

## 개수로내의 점변 및 급변 부정류에 대한 유한요소해석 : II. 적용예

### Finite Element Analysis of Gradually and Rapidly Varied Unsteady Flow in Open Channel : II. Applications

한 건 연\* · 박 재 홍\*\* · 이 을 래\*\*\*

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

---

#### Abstract

Petrov-Galerkin finite element model for analyzing dynamic wave equation is applied to gradually and rapidly varied unsteady flow. The model is verified by applying to hydraulic jump, nonlinear disturbance propagation in frictionless horizontal channel and dam-break analysis. It shows stable and accurate results compared with analytical solutions for various cases. The model is applied to a surge propagation in a frictionless horizontal channel. Three-dimensional water surface profiles show that the computed result converges to the analytical one with sharp discontinuity. The model is also applied to the Taehwa River to analyze unsteady floodwave propagation. The computed results have good agreements with those of DWOPER model in terms of discharge and stage hydrographs.

---

#### 요 지

Dynamic wave식의 Petrov-Galerkin 방법에 의한 유한요소모형을 점변 및 급변 부정류의 경우에 적용하였다. 정상도수, 마찰없는 수평수로상에서의 비선형 표면동요의 전달 및 댐 파괴 등의 급변 부정류의 경우에서 그 해석결과는 기존기법에 비해 우수하게 나타났고 해석적인 해와도 잘 일치되고 있었다. 본 연구모형은 마찰없는 수평수로상의 surge의 전파에 대하여 적용하여 급격한 선단부를 해석적인 해의 경우와 같이 재현할 수 있어 그 적용성을 입증하였다. 점변 부정류의 경우에는 태화강 하류부에 대해서 적용되었는데 그 계산결과는 수위, 유량의 수문곡선과 그 종단형상에 있어 기존의 DWOPER 모형과 대등한 계산결과로 나타나 본 연구의 활용성을 입증하였다.

---

\* 경북대학교 공과대학 토목공학과 교수  
\*\* 경북대학교 공과대학 토목공학과 연구조교  
\*\*\* 경북대학교 공과대학 토목공학과 석사과정

## 1. 서 론

본 연구에서는 개수로에서의 점변 및 급변 부정류 해석을 위하여 dynamic wave식을 Petrov - Galerkin 유한요소기법에 의해 해석하고 이를 다양한 흐름조건에 대하여 적용하며 그 결과를 비교검토함으로써 유한요소기법의 홍수류에 대한 해석기법을 체계화시켜 발전시키고자 한다. 이를 위해서 정상도수, 비선형 표면동요의 전파, 댐 파괴의 급변부정류와 실제하천에서의 점변부정류의 경우에 적용하고 그 결과를 해석적인 해 및 기존의 해석기법과 비교하여 본 연구모형의 적용성을 입증하였다.

기존의 수치해석 기법중에서 유한요소법은 댐 파괴시의 홍수단파, 수공구조물 주변에서의 도수현상과 같은 불연속적인 흐름을 정확하게 해석할 수 있다. 또한 댐, 웨어, 수문등의 다양한 수공구조물의 영향을 효과적으로 도입할 수 있을 뿐만 아니라 하도망해석, 토사이동해석, 다차원 흐름해석 등으로 확장 발전시킬 수 있는 우수한 기법으로 판단된다.

유한요소해석의 실제 하도에 대한 적용연구의 예는 Kawahara 등(1982)이 시간항을 Taylor 전개를 통하여 양해적으로 쌍곡선형 미분방정식을 푸는 Taylor-Galerkin 방법을 도입하여 해석하였고, Samuels(1985)는 홍수터에서의 부정류 해석을 위해서 유한요소기법을 이용하였고, Adefa와 Wang (1985)은 하도망 해석을 위해서 감쇠형 유한요소기법을 이용하여 해석하였으며, DeLong (1985)은 사행하도의 흐름특성 해석을 위하여 collocation 기법을 적용하여 해석하였다. Katopodes(1987)는 가상제내지 상에서 제방파괴에 대한 영향을 검토하였고, Froehlich(1990)는 댐파괴로 인한 홍수파 해석을 위하여 Hermite Galerkin 모형을 이용하여 해석하였으며, Hicks와 Steffler(1992)는 특성선과 감쇠형 유한요소법에 의해서 상류-사류의 천이영역에서의 부정류 해석을 실시하였고, Alam과 Bhuiyan (1995)은 collocation기법에 의한 댐 파괴류 해석을 실시하였다.

국내에서 이 분야에 대한 연구는 윤태훈(1982)이 각각 항내 토사이동 예측을 고찰하기 위해서 2차원 유한요소기법을 적용하였다. 한건연 등(1993)은 2

차원 천수방정식에 대하여 감쇠형 유한요소기법에 의하여 해석하였으며, 윤용남과 박무중 (1994)은 한강 하류부에 FESWMS모형을 적용하여 해석한 예는 있으나, 개수로에서 dynamic wave 식의 유한요소 해석에 의한 모형개발 및 점변, 급변 부정류 등의 다양한 흐름조건에 대한 적용성 검토 등의 실용적인 연구는 아직까지 매우 미흡한 실정이다.

## 2. Petrov-Galerkin 유한요소모형

유한요소법에서 수치해의 정확도는 기저(보간)함수와 시행함수의 선정에 달려있다. 기저함수는 어떻게 변수가 표현되는지를 결정하며 시행함수는 미분방정식이 어떻게 실행되는지를 결정한다. Bubnov-Galerkin 방법에서는 시행함수는 기저함수와 동일하나 이 방법은 이송항이 지배하는 흐름에 대해서는 어려움을 겪게 된다. 기본적인 문제는 시행함수(偶함수)가 절점과 절점간에 있는 진동의 존재를 탐지하지 못한다는 것인데, 이 진동해는 기함수(비대칭함수)인 공간미분치를 가지고 있기 때문이다.

이 문제를 해결하기 위한 하나의 방법으로는 혼합 보간방법(mixed interpolation)을 사용하는 것인데 이는 천수방정식에 대해서 수심을 유속에 비해서 낮은 차수의 기저함수를 사용하는 것이다. 전형적으로 수심은 기본상수로서 유속은 선형함수로 사용하거나 수심을 선형함수로 유속은 2차 함수를 적용하는 것이다. 이 방법은 절점과 절점간의 진동으로부터 수심을 효과적으로 그 영향을 흡수할 수 있으나 그 흐름 해석 결과에 큰 변화가 없는 경우에는 유속의 진동을 감쇠하기 위해서 추가적으로 인위적인 점성항에 의존하여야 하였다(Pinder와 Gray, 1977; Lapidus와 Pinder, 1982).

또 다른 하나의 방법은 시행함수를 변형하여 偶함수뿐만 아니라 奇함수를 포함하게 됨으로써 이들 진동현상이 적정한 가중조건하에서 제거될 수 있는 것이다. 이 기법은 시행함수가 기저함수와 다른 해석기법으로서 Petrov-Galerkin방법이라고 하는데 본 연구에서는 이 기법에 의해서 해석을 실시하였다.

하천에서 흐름해석을 위한 dynamic wave 식은 다음과 같은 매트릭스 형태로 기술될 수 있다.

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + A \frac{\partial Q}{\partial x} + D = 0 \quad (1)$$

여기서

$$Q = \begin{Bmatrix} h \\ p \end{Bmatrix} \quad (2)$$

$$A = \begin{Bmatrix} 0 & 1 \\ gh - \frac{p^2}{h^2} & \frac{2p}{h} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 & 1 \\ c^2 - u^2 & 2u \end{Bmatrix} \quad (3)$$

$$D = \begin{Bmatrix} i \\ gh \frac{\partial z_0}{\partial x} + g \frac{n^2 p^2}{h^{7/3}} - \frac{pi}{2} \end{Bmatrix} \quad (4)$$

$$p = uh \quad (5)$$

여기서  $h$ 는 수심,  $u$ 는 유속,  $z_0$ 는 하상고,  $n$ 는 Manning의 계수,  $i$ 는 측방유출입량을 나타낸다.

Petrov-Galerkin 기법은 시행함수로서 기저함수를 선택하지 않고  $C^{-1}$ 연속조건을 가지고 상류부에서 가중된 효과 (upstream weighting)를 가진 함수를 선택하였다.

$$v_i = f_i + g_i = f_i + \omega \left[ A^T \frac{df_i}{dx} \right] \quad (6)$$

여기서  $f_i$ 는 선형기저함수이고  $g_i$ 는 감쇠항을 처리하기 위한 함수이며,  $\omega$ 는 감쇠계수이다.

지배방정식을 유한요소법으로 해석하기 위해서 식 (6)의 시행함수를 이용하여 식 (1)을 정리하면 식 (7)을 얻게된다.

$$\sum_{n=1}^{NE} \int_0^L v_i \left( \frac{\partial Q}{\partial t} + A \frac{\partial Q}{\partial x} + D \right) dx = 0 \quad (7)$$

여기서 NE는 요소의 수이다. 식 (7)은 비선형 연립 방정식이므로 Newton-Raphson 기법에 의해 그 해를 구할 수 있다. 각 요소에 대한 방정식이 전체 매트릭스 형태로 구성되면 이 식은 Frontal 기법에 의해 효율적으로 그 해를 구할 수 있었다.

Frontal 기법은 전체 계수 매트릭스가 소거과정울

시작하기 위해서 완전한 매트릭스가 형성하지 않아도 된다는 개념하에서 만들어진 Gauss 소거법의 변형된 기법이다. 대신에 이 기법은 기억용량에 저장된 비교적 작은 부 매트릭스를 사용한다. 일단 변수가 소거되면 방정식들의 계수는 기억장치에 저장되고 후 방치환에 의해 모든 계수가 소거될 때까지 남아 있게 된다. 이 방법을 이용하면 커다란 매트릭스의 해석에 있어서도 외부기억장치를 이용해서 제한된 중앙기억 용량만으로도 계산이 가능하다. Frontal 기법은 사용자에 의해서 할당된 기억용량이 채워질 때까지 각 요소의 유동매트릭스를 조합하는 것으로 시작된다. 그리고 계속되는 조합과정에서 더 이상의 영향을 받지 않는 완전히 조합된 행과 열에 대해서 pivotal search가 수행된다. 충분한 계수가 소거되고 외부기억장치에 놓여지면 다음 요소의 유동매트릭스가 조합되는 순으로 진행된다.

Frontal 기법에 대해서 각 방정식은 band 기법에서 보다 앞선 단계에서 소거될 수 있는데 이는 우수한 계산과정에 기인한 것이다. Frontal 기법은 절점 번호에 의하기 보다는 요소에 의해서 지시하는 대로 방정식을 보관하기 때문에 '0'이 아닌 요소가 증가되는 것을 최소화할 수 있다. 그러나 각 요소에 대해서는 Frontal width와 기억요구량을 최소화하기 위해서 최적의 순서에 의해 절점번호가 부여되어야 한다 (Irons, 1970).

본 연구에서는 global 매트릭스 형성시 발생하는 이산 매트릭스를 처리할 때 Frontal 기법의 일종인 non-pivoting과 all-core routine을 적용함으로써 저장요량을 90% 이상 감소시킬 수 있었고 계산시간도 극소화를 이룰 수 있었다.

### 3. 적용례

본 연구모형의 적용성을 검증하기 위해서 객관적이고 비판적인 모의수행이 엄격한 수치실험을 통해서 수행되었다. 급변 부정류에 대한 수치실험은 정상도수, 비선형 표면동요의 경우 및 댐 파괴 등에 대하여 적용하였고 계산결과는 해석적인 해와 기존의 기법에 의한 결과 및 해의 안정도, 수렴성, 정확도 등에 대해서 검토하였다.

### 3.1 정상도수해석

본 수치실험은 정상 도수의 경우에 대하여 적용되었는데 마찰이 없는 직사각형 수평수로에서 사류에서 상류로의 천이영역을 포함한다. 해석을 위해서 0.05 m간격을 가지고 있는 30개의 요소가 사용되었다. 유량은 초기에 모든 절점에서  $5 \text{ m}^3/\text{sec}$ 가 주어졌고, 주어진 영역에서의 1/2 인 상류역에서 초기의 사류 수심은 1.2 m, 하류역에서는 상류수심인 1.546 m가 주어졌다. 주어진 경계 조건은 상류단에서 수심과 유량조건, 하류단에서는 수심조건이 부여되었다.

Preissmann, Bubnov-Galerkin 및 Petrov-Galerkin 기법등 3가지 방법이 적용되었다. 이 수치실험은 상류와 사류의 조합 때문에 Preissmann 기법에서는 그 계산이 발산되었다. 유한요소법에 있어서 수치실험은  $\Delta t = 0.0072$ 초에서  $\theta = 0.5$ 인 반음해 조건하에서 수행되었으며 반복 계산과정에서 허용한계는  $10^{-5}$  m의 조건이 사용되었다.

그림 1과 2는 20 timestep 후에 Bubnov-Galerkin과 Petrov-Galerkin 기법에 대한 수심과 유량해석 결과이고 그림 3과 4는 200 timestep 후에 Petrov-Galerkin 기법에 의한 수심과 유량해석 결과이다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 20 timestep 후의 Petrov-Galerkin의 해석결과는 해석 해의 결과와 비교하여 수위와 유량에 있어 작은 편차를 가지고 잘 일치되고 있었으나 Bubnov-Galerkin기법의 결과는 이 기법의 비감쇠 특성으로 인하여 수심 및 유량에 있어서 커다란 진동이 발생하고 있었다. 200 timestep 후의 결과에 있어서도 Petrov-Galerkin의 해석결과는 큰 변화가 관찰되지 않았으나 Bubnov-Galerkin기법의 결과는 과도한 수심 및 유량 진동으로 인하여 해는 발산하였다.

Petrov-Galerkin 기법은 선형 안정도 해석으로부터 기대된 바와 같이  $2\Delta x$  파를 감쇠할 수 있는 능력을 가지고 있으므로 (한건연 등, 1996) 그 해는 Bubnov-Galerkin기법보다 주목할 만하게 좀 더 안정되고 수심과 유량에서 무시할 수 있는 동요를 가지고 안정되고 정확한 도수를 계산하였다.

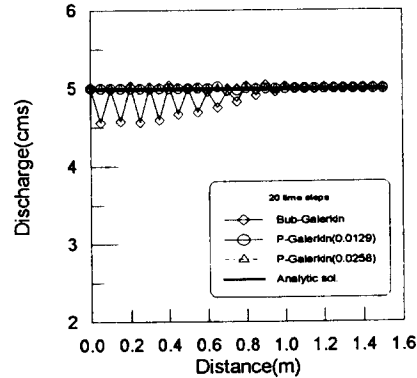


그림 1. 정상도수 해석결과의 비교 (유량, 20 timestep 후)

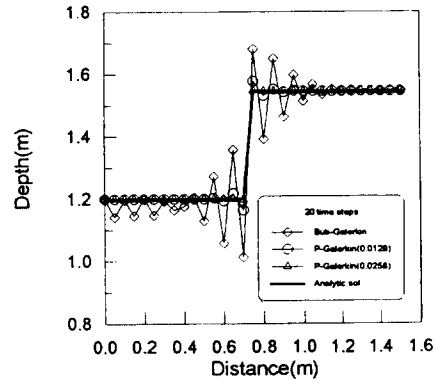


그림 2. 정상도수 해석결과의 비교 (수심, 20 timestep 후)

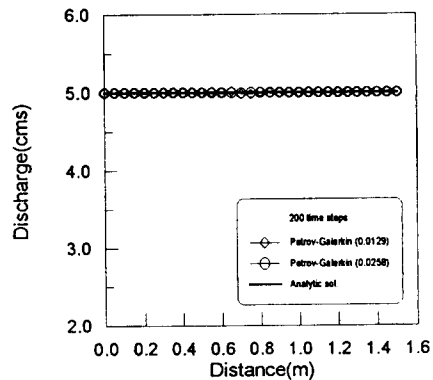


그림 3. 정상도수 해석결과의 비교 (유량, 200 timestep 후)

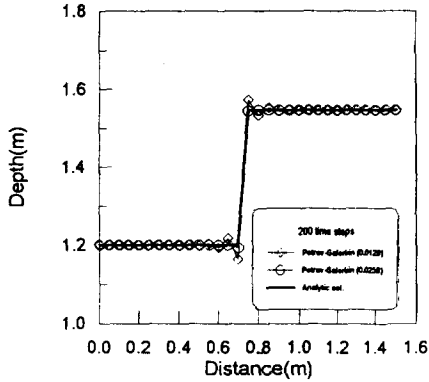


그림 4. 정상도수 해석결과와의 비교 (수심, 200 timestep 후)

### 3.2 비선형 표면동요의 해석

본 수치실험의 목적은 마찰과 경사항을 고려하지 않음으로써 정확하게 비선형의 표면동요가 전파되는지의 능력을 조사하는데 있었다. 대상구간은 마찰이 없는 직사각형 수평수로 상에서 500 m를 100개 요소로 구분하여 각 요소는 5 m의 길이를 가지도록 구성하였다. 비선형 문제에 대한 정확한 해의 계산을 위해서 초기조건은 두 개의 동일한 동요인 하나의 진행파 그리고 하나의 역행파로 지정되어 있다. 초기의 수심변동 및 유량조건은 그림 5와 6에 주어졌다. 초기 수심은 첨두부에서 4.7 m였고 나머지 구간은 3.5 m로 주어졌으며 초기유량은 첨두부에서  $\pm 8 \text{ m}^3/\text{sec}$ 였고 나머지 구간은 0으로 부여되었다. Petrov-Galerkin 기법에 대한 결과는 0.5와 1.0의 Cr에 대하여 각각 그림 7과 8에 도시하였다. 그림에서 보는 바와 같이 두 개의 동요가  $t=17.3$ 초에서 제시되었는데, 이 경우 첨두점인 수심 4.7 m는 각각 55 m, 435 m에서 위치해 있었다.

특성선 방법에 의한 해석적인 해 (Hicks와 Steffler, 1994)와 비교하여 0.5 및 1.0의 Cr에 대한 경우 모두가 시간가중치 0.5 일 때 첨두값의 재현은 정확하게 실시하고 있었으나 끝부분에서 약간의 동요가 발생되고 있었고 Cr가 1.0일 때 그 동요는 감소하고 있었다. 시간가중치가 1.0일 때는 끝부분의 동요는 발생되지 않았으나 첨두값의 확산이 과도하게 나타났다. 이와 같은 극단적인 경우에서의 해석결과는 적절한 감쇠계수, Cr 및 시간가중치를 도입하여 해석해와 가깝게 재현할 수 있었다.

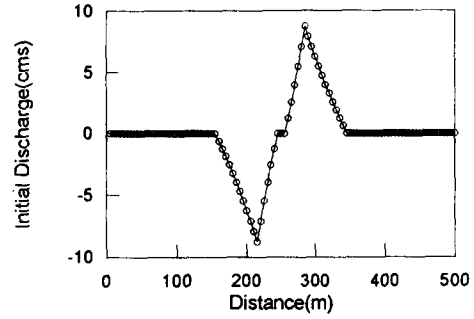


그림 5. 비선형 표면동요의 해석을 위한 초기유량

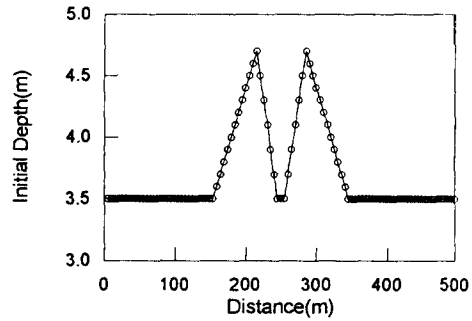


그림 6. 비선형 표면동요의 해석을 위한 초기수심

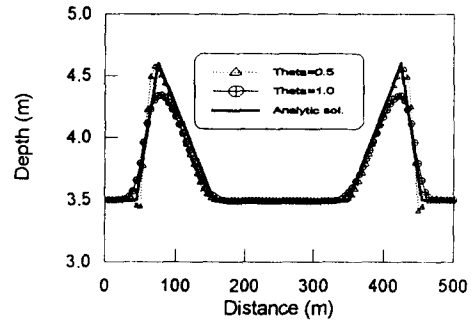


그림 7. 비선형 표면동요의 전달해석 (Cr=0.5)

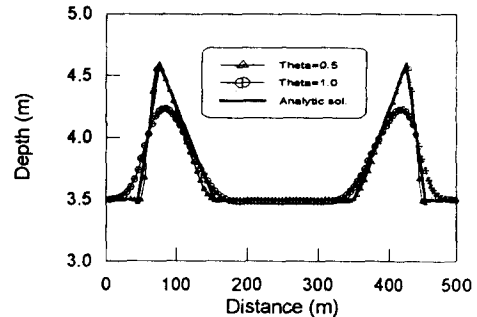


그림 8. 비선형 표면동요의 전달해석 (Cr=1.0)

### 3.3 Surge 전파해석

마찰없는 수평수로 상에서 수공구조물의 급격한 개방이나 폐쇄로부터 나타나는 surge는 유한요소기법의 계산능력을 엄격하게 평가할 수 있는 하나의 예가 될 수 있다. 이 경우에 0.03 m간격을 가지고 있는 48개의 요소가 해석에서 사용되었다. 초기수심은 1 m, 유량은 0 m<sup>3</sup>/sec/m으로 하였다. 시간 t=0 sec에서 유량이 1 m<sup>3</sup>/sec/m로 증가하여 그 결과로 surge가 일정한 속도로 정수구간을 통해서 전파하였다. 주어진 경계 조건은 상류단에서 유량이, 하류단에서는 수심이 부여되었다.

그림 9, 10은 시간 및 거리에 따른 surge의 3차원적인 형상을 도시하고 있다. 시간 가중치의 영향에 따라 surge 선단부의 감쇠가 뚜렷하였으며 시간가중치가 1.0일 경우에는 과도한 확산의 영향으로 불연속

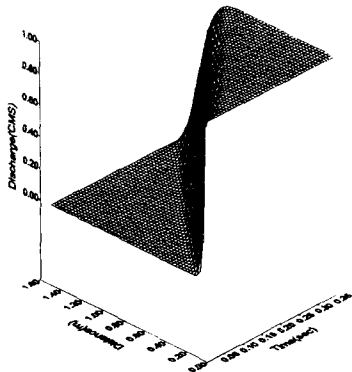


그림 9. Surge 전파의 3차원 형상 (시간가중치 = 1.0)

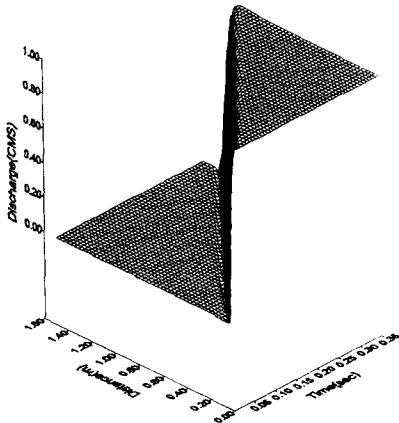


그림 10. Surge 전파의 3차원 형상 (시간가중치 = 0.6)

구간이 10 여개 절점에 걸쳐 나타나 2개 절점에서 나타나는 최적의 경우를 잘 재현하지 못하였다. 그러나 시간가중치가 0.5 일 경우에 surge는 2개 절점에서 잘 보존되고는 있었으나 직상하류부에서 약간의 동요가 발생하였다. 그림 10에서와 같이 감쇠계수를 0.0258로 취하고 시간가중치가 0.6일 경우에 surge는 실제의 현상을 급격한 종단형상에 있어서 잘 재현하고 있는 것으로 판단되었다.

### 3.4 댐 파괴류 해석

Fennema와 Chaudhry(1987)로부터 재현된 이 수치실험은 대상구간은 마찰이 없는 직사각형 수평수로 상에서 댐의 순간적인 파괴를 모의수행하는 경우이다. 대상구간은 2000 m를 80개 요소로 구분하여 각 요소는 25 m의 길이를 가지도록 구성하였다.

초기유량은 모든 절점에서 0 m<sup>3</sup>/sec으로 설정하였고 초기수위는 영역의 상류단의 1/2을 통해서 초기수심  $H_0$ 는 10 m로 하고 하류단의 1/2 영역에 대해서  $H_1$ 은 5 m의 수심( $H_1 / H_0 = 0.5$ ) 조건하에서 모의수행 되었고 경계 조건은 지정된 양끝단에서 유량이 0으로 주어졌다.

그림 11은 댐 파괴류 해석을 위한 초기수심 자료를 나타낸다. 시간 가중치는 0.5, 0.6과 1.0의 조건하에서 실시되었고 계산시간간격은 1.25 초로 하였는데 이것은 0.23의 Cr에 대응하는 조건이었다. 그림 12와 13은 30초 후와 60초 후에서 수면의 종단형상을 나타내고 있다.

그림에서 보는 바와 같이 Petrov-Galerkin 기법에 의한 결과는 시간가중치 0.5에 대해서 비록 진행파의 선단부와 역행파의 후단부에서 약간의 동요가 발생되기는 하나 특성선법에 의한 해석해(Fennema와 Chaudhry, 1987)와 수면형상이 일치되고 있었다. 이 경우에도 시간가중치 1.0일 경우에는 진행파의 선단부에서의 확산이 과도하게 나타났으나 시간가중치 0.6일 경우는 진행파의 선단부와 역행파의 후단부에서 동요가 거의 제거된 상태에서 해석 해와 잘 일치되고 있었다. 특히 해석결과 선형안정도 해석에서 나타난 바와 같이 역행파에 대해서 위상정확도의 유지와 첨두값의 보존이 더욱 양호한 것으로 나타났다.

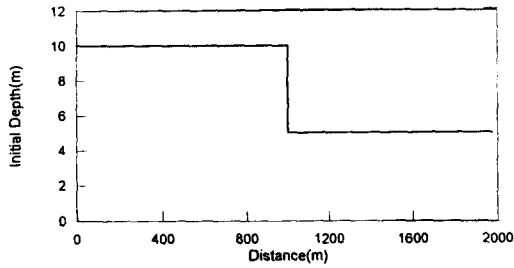


그림 11. 댐 파괴류 해석을 위한 초기수위 조건

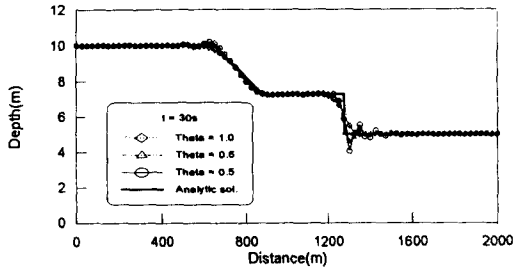


그림 12. 댐 파괴류 해석결과 (t=30초 후)

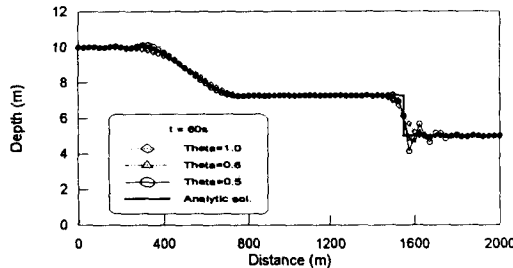


그림 13. 댐 파괴류 해석결과 (t=60초 후)

이러한 댐 파괴 모형화는 급격한 수위변동 상태에서 진행과 역행 교란 증가를 조합함으로써 다양한 방법들에 대한 수치해석 결과를 제공할 수 있었다. 본 연구결과에서 보는 바와 같이 Petrov-Galerkin 기법은 댐 파괴류 등의 급변부정류 해석에 있어서 매우 가능성 있는 큰 기법으로 나타났다. 댐 파괴의 문제에 대해서는 좀 더 정교한 수치실험이 다양한  $H_1 / H_0$  비, 적절한 감쇠계수의 도입, Cr 및 시간가중치 등을 고려하여 해석되어야 할 것으로 판단되었다.

### 3.5 점변 부정류의 해석

본 연구모형을 하도단면의 변화가 비교적 완만한 태화강 하류부에 적용하였다. 이 구간에서는 상류부

에서 설계 홍수수문곡선이 유입되고 있는 것으로 고려하였고, 하류부에서는 조석의 영향에 의해서 고조위를 유지하고 있는 경우에 대하여 해석을 실시하였다. 그림 14에서 볼 수 있는 바와 같이 태화강 하류부 5.0 km에 대해서 29개의 절점을 취하였는데 평균적인 하도경사는 0.00037이었고, Manning의 조도계수는 태화강 하도정비 기본계획(1987)을 참고하여 0.023으로 설정하였다. 또한 평균적인 계산 거리구간은 178 m, 계산시간간격은 0.5 시간으로 하였다.

본 연구모형에 의한 계산결과는 Preissmann 기법을 사용하는 DWOPER 모형 (Fread, 1985)에 의한 계산치와 비교함으로써 본 계산결과의 적용성을 입증하고자 하였다.



그림 14. 태화강 하류부 해석구간도

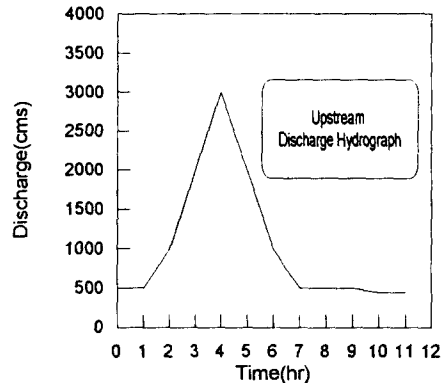


그림 15. 상류단의 홍수수문곡선

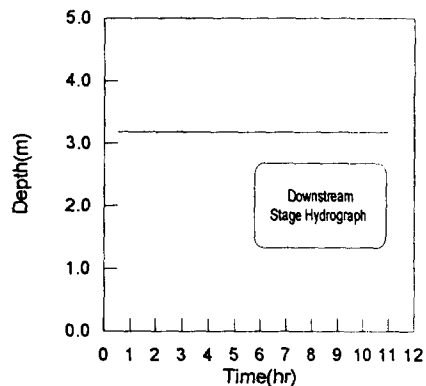


그림 16. 하류단의 조위곡선

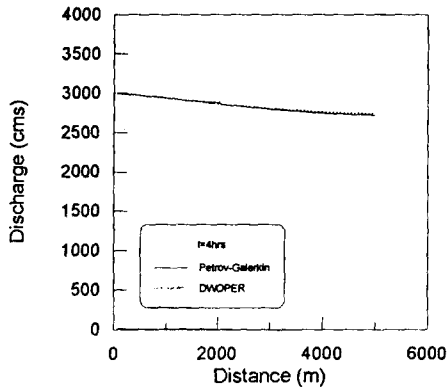


그림 17. 유량의 종단형상 (t=4시간)

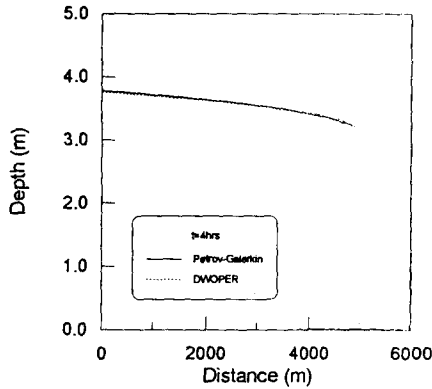


그림 18. 수위의 종단형상 (t=4시간)

그림 15는 상류단의 설계 유량수문곡선으로서 첨두유량은 3000 m<sup>3</sup>/sec 였고, 그림 16은 하류단의 고조위 조건으로서 수심은 3.18 m 였다.

그림 17과 18는 t=4시간에서의 수위와 유량의 종단형상을 나타낸 것으로서 Petrov-Galerkin 모형에 의한 계산결과는 DWOPER 모형에 의한 계산결과와 잘 일치되고 있었다.

그림 19에서 그림 22은 주요지점인 no. 10, no. 20 에서의 Petrov-Galerkin 모형에 의해서 계산된 유량과 수위 수문곡선을 도시한 것으로서 DWOPER 모형에 의한 계산결과와 비교하면 계산오차는 1-2 % 이내의 범위에서 잘 일치되고 있었다. Petrov-Galerkin 기법에 의한 계산결과는 기존의 DWOPER 모형에 의한 계산치와 비교하여 주요지점에서의 유량과 수위 수문곡선 및 수위, 유량의 종단형상에 있어 대등한 결과를 나타내며 일치되고 있어 본 연구 모형

의 활용성을 입증하였다.

앞으로 댐, 웨어, 수문등의 다양한 수공구조물의 영향을 효과적으로 도입할 수 있을 뿐만 아니라 홍수범람의 문제를 포함한 1-2차원 복합해석 등으로 확장 발전시키면 하천의 치수관리에 크게 기여할 수 있을 것으로 판단되었다.

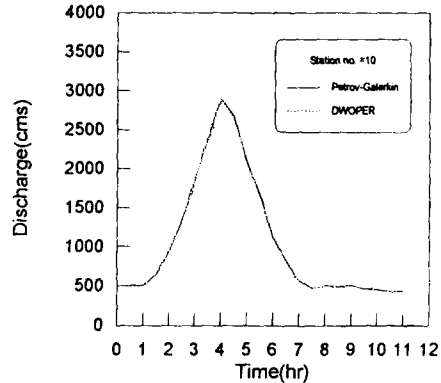


그림 19. 유량수문곡선의 비교 (no. 10지점)

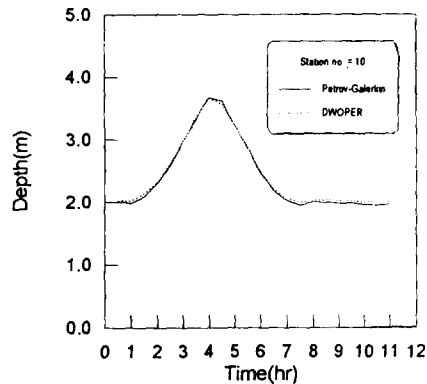


그림 20. 수위수문곡선의 비교 (no. 10지점)

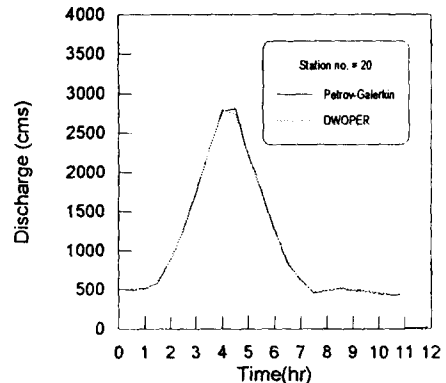


그림 21. 유량수문곡선의 비교 (no. 20지점)



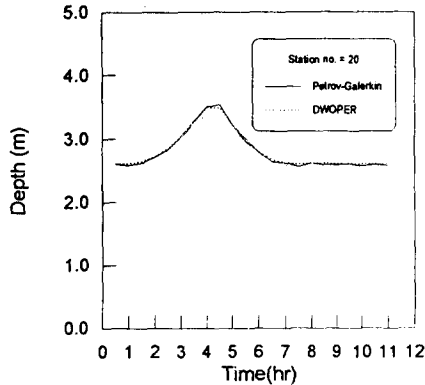


그림 22. 수위수문곡선의 비교 (no. 20지점)

#### 4. 결 론

Dynamic wave식의 Petrov-Galerkin 기법에 의한 유한요소모형을 정상도수, 비선형 표면동요의 전파 및 댐 파괴 등에 적용한 결과는 Bubnov-Galerkin 기법에 비해서 해의 안정도, 수렴성 등에 있어서 크게 개선된 것으로 나타났으며 해석적인 해와도 비교적 잘 일치되고 있어 본 연구모형의 급변부정류에 대한 적용성을 확인할 수 있었다. 본 연구모형은 마찰없는 수평수로상의 surge의 전파에 대하여 적용하여 급격한 선단부를 해석적인 해의 경우와 같이 재현할 수 있어 그 적용성을 입증하였다. 특히 Petrov-Galerkin 기법은  $2\Delta x$  과를 선택적으로 감소시킬 수 있는 능력을 가지고 있으므로 선단부가 급격하게 변화하는 경우에도 효율적인 계산을 수행할 수 있었다.

본 연구 모형은 태화강 하류부의 점변 부정류 해석의 경우에 대하여 적용하였다. Petrov-Galerkin 기법에 의한 계산결과는 기존의 DWOPER 모형에 의한 계산치와 비교하여 주요지점에서의 유량과 수위 수문곡선 및 수위, 유량의 종단형상에 있어 대등한 결과를 나타내며 일치되고 있어 본 연구 모형의 활용성을 입증하였다.

#### 감사의 글

본 연구는 1995년도 한국과학재단 연구비 지원 (과제번호 : KOSEF 951-1201-008-1)에 의한 결

과로서 지원당국에 깊이 감사 드립니다.

#### 참 고 문 헌

- 윤용남, 박무중 (1994). "FESWMS-2DH에 의한 한강 하류부의 수리특성분석." 대한토목학회논문집, 제 14권, 제4호, pp. 847-857.
- 윤태훈 (1982). "유한요소법에 의한 항만에서의 토사이동 추정모형." 대한토목학회논문집, 제2권, 제2호, pp. 19-28.
- 태화강 하천정비 기본계획. (1987). 건설부
- 한건연, 이종태, 김홍태 (1993). "하천에서의 동수역학적 유동해석을 위한 유한요소모형의 개발." 한국수문학회지, 제26권, 제3호, pp. 87-101.
- 한건연, 박재홍, 이종태. (1996). "개수로내의 점변 및 급변 부정류에 대한 유한요소해석: I. 이론 및 수치안정성 해석." 제26권, 제6호, pp. 167-178.
- Adeff, S.E., and Wang, S.S.Y. (1985). "Hydro-dynamic 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." *J. of Hyd. Eng.*, ASCE, Vol. 121, No. 2, pp. 118-128.
- DeLong, L.L. (1985). "Extension of the unsteady one-dimensional open channel flow equations for flow simulation in meandering channel with floodplains." in Selected papers in the hydrologic sciences, *Water-Supply Paper 2220*, USGS, pp. 101-105.
- Fennema, R.J., and Chaudhry, M.H. (1987). "Simulation of one-dimensional dam-break flows." *J. of Hyd. Res.*, Vol. 25, No. 1, pp. 41-51.
- Fread, D.L. (1985). "Channel routing." *Hydrological forecasting*, M.G. Anderson and T.P. Burt, eds., John Wiley and Sons, pp. 437-503.
- Froehlich, D.C. (1990). "Hermite-Galerkin model for dam-break floods." *Proc. of 1990 Nat. Conf. on Hyd. Eng.*, ASCE, pp. 557-562.
- Hicks, F.E., and Steffler, P.M. (1992). "Characteristic dissipative Galerkin scheme for open channel flow." *J. of Hyd. Eng.*, ASCE, Vol. 118, No.

- 2, pp. 337–352.
- Hicks, F.E., and Steffler, P.M. (1994). “Comparison of finite element methods for the St. Venant equation.” *Int. J. for Num. Meth. in Fluids*, Vol. 20, pp. 99–113.
- Irons, B.M. (1970). “A frontal solution program for finite element analysis.” *Int. J. for Num. Meth. in Eng.*, Vol. 2, pp. 5–32.
- Katopodes, N.D. (1987). “Analysis of transient flow through broken levees.” *Turbulence measurement and flow modeling*, C.J. Chen, L.D. Chen, and F. M. Holly, Jr., eds., Hemisphere Publishing Corp., Washington, D. C., pp. 301–310.
- Kawahara, M., Hirano, H., Tsubota, K., and Iwagaki, K., (1982). “Selective lumping finite element method for shallow water flow.” *Int. J. for Num. Meth. Fluids*, Vol. 2, pp. 89–112.
- Lapidus, L., and Pinder, G.F. (1982). *Numerical solution of partial differential equations in science and engineering*. John Wiley and Sons.
- Pinder, G.F., and Gray, W.G. (1977). *Finite element simulation in surface and subsurface hydrology*. Academic Press.
- Samuels, P.G. (1985). “Modeling of river and floodplain flow using the finite element method.” *Research Report No. SR 61*, Hydraulics Research Ltd., Wallingford, UK.

〈접수 : 1996년 4월 1일〉