

GIS와 연계한 한강 하류부에서의 동수역학적 수치모형의 개발

Development of Hydrodynamic Model on the Downstream of Han River by Using Geographical Information System

한 건 연* / 이 을 래** / 박 재 홍***

Han, Kun Yeun / Lee, Eul Rae / Park, Jae Hong

Abstract

This study was to develop a two-dimensional model system for the hydrodynamic analysis and to apply the system on the downstream of Han river. It is performed to design a GIS-based hydrodynamic system for the scientific shallow water profile analysis, and to compare hydraulic modeling results with field measurements for the verification of the this model. The proposed method is the Petrov-Galerkin's finite element method for flow prediction model. This study was to construct a GIS-based river flow system, and it is useful for supporting user's decision making for the on-line status through various analysis. We expect that the results from this study can be used as one of the guidelines for river analysis and management system in other rivers, reservoirs, and estuaries.

keywords : hydrodynamic system, Petrov-Galerkin, finite element method, GIS, verification

요 지

본 연구에서는 2차원 동수역학적 수치해석모형을 개발하고, 한강하류부에 적용하였다. 과학적인 천수흐름 거동 해석을 위해서 GIS에 기초한 동수역학모형을 구성하였으며, 개발된 모형의 검증을 위해서 모의수행에 의한 결과 값과 현장관측값과의 비교를 수행하였다. 본 연구에서 제시된 수치해석 모형은 Petrov-Galerkin 유한요소법이다. 또한 GIS를 이용한 하천흐름해석기법을 구축하였으며, 이는 다양한 해석을 통해 직접적으로 사용자의 결정에 도움을 주게 된다. 본 연구의 결과는 다양한 하천, 저수지 그리고 하구의 해석에 관한 지침이 될 수 있을 것으로 사료된다.

핵심용어 : 동수역학, Petrov-Galerkin, 유한요소법, 지리정보시스템, 검증

* 경북대학교 공과대학 토목공학과 교수

Prof., Dept. of Civil Engrg., Kyungpook National Univ., Taegu 702-701, Korea
(E-mail : kshanj@knu.ac.kr)

** 경북대학교 공과대학 강사

Part-Time Lecturer, Dept. of Civil Engrg., Kyungpook National Univ., Taegu 702-701, Korea

*** 세명대학교 공과대학 토목공학과 전임강사

Full-Time Lecturer, Dept. of Civil Engrg., Semyung Univ., Jechun, Chungbuk 390-711, Korea

1. 서 론

최근 들어 이상기후에 따른 집중호우의 영향과 제내지의 토지이용 극대화로 인하여 홍수로 인한 재해가 증대되고 있으며 홍수재해를 줄이기 위해서 제한구역의 설정, 각종 수공구조물의 건설, 홍수 예·경보 시스템의 개발 등의 구조적 및 비구조적 방안이 제시되고 있다. 이러한 대책 방안을 실제 하천유역에 적용하기 이전에 모형에 의한 모의수행은 매우 중요한 과정으로 고려되어야 하며, 이를 위해서는 다양한 수리현상을 모의할 수 있는 수학적 모형의 개발 및 이의 수행이 필수적이다. 특히 다양한 조건의 지류가 유입되어 경계조건이 복잡해지고 거동이 다양하게 변화하며 수중보와 같은 수공구조물이 존재하는 구간에서는 단순한 1차원 해석만으로는 흐름에 대한 수리학적 제반특성을 나타내기에는 많은 제약조건들이 상존하게 된다.

따라서 본 연구에서는 하천의 2차원 동수역학적 흐름해석을 위해 불연속 기중함수를 이용한 Petrov-Galerkin 유한요소모형을 개발하였다. 시간항의 처리는 2차항의 정도를 가지며 가중인자를 도입한 유한차분기법을 이용하였으며, 개발된 유한요소모형은 정진동 실험 및 댐 파괴류흐름을 수행함으로써 모형의 적용성을 검토하였다. 또한 실제하도인 한강 하류부에 대한 적용을 통하여 정량, 정성적 특성을 입증하였으며 GIS와 연계하여 전·후처리과정의 일관된 수행을 구축하였다. 그리고 본 모형의 적용가능성에 대하여 실제하천의 실측값과 계산값을 비교하여 적합성을 확인하였다.

하천에서의 동수역학적 흐름 해석을 위한 2차원 유한요소법의 적용에는 King과 Norton(1978), Gee와 MacArthur(1981) 등이 유속항에 대하여 2차 보간함수를, 수심항에 대하여 선형 보간함수를 사용하였다. Lee와 Froehlich 등(1986)의 연구에서는 2차원 천수방정식을 유한요소법으로 해석할 때 유속 및 수심항에 대하여 동일한 차수의 보간함수를 사용하였으며 Katopodes(1984)는 감쇠형 유한요소기법을 개수로내의 홍수류 해석에 적용하였다. Adefwa와 Wang(1985)은 하도망 해석을 위해 감쇠형 유한요소기법을 이용하여 해석하였으며, Hicks와 Steffler(1992)는 특성선과 감쇠형 유한요소법에 의해 상류-사류를 가지는 천이영역에서의 부정류 해석을 실시하였고 Alam과 Bhuiyan(1995)은 collocation기법에 의한 댐 파괴류 해석을 실시하였다. 하천에서의 GIS응용에 관련된 연구로서는, Ruland와 Rouv(1994)가 1, 2차원 수리학

적 모형과 통합하여 하도흐름, 물질운송, 수질 등을 모의하는데 GIS를 적용하여 사용자에게 편의성을 부여하였다. Maidment 등(1996)은 Upper Houston Ship 수로에서의 수질해석을 위해서 ArcView와 WASP5와 연계하여 연구를 수행한 바 있다. 국내에서 2차원 천수방정식에 관한 수치해석기법은 주로 유한차분기법을 중심으로 연구되어 왔는데 한건연 등(1982)이 울산만의 조석해석, 이길성 등(1989)이 천수방정식의 유한차분특성을 연구한 바 있으며 건설기술연구원(1995), 이진희 등(1996)이 유한체적법을 이용하여 2차원 하천모형을 연구하였다. 유한요소기법에 대한 연구로는 윤태훈(1982)이 각각 항내 토사이동 예측과 단면 급확대에 의한 흐름영향을 고찰하기 위해 2차원 천수방정식의 유한요소기법을 적용하였고, 윤용남 등(1994)은 한강 하류부에 FESWMS 모형을 적용하여 해석한 예가 있다.

2. 수치모형의 기본이론

2.1 기본방정식

2차원 천수방정식의 주된 가정은 연직으로의 압력분포를 정수압으로 가정하여 고려하는 것이다. 그 결과 자유 수표면 곡률은 무시 가능하고 수평으로의 유속 성분은 수심에 따라 일정하게 된다. 이것은 유체가 연직 평면의 모든 점에서 유속이 동일하다는 것을 의미한다. 이러한 조건 하에서 연속방정식과 운동방정식은 식 (1)~(3)과 같이 기술될 수 있다.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(uh)}{\partial x} + \frac{\partial(vh)}{\partial y} + i = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(uh)}{\partial t} + \frac{\partial(u^2h)}{\partial x} + \frac{\partial(uvh)}{\partial y} + g \frac{\partial(h^2/2)}{\partial x} = gh(S_{0x} - S_{fx}) \quad (2)$$

$$\frac{\partial(vh)}{\partial t} + \frac{\partial(v^2h)}{\partial y} + \frac{\partial(uvh)}{\partial x} + g \frac{\partial(h^2/2)}{\partial y} = gh(S_{0y} - S_{fy}) \quad (3)$$

여기서 h = 수심, u, v = 유속에 대한 x 와 y 성분, t = 시간, S_{0x}, S_{0y} = 하상경사에 대한 x 와 y 성분, S_{fx}, S_{fy} = 각각 x 와 y 방향으로

의 수리학적 마찰 경사선, $i =$ 측방향 유출입량, $g =$ 중력가속도를 의미한다.

이제 $p = uh$ 그리고 $q = vh$ 라고 하면, 식 (1)~(3)은 식 (4)와 같이 행렬의 형태로 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial x} + \frac{\partial G}{\partial y} + D = 0 \quad (4)$$

여기서

$$U = \begin{pmatrix} h \\ p \\ q \end{pmatrix}, \quad F = \begin{pmatrix} p \\ \frac{p^2}{h} + \frac{gh^2}{2} \\ \frac{pq}{h} \end{pmatrix},$$

$$G = \begin{pmatrix} q \\ \frac{pq}{h} \\ \frac{q^2}{h} + gh^2 \end{pmatrix}$$

$$D = \begin{pmatrix} i \\ gh \frac{\partial z_0}{\partial x} + gn^2 \frac{p(p^2 + q^2)^{1/2}}{h^{7/3}} \\ gh \frac{\partial z_0}{\partial y} + gn^2 \frac{q(p^2 + q^2)^{1/2}}{h^{7/3}} \end{pmatrix}$$

식 (4)에서 미분방정식에 대한 chain rule을 적용하면 식 (5)와 같다.

$$\frac{\partial U}{\partial t} + A \frac{\partial U}{\partial x} + B \frac{\partial U}{\partial y} + D = 0 \quad (5)$$

여기서

$$A = \frac{\partial F}{\partial U} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -\frac{p^2}{h^2} + gh & \frac{2p}{h} & 0 \\ -\frac{pq}{h^2} & \frac{q}{h} & \frac{p}{h} \end{pmatrix}$$

$$B = \frac{\partial G}{\partial U} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ -\frac{pq}{h^2} & \frac{q}{h} & \frac{p}{h} \\ -\frac{q^2}{h^2} + gh & 0 & \frac{2q}{h} \end{pmatrix}$$

2.2 유한요소수식화

본 모형에서는 좌표계형성에 있어서 좀 더 사용이 용이한 공간 좌표계에서 지배방정식을 구성하게 되는데, 즉 지배방정식을 전체좌표계에서 국지좌표계로 표현하는 것이다. 즉 (ξ, η, τ) 를 기존 좌표계인 (x, y, t) 와 관련된 이동 좌표계라고 하면 다음과 같은 표현이 가능하게 된다.

$$x = x(\xi, \eta, \tau), \quad y = y(\xi, \eta, \tau), \quad t = \tau$$

여기서 chain rule을 사용하면, 식 (6)~(8)과 같은 식이 성립한다.

$$\frac{\partial}{\partial \xi} = \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial \xi} + \frac{\partial}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial \xi} + \frac{\partial}{\partial t} \frac{\partial t}{\partial \xi} \quad (6)$$

$$\frac{\partial}{\partial \eta} = \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial \eta} + \frac{\partial}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial \eta} + \frac{\partial}{\partial t} \frac{\partial t}{\partial \eta} \quad (7)$$

$$\frac{\partial}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial \tau} + \frac{\partial}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial \tau} + \frac{\partial}{\partial t} \frac{\partial t}{\partial \tau} \quad (8)$$

식 (6)과 식 (7)을 x 와 y 에 대한 편미분에 관하여 풀면 다음 식과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x} = \frac{1}{|J|} \left(\frac{\partial y}{\partial \eta} \frac{\partial}{\partial \xi} - \frac{\partial y}{\partial \xi} \frac{\partial}{\partial \eta} \right) \quad (9)$$

$$\frac{\partial}{\partial y} = \frac{1}{|J|} \left(\frac{\partial x}{\partial \xi} \frac{\partial}{\partial \eta} - \frac{\partial x}{\partial \eta} \frac{\partial}{\partial \xi} \right) \quad (10)$$

여기서 Jacobian J 는 다음과 같다.

$$|J| = \frac{\partial x}{\partial \xi} \frac{\partial y}{\partial \eta} - \frac{\partial x}{\partial \eta} \frac{\partial y}{\partial \xi}$$

식 (8)은 식 (11)과 같이 구성될 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial \tau} - \frac{\partial x}{\partial \tau} \frac{\partial}{\partial x} - \frac{\partial y}{\partial \tau} \frac{\partial}{\partial y} \quad (11)$$

결국, 식 (9)~(11)을 이용하여 지배방정식인 식 (5)에 대입함으로써 국지좌표계에 의한 방정식으로의 전환이 가능하게 된다. 그리고, 유한요소해식은 공간적인 보간함수가 정의된 국지좌표계로 변형된 좌표계 (ξ, η) 로 나타냄으로써 편리하게 수행될 수 있다. 즉, 국지좌표계 (ξ, η) 는 (x, y) 에 대해 다음과 같은 관계가 성립된다.

$$x(\xi, \eta, \tau) = \sum_{\alpha=1}^N x_{\alpha}(\tau) N_{\alpha}(\xi, \eta) \quad (12)$$

$$y(\xi, \eta, \tau) = \sum_{\alpha=1}^N y_{\alpha}(\tau) N_{\alpha}(\xi, \eta) \quad (13)$$

여기서 x_{α}, y_{α} 는 요소의 절점에 대한 좌표이고, N_{α} 는 식 (14)와 같이 주어지는 bilinear 형상함수이다.

$$N_{\alpha} = \frac{1}{4}(1 + \xi_{\alpha}\xi)(1 + \eta_{\alpha}\eta), \quad \alpha = 1, 2, 3, 4 \quad (14)$$

식 (5)의 해를 구하기 위한 유한요소 근사치는 식 (15)와 같이 표현될 수 있다.

$$\hat{U} = N_{\alpha} U_{\alpha} \quad (15)$$

여기서 U_{α} 는 구하고자 하는 미지수의 합계를 의미하는 반복지표로서 절점에서의 해를 나타내고 있다. 따라서, 전형적인 가중잔차방정식은 식 (16)과 같은 방정식의 형태로 주어진다.

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

여기서 W 는 가중함수집합이고 적분은 공간 영역 Ω 에 대해 적용된다.

(1) 감쇠인자의 도입

감쇠형 유한요소기법에 대한 개발은 현재 광범위하게 논의되고 있다. 이 방법에서 가중함수의 선택은 전형적인 Galerkin 기법과는 상이한 형태를 나타내는데 형상함수와 동일한 가중함수를 선택하지 않고 식 (17)

과 같은 불연속적인 시험함수를 사용한다.

$$N_{\alpha}' = N_{\alpha} + \epsilon_x A^T \frac{\partial N_{\alpha}}{\partial x} + \epsilon_y B^T \frac{\partial N_{\alpha}}{\partial y} \quad (17)$$

여기서 ϵ_x 와 ϵ_y 는 감쇠매개변수이며, 위첨자 T 는 행렬의 轉置를 나타내고 있다. 시험함수와 시험함수간의 기능적 차이는 가중함수의 C^{-1} 조건의 연속 특성을 나타내고 있다. 여기서, 2차원 흐름에 대해 일반화될 때, 감쇠인자는 식 (18)과 같이 산정될 수 있다(Katopodes, 1984).

$$\epsilon_x = \epsilon_y = \frac{\Delta L}{[\sqrt{(p/h)^2 + (q/h)^2 + c}] \sqrt{15}} \quad (18)$$

여기서 $c = \sqrt{g \hat{h}}$, \hat{h} =요소 중점에서의 수심, 그리고 ΔL =흐름방향으로 요소중점을 지나는 좌표상의 길이를 나타낸다.

이제 식 (17)의 가중함수에 의하여 식 (5)를 유한요소 방정식으로 표시하면 식 (19)와 같다.

$$\sum_{\alpha=1}^{NE} \int_{\Omega} (N'_{\alpha})^T \left\{ \frac{\partial U}{\partial t} + A \frac{\partial N}{\partial x} + B \frac{\partial N}{\partial y} + D \right\} d\Omega = 0 \quad (19)$$

여기서 NE =전체요소의 수, Ω =요소의 면적, $A = \frac{\partial F}{\partial x}$, $B = \frac{\partial G}{\partial y}$ 로 기술된다.

(2) 시간에 대한 수치적분

시간에 대한 수치적분은 2차 정도의 정확도를 가진 유한차분기법을 사용하게 되는데, 시간 $\tau = n \Delta \tau$ 와 $\tau = (n+1) \Delta \tau$ 사이에 식 (20)과 같이 적용한다.

$$\frac{\hat{U}^{n+1} - \hat{U}^n}{\Delta \tau} = \lambda \left(\frac{\partial \hat{U}}{\partial \tau} \right)^{n+1} + (1-\lambda) \left(\frac{\partial \hat{U}}{\partial \tau} \right)^n \quad (20)$$

여기서 λ 는 본 연구의 모든 계산에서 0.5의 값으로 지정된 가중인자이며, 식 (20)은 식 (21)과 같이 정리할 수 있다.

$$\left(\frac{\partial \hat{U}}{\partial \tau} \right)^{n+1} = \alpha \hat{U}^{n+1} - \beta \quad (21)$$

여기서 $\alpha = \frac{1}{\lambda \Delta \tau}$, $\beta = \alpha \hat{U}^n + \left(\frac{\partial \hat{U}}{\partial \tau} \right)^n$ 이다.

식 (21)을 식 (16)에 대입하면 음해적 성격을 가진 대수 방정식이 생성되며, 이 방정식의 해는 Newton-Raphson 기법을 사용하여 얻을 수 있다. 미지의 절점 값에 대해 초기 예측값이 주어지면, 식 (22)에 의해 새로운 계산값을 얻을 수 있다.

$$\hat{U}^{k+1} = \hat{U}^k - \Delta \hat{U}^k \quad (22)$$

여기서 $\Delta \hat{U}^k$ 는 선형 시스템의 해가 된다.

$$\left\{ \frac{\partial f^k}{\partial \hat{U}^k} \right\} \Delta \hat{U}^k = -f^k \quad (23)$$

3. 흐름해석 모형의 검증

흐름모형의 안정성, 정확도, 적용성 등을 검증하기 위하여 다양한 수치실험이 실시되었다. 수치실험을 위한 조건으로서 정진동수치실험을 통해서 모형의 검증을 실시하였고, 댐 파괴의 경우에 대해서 적용

하였다.

3.1 정진동 해석

단순하도에서 본 모형의 수렴성을 계산하기 위하여 양단이 폐쇄된 1차원적인 하도의 직사각형 단면의 수평수로에서 정진동실험을 실시하였다. 하도의 길이(L)는 10 km, 단면폭(b)이 100 m, 수로바닥경사(S₀)는 수평으로 하였다. Manning의 조도계수(n)는 0.0001과 0.035, 계산격자간격 Δx, Δy는 각각 50 m, 계산 시간간격은 5초, 상류단 및 하류단경계는 폐쇄단경계로 하였고 초기수위를 cosine 함수로 주어 초기수위에 의해 파의 변화를 시험하였다.

그림 1, 2는 정진동 실험결과 나타난 시간에 따른 파의 변화양상을 조도계수에 따라 나타내고 있다. 그림 1에서 보는 바와 같이 조도계수 n 값이 0.0에 가까울 때는 수위의 감쇠가 거리에 따라 매우 작은 값을 나타내고 있었고 시간이 경과함에 따라 수면경사의 감소는 나타나지 않았다. 그림 2에서는 증가된 조도계수값을 사용하여 시간의 따른 수위의 변화를 도시하였다. 그림에서 보는 바와 같이 시간에 따라 큰 수위감쇠를 나타내고 있어 본 모형이 정진동 실험에서 흐름방정식을

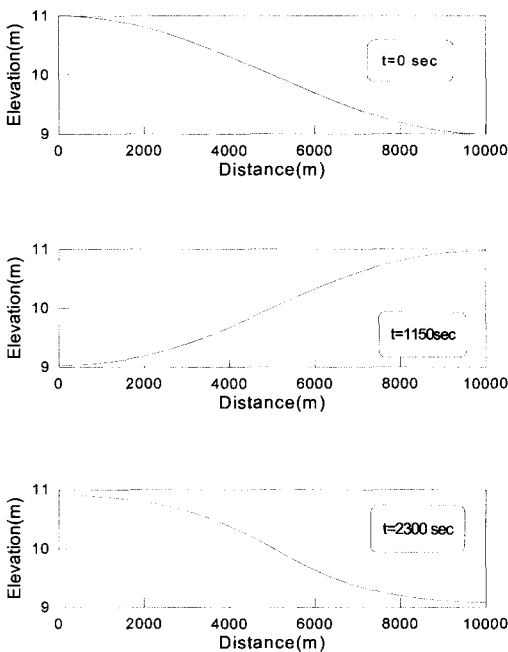


그림 1. 파의 변화양상(n=0.0001)

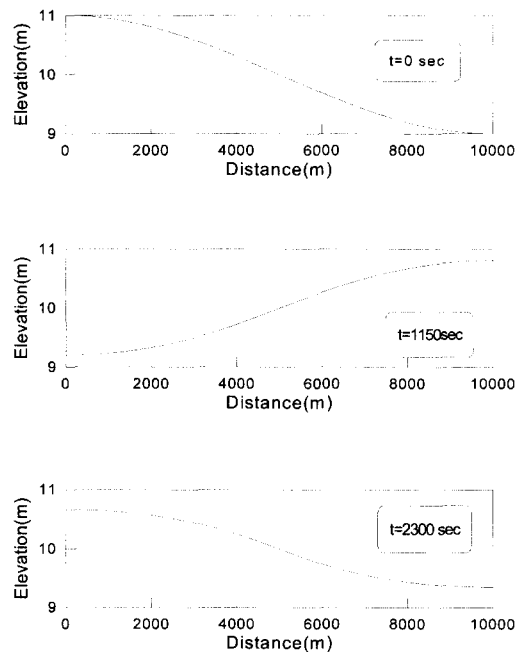


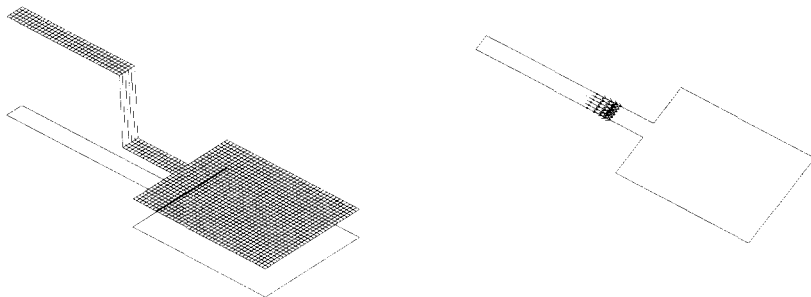
그림 2. 파의 변화양상(n=0.035)

잘 해석하고 있음을 알 수 있었다.

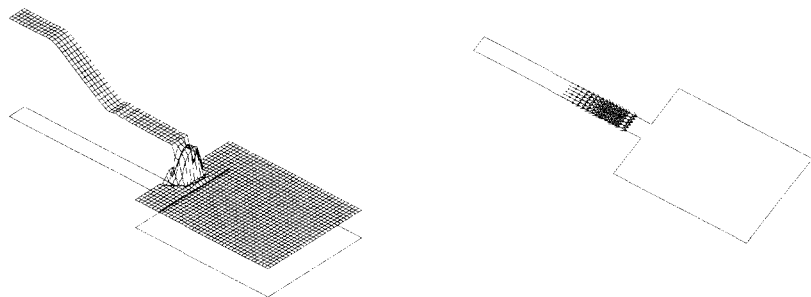
3.2 댐 파괴류의 경우

댐 파괴에 따른 적용의 경우는 좁고 긴 직사각형 수로의 하류부에 넓고 수심이 얇은 제내지가 존재할 경우이다. 이 경우 급격한 댐 파괴의 축소단면을 하천제방 또는 댐 파괴의 경우로 보고 하류단을 폐쇄단으로 처리해서 제내지에서의 수위 및 유속분포 상황을 모의하였다. 본 수치실험의 목적은 흐름의 급격한 확대로 인해 비선형항의 영향이 증대되고 서로 다른 상하류단 경계조건이 존재하는 비교적 복잡한 흐름 상황에서 모형의 계산수행 능력을 평가하고자 함에 있다. 초기조건은 유속이 '0'이고 수로에서의 수위를 3 m, 홍수터에서의 수위를 50 cm로 가정하였고 상류단 수로에서 수문의 급격한 제거로 댐 파괴 효과를 모의하였다. 계산 절점간격은 1 m, 계산 시간 간격은 0.1초로 하였다. 본 모형을 가상하도에 적용하여 시험한 결과가 그림 3에 나타나 있다. 그림에서 계산시작 0.5초 후에는 급격

한 댐 파괴로 인해 주수로에서 빠른 유속과 급한 수면경사를 가진 흐름이 발생하여 댐 파괴후의 초기 현상을 재현하였으며 시간이 경과함에 따라 주수로의 흐름이 발달하였고 유속분포도 댐 파괴부 상,하류단으로 확산되고 있다. 계산 시작 3.5초 후에는 주수로의 흐름이 제내지에 도달하였고 축소부의 빠르고 급한 수면경사를 가진 흐름이 단면이 급확대된 제내지에 도달하여 계산이 수렴되고 있음을 알 수 있었다. 계산시작 5.5초 후에는 주수로에서의 흐름이 제내지내로 확산되어 가고 있고 급확대부 가장자리에서 난류의 영향으로 활발한 와류가 발생하고 있다. 제내지의 흐름 선단부에서는 선단부마찰의 영향으로 수면경사가 급하고 유속이 느린 것을 잘 재현하고 있다. 계산시작 8.5초 후에는 제내지에서는 폐쇄단 경계의 영향으로 벽면에서 반사된 흐름과 주수로에서의 확산된 흐름이 서로 경계를 이루고 확산되고 있으며 중앙부에서 주수로 흐름 운동력의 영향으로 제내지 중앙부에서 주수로 흐름의 영향이 크게 미치고 있다.

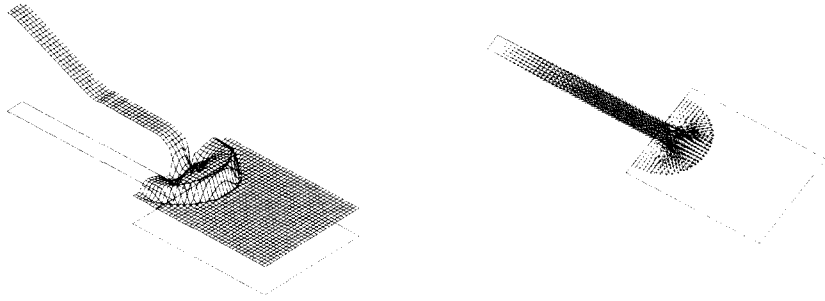


(a) 0.5 초 경과후

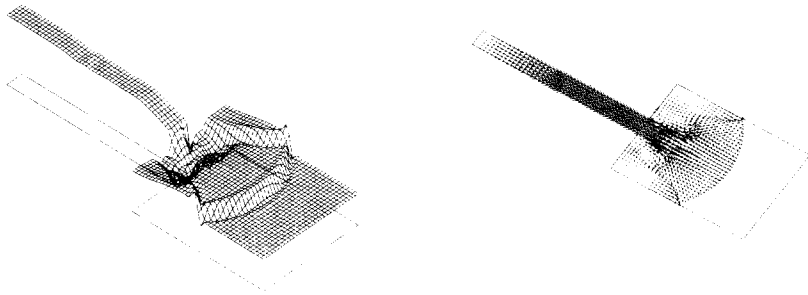


(b) 3.5 초 경과후

그림 3. 댐 파괴에 의한 수위 및 유속분포 (t=0.5, 3.5, 5.5, 8.5초)(계속)



(c) 5.5 초 경과후



(d) 8.5 초 경과후

그림 3. 댐 파괴에 의한 수위 및 유속분포 (t=0.5, 3.5, 5.5, 8.5초)

전체적으로 보면 초기상태에서는 흐름은 수로를 채우면서 흐르다가 확대부로 유입될 때 확산이 발생하면서 제내지의 침수가 시작되었다. 시간경과에 따라 제내지에서의 침수영역이 확대되고 폐쇄단 경계의 반사된 흐름과 수로에서의 주류와 경계를 이루면서 흐름 확산 현상이 재현되고 있었으며 이 연구결과는 Fennema(1987), Almeida와 Franco(1993) 등의 연구결과와 잘 일치되고 있었다.

4. 실제하도의 적용

4.1 대상구역의 선정

본 모형의 실제하도의 적용을 위해 적용대상구간은 북한강과 남한강이 유입되는 팔당댐의 하류부에서 한강 인도교까지의 총구간길이 35.7 km 구간을 선택하였다. 본 구역에서의 주요 지류유입으로 우안으로 왕숙

천과 중랑천, 좌안으로 탄천 등이 유입되고 있다. 팔당댐에서 방류된 유량은 하류부의 각종 취수장, 하수처리장 및 지류 등으로 인하여 용수수요량과 유입수의 영향을 받으므로 구간별로 유하량이 변하게 된다. 본 연구에서는 한강유역의 구간별 유하량을 구하기 위하여 서울시가 산정한 적정 팔당댐 방류량인 $200 \text{ m}^3/\text{s}$ 를 지정하였으며, 이는 갈수기의 한강 하류부의 오염원 분포해석에 적합한 값으로 판단된다.

4.2 GIS에 의한 입력지형자료의 구축

실제하천의 복잡한 지형을 모의수행하기 위해서는 모형의 타당성 뿐만 아니라, 대상시스템에 대해 지형학적 특성이 정확하게 제시되어야 한다. 본 구간의 실제 측량자료인 x, y 축점을 이용하여, 모든 경, 위도 값은 중부도 원점을 기준으로 한 TM좌표로 변환시킴으로서 실제하천에 대한 원축척의 자료를 사용하였으며,

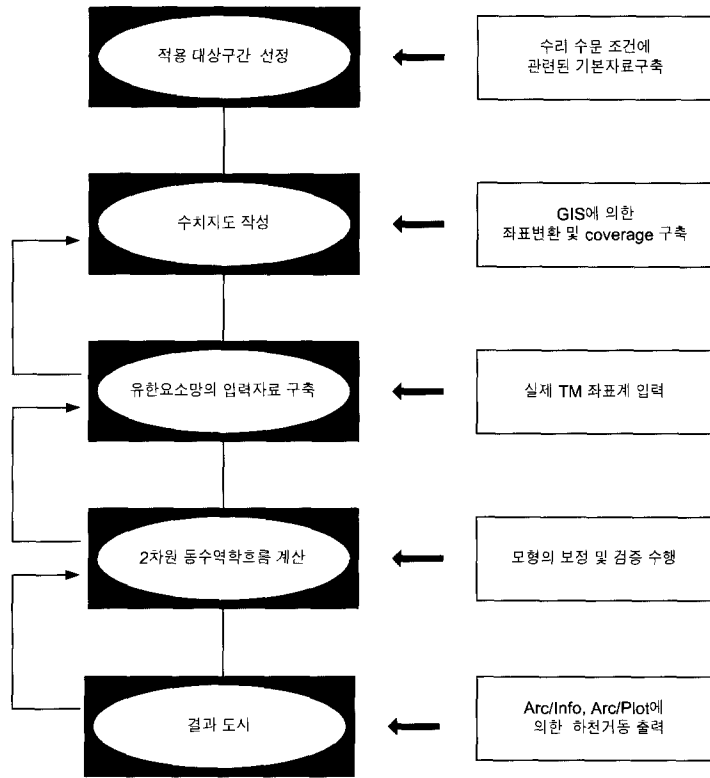


그림 4. 동수역학적 수치모형적용을 위한 흐름도

하상고는 서울시 및 경기도 구간의 실측 하상단면 자료를 이용하였다. 그림 4는 하천수계의 동수역학적 흐름해석을 위한 모형수행의 흐름도를 나타내고 있다. 그림에서 나타난 바와 같이 먼저 하천흐름의 수치모의가 요구되고 있는 대상구간을 선정하고 다음 GIS를 이용하여 입력자료의 구축을 위한 수치지도를 작성하였다. 실제 TM좌표계에 의한 수치지도에 의해 산정된 표고점을 이용하여 유한요소망을 구축하였으며 2차원 동수역학적 흐름을 위해 수치모형을 이용하여 수행한 다음 대상구역의 흐름해석을 과학적이고 체계적인 도시를 위해 GIS와 연계하여 일관된 전, 후처리과정을 통합한 하천수계에서의 동수역학적 흐름시스템을 구축하였다.

본 연구에 사용된 기초자료는 1/5,000 지형도와 하천정비기본계획상 횡단도 등이며, 적용에 필요한 도곽을 이용하여 벡터화 작업을 수행하였다. 벡터화 작업은 하천흐름 및 수질해석 프로그램의 입력자료 작성과 가시적인 출력에 필요한 하천, 등고선, 표고점 및 경계점 등에 대해 수행하였으며, 각각의 coverage를

ArcView에 의해 한 개의 coverage로 합성하였다. 그리고 계산에 필요한 요소를 구성하기 위한 전 단계로서 실측횡단도의 지점들을 실제 2차원 합성지형 하도상에 입력을 하였다. 각 실측치가 있는 절점들을 연결하여 수치해석을 위한 유한요소망을 구축하였다. 그림 5는 왕숙천의 지형에 대한 실측횡단도 지점을 나타낸 그림이고, 그림 6은 지형과 유한요소망이 합성된 그림을 나타낸다.

4.3 동수역학적 흐름해석

계산에 사용된 각 조건들은 절점 수 3,444개, 요소 수 3,146개, 경계절점의 수 615개를 적용하였다. 계산 시간 간격은 1.0 시간이고, Manning의 조도계수는 한 강분류구간에서는 균일하게 0.035를 적용하였으며(서울특별시, 1998), 중랑천은 0.031(의정부시, 1996), 왕숙천은 0.030(경기도, 1984), 탄천은 0.030(경기도, 1987)을 각각 지정하였다. 대상구역에 대한 초기유속은 0인 정적계산 조건으로부터 시작하였으며, 상류단



그림 5. 하도의 횡단면 자료입력(왕숙천합류부)

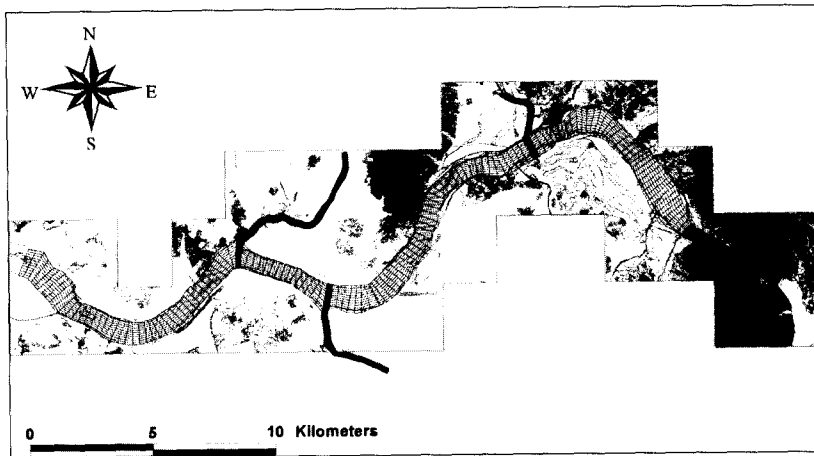


그림 6. ArcView를 이용한 합성 coverage 에서의 유한요소망

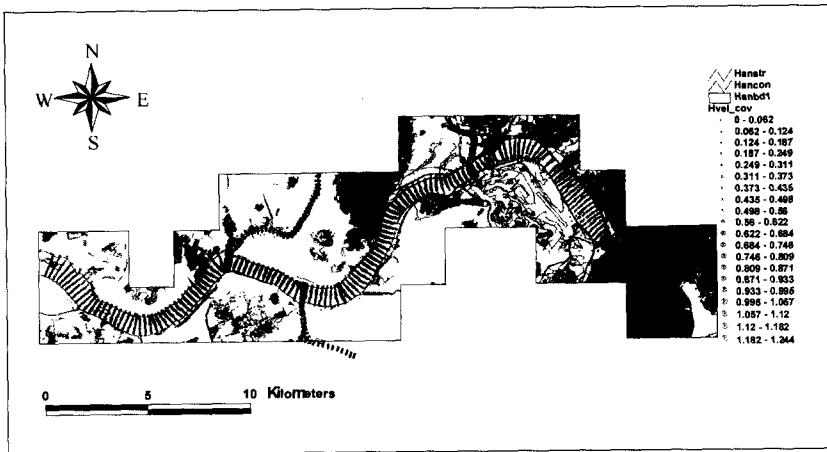


그림 7. ArcView를 이용한 합성 coverage에서의 유속분포도

경계조건은 절점번호 1~12에서 서울시 산정유량에 대한 x , y 방향의 유량경계조건을 사용하였으며, 각 지류자료인 왕숙천, 탄천, 중랑천의 유입부 절점번호인 1285~1296, 2257~2268, 3181~3192 에서는 한강본류의 물수지 분석(서울특별시, 1998, 1999)에 의한 지류유입량을 고려하였다. 하류단 경계조건은 절점번호 3433~3444의 인도교 지점에서 관측된 평균유속자료로부터 도출된 수위를 이용하여 하류로 진행하면서 발생하는 유량의 변화값을 경계조건으로 사용하였다.

본 연구에서 동수역학 흐름해석을 위해 개발된 프로그램은 Fortran-77에 바탕을 둔 Fortran 언어로 코드화되었고, 사용자의 편의에 따라 수정 및 변환이 용이하며, DOS 및 Windows에서의 수행이 가능하다. 그림 7은 합성한 coverage에 대해 유속벡터도를 coverage로 변화한 후 ArcView에 의해 합성한 그림으로서 실제유역에서 흐름의 변화를 좀 더 명확하게 판단할 수가 있었다. 그림에서 나타난 것과 같이 대상

유역의 만곡형태로 인해 하도의 외측으로 빠른 유속을 보이고 있으며, 또한 하도중간의 잠실수중보에서는 월류부의 영향으로 강남측의 유속이 활발히 나타나면서 다시 하도의 정상상태를 유지하고 있다. 따라서 본 모형은 한강유역의 지형에 의한 실제 흐름거동분포를 합리적으로 재현하고 있다는 것을 알 수 있었다.

본 모형을 이용한 하도에서의 흐름에 대한 모의수행은 한강유역의 만곡부를 크게 형성하고 있는 여러 곳에서의 유속분포를 적절하게 나타내고 있음을 알 수 있었다.

4.4 적용구간에서의 검증

적용된 수치모형에 대한 대상구간에서의 검증을 위해서 1998년 11월 3일의 실측자료를 이용하여 비교 및 검토를 수행하였다. 1998년 11월의 팔당댐의 방류량은 $134\sim 264\text{ m}^3/\text{s}$ 로서 비교적 갈수량에 가까운 조

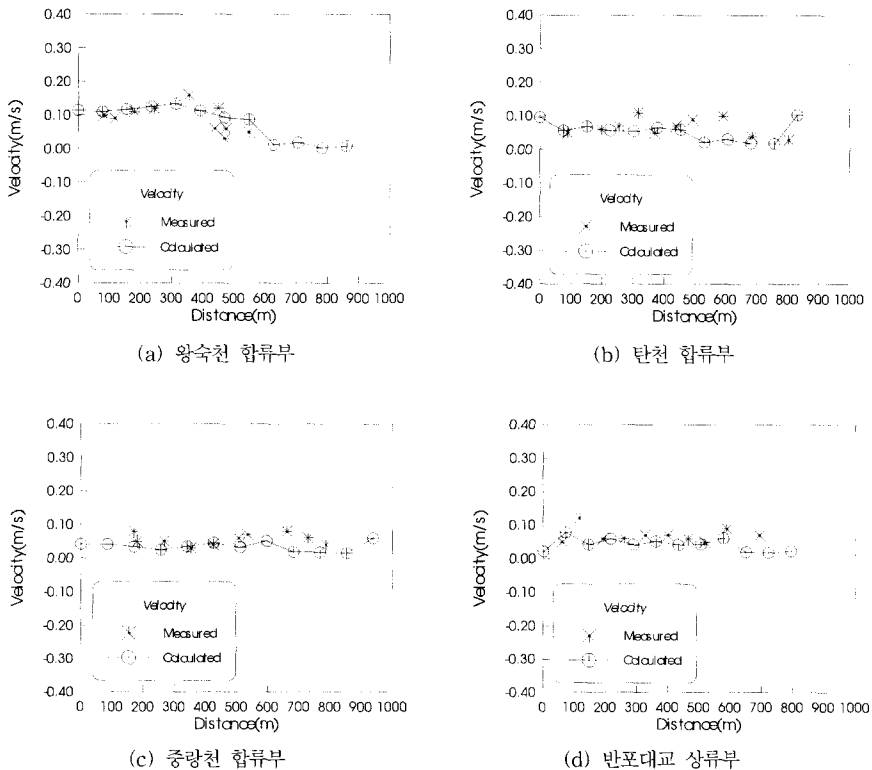


그림 8. 횡단별 관측값과 실측값의 유속비교

건이었으며, 수질측정당시의 유량은 $163 \text{ m}^3/\text{s}$ 로 관측이 되었으며 동수역학적 흐름해석수행에 필요한 유입 유량조건으로 사용하였다(한국수문조사연보, 1998).

본 연구의 대상유역인 한강 하류부에서의 유속을 측정하기 위하여 잠실 수중보를 중심으로 하류 3개 단면, 상류 1개 단면을 선정하였다. 선정된 단면은 왕숙천 합류 직하류 단면, 탄천 합류 직하류 단면, 중랑천 합류 직하류 단면, 반포대교 상류 단면이다. 각 단면에서 횡방향으로 약 10개 지점을 선정하여 수심과 유속을 측정하였다. 그림 8은 유속관측지점에서의 계산값과 실측값의 횡단별 비교를 나타낸 그림이다. 그림에서 나타난 바와 같이 각각의 관측지에서의 값과 본 모형을 적용한 값과의 차이는 정량적, 정성적인 면에서 만족하고 있는 것을 알 수가 있었다.

5. 결 론

본 연구에서는 하천에서의 2차원 동수역학적 흐름해석을 위해서 Petrov-Galerkin 기법에 의한 유한요소 모형을 개발하였으며, 실제하도에 적용함으로써 모형의 우수성을 확인할 수 있었다.

본 연구의 주요결과는 다음과 같다.

(1) 본 모형에서는 2차원 천수방정식의 동수역학적 해석을 위해서 불연속적 기중합수를 도입한 Petrov-Galerkin 유한요소모형을 개발하였다.

(2) 개발된 모형의 적용성을 검토하기 위하여 정진 동실험을 실시하였는데 시간에 따른 수면경사의 변화를 수행한 결과 정진동 실험에서 흐름방정식을 잘 해석하고 있음을 알 수가 있었다.

(3) 댐 파괴류에 본 모형을 적용한 결과 댐 파괴로 인해 주수로의 흐름이 제내지로 퍼져나가는 복잡한 흐름현상을 합리적으로 모의하였으며, 여러 가지의 한계적인 상황에서도 수렴성이 뛰어난 것을 알 수가 있었다.

(4) 본 연구에서 개발한 수치모형을 한강하류부에 적용하여 2차원 동수역학 해석을 실시하였다. 동수역학의 모의결과 흐름의 반곡부, 잠실수중보 및 지류 유입부에서 정량적 및 정성적으로 계산을 하였으며, 실측치와 비교하여 유속분포에 있어서 일치하는 값을 보여줌으로서 실제적인 흐름양상을 합리적으로 재현하고 있었다.

(5) 본 연구모형은 GIS와 연계를 실시함으로써 모형의 입력, 수행 및 출력과정을 구성하였으며, 실제지형 및 결과값을 GIS와 연계하여 시도함으로써 좀더 체계적이고 합리적인 결과를 제시할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 1998년도 한국과학재단의 특정기초연구(과제번호 98-0601-04-01-3)에 의한 연구결과로서 지원당국에 깊이 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 건설교통부 (1998, 1999). 한국수문조사연보.
 경기도 (1984). 왕숙천 하천정비기본계획.
 경기도 (1987). 탄천 하천정비기본계획.
 서울특별시 (1999). 한강조류발생 방지대책 및 수질 개선방안 연구.
 서울특별시 (1998). 한강생태계조사연구.
 윤용남, 박무종 (1994). "FESWMS-2DH에 의한 한강 하류부의 수리특성분석." 대한토목학회논문집, 제14권, 제4호, pp. 847~857.
 윤태훈 (1982). "유한요소법에 의한 항만에서의 토사 이동 추정모형." 대한토목학회논문집, 제2권, 제2호, pp. 19~28.
 의정부시 (1996). 중랑천수계 하천정비기본계획
 이길성, 강주환 (1989). "천수방정식의 유한차분특성." 대한토목학회논문집, 제9권, 제1호, pp. 41~52.
 이진희, 김정탁, 심명필 (1996). "개수로에서의 이차원 부정류 해석을 위한 유한체적법." 한국수자원학회 논문집, 제29권, 제5호, pp. 173~184.
 한건연, 김정옥 (1982). "수치모델에 의한 만내의 이차원 동수역학 해석." 한국수문학회논문집, 제15권, 제4호, pp. 45~53.
 한국건설기술연구원 (1995). "이차원 하천모형의 개발(1)." 한국건설기술연구원 연구보고서.
 Adeff, S.E. and Wang, S. (1985). "Hydrodynamic model for river flow in a microcomputer." *Hydraulics and Hydrology in Small Computer Age*, ASCE, pp. 1017~1023.
 Alam, M.M. and Bhuiyan, M.A. (1995). "Collocation finite element simulation of dam-break flows." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 121, No. 2, pp. 118~128.
 Almeida, R.J., and Franco, A.B. (1993). "Modeling of dam-break flow." *Proc. of the NATO Advanced Study Institute on*

- Computer Modeling of Free Surface and Pressurized Flows*, Pullman, WA, June 28 ~July 9.
- Fennema, R.J. (1987). "Numerical solution of two-dimensional transient free surface flows." Ph. D. Thesis, Washington State Univ., Pullman, WA.
- Gee, D.M. and MacArthur, R.C. (1981). "Evaluation and application of the generalized finite element hydrodynamic model, RMA-2." *Two-Dimensional Modeling*, (eds. MacArthur, R.C et al.), Hydrologic Engineering Center, pp. 97~113.
- Hicks, F.E. and Steffler, P.M. (1992). "Characteristic dissipative Galerkin scheme for open channel flow." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 118, No. 2, pp. 337~352.
- Katopodes, N.D. (1984). "A dissipative Galerkin scheme for open channel flow." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 110, No. 4, pp. 450~466.
- Katopodes, N.D. (1984). "Two dimensional surge and shocks in open channels." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 110, No. 6, pp. 794~812.
- 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*, (eds. Brebbia, C.A. et al.), Pentech Press, pp. 2.81~2.99.
- Lee, J.K. and Froehlich, D.C. (1986). "Review of literature on the finite element solution of the equations of two dimensional flow in the horizontal plane." *U. S. Geological Survey Circular 1009*, pp. 1~65.
- Maidment, D.R. et al. (1996). "Modeling of dissolved oxygen in houston ship channel using WASP5 and Geographic Information System." *CRWR Online Report 96-2*.
- Ruland, P. and Rouv, G. (1994). "Advantage of object oriented GIS for the irrigation of Hydraulic models." *Proceeding of the 1st International Conference on Hydroinformatics*, Delft, Netherlands, pp. 253~259.

(논문번호:00-070/접수:2000.11.20/심사완료:2001.01.19)