 실험하도에 대하여 수치모의를 수행하고 Yulistiyanto 등 (1998)의 실험 결과와 비교하고 오차에 대하여 분석하였다. 모의결과 와점성계수 값의 변화에 따라 모의결과가 상이하게 나타났으며, 이를 통해 난류 해석이 필요한 것을 확인할 수 있었다. 또한 내부경계가 존재하는 하도의 경우  $5\sim 20m^2/sec$ 의 와점성계수 값이 적절한 것으로 모의되었다.
- (3) 지류가 유입되는 조건에 대해 와점성계수 값을 다양하게 선정하여 모의를 수행하였다. 모의결과 이전 모의와 마찬가지로 와점성계수 값에 따라 모의결과가 상이하게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 모의 결과를 Shumate(1998)의 실험결과와 비교한 결과, 총 유량에 대한 본류의 유량의 비가 0.75인 경우에는 와점성계수의 값이  $10m^2/sec$ 인 경우의 모의결과가 Shumate 실험결과와 가장 유사한 수위형상을 나타내었고, 총 유량에 대한 본류의 유량의 비가 0.25인 경우에는 와점성계수의 값이 20

$m^2/sec$ 인 경우가 Shumate 실험결과와 가장 유사한 것으로 나타났다. 그러나 이러한 결과는 지류의 유입이 본류와 직각을 이루는 경우에 한정되고 자연하천의 지류 유입 부에서의 적정 와점성계수에 대한 연구는 향후 진행되어야 할 것으로 판단된다.

- (4) 본 논문에서는 한강에 대한 본 연구 개발모형의 모의결과를 수위관측소에서의 실측수위와 비교를 통하여 검증하였다. 난류교환에 대하여 고려하지 않은 경우와 와점성계수 값이  $150m^2/sec$ 인 경우 수치모의 결과와 실측수위와의 편차가 상당히 크게 나타났으며, 또한 와점성계수가  $150m^2/sec$  보다 큰 값을 적용한 경우에는 모의수행을 완료할 수 없었다. 이는 부적절한 와점성계수는 모의 수행에 있어서 불안정을 야기하며 난류교환에 대한 고려는 2차원 모형에 있어서 반드시 필요한 것을 알 수 있다. 모의 결과 와점성계수의 크기가 커질수록 수위가 증가하는 경향을 나타내었으며, 오차분석결과 한강유역에 대한 와점성계수는  $35m^2/sec$ 가 적절하다고 판단되었다. 그러나 자연하천의 경우 조도계수, 지형 등 대상유역에 따라 흐름에 영향을 미치는 매개변수와 조건이 상이하므로 다른 유역에 적용시에는 본 연구의 와점성계수는 참고 자료로만 사용하는 것이 적절할 것으로 판단되며 향후 매개변수와와의 관계 및 흐름조건 등을 고려한 적정 와점성계수에 대한 연구가 진행되어야 할 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 과학기술부가 출연하고 수자원의 지속적 확보기술개발사업단에서 위탁 시행한 21세기 프론티어 연구개발사업중 “RAM2 모형의 확장 개발 및 상용화”(과제번호2-3-3)에 의해 수행되었습니다.

## 참 고 문 헌

- 정영훈, 최성욱, 최정일. 2004. 저 레이놀즈 수 개수로 난류흐름의 직접수치모의: 난류의 비등방성 해석. 2004년 한국수자원학회 학술대회논문집, pp. 376-380
- 최홍식. 1997. 난류모형을 이용한 개수로 급축소부 흐름의 수치해석. 한국수자원학회논문집 30(3): 201-210
- 강형식, 김규호 2009. 난류모형을 이용한 대응식생수로 흐름수치모의. 2009 한국수자원학회 학술발표회 논문집. CD-ROM.
- Cea, L., Pena, L, Puertas, J, Vazquez-Cendon, M.E. and Pena, E. 2007. Application of several depth-averaged turbulent models to simulate flow in vertical slot fishway. Journal of Hydraulic Engineering, 133(2): 160-172.
- Ewertowski. 2006. Automatic eddy viscosity assignment for 2-D hydrodynamics model. Publications of the Institute of Geophysics Polish Academy of Sciences. 9:124-131.
- King, I.P. and Norton, W.R 1978. Recent application of RMA's finite element models for two-dimensional hydrodynamics and water quality. *Finite Element in Water Resources*, Pentech Press pp. 281-299.
- Olsen, N.R.B. (2003). Three-dimensional CFD modeling of self-forming meandering channel. Journal of Hydraulic Engineering, 129(5): pp. 366-372.
- Puertas, J., Pena, L. and Teijero, T.R. 2004. An experimental approach to the hydraulics of vertical slot fishway. Journal of Hydraulic Engineering, 130(1): 10-23.
- Rameshwaran, P, and Naden, P.S. (2003). Three dimensional numerical simulation of compound channel flows. Journal of Hydraulic Engineering, 129(8): pp. 645-652.
- Shumate, E.D. 1998. Experimental description of flow at an open channel junction. Master thesis, Univ. of Iowa, Iowa.
- Vazquez-Cendon, M.E. and Cea, L. 2007. High order upwind scheme for modeling turbulent shallow water flow in hydraulic structures. Proc. Appl. Math. Mech. 7(1) pp. 1100205-1100206.
- Violeau, D., Bourban, S., Cheviet, C., Markofsky, M., Petersen, O., Roberts, W., Spearman, J., Toorman, E., Vested, H.J., and Weilbeer, H. (2002). Numerical simulation of cohesive sediment transport: Intercomparison of several numerical models. Proceedings in Marine Science, 5: pp. 75-89.
- Yulistiyanto B., 1998. Flow around a cylinder installed in a fixed-bed open channel. Ph. D. dissertation, Ecole Polytechnique federale, Lausanne, CH.

○ 논문접수일 : 2011년 06월 17일

○ 심사의뢰일 : 2011년 06월 22일

○ 심사완료일 : 2011년 09월 22일