

흐름저항응력 및 초기수심에 따른 댐붕괴류의 수리특성

Hydraulic Characteristics of Dam Break Flow by Flow Resistance Stresses and Initial Depths

송 창 근* / 이 승 오**

Song, Chang Geun / Lee, Seung Oh

Abstract

The flood wave generated due to dam break is affected by initial depth upstream since it is related with hydraulic characteristics propagating downstream, and flow resistance stress has influence on the celerity, travel distance, and approaching depth of shock wave in implementing numerical simulation. In this study, a shallow water flow model employing SU/PG scheme was developed and verified by analytic solutions; propagation characteristics of dam break according to flow resistance and initial depth were analyzed. When bottom frictional stress was applied, the flow depth was relatively higher while the travel distance of shock wave was shorter. In the case of Coulomb stress, the flow velocity behind the location of dam break became lower compared with other cases, and showed values between no stress and turbulent stress at the reach of shock wave. The value of Froude number obtained by no frictional stress at the discontinuous boundary was the closest to 1.0 regardless of initial depth. The adaption of Coulomb stress gave more appropriate results compared with turbulent stress at low initial depth. However, as the initial depth became increased, the dominance of flow resistance terms was weakened and the opposite result was observed.

keywords : dam break, initial depth, flow resistance stress, bottom frictional stress, Coulomb stress

요 지

댐붕괴에 의해 발생하는 홍수파는 초기수심의 깊이에 따라서 하류부로 전달되는 수리학적 특성이 다르게 나타나며, 수치모의 시 흐름저항응력은 충격파의 전파 속도, 도달 거리 및 접근 수심 등에 영향을 미친다. 본 연구에서는 천수방정식을 SU/PG 기법으로 이산화한 모형을 개발하고 해석해를 이용하여 모형을 검증한 후, 초기수심 및 흐름저항응력에 따른 댐붕괴류의 전파특성을 분석하였다. 바닥마찰력을 적용한 경우 수심은 상대적으로 컸으나 충격파의 도달거리는 짧게 나타났다. Coulomb 응력을 적용한 경우 댐붕괴 후면에서의 유속이 상대적으로 작게 나타났으나, 충격파가 도달하는 영역에서는 바닥마찰력을 적용한 값과 흐름저항응력을 고려하지 않은 값 사이의 유속을 보였다. 또한 초기수심에 관계없이 흐름 저항응력을 고려하지 않은 경우의 불연속면에서의 F_r 수가 1.0에 가장 근사하였다. 초기수심이 얕은 경우 Coulomb 응력에 의한 모의결과가 난류응력을 적용한 경우에 비해 우수한 모의결과를 도출하였으나, 초기수심이 깊어지는 경우 흐름저항응력의 영향력이 소멸되므로 반대의 양상이 나타났다.

핵심용어 : 댐붕괴, 초기수심, 흐름저항응력, 바닥마찰력, Coulomb 응력

* 인천대학교 안전공학과 조교수 (e-mail: baybreeze119@incheon.ac.kr)

Assistant professor, Dept. of. Safety Engrg, Incheon National Univ., Incheon 406-772, Korea

** 교신저자, 홍익대학교 토목공학과 부교수 (e-mail: seungoh.lee@hongik.ac.kr, Tel: 82-2-320-3046)

Corresponding Author, Associate professor, Dept. of Civil Engrg., Hongik Univ., Seoul 121-791, Korea

1. 서 론

최근 빈번하게 발생하고 있는 대규모 재난에 대비하고 자 국토교통부는 2014년 4월 27일 현장 중심의 재난안전 체계를 강화하기 위해 각종 항공, 철도 및 도로 사고 등의 재난 상황별 초동조치 매뉴얼을 전면 개편하기로 하였다. 이 매뉴얼은 사회기반시설에 관한 위기 대비 안전점검에 관한 내용을 포함하며, 날로 증가하는 가능최대강수량(PMP)이나 설계빈도를 초월하는 이상홍수에 의해 댐 등의 수공 구조물이 붕괴되는 비상상황에 대비하기 위한 치수능력증대사업에 관한 내용도 다루고 있다. 댐붕괴 사고에 의해 발생한 홍수파는 단시간 내에 댐이나 저수지 하류부에 위치해 있는 농가, 농경지 및 각종 시설물에 치명적인 피해를 끼치므로, 댐의 설계단계나 노후 댐의 유지보수 점검 시 충격파의 전파 속도, 이동 거리, 도달 면적 및 접근 수심 등에 대한 수리학적 분석이 필요하다. 특히 댐 하류부에 주요 공공 시설물이 위치하고 있는 경우 극한적인 강우조건에 의한 댐붕괴 등의 긴급상황에 대비한 홍수파 해석을 사전에 수행하여 피해를 최소화 할 수 있는 대책이 강구되어야 한다. 미국의 국가 댐 성능 프로그램(National Dam Performance Program) 및 댐 안전기구 협회(Association of State Dam Safety Officials), WISE Uranium Project 등의 통계자료를 분석해보면 2009년 이후 전 세계적으로 15건의 댐붕괴 사고에 의해 250여명의 사상자가 발생하고, 2,000여명이 집을 잃었으며, 4,000여명이 긴급 대피한 것으로 집계되었다. 댐 붕괴는 기초의 전단저항 강도 미달, 지반의 불안정, 댐체의 침식 등이 극치 강우사상과 함께 작용하여 발생하게 된다.

댐붕괴 문제는 수치해석적인 측면에서나 물리적인 측면에서 여러 의미를 지닌다. 댐붕괴 시 발생하는 홍수파에 의해 상류, 사류 및 천이류가 공존하게 되고, 상류와 사류의 경계면이 이동하므로 일반적인 수치해석 기법으로는 충격파(shock wave)와 소밀파(rarefaction wave)를 올바르게 포착하기 어렵다. 댐붕괴에 의해 급격한 자유수면 경사와 속도 경사가 발생하므로 충격파의 선단부 영역에서 발생하는 수치적 불안정성을 해결하고 정확성을 확보하는 것이 매우 중요하다. 또한 급경사면 위에서 발생하는 댐붕괴 문제는 토사의 질량이 응집되어 있다가 순간적으로 중력에 의해 방류되는 토석류 해석모형의 검증에 의해 활용되기도 한다(Naef et al., 2006; Medina et al., 2008; Murillo와 Garcia-Navarro, 2012).

수심적분된 천수방정식을 지배방정식으로 하여 댐 붕괴 문제를 해석하고, 홍수파의 예측경로, 침수심, 유속, 도

달시간 등에 관한 공학적 분석을 효율적으로 수행할 수 있도록 수치모형을 개발하고 개선하는 연구가 2000년대 이후부터 최근까지 활발하게 진행되고 있다(Kim and Cho, 2005; Kim et al., 2009a; Kim et al., 2009b; Jeong and Park, 2011). 이와 같은 기존 연구에서는 하천 흐름 및 하천 주변에서 발생하는 범람현상 등을 모의하고 분석하기 위해 불연속 흐름을 정확하고 안정적으로 모의할 수 있는 다양한 기법의 개발 및 적용에 초점이 맞추어졌다. 그러나 댐 붕괴 수치모의 시 초기수심에 따른 홍수파의 하류부 전달 특성과 바닥마찰력, 구성유체 입자의 내부 전단력 등의 흐름저항응력에 따른 충격파의 전파 속도, 도달 거리 및 접근 수심 등에 관한 수리학적 특성을 분석한 연구는 아직 부족한 실정이다.

본 연구에서는 천수방정식을 SU/PG 기법으로 이산화한 유한요소모형을 개발하고 젖은 바닥 위를 통과하는 댐 붕괴류의 수심 및 유속에 관한 해석해를 이용하여 모형을 검증한 후, 초기수심 및 흐름저항응력에 따른 댐붕괴류의 전파특성을 분석하였다. 3가지 초기수심에 대하여 흐름저항응력이 없는 경우와 마찰계수에 의해 바닥면과 유체운동의 상대마찰력을 부여하는 경우 및 Coulomb 마찰응력에 의해 구성 유체의 내부마찰에 의한 흐름저항이 반영되는 경우를 고려하였다. 또한 충격파가 발생하는 초기 불연속면에서 형성되는 천이류를 분석하여 수치모형의 적용성과 수치기법의 정확도를 판단하였다.

2. 이론적 배경

2.1 흐름저항응력

댐붕괴가 발생한 이후 바닥면과 유체 운동면 사이에 작용하는 상대적인 마찰력을 의미하는 바닥전단응력이나 구성 유체 입자간의 내부마찰에 의한 흐름저항응력은 충격파의 전파 속도, 이동 거리 및 접근 수심 등을 예측하는데 중요한 인자로 작용한다. 본 연구에서는 천수방정식의 바닥전단응력을 1차원 Saint-Venant 방정식의 마찰경사(S_f , friction slope)와 동일한 개념으로 간주하여 지면저항을 고려한 난류전단응력, 점착력에 의해 응집되어 있던 질량이 외부 응력에 의해 순간 파괴될 때의 관계에 해당하는 Coulomb 응력 및 마찰전단응력을 무시한 경우 등의 3가지 종류의 흐름저항응력을 고려하였다. 흐름저항응력을 무시한 경우는 마찰계수나 내부마찰각을 0으로 설정하는 경우에 해당하므로, 본 절에서는 난류전단응력과 Coulomb 응력에 관한 이론을 정리하였다.

2.1.1 난류전단응력

1차원 등류흐름에 관한 Chézy 공식을 마찰경사(S_f)에 대하여 정리하면 다음과 같이 표현된다.

$$S_f = \frac{u^2}{C^2 R_h} \quad (1)$$

여기서, R_h 는 동수경사를 의미한다. 천수방정식의 바닥전단응력(τ)과 1차원 Saint-Venant 방정식의 마찰경사를 차원을 고려하여 대응하면 Eq. (2)와 같다.

$$\frac{\tau}{\rho h} = g S_f \quad (2)$$

흐름저항 정도를 나타내는 Chézy 계수(C), Manning 계수(n) 및 Darch-Weisbach 마찰계수(f)는 아래와 같은 관계를 가진다.

$$C = \frac{R_h^{1/6}}{n} = \sqrt{\frac{8g}{f}} \quad (3)$$

Eqs. (1) and (3)을 이용하여 Chézy 계수를 마찰계수로 치환하고 Eq. (2)의 S_f 에 대입하여 정리하면 다음과 같은 난류전단응력을 유도할 수 있다.

$$\tau = \frac{\rho}{8} f u^2 \quad (4)$$

2.1.2 Coulomb 응력

점착력(c)에 의해 응집되어 있던 입상재료(*granular material*)가 외부 응력(τ)에 의해 전단 파괴될 때 응력-점착력-마찰력의 관계를 기술하는 Mohr-Coulomb 식은 다음 Eq. (5)와 같이 표현된다.

$$\tau = c + \sigma \tan \phi \quad (5)$$

Eq. (5)에서 σ 는 바닥경사(θ)를 가지는 지면 상부의 입상재료가 저면에 가하는 수직응력으로 수심이 h 인 경우 $\sigma = \rho g h \cos \theta$ 로 나타낼 수 있으며, ϕ 는 입상재료 간의 내부마찰각이므로 $\sigma \tan \phi$ 는 마찰력을 의미하게 된다. 입상

재료가 점성이 큰 토사가 아닌 유체와 세립질 유기물의 혼합체로 구성되어 있는 경우 $c \approx 0$ 으로 근사하면 Eq. (6)과 같이 표현된다.

$$\tau = \rho g h \cos \theta \tan \phi \quad (6)$$

2.2 해석해

댐붕괴가 발생한 경우 시간에 따른 충격파의 이동 속도, 접근 수심 및 도달 거리 등의 전파특성은 수리구조물의 설계나 재해 예방 등의 측면에서 매우 중요하므로, 여러 학자들에 의해 해석적인 기법으로 연구되었다. Ritter (1892)는 특성기법(*characteristic method*)에 의해 이상 유체의 해석해를 최초로 유도하였으며, Dressler (1952)와 Whitham (1955)은 바닥저항력의 영향을 추가하여 댐붕괴류를 해석하고 선단부의 유속과 수심에 관한 해석해를 유도하였다. Stoker (1957)는 Ritter (1892)의 해를 확장하여 젖은 바닥 위를 통과하는 댐붕괴류의 해석해를 제시하였다. Hungr(1995)는 댐붕괴에 의한 소성유체의 도달거리를 에너지보존법칙에 근거하여 유도하였다. Mangeney et al. (2000)은 바닥경사가 있는 가상수로 상에서 댐붕괴에 의한 해석해를 유도하였다. Chanson (2006)은 Darcy-Weisbach 마찰계수를 도입하고 바닥전단력이 반영하여 실제유체의 댐붕괴 거동과 보다 유사한 해석해를 제시하였다. Mungkasi와 Roberts (2011)는 Mangeney et al. (2000)의 결과를 일반화하여 초기수심이 직교좌표계와 일치하는 경우의 해석해를 구하였다.

본 연구에서는 초기수심과 바닥마찰응력에 따른 젖은 하도를 통과하는 댐붕괴류의 전파특성을 수치모의하고 그 결과를 검증하기 위해, 상기에 언급된 해석해 중 댐 하류에 초기 수심이 존재하는 Stoker (1957)의 해석해를 이용하였다. 젖은 하도를 통과하는 댐붕괴류의 해석해를 정리하면 다음과 같다.

Stoker (1957)는 선형 과 이론을 근간으로 Ritter (1892)의 해를 마찰이 없는 젖은 바닥 위를 통과하는 해석해(Fig. 1(b))

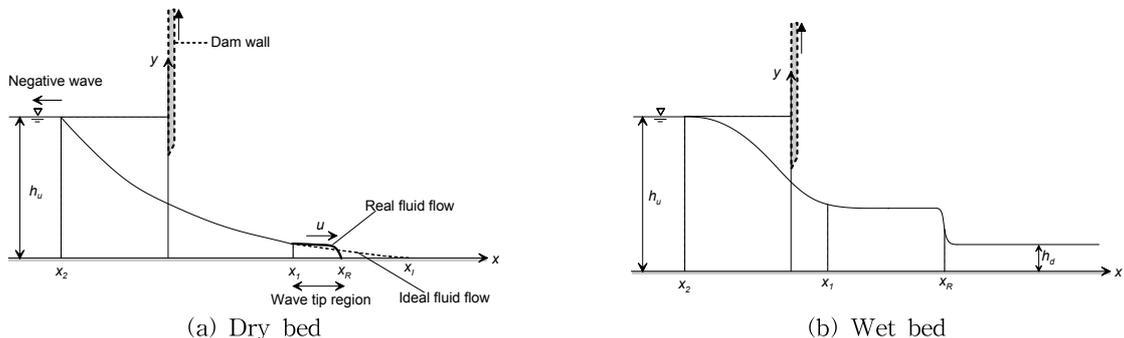


Fig. 1. Schematic Diagram of Dam Break Flow in Flat-bottom

로 확장하였다. 마른 바닥과 젖은 바닥 위를 통과하는 수심과 유속에 관한 해석해와 비교해 보면 $x_2 \leq x \leq x_1$ 의 영역에서는 동일한 식을 가지지만, 젖은 하도의 충격파 도달 영역에서는 초기 하류부 바닥조건에 의한 영향이 작용하기 때문에 댐 상류부의 초기 수심 h_u 와 하류부의 초기수심 h_d 이 고려된 전파유속 c_m 이 포함되어 있음을 알 수 있다.

$$h = \begin{cases} h_u & x_2 \geq x \\ \frac{h_u}{9} \left(2 - \frac{x}{t\sqrt{gh_u}} \right)^2 & x_2 \leq x \leq x_1 \\ \frac{c_m^2}{g} & x_1 \leq x \leq x_R \\ h_d & x \geq x_R \end{cases} \quad (7)$$

$$u = \begin{cases} 0 & x_2 \geq x \\ \frac{2}{3} \left(\frac{x}{t} + \sqrt{gh_u} \right) & x_2 \leq x \leq x_1 \\ 2(\sqrt{gh_u} - c_m) & x_1 \leq x \leq x_R \\ 0 & x \geq x_R \end{cases} \quad (8)$$

$$x_2 = -\sqrt{gh_u}t \quad (9a)$$

$$x_1 = (2\sqrt{gh_u} - 3c_m)t \quad (9b)$$

$$x_R = \frac{2c_m^2(\sqrt{gh_u} - c_m)}{c_m^2 - gh_d}t \quad (9c)$$

상기 식에서 $c_m (= \sqrt{gh_u})$ 은 다음의 식에 의해 음해적으로 구할 수 있다.

$$-8gh_d c_m^2 (gh_u - c_m^2)^2 + (c_m^2 - gh_d)^2 (c_m^2 + gh_d) = 0 \quad (10)$$

3. 댐붕괴류 전파 해석모형

본 연구에서는 Seo and Song (2010) 및 Song and Seo

(2012)에서 개발한 천수흐름 해석 수치모형의 외력항을 변경하고 1차원 댐붕괴 문제에 적용하여 흐름저항능력 및 초기수심에 따른 댐붕괴류의 전파특성을 분석하였다. Eqs. (11) and (12)와 같은 지배방정식을 채택하였으며, 흐름저항을 의미하는 Eq. (12)의 우변의 마지막 항(τ)을 Eqs. (4), (6) 및 0으로 적용하여 바닥전단력 및 내부마찰 조건에 따른 충격파의 전파 거동을 비교분석하였다.

$$h_t + (uh)_x = 0 \quad (11)$$

$$u_t + uu_x = -gh_x + \nu u_{xx} - \tau / (\rho h) \quad (12)$$

Eqs. (11) and (12)를 Seo et al. (2014)에서 상술한 SU/PG 방법으로 이산화하여 선형대수방정식을 구성하였다. SU/PG 기법은 댐붕괴나 홍수량 유입과 같이 급격하게 흐름조건이 변화하는 경우나 천이류가 발생하는 경우, 충격파의 전달 등의 흐름해석에 있어서 기존의 Galerkin 기법에 비해 더욱 안정적인 해를 도출하는 것으로 알려져 있다(Bova and Carey, 1996; Akin and Tezduyar, 2004). 이는 SU/PG 기법의 가중함수에 의해 유속과 형상함수 편미분의 내적에 의해 가중된 섭동함수가 유체의 흐름방향으로 작용하게 되어, 비선형 이송항의 불안정성을 감소시키고, 이송항에 의한 가속도의 영향을 보다 정확하게 반영하기 때문이다.

4. 댐붕괴류의 전파특성

4.1 수치모의 조건

초기수심 및 흐름 저항능력에 따른 댐붕괴류의 전파특성을 분석하기 위해 Table 1과 같은 수치모의 조건을 구성하였다. 각 수심별로 흐름저항능력이 없는 경우(No friction)와 마찰계수(Friction factor)에 의해 바닥마찰력이 부여되

Table 1. Flow Resistance and Initial Condition for Numerical Simulations

RUN	h_u	Flow resistance	Friction factor	Friction angle
5N0	5 m	No friction	-	-
5T1	5 m	Turbulent	0.005	-
5C1	5 m	Coulomb	-	1°
10N0	10 m	No friction	-	-
10T1	10 m	Turbulent	0.004	-
10C1	10 m	Coulomb	-	1°
15N0	15 m	No friction	-	-
15T1	15 m	Turbulent	0.003	-
15C1	15 m	Coulomb	-	1°

는 경우(Turbulent) 및 Coulomb 마찰응력에 의해 구성유체의 내부저항이 반영되는 경우를 고려하였다. ‘Turbulent’의 경우 마찰계수는 Eq. (3)에 의해 $f \approx 8gn^2/h^{1/3}$ 로 표현되므로 매끈한 하도 상을 통과하는 흐름을 가정한 조도계수 ($n=0.01$)와 수심(h_u)을 고려하여 산정하였으며, 내부마찰각(Friction angle)은 바닥 경사각보다 큰 경우 해가 발산할 우려가 높으므로 (Mangeny et al., 2000) 1° 로 설정하였다. 이상의 9가지 모의케이스로 Table 1과 같은 RUN을 명명하였다.

수치모의를 위한 계산영역은 흐름 방향 및 폭 방향으로 100×5 m의 크기를 가지는 직사각형 영역으로, 25,000개의 요소($1,000 \times 250$)와 26,026개의 절점으로 유한요소망을 구축하였다. 댐붕괴류가 하류단 경계에 도달하기 이전 시간인 $t=4.0$ sec.까지 수치모의를 진행하였으며, 계산시간 간격은 $\Delta t=0.001$ sec.로 설정하여 $h_u=15$ m의 경우 댐붕괴류의 이동속도와 전파속도의 합이 최대 22m/s에 달해 최대 Cr 수는 0.22이므로 충격파의 전파특성을 주어진 격자망과 시간간격으로 충분히 포착할 수 있어, 별도의 격자민감도 분석은 수행하지 않았다. 초기조건으로는 $-40 \text{ m} \leq x \leq 0$ 에 h_u (5m, 10m, 15m)를 할당하고, 이후 영역에는 수심을 3.6mm로 일정하게 부여하여 $x=0$ 에서 불연속 수심을 가지는 젖은 하도 위를 통과하는 댐붕괴류를 재현하였다.

4.2 모형의 검증

본 연구에서 개발한 댐붕괴 해석모형을 검증하기 위해 특정 시간 t 에서 젖은 하도 위를 통과하는 댐붕괴류의 수심 및 유속에 관한 해석해를 나타내는 Eqs. (7)~(10)과 수치모의 결과를 비교하였다. 해석해의 유도과정에서 마찰력을 무시하였기 때문에 모형의 검증을 위한 수치모의 조건은 10N0 RUN을 이용하였다.

Fig. 2는 댐붕괴가 발생한 이후 초기시간에 해당하는 $t=$

0.1 sec.와 모의 중간시간인 $t=2.0$ sec. 및 모의 종료시간인 $t=4.0$ sec.에서의 10N0에 의한 수심 분포를 3차원적으로 도시한 것이다. $x=0$ 지점에서의 불연속 수심경계에서 발생한 충격파와 소밀파가 시간이 경과됨에 따라 전파되는 것을 선단부 및 후미부의 이동양상을 통해 확인할 수 있다. 본 연구에서 개발한 모형은 2차원 천수흐름 해석모형이지만 수심변화가 종방향 좌표계를 통해서만 나타나고 수로폭 방향으로의 변동이 없으므로 Eqs. (7)~(10)에 제시되어 있는 1차원 해석해와 비교하여 수치모의 결과의 정확성을 확인하였다.

$t=1.0$ sec.와 $t=3.0$ sec.에서의 수심 및 유속 모의결과를 해석해와 비교하여 Fig. 3에 수록하였다. Fig. 3(a)에서 수심에 대한 해석해와 수치해의 모의결과를 비교해 보면, 댐붕괴가 발생한 후면에서 소밀파의 진행에 따른 수면 저하 형상이 잘 일치하였으며, 시간에 따른 충격파의 도달 거리도 매우 근사하였다. 유속을 비교한 Fig. 3(b)의 경우도 댐붕괴가 발생한 후면에서 유속 증가 경향이 잘 일치하였으며, 충격파 도달 영역의 최대 유속과 선단부의 유속 저감 양상이 유사하였다.

4.3 흐름저항응력 및 초기수심에 따른 흐름특성

Fig. 4는 Coulomb 흐름저항력을 적용한 경우의 시간에 따른 수심분포를 나타낸 것이다. h_u 에 따라 전파유속이 달라지므로 댐붕괴 후면의 소밀파에 의한 수심의 기울기가 다르게 나타났으며, 무차원화된 수심경사는 초기수심이 커질수록 종방향에 걸쳐 완만하게 분포하였다. 충격파의 선단부 형상은 급경사를 이루었으며, h_u 에 따라 도달거리에서 차이를 보였다. 그리고 Fig. 4(a)~(c)의 $x=0$ 지점에서 $h/h_u=0.444$ 의 값으로 일정하여, 댐붕괴가 발생한 지점에서의 수심은 h_u 나 시간에 관계없이 초기수심의 44.4%에 해당하는 값을 가졌다. Eq. (7)의 해석해에서 $x=0$ 의 경

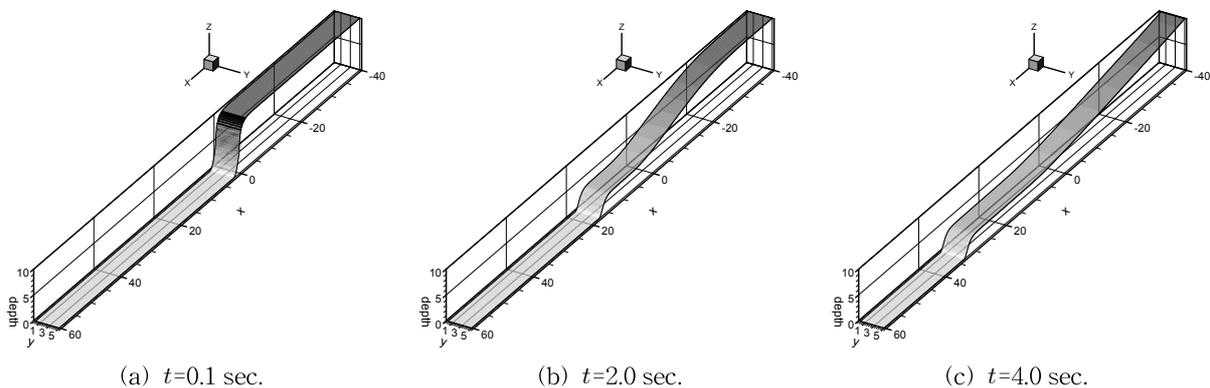
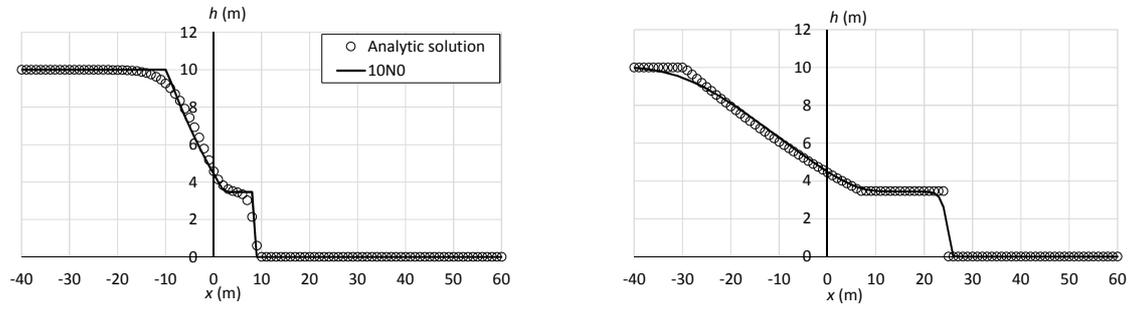
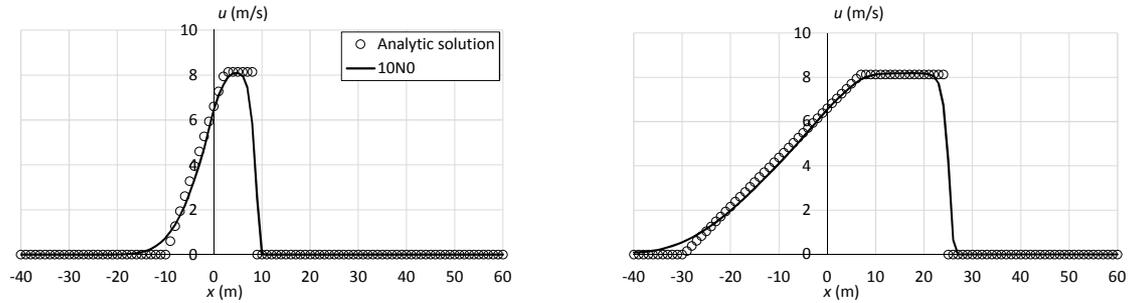


Fig. 2. Depth Evolution by 10N0

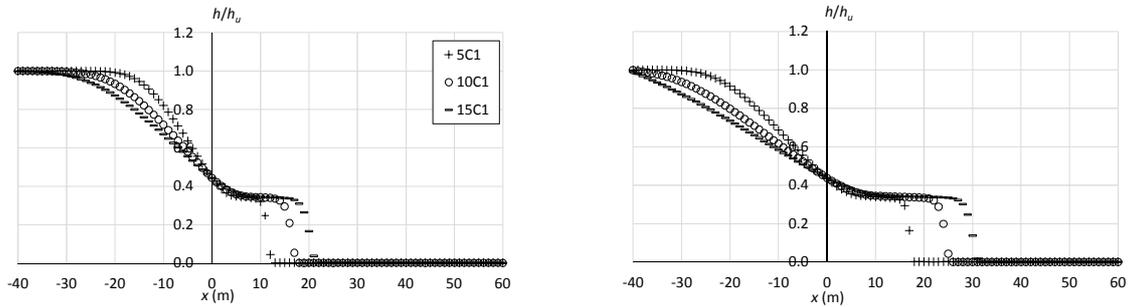


(a) Depth (left: $t=1.0$ sec.; right: $t=3.0$ sec.)



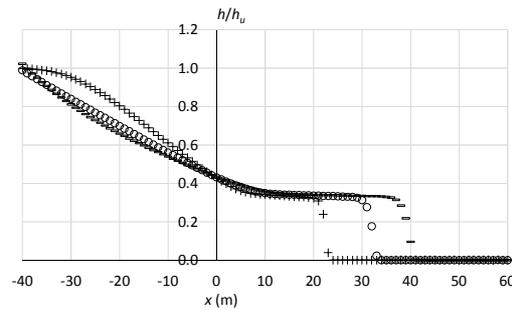
(b) Velocity (left: $t=1.0$ sec.; right: $t=3.0$ sec.)

Fig. 3. Comparison of 10N0 with Analytical Solutions



(a) $t=2.0$ sec.

(b) $t=3.0$ sec.



(c) $t=4.0$ sec.

Fig. 4. Depth Distributions according to Initial Depths

우 $h = 4h_u/9 = 0.444h_u$ 이므로 이를 통해 해석해와 수치모의 결과가 잘 일치함을 확인할 수 있다.

Figs. 5 and 6에 초기수심 및 흐름 저항응력에 따른 수심분포와 유속분포를 각각 초기수심 h_u 과 $c_0 (= \sqrt{gh_u})$ 로 무차원화하여 도시하였다. Fig. 5에서 흐름저항응력에 따

른 수심분포가 확연하게 차이나지는 않았지만, \circ 로 표시된 T1에 의한 충격파의 도달거리는 약간 짧았고, 수심은 상대적으로 크게 나타났다. 이는 난류응력에 의한 바닥저항력이 작용하여 유속이 N0나 C1에 비해 감소하여 수심은 상대적으로 커졌기 때문이다. 그리고 충격파의 최선단

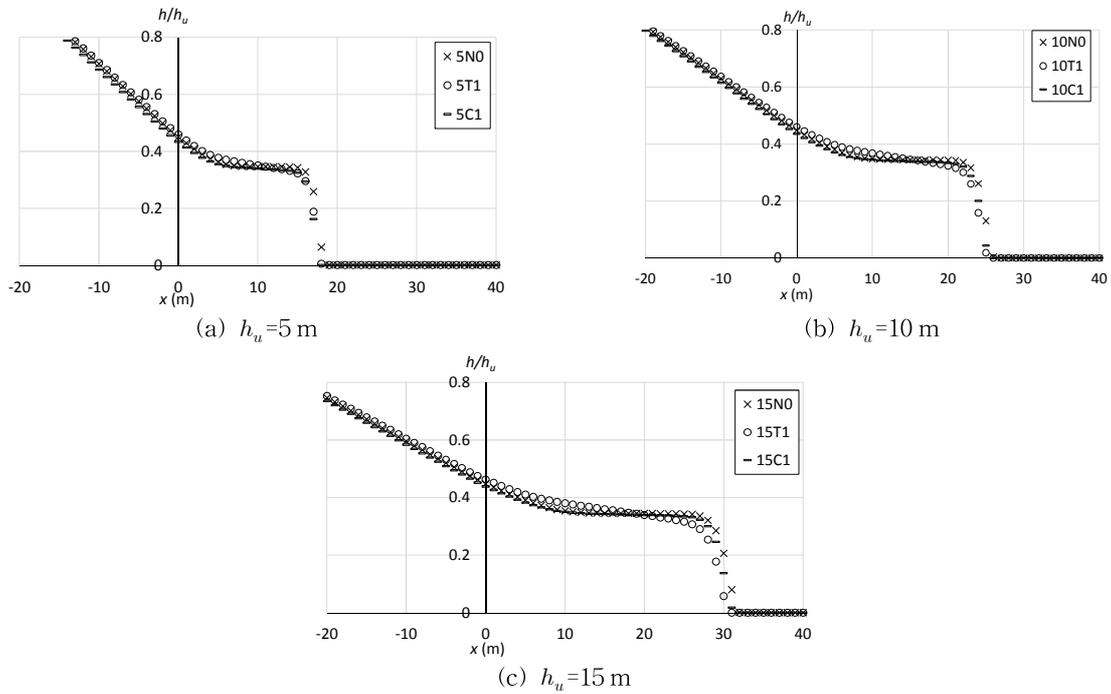


Fig. 5. Depth Distributions Varying with Flow Resistance Stresses at $t=3.0$ sec.

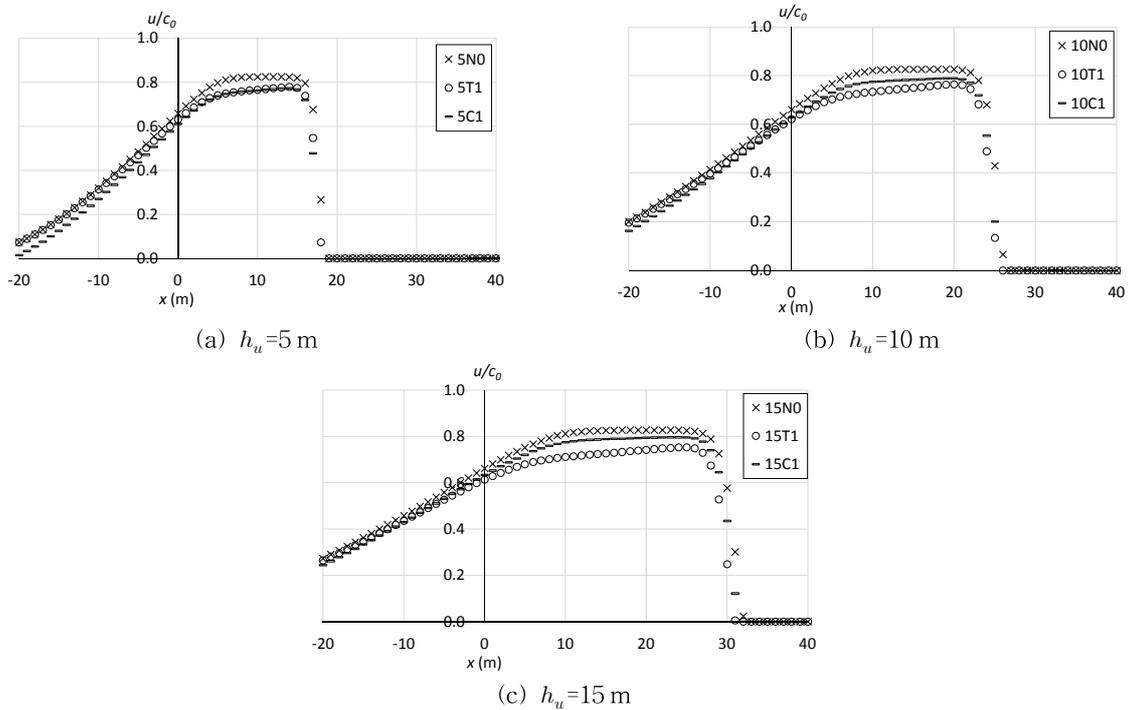


Fig. 6. Velocity Distributions Varying with Flow Resistance Stresses at $t=3.0$ sec.

부에서의 수심값은 N0, C1, T1 순으로 크게 나타났다. Fig. 6에서 h_u 에 관계없이 흐름저항을 무시한 N0 RUN의 경우, u/c_0 는 최대 0.82의 값을 가졌으며, 충격파에 반대 방향으로 작용하는 외력을 무시하였으므로 T1 RUN이나

C1 RUN에 비해 4~10% 정도 높은 유속이 나타났다. $h_u=5$ m인 경우 댐붕괴 후면에서는 5T1이 5N0과 매우 근사하였으나, $x > 0$ 의 영역에서는 5C1의 값에 근접하였다. Coulomb 응력을 적용한 경우 댐붕괴 후면에서의 유속은

N0나 T1에 비해 상대적으로 작게 나타났으나, h_u 가 증가할수록 충격파가 도달하는 영역에서는 N0와 T1 사이의 값을 가졌다. 이는 h_u 가 커질수록 댐붕괴류의 이동속도와 전파유속이 커지므로, Eq. (4)에 의해 T1의 바닥마찰력이 증가하여 C1의 유속이 T1보다 크게 나타났기 때문이다.

Fig. 7은 초기 불연속 수심 경계면에 해당하는 $x=0$ 축선의 중앙점인(0, 2.5)에서 시간에 따른 Fr 수 변화를 도시한 것이다. Toro (2001)에 의하면, 댐붕괴가 발생하는 경우 초기 불연속면에서는 천이류가 형성되어 $Fr=1.0$ 이 유지되므로, 이를 통해 수치모형의 적용성, 수치기법의 정확도 및 흐름저항능력의 영향력 등을 판단할 수 있다. Fig. 7에서 h_u 에 관계없이 흐름 저항능력을 고려하지 않은 경우가 $Fr=1.0$ 에 가장 근사하였다. 초기수심이 상대적으로 낮은 Fig. 7(a)의 경우, 바닥 전단응력을 고려한 5T1과 Coulomb 흐름 저항력이 반영된 5C1의 Fr 값이 유사하였으나, h_u 가 10인 경우 10C1에 의한 결과가 10T1보다 상대적으로 정확하였으며, $h_u=15$ 인 경우 반대로 15T1이 15C1에 비해 우수한 모의결과를 도출하였다. C1의 경우 초기수심이 증가함에 따라 Fr 수가 0.90에서 0.95로 비례하여 증가한 반면 T1은 $h_u=15$ m인 경우에는 $Fr=1.0$ 에 매우 근사하였으나, 초기수심이 이보다 낮은 경우에는 $Fr=0.90$ 을 유지하였다. 흐름저항능력이 고려된 경우 초기 수심이 특정 범위를 초과하게 되면 충격파의 전파속도와 유체의 이동

속도가 같아지게 되고, 불연속면에서 충격파와 소밀파의 영향이 균형을 이루므로 이와 같은 현상이 발생한 것으로 판단된다.

5. 결론

댐붕괴에 의해 발생하는 홍수파는 초기수심의 깊이에 따라서 하류부로 전달되는 이송 과정 및 수리학적 특성이 다르게 나타나며, 이에 대한 수치모의 시 바닥마찰력, 구성유체의 내부 전단력 등에 의한 흐름저항능력을 어떻게 다루느냐에 따라 충격파의 전파 속도, 도달 거리 및 접근 수심 등이 다르게 나타난다. 본 연구에서는 천수방정식을 SU/PG 기법으로 이산화한 유한요소모형을 개발하고 쪼은 바닥 위를 통과하는 댐붕괴류의 수심 및 유속에 관한 해석해를 이용하여 모형을 검증하였다. 댐붕괴가 발생한 후면에서 소밀파의 진행에 따른 수면 지하형상과 유속 증가 경향이 잘 일치하였으며, 시간에 따른 충격파의 도달 거리 및 선단부 최대 유속이 매우 근사하였다. 또한 댐붕괴가 발생한 지점에서의 수심은 초기수심의 44.4%에 해당하는 값을 가져 해석해에 의한 값과 일치하였다.

초기수심 및 흐름 저항능력에 따른 댐붕괴류의 전파특성을 분석하기 위해 세 가지 초기 수심을 가정하고 각 수심 별로 흐름저항능력이 없는 경우(N0)와 마찰계수에 의

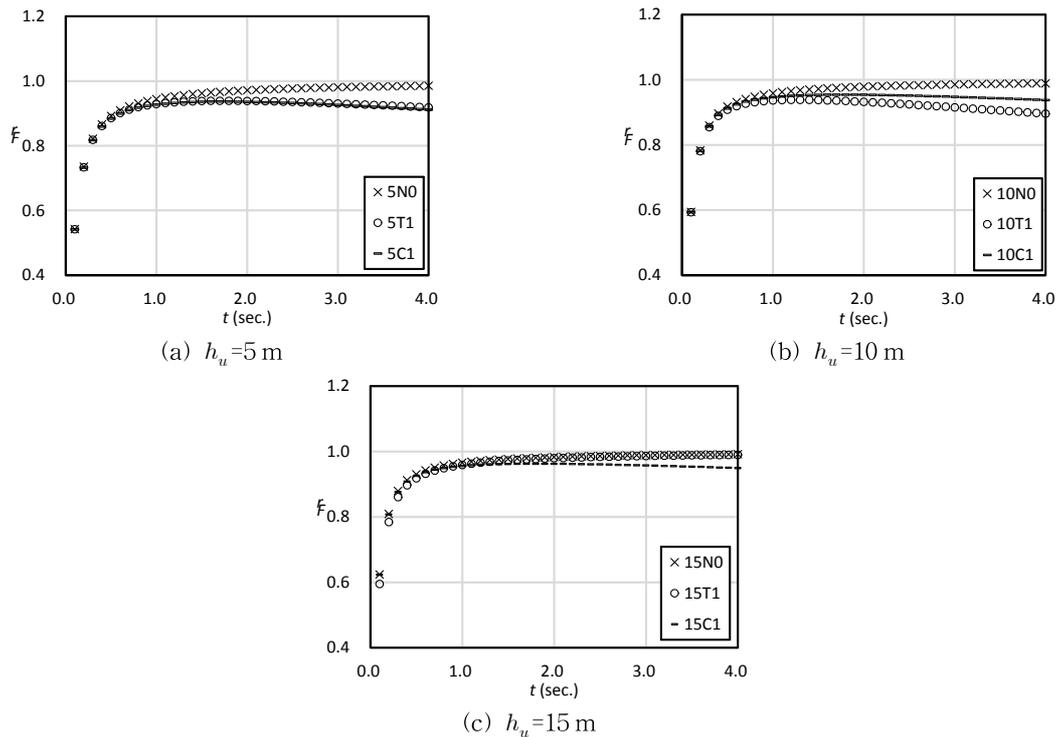


Fig. 7. Fr Variations at Critical Flow Point (0, 2.5) by Initial Depths

해 바닥마찰력이 부여되는 경우(T1) 및 Coulomb 마찰력에 의해 구성유체의 내부저항이 반영되는 경우(C1)를 고려하였다. T1에 의한 충격파의 도달거리는 약간 짧았고, 수심은 상대적으로 크게 나타났다. 이는 난류응력에 의한 바닥저항력이 작용하여 유속이 N0나 C1에 비해 감소하여 수심은 상대적으로 커졌기 때문이다. 충격파의 최선단부에서의 수심값은 N0, C1, T1 순으로 크게 나타났으며, 초기 수심에 관계없이 흐름저항을 무시한 N0 RUN의 경우, u/c_0 는 최대 0.82의 값을 가졌으며, 충격파에 반대방향으로 작용하는 외력을 무시하였으므로 T1 RUN이나 C1 RUN에 비해 4-10 % 정도 높은 유속이 나타났다. Coulomb 응력을 적용한 경우 댐붕괴 후면에서의 유속은 N0나 T1에 비해 상대적으로 작게 나타났으나, 초기수심이 커질수록 충격파가 도달하는 영역에서는 N0와 T1 사이의 값을 가졌다. 이는 초기수심이 증가할수록 댐붕괴류의 이동속도와 전파유속이 커지므로, T1의 바닥마찰력이 증가하여 C1의 유속이 T1보다 크게 나타났기 때문이다.

댐붕괴가 발생하는 경우 초기 불연속면에서는 천이류가 형성되어 $Fr=1.0$ 이 유지되므로, 이를 통해 흐름저항응력의 정확도를 판단할 수 있었다. 흐름저항응력이 고려된 경우 초기 수심이 특정 범위를 초과하게 되면 충격파의 전파속도와 유체의 이동속도가 같아지게 되고, 불연속면에서 충격파와 소밀파의 영향이 균형을 이루므로 높은 초기수심이 부여된 경우 $Fr=1.0$ 에 보다 근사하였다. 향후 연구에서는 흐름 저항응력을 Bingham 및 Voellmy 관계식 등으로 확장하고, 가파른 바닥경사 지형 상의 중력유발 댐붕괴류에 관한 모의를 수행하여, 산사면 및 도심 급경사면에서 발생하는 토석류 유동 해석을 위한 수치모형을 검증하고자 한다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원 건설기술연구사업의 연구비지원(13SCIPS04)에 의해 수행되었습니다.

References

Akin, J.E., and Tezduyar, T.E. (2004). "Calculation of the advective limit of the SUPG stabilization parameter for linear and higher-order elements." *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 193, No. 21, pp. 1909-1922.

Bova, S.W., and Carey, G.F. (1996) "A symmetric formulation and SU/PG scheme for the shallow-water equations." *Advances in Water Resources*, Vol. 19, No. 3, pp 123-131.

Chanson, H. (2006). *Analytical solutions of laminar and turbulent dam break wave*. River Flow 2006, Edited by Ferreira, Alves, Leal and Cardoso, Taylor & Francis Group, London, ISBN 0-415-40815-6.

Dressler, R.F. (1952). *Hydraulic resistance effect upon the dam-break functions*. National Bureau of Standards.

Hungr, O. (1995). "A model for the runout analysis of rapid flow slides, debris flows, and avalanches." *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 32, No. 4, pp. 610-623.

Jeong, W.C., and Park, Y.J. (2011). "A study on simulation of dam-break wave using two-dimensional finite volume model." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 44, No. 3, pp. 249-262.

Kim, B.H., Han, K.Y., and Ahn, K.H. (2009a). "Propagation analysis of dam break wave using approximate Riemann solver." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 29, No. 5B, pp. 429-439.

Kim, D.H., and Cho, Y.S. (2005). "An improved surface gradient method for the computation of hyperbolic-type shallow-water equations on irregular bathymetry." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 25, No. 3B, pp. 223-229.

Kim, H.J., Kim, J.M., and Cho, Y.S. (2009b). "Numerical analysis of dam-break flow in an experimental channel using cut-cell method." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 29, No. 2B, pp. 121-129.

Mangeney, A., Heinrich, P., and Roche, R. (2000). "Analytical solution for testing debris avalanche numerical models." *Pure and Applied Geophysics*, Vol. 157, No. 6-8, pp. 1081-1096.

Medina, V., Hurlimann, M., and Bateman, A. (2008). "Application of FLATModel, a 2D finite volume code, to debris flows in the northeastern part of the Iberian Peninsula." *Landslides*, Vol. 5, No. 1, pp. 127-142.

Mungkasi, S., and Roberts, S.G. (2011). "A new analytical solution for testing debris avalanche numerical models." *ANZIAM Journal*, Vol. 52, pp. C349-C363.

- Murillo, J., and Garcia-Navarro, P. (2012). "Wave Riemann description of friction terms in unsteady shallow flows: Application to water and mud/debris floods." *Journal of Computational Physics*, Vol. 231, No. 4, pp. 1963–2001.
- Naef, D., Rickenmann, D., Rutschmann, P., and McArdell, B.W. (2006). "Comparison of flow resistance relations for debris flows using a one-dimensional finite element simulation model." *Natural Hazards and Earth System Science*, Vol. 6, No. 1, pp. 155–165.
- Ritter, A. (1892). "Die Fortpflanzung der Wasserwelle." *Vereine Deutscher Ingenieure Zeitschrift*, Vol. 36, pp. 947–954.
- Seo, I.W., and Song, C.G. (2010). "Development of 2D finite element model for the analysis of shallow water flow." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 30, No. 2B, pp. 199–209.
- Seo, I.W., Kim, Y.D., and Song, C.G. (2014). "Validation of Depth-Averaged Flow Model Using Flat-Bottomed Benchmark Problems." *The Scientific World Journal*, Vol. 2014, Article ID 197539, 18 pages.
- Song, C.G., and Seo, I.W. (2012). "Numerical simulation of convection-dominated flow using SU/PG scheme." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 32, No. 3B, pp. 175–183.
- Stoker, J.J. (1957). *Water Waves: The Mathematical Theory with Application*. Interscience Publishers, New York.
- Toro, E.F. (2001). *Shock-capturing Methods for Free-surface Shallow Water Flows*. Wiley, New York.
- Whitham, G.B. (1955). "The effects of hydraulic resistance in the dam-break problem." *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, Vol. 227, No. 1170, pp. 399–407.

<p>paper number : 14-071 Received : 1 August 2014 Revised : 30 August 2014 / 17 October 2014 Accepted : 17 October 2014</p>
--