

충격파 전파 흐름문제의 해석



송창근 ●●●
인천대학교 안전공학과 교수
baybreeze119@incheon.ac.kr

서론

최근 빈번하게 발생하고 있는 대규모 재난에 대비하고자 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 PMF나 설계빈도를 초월하는 이상홍수에 의해 댐 등의 수공 구조물이 붕괴되는 비상상황에 대비하기 위한 치수능력증대 사업에 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 중요 국가 시설물이 위치하고 있는 경우에는 가능최대

강수량 등 극한적인 강우조건 하에서 댐의 가상적인 비상상황에 따른 하류부의 홍수파 해석을 실시하고 예상되는 홍수위 변동 양상을 파악함으로써 만일에 발생할 수 있는 사태에 대한 피해를 최소화 할 수 있는 대책이 수립되어야 한다 (Song and Oh, 2016).

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 진행파와 역행파를 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; Murillo and Garcia-Navarro, 2012).

미국의 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 사상자

가 발생하고, 2,000여명이 집을 잃었으며, 4,000여명이 긴급 대피한 것으로 집계되었다. 댐붕괴는 기초의 전단저항 강도 미달, 지반의 불안정, 댐체의 침식 등이 극치 강우사상과 함께 작용하여 발생하며, 댐붕괴에 의해 발생하는 홍수파는 초기수심의 깊이에 따라서 하류부로 이동되는 전달 과정 및 수리적 특성이 다르게 나타나며, 이에 대한 수치모의 시 바닥마찰력, 구성유체 입자의 내부 전단력 등에 의한 흐름저항응력을 어떻게 다루느냐에 따라 충격파의 전파 속도, 도달 거리 및 접근 수심 등이 다르게 나타난다.

댐붕괴가 발생한 경우 시간에 따른 충격파의 이동 속도, 접근 수심 및 도달 거리 등의 전파특성은 수리구조물의 설계나 재해 예방 등의 측면에서 매우 중요하므로, 본 기사에서는 다양한 조건에 따른 충격파 전파흐름에 관한 해석해를 정리하였다.

해석해

Ritter(1892)는 특성기법(characteristic method)에 의해 이상유체의 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 소성 유체의 도달거리를 에너지보존법칙에 근거하여 유도하였다. Mangeney 등(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 등(2000)의 결과를 일반화하여 초기수심이 직교 좌표계와 일치하는 경우의 해석해를 구하였다. 마른 하도와 젖은 하도를 통과하는 댐붕괴류의 해석해를 정리하면 다음과 같다.

마른 하도 조건에서 이상유체의 해석해

Ritter(1892)는 식 (1)과 같이 1차원 질량보존방정식과 Coulomb 저항응력을 포함한 비보존형 운동량방정식에 관한 해석해를 유도하였다.

$$\begin{aligned} h_t + uh_x + hu_x &= 0 \\ u_t + gh_x + uu_x &= -g \frac{dz}{dx} - g \cos\theta \tan\phi \end{aligned} \quad (1)$$

변수치환에 의해 식 (1)을 외력이 없는 형태로 변형하고, 특성기법(characteristic method)을 적용하면 마찰이 없는 평평한 직사각형 수로의 마른 바닥을 통과하는 이상유체의 특정 시간 t 에서의 수심(h)과 유속(u)에 대한 해석해를 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$h = \begin{cases} h_u & x_2 \geq x \\ \frac{h_u}{9} \left(2 - \frac{x}{t\sqrt{gh_u}} \right)^2 & x_2 \leq x \leq x_I \\ 0 & x \geq x_I \end{cases} \quad (2)$$

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

$$x_2 = -\sqrt{gh_u} t \quad x_I = 2\sqrt{gh_u} t \quad (4)$$

위 식에서, h_u 는 Fig. 1(a)에 표시된 바와 같이 댐붕괴 발생 전 초기수심을 의미하며, x_2 와 x_I 는 각각 역행파와 진행파가 도달한 위치를 나타낸다.

마른 하도 조건에서 실제유체의 해석해

Ritter(1892)의 해는 바닥마찰력과 점성을 무시한 이상유체의 해석해에 해당하므로, Fig. 1(a)에 점선으로 표시된 바와 같이 충격파의 이동거리를 과대산정하고 선단부의 수면형상을 왜곡하는 단점이 있다. 이와 같은 문제점을 해결하기 위해 여러 연구가 진행되었으나, 본 기사에서는 댐붕괴

류가 전파되는 선단부의 유속을 파속(celerity)으로 가정하고, Darcy-Weisbach 마찰계수를 도입하여 바닥전단력이 반영된 실제유체에 보다 근사한 수심과 유속값을 제시한 Chanson(2006)의 해석해를 정리하였다. Fig. 1(a)에 실선으로 표시된 Chanson(2006)의 해는 아래와 같으며, 상기 이상유체의 해석해에 실제유체의 선단부 영역에 해

$$h = \begin{cases} h_u & x_2 \geq x \\ \frac{h_u}{9} \left(2 - \frac{x}{t\sqrt{gh_u}} \right)^2 & x_2 \leq x \leq x_1 \\ h_u \left(\frac{9}{32} G^{1/4} \left(\frac{u}{\sqrt{gh_u}} \right)^2 \frac{(x_R - x)}{h_u} \right)^{4/9} & x_1 \leq x \leq x_R \\ 0 & x \geq x_R \end{cases} \quad (5)$$

$$u = \begin{cases} 0 & x_2 \geq x \\ \frac{2}{3} \left(\frac{x}{t} + \sqrt{gh_u} \right) & x_2 \leq x \leq x_1 \\ \sqrt{\frac{32gh_u^2}{9G^{1/4}(x_R - x)}} \left(\frac{h}{h_u} \right)^{9/8} & x_1 \leq x \leq x_R \\ 0 & x \geq x_R \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} x_2 &= -\sqrt{gh_u} t \\ x_1 &= \left(\frac{3}{2} u - \sqrt{gh_u} \right) t \\ x_R &= h_u \left[\left(\frac{3}{2} \frac{u}{\sqrt{gh_u}} - 1 \right) \sqrt{\frac{g}{h_u}} t + \frac{32}{9G^{1/4}} \left(\frac{\sqrt{gh_u}}{u} \right)^2 \left(1 - \frac{1}{2} \frac{u}{\sqrt{gh_u}} \right)^{9/2} \right] \end{aligned} \quad (7)$$

$$G = 3.65e - 5 \frac{k_s}{h_u} + \frac{2.5e - 3}{Re_D \times \frac{u}{\sqrt{gh_u}}} \quad (8)$$

sand roughness height)이고, $Re_D = \sqrt{gh_u^3} / \nu$ 는 초기 수심과 유체의 동점성계수(ν)에 의해 정의되는 무차원 Re 수이다.

젖은 하도 조건에서의 해석해

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

당하는 $x_1 \leq x \leq x_R$ 에서의 수심과 유속값이 별도로 추가되어 있음을 알 수 있다. 또한 식 (8)과 같이 조도(k_s), Re 수, 유속(u) 및 초기수심(h_u)의 함수인 매개변수 G 를 도입하여 선단부에서의 바닥마찰과 점성효과를 반영하였음을 확인할 수 있다.

식 (8)에서 k_s 는 등가 모래 조도고(equivalent

$$\begin{aligned} x_2 &\geq x \\ x_2 &\leq x \leq x_1 \\ x_1 &\leq x \leq x_R \\ x &\geq x_R \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} x_2 &\geq x \\ x_2 &\leq x \leq x_1 \\ x_1 &\leq x \leq x_R \\ x &\geq x_R \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} x_2 &= -\sqrt{gh_u} t \\ x_1 &= \left(\frac{3}{2} u - \sqrt{gh_u} \right) t \\ x_R &= h_u \left[\left(\frac{3}{2} \frac{u}{\sqrt{gh_u}} - 1 \right) \sqrt{\frac{g}{h_u}} t + \frac{32}{9G^{1/4}} \left(\frac{\sqrt{gh_u}}{u} \right)^2 \left(1 - \frac{1}{2} \frac{u}{\sqrt{gh_u}} \right)^{9/2} \right] \end{aligned} \quad (7)$$

$$G = 3.65e - 5 \frac{k_s}{h_u} + \frac{2.5e - 3}{Re_D \times \frac{u}{\sqrt{gh_u}}} \quad (8)$$

바닥과 젖은 바닥 위를 통과하는 수심과 유속에 관한 해석해인 식 (5)-(6)과 식 (9)-(10)을 비교해보면 $x_2 \leq x \leq x_1$ 의 영역에서는 동일한 식을 가지지만, 젖은 하도의 진행과 도달영역에서는 초기 하류부 바닥조건에 의한 영향이 작용하기 때문에 댐 상류부의 초기 수심 h_u 과 하류부의 초기수심 h_d 이 고려된 전파유속 c_m 이 포함되어 있음을 알 수 있다.

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

$$u = \begin{cases} 0 & x_2 \geq x \\ \frac{2}{3} \left(\frac{x}{t} + \sqrt{gh_u} \right) & x_2 \leq x \leq x_1 \\ 2(\sqrt{gh_u} - c_m) & x_1 \leq x \leq x_R \\ 0 & x \geq x_R \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} x_2 &= -\sqrt{gh_u}t \\ x_1 &= (2\sqrt{gh_u} - 3c_m)t \\ x_R &= \frac{2c_m^2(\sqrt{gh_u} - c_m)}{c_m^2 - gh_d}t \end{aligned} \quad (11)$$

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

$$-8gh_dc_m^2(gh_u - c_m^2)^2 + (c_m^2 - gh_d)^2(c_m^2 + gh_d) = 0 \quad (12)$$

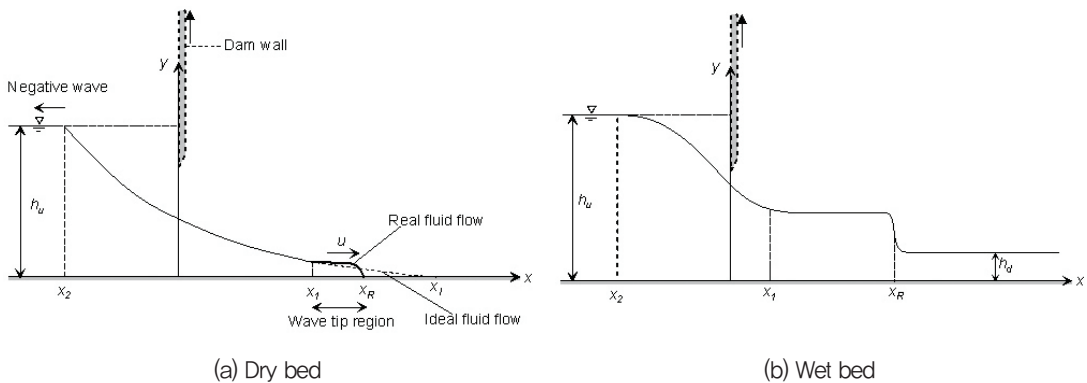


Fig. 1. Schematic diagram of dam break flow in flat-bottom



최규현, 한건연 (2005). “댐 붕괴 해석을 위한 2차원 홍수범람모형의 개발: I. 이론 및 모형의 검증.” 대한토목학회 논문집, Vol. 25, No. 2B, pp. 135–142.

Chanson, H. (2006). Analytical solutions of laminar and turbulent dam break wave.

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

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.

Mungskasi, 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.

Song, C. G., and Oh, T. G. (2016). “Transient SU/PG modelling of discontinuous wave propagation.” Progress in Computational Fluid Dynamics, Vol. 16, No. 3, pp. 146–162.

Stoker, J. J. (1957). Water Waves: The Mathematical Theory with Application. Interscience Publishers, 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.