

EFDC 모형을 이용한 댐 붕괴류 수치모의 및 매개변수 민감도 분석

장철 · 송창근*

인천대학교 안전공학과 · *인천대학교 소방방재연구센터
(2016. 6. 27. 접수 / 2016. 8. 12. 수정 / 2016. 8. 16. 채택)

Numerical Simulation of Dam Break Flow using EFDC Model and Parameter Sensitivity Analysis

Chul Jang · Chang Geun Song**

Department of Safety Engineering, Incheon National University

*Fire Disaster Prevention Research Center, Incheon National University

(Received June 27, 2016 / Revised August 12, 2016 / Accepted August 16, 2016)

Abstract : In this study, a series of numerical simulation of dam break flow was conducted using EFDC model, and input conditions including cell size, time step, and turbulent eddy viscosity were considered to analyze parameter sensitivity. In case of coarse mesh layout, the propagated length of the shock wave front was Δx longer than that of other mesh layouts, and the velocity results showed jagged edge, which can be cured by applying fine grid mesh. Turbulent eddy viscosity influenced magnitude of the maximum velocity passing through gate up to 20% and the cell Peclet number less than 2.0 ensured no numerical oscillations.

Key Words : EFDC, dam break flow, cell size, time step, courant number, peclet number, parameter sensitivity analysis

1. 서론

최근 가능최대강수량(PMP)이나 설계빈도를 초월하는 이상홍수에 의해 댐이 붕괴되는 비상상황에 대비하기 위한 치수능력 증대사업이 활발하게 이루어지고 있다. 댐붕괴 사고에 의해 발생한 홍수파는 단시간 내에 댐이나 저수지 하류부에 위치해 있는 농가, 농경지 및 각종 시설물에 치명적인 피해를 끼치게 되며, 특히 댐 하류부에 주요 공공 시설물이 위치해 있는 경우 극한적인 강우조건에 의한 댐붕괴 등의 긴급상황에 대비한 홍수파 해석을 사전에 수행하여 피해를 최소화 할 수 있는 대책이 강구되어야 한다¹⁾.

댐붕괴류 수치모의는 초기조건으로 댐 상류부와 하류부에 불연속적인 수위를 부여하여 단파(bore)의 전파를 예측하는 것이다. 이 과정에서 발생한 충격파는 계산 격자간격과 시간 간격, 난류 점성계수 등에 따라 포착(capturing)되는 정도가 달라지므로 매개변수에 관한 민감도 분석이 선행되어야 수리구조물의 설계단계에서 수치모의 결과를 활용할 때에 정확한 해석이 이루어

어질 수 있다.

본 연구에서는 모형의 확장성이 우수하고 다양한 계산모듈을 제공하여 국내외에서 널리 활용되고 있는 EFDC 모형을 이용하여 댐붕괴류를 수치모의하였다. 또한 모의 결과에 영향을 미치는 격자간격, 시간간격 및 난류 점성계수에 대한 수치해의 안정조건을 제시하고, 이에 따른 매개변수의 민감도를 분석하였다.

2. EFDC 모형 소개

2.1 모형 소개

EFDC(Environmental Fluid Dynamics Code)는 미국환경보호국(US EPA)의 지원을 받아 버지니아 해양과학연구소(VIMS)에서 Hamrick박사 연구팀에 의해 1992년 처음 개발되었다. 다양한 분야에 적용 가능하며 하천, 호소, 연해에 대해서 3차원 유동, 수온분포, 염도분포, 염료확산, 치어이동, 유사이동 및 퇴적변화, 수질변화 등을 수치 모의할 수 있다. 3차원 유동 방정식을 해석하며 연직 방향으로는 정수압 방정식을 이용한다. 2개

* Corresponding Author : Chang Geun Song, Tel : +82-32-835-8291, E-mail : baybreeze119@inu.ac.kr

Fire Disaster Prevention Research Center & Department of Safety Engineering, Incheon National University, 119, Academy-ro, Yeosu-gu, Incheon 22012, Korea

의 난류 이동 방정식 해결을 위하여 Mellor-Yamada 난류 모형을 사용한다. 외부에서 정한 고주파 표면 중력과 장을 사용하여 파와 조류 경계층 상호작용을 구하기 위한 바닥 경계층 모델도 사용 가능하다. 기본 staggered 격자 또는 C-grid 격자의 공간 차분법을 사용한다. Couple된 이동 방정식으로 난류 에너지, 난류 길이, 염분 및 온도 모의가 가능하다. 또한 보존 방정식을 이용하여 수심이 얇은 지역에서의 마름 영역 모의가 가능하다. EFDC의 결과를 이용하여 수질 모델인 WASP과 연동이 가능하다.

2.2 입출력 구조 및 구동 과정

EFDC 모형을 구동하기 위해서는 Fig. 1과 같이 EFDC 설치 시 제공되는 기본입력파일(cell.inp 등 16개의 inp 파일)이 모의하려는 디렉토리 내에 위치해 있어야 한다. 지형정보 파일로는 Grid 정보를 포함한 topographic information file (파일명.xyz)과 셀을 구성하는 4개의 corner grid에 관한 정보를 포함한 corner point file (파일명.pas)이 있다.

Fig. 2는 EFDC 모형을 구동하기 위한 모의절차를 나타낸다. 격자정보를 생성한 후 초기조건과 경계조건을

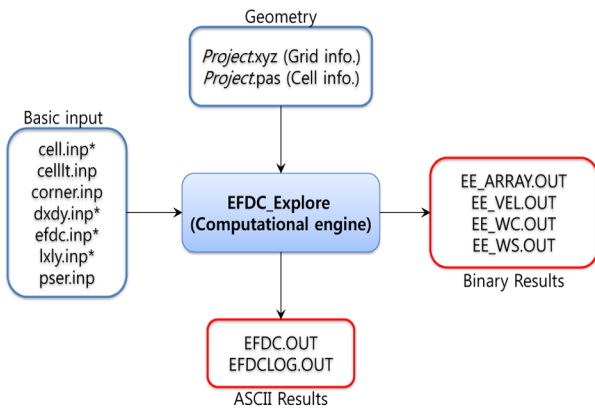


Fig. 1. I/O structure of EFDC model.

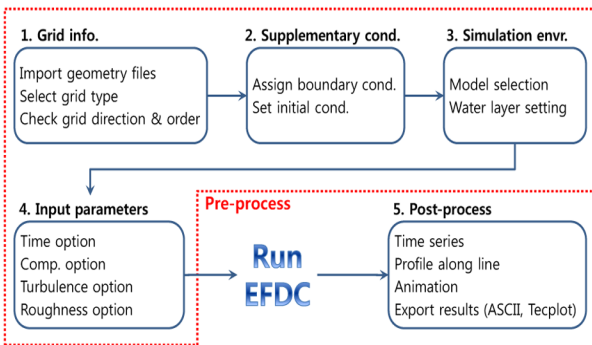


Fig. 2. Modeling procedure.

부여하고, 모형선정 및 연직층 설정 등의 구동 환경을 입력한다. 이후 시간, 계산, 난류모형, 거칠기 계수 등에 관한 변수를 입력하여 모의를 수행하게 된다.

EFDC 모형은 자체 GUI 내에서 모의결과를 등고선이나 벡터도로 표현하고 텍스트 파일로 원하는 정보를 생성하는 기능을 포함한다. EFDC 모형의 View Grid 탭을 클릭하면 바닥고를 포함한 지형의 평면형상이 나타나며 Option을 통해 Cell Indexes, Cell Map, Bottom Elevation, Water Levels, Boundary C's, Model Metrics, Velocities, Sediment Bed, Water Column 등의 내용을 시간에 따라 확인할 수 있다. 특히 Model Metrics 옵션의 경우 적정 계산시간간격, Courant 수, Froude 수 및 파의 전파속도(celerity)에 관한 범위를 제시해 주므로 CFL 조건을 쉽게 확인할 수 있고 사류가 발생하는 지점을 식별할 수 있다. Water Column 옵션에서는 오염물질의 확산 범위를 제공해 준다. 특정 Grid에서의 시간에 따른 유속 및 수위정보를 출력해주는 Time Series, 사용자가 지정하는 축선을 따른 유속, 수위 및 농도의 공간적 분포를 도시화하는 Longitudinal Profiles, Multi-layer를 이용한 모의 시 종횡방향 유속의 연직분포 및 오염물질의 농도분포를 도시화하는 Vertical Profiles. 이상의 결과들은 모두 사용자가 읽을 수 있는 ASCII 파일 형태의 txt 파일로 export가 가능하다. 또한 TP 탭에서는 모의결과를 Tecplot에서 읽을 수 있는 dat 형태로 export 해 주므로 EFDC 내에서 도시화하기 어려운 유선이나 3차원적인 수위분포 등을 그릴 수 있다. 그림은 메타파일 형태의 emf 포맷으로 생성이 가능하다.

본 연구에서는 댐붕괴류 문제에 EFDC 모형을 적용하여 매개변수의 민감도를 분석하였다. EFDC 모형의 매개변수 민감도를 분석한 기존 연구로는 태양복사에너지 분포, 활성 바닥 수온층 깊이, 열전달계수 등의 매개변수가 저수지 열성층화 현상과 관계되는 영향을 분석한 Kim et al.²⁾의 문헌이 있으며, EFDC 모형을 댐붕괴류 해석에 직접 적용한 연구 사례는 없는 것으로 조사되었다.

3. 수치해의 안정 조건

본 연구에서는 격자간격, 시간간격 및 난류 점성계수에 따른 수치해의 안정조건을 제시하기 위해 다음의 기준을 바탕으로 수치모의 인자를 결정하고 이에 따른 민감도 분석을 수행하였다. 첫 번째 안정성 기준은 얼마나 빨리 질량이 계산 격자를 통하여 이송되는가에 관련된다. 수치적으로 안정한 해를 얻기 위해 시간간격 Δt 는 다음의 Cr 조건에 의해 상한값이 제한된다³⁾.

$$\Delta t \leq \frac{1}{\left| \frac{u}{\Delta x} \right| + \left| \frac{v}{\Delta y} \right|} \quad (1)$$

여기서, u, v 는 직교좌표계 상 x 방향 및 y 방향 유속이며, Δx 와 Δy 는 x 방향 및 y 방향 격자 간격이다. 이 기준은 시간 미분항과 이송 가속도항을 포함한 편미분방정식을 차분할 때 해의 수렴조건으로부터 얻어진다. 식 (1)은 통상 Courant-Friedrichs-Lewy(CFL) 조건으로 불리며, 단일 계산시간 내에서 유체 입자가 계산 격자 길이를 초과하여 움직이는 것을 제한하는 것으로 해석될 수 있다. 만약 이 조건이 위배된다면 인접한 격자 혹은 이전 계산시간에 의한 흐름정보가 단일 계산 시간 내에 계산 격자를 뛰어 넘게 되므로 시공간적인 흐름정보가 정확하게 전달되지 못하게 된다. 따라서 정확한 계산결과를 얻기 위해 많은 수의 격자를 이용하는 경우에 안정성을 유지하기 위해서는 계산시간간격을 감소시켜야 한다.

조석류의 전파나 댐붕괴와 같이 불연속인 초기수위 조건이 부여된 경우 유체의 이동은 이송에 의한 유속 뿐만 아니라 파의 전파에 의한 이동속도도 함께 고려해야 한다. 이 경우 위의 CFL 조건의 유속은 수심에 의한 $c = \sqrt{gh}$ 인 파의 전파속도가 이동속도에 함께 포함되므로 정방격자($\Delta x = \Delta y$)를 이용하는 경우 식 (1)은 다음과 같이 표현된다.

$$\Delta t \leq \frac{\Delta x}{2\sqrt{u^2 + v^2 + c}} \quad (2)$$

점성에 의한 운동량 이송에 관련된 계산 격자간격, 시간간격 및 점성계수(A_H)의 안정성 기준은 다음의 식으로 표현된다.

$$\Delta t \leq \frac{1}{2A_H} \left| \frac{\Delta x^2 \Delta y^2}{\Delta x^2 + \Delta y^2} \right| \quad (3)$$

이 기준은 시간 미분항과 점성에 의한 운동량항을 포함한 편미분방정식을 FTCS(Forward Time and Central Space) 기법에 의해 차분하는 경우의 해의 수렴조건으로부터 얻어지게 된다⁴⁾. 즉, 2차 편미분항인 난류 점성항을 중앙 차분하는 경우 계산을 반복함에 따라 점차 오차를 감소시키기 위해 만족해야 하는 조건으로써, 단일 계산 시간 내 계산 격자의 점성에 의한 운동량을 제한하는 것으로 해석된다.

수치해의 진동을 억제하기 위해 Patankar⁵⁾는 다음의 조건을 제시한 바 있다.

$$Pe_c \leq \frac{u\Delta x}{A_H} \leq 2 \quad (4)$$

즉 모든 계산영역에서 셀 Pe 수를 2 이하로 유지하는 경우 수치진동이 발생하지 않는다는 조건이다. 이 조건을 충족시키는 경우 수치모의 결과에서 2-delta wave에 의한 유속 및 수위의 진동이 완화되거나 없어지는 것으로 알려져 있다. 이상의 조건들에 근거하여 $\Delta x, \Delta y, \Delta t$ 및 점성계수(A_H) 등의 수치모의 인자를 설정하고, 이에 따른 해의 민감도 분석을 수행하였다.

4. 댐붕괴 수치모의 및 민감도 분석

4.1 모의조건

댐붕괴 수치모의를 위한 계산영역 및 초기조건을 Fig. 3에 수록하였다. 종횡방향으로 200 m 길이를 가지는 정방형 모의영역을 구성하고 댐 상류부에는 수위 10 m, 하류부에는 수위 5 m를 초기조건으로 부여하여, 댐 붕괴 혹은 갑작스러운 수문의 개방으로 75 m의 댐 폭을 통해 물이 상하류 방향으로 전파되는 현상을 EFDC 동수역학 모형을 이용해 모의하였다.

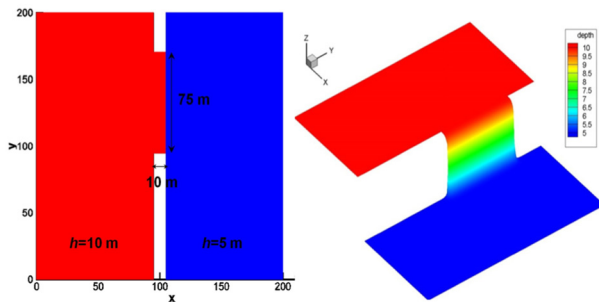


Fig. 3. Simulation domain (left) and initial condition (right).

댐 붕괴 수치모의를 수행하고, 매개변수의 민감도를 분석하기 위해 EFDC_Explore3 (GVC Version)을 이용하였으며, 안정적인 계산과 다양한 후처리 결과를 얻기 위해 DS Model 옵션, Explicit Momentum Equation Solution, 2 Time Level을 선택하여 수치모의를 수행하였다. 총 계산시간은 단파가 하류단 경계에 도달하기 전까지인 10초까지로 한정하여 벽면 및 경계면 반사의 영향을 배제하였다.

4.2 매개변수 민감도 분석

Table 1 및 2와 같이 수치모의 결과에 영향을 미치는 모의 인자들을 변화시켜 2차원 댐붕괴 해석을 위한 입력 조건을 부여하였다. 계산 격자간격과 시간간격은

Table 1. Sensitivity analysis for cell size and time step

Case	Δx (m)	# of cell	# of grid	Δt (s)	A_{eff} (m ² /s)
DC	5.00	1,550	1,656	0.100	0.11
DM	2.50	6,200	6,411	0.050	
DF	1.25	24,800	25,221	0.025	

식 (1)과 같이 Cr 수와 밀접한 관련이 있으므로, 동일한 Cr 수를 가지는 계산 격자간격을 고려하여 성근 (coarse) 격자망에 의한 DC, 중간(moderate) 격자망에 의한 DM, 조밀한(fine) 격자망에 의한 DF 등 3가지 격자망을 구성하였다. 이 경우 안정적인 수치모의를 위하여 시간간격(Δt)을 조정하여 Cr 수가 0.2로 일정하도록 모의조건을 설정하였다. DM은 DC에 비해 4배, DF은 DM에 비해 4배 많은 셀 갯수를 가지지만, 비교적 고사양 컴퓨터(Intel I7 6700 4.0 GHz, 8GRAM)를 사용하여 계산 부하량이 많지 않은 댐 붕괴 문제를 해석하였으므로 계산 소요 시간의 측면에서는 큰 차이를 보이지 않았다.

Fig. 4는 계산 격자간격에 따른 등유속도를 도시한 것으로 붕괴된 댐 폭을 따라 방류되는 유체가 좌측 벽면에 도달하는 시점인 7.2초일 때의 유속을 나타내었다. 수문 양끝단에서 5 m/s 이상의 고유속이 발생하였으며, 단파에 의해 형성된 선단부(front)가 상하류로 전파되어 가는 것을 확인할 수 있다. DC의 경우 성근 격자크기로 인하여 다른 격자망에 비해 저수지측 선단부 위치에서 Δx 만큼 파가 더 진행된 것으로 관찰되었다. 또한 정형격자망(structured grid)에 의해 충격파의 선단부에서 툽날형(jagged) 유속이 나타났으나 DF의 경우 세밀한 격자망으로 인하여 매끄러운 유속분포를 얻을 수 있었다.

Fig. 5는 계산 격자간격에 따른 종방향 관측선($y = 130$ m)에서 유속 및 수위를 비교한 것이다. 유속의 경우 댐이 위치해 있는 $x = 105$ m 직하류부의 유속이 크게 나타났고 최상류단인 $x = 0$ 부근에서도 미약한 유속이 존재하였다. 계산 격자망에 따른 민감도 분석 모의의 경우 점성의 영향을 무시하였으므로, 하류로 향하

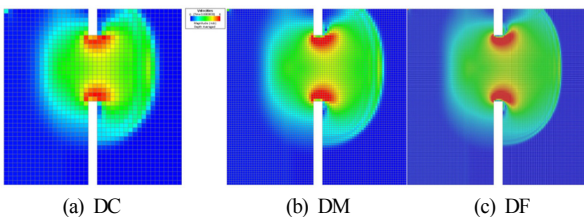
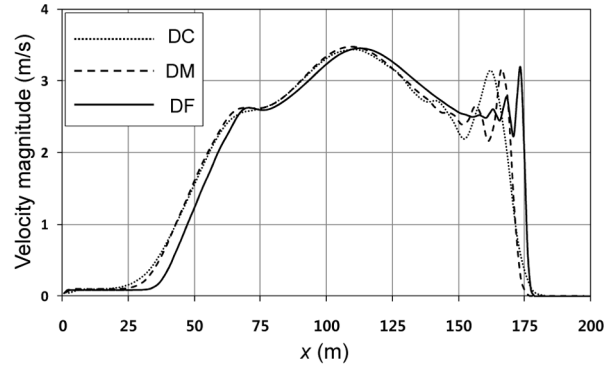
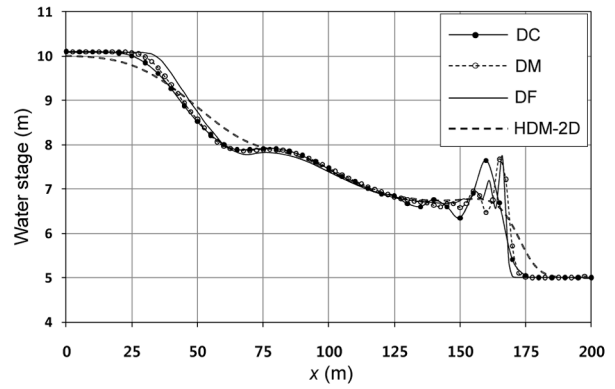


Fig. 4. Velocity contours by cell size at $t = 7.2$ s.



(a) Velocity



(b) Water stage

Fig. 5. Longitudinal flow characteristics by cell size. ($y = 130$ m, $t = 7.2$ s)

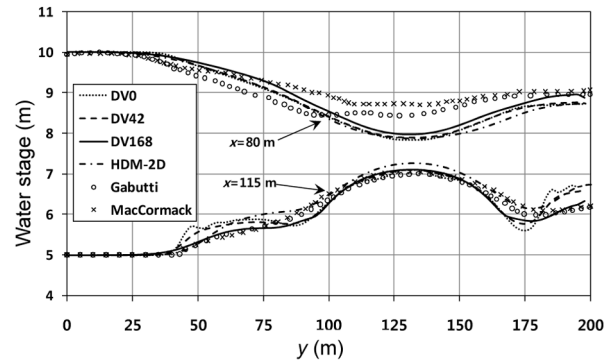


Fig. 6. Transverse distributions of water stage by cell size. ($t = 7.2$ s)

는 파의 선단부의 유속 및 수위에서 모두 수치진동이 발생하였다. 세 격자망에 모두 동일한 Cr 수 조건을 부여하였으므로 2-delta wave의 진폭은 모든 격자망에서 동일하게 나타났고 주기는 격자망의 크기에 비례하였다. 이와 같은 수치진동은 Fig. 8에서와 같이 과도한 점성을 부여하여 제거할 수 있었다. 수위분포의 경우 비교 결과로 제시되어 있는 HDM-2D는 Oh and Song⁶⁾

에 의해 개발된 천수흐름 해석 유한요소모형으로 DF와 동일한 격자수로 모의한 결과이다.

Fig. 6은 계산 격자간격에 따른 댐 상하류에 각각 위치에 있는 두 개의 횡방향 축선 ($x=80$ m, 115 m)에서의 수위를 비교한 것이다. 이 그림의 경우 Oh and Song⁵⁾의 HDM-2D 모형 결과와 Fennema and Chaudhry⁷⁾의 Gabutti 및 MacCormack 기법에 의한 수치모의 결과와도 비교하였다. $x=80$ m 축선에서 DC, DM, DF 모두 HDM-2D의 모의결과와 매우 유사한 횡방향 수위분포를 보였고, $x=115$ m의 축선에서도 다른 모형 결과와 전반적으로 유사한 경향을 나타냈다.

이상의 3가지 격자망 가운데 모의시간이 오래 걸리지 않고 상대적으로 정확한 결과를 얻을 수 있는 DM 격자망을 점성계수의 민감도 분석을 위한 계산 격자망으로 채택하였다. 점성계수에 따른 수치 모의조건을 구성하기 위하여 수직적분된 포물선 형태의 난류 점성계수식 (5)를 이용하였다.

$$A_H = \frac{1}{6} \kappa u_* h \tag{5}$$

여기서, κ 는 von Karman 상수 (0.4), h 는 수심, u_* 는 전단유속으로 조도계수(n)와 유속의 크기(U)를 이용하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} = \sqrt{\frac{gn^2}{h^{1/3}}} U \tag{6}$$

따라서, 매끄러운 바닥을 가정한 $n=0.013$, 최대수심인 $h=10$ m, 최대유속 $U=6$ m/s를 고려하는 경우 수심평균된 난류 점성계수는 $A_H=0.11$ m²/s로 계산된다. 그러나 EFDC의 동수역학 모형의 경우 공간차분을 이차정확도의 중앙차분법(central difference scheme)을 이용하지 않고 수치적 안정성을 고려하여 풍상차분법(upwind difference scheme)을 이용하므로 과도한 인공점성이 난류 점성계수에 포함된다. 따라서 본 연구에서는 점성계수의 영향을 확인하기 위하여 식 (5)에 의한 계산값보다 큰 1.4, 4.2, 8.4, 16.8 m²/s를 부여하여 점성계수의 민감도 분석을 위한 Table 2와 같은 모의 케이스를 구성하였다. 점성계수의 크기에 따른 EFDC 모의 구동 시간의 차이는 없었다.

Fig. 7은 점성계수에 따른 등유속도를 도시한 것이다. 이 그림에서 난류 점성계수가 증가할수록 수문을 통과하는 최대유속의 크기는 낮아져 DV84의 경우 DV0에 비해 20% 정도 감소하였으며, 하류로 향하는 선단부에

Table 2. Sensitivity analysis for eddy viscosity

Case	Δx (m)	# of cell	# of grid	Δt (s)	A_H (m ² /s)
DV0	2.50	6,200	6,411	0.01	0.0
DV14					1.4
DV42					4.2
DV84					8.4
DV168					16.8

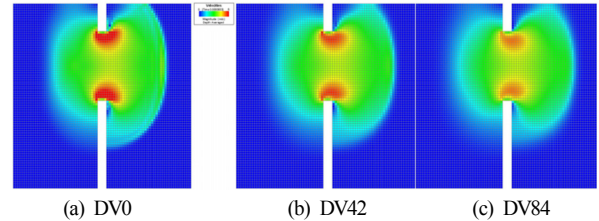
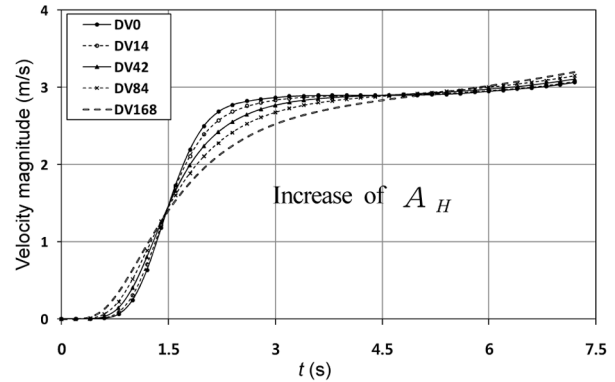
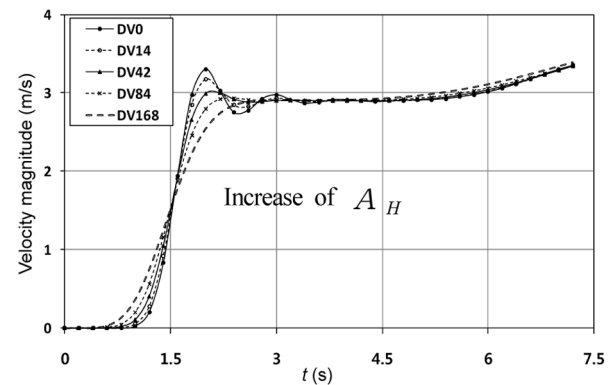


Fig. 7. Velocity contours by eddy viscosity at $t=7.2$ s.



(a) Upstream of the gate (95, 130)



(b) Downstream of the gate (120, 130)

Fig. 8. Velocity variations by eddy viscosity.

서의 유속의 진동이 완화됨을 알 수 있다.

점성계수에 따른 댐 상하류 지점에서 유속의 시간 변화를 Fig. 8에 도시하였다. 댐 상류지점에서의 유속

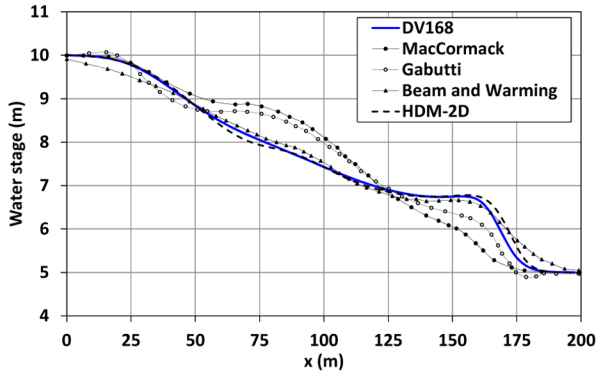


Fig. 9. Comparison of longitudinal water stage. ($y=130$ m, $t=7.2$ s)

은 점성계수가 증가할수록 곡선의 기울기가 완만했으며, 댐 하류지점에서의 수치진동도 점성계수가 커질수록 점점 소멸되어 DV42부터는 매끄러운 수치모의 결과를 얻을 수 있었다. 따라서 댐붕괴 모의와 같이 극단적인 충격파가 전파되는 문제의 경우 높은 난류 점성계수를 입력하면 수치진동이 발생하지 않는 안정적인 결과를 얻을 수 있었다.

모든 계산영역에서 셀 Pe 수를 2 이하로 유지하는 경우 수치진동이 발생하지 않는다는 조건인 식 (4)를 본 해석에 적용해 보면 댐 하류부 지점에서의 시간에 따른 최대 유속은 Fig. 8과 같이 $u=3.3$ m/s이며, 격자간격은 $\Delta x=2.5$ m이므로 이 지점에서 수치진동을 억제하기 위한 난류 점성계수는 $A_H=4.13$ m²/s로 계산된다. 따라서 DV42의 경우에는 $A_H=4.2$ m²/s이므로 수치진동이 발생하지 않았다.

DV168과 타 모형과의 종방향 측선 $y=130$ m에서의 수위분포를 비교하여 Fig. 9에 수록하였다. 수치진동을 억제하기 위한 모의케이스인 DV168의 경우 종방향 수위가 매우 안정적으로 분포하였으며 HDM-2D 및 Beam and Warming의 계산결과와 유사하였다.

5. 요약 및 결론

댐붕괴에 의해 발생한 충격파는 계산 격자간격과 시간 간격, 난류 점성계수 등에 따라 포착되는 정도가 달라지므로 매개변수에 관한 민감도 분석이 선행되어야 한다. 본 연구에서는 모형의 확장성이 우수하고 다양한 계산모듈을 제공하여 국내외에서 널리 활용되고 있는 EFDC 모형을 이용하여 댐붕괴류를 수치모의하고, 수치모의 결과에 영향을 미치는 격자간격, 시간간격 및 난류 점성계수에 대한 수치해의 안정조건을 제시하였으며, 이에 따른 매개변수의 민감도를 분석하였다.

동일한 Cr 수를 가지는 계산 격자간격을 고려하여 성근 격자망, 중간 격자망 및 조밀한 격자 등 3가지 격자망에 따른 영향을 분석하였다. 성근 격자망의 경우 다른 격자망에 비해 저수지측 선단부 위치에서 Δx 만큼 파가 더 진행하였으며, 정형격자망에 의해 충격파의 선단부에서 톱날형 유속이 나타났으나 조밀한 격자망의 경우 매끄러운 유속분포를 얻을 수 있었다. 점성의 영향을 무시한 경우, 하류로 향하는 파의 선단부의 유속 및 수위에서 수치진동이 발생하였으며, 동일한 Cr 수 조건을 부여하여, 2-delta wave의 진폭은 모든 격자망에서 동일하게 나타났고 주기는 격자망의 크기에 비례하였다.

수심적분된 포물선 형태의 난류 점성계수식을 기준으로 5개의 점성계수에 따른 댐 수문 상하류의 시공간적인 수치해의 변화 양상을 분석하였다. 난류 점성계수에 따라 수문을 통과하는 유속의 크기는 최대 20%까지 차이가 발생하였으며, 점성계수가 증가할수록 하류로 향하는 선단부에서의 유속의 진동이 완화되었다. 또한 셀 Pe 수를 2 이하로 유지하는 경우 수치진동이 발생하지 않았다.

본 연구에서는 EFDC 모형의 계산 격자망을 구성하고 기본 입력변수를 설정함에 있어 고려해야 할 사항들을 체계화하였다. 향후 연구에서는 댐 하류부의 초기조건이 마름 상태인 경우의 매개변수 민감도 해석과 연직방향 Layer의 수에 따른 수심평균 유동장과 각 층에서의 해의 거동에 관해 분석하고자 한다.

감사의 글: 본 연구는 국민안전처 재난안전기술개발사업단(자연피해예측 및 저감연구개발사업)의 지원으로 수행한 ‘기후변화 적응을 위한 연안도시지역별 복합원인의 홍수 취약성 평가기술 개발 및 대응 방안 연구’ [MPSS-자연-2015-77] 과제에 의한 연구결과이며, 이에 감사드립니다.

References

- 1) C. G. Song and S. O. Lee, “Hydraulic Characteristics of Dam Break Flow by Flow Resistance Stresses and Initial Depths”, *Journal of Korea Water Resource Association*, Vol. 47, No. 11, pp. 1077-1086, 2014.
- 2) S. -J. Kim, D. -I. Seo and K. -H. Ahn, “Estimation of Proper EFDC Parameters to Improve the Reproducibility of Thermal Stratification in Korea Reservoir”, *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 44, Issue 9, pp. 741-751, 2011.

- 3) R. Courant, K. Friedrichs and H. Lewy, "Über die Partiellen Differenzgleichungen der Mathematischen Physik", *Mathematische Annalen*, Vol. 100, No. 1, pp. 32-74, 1928. (in German).
- 4) K. A. Hoffmann and S. T. Chiang, *Computational Fluid Dynamics for Engineers. A Publication of Engineering Education System*, 1993.
- 5) S. V. Patankar, *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, McGraw-Hill, New York, 1980.
- 6) T. K. Oh and C. G. Song, "Transient SU/PG Modeling of Discontinuous Wave Propagation", *Progress in Computational Fluid Dynamics, An International Journal*, Vol. 16, No. 3, pp. 146-162, 2016.
- 7) R. J. Fennema and M. H. Chaudhry, "Explicit methods for 2-D Transient Free-surface Flows", *J. Hydraul, Engrg.*, Vol. 116, No. 8, pp. 1013-1034, 1990.