

댐 붕괴 수치모형에 대한 적용성 평가

Applicability Evaluations of Dam Breach Floodwave Models

한 건 언 / 이 재 영 / 이 을 래 / 송 재 우

Han, Kun Yeun / Lee, Jae Young / Lee, Eul Rae / Song, Jai Woo

Abstract

Five dam-break floodwave models are evaluated by using two field data sets. The models include FLDWAV, SMPDBK, HEC-1, TR66, and HEC Dimensionless Graph. The field data sets documented the disasters at Teton dam, and Yeunchun dam. The FLDWAV results are used to test the sensitivity of the floodwave to variations in Manning's roughness coefficient, breach size, and bottom slope. The HEC-1 analysis includes testing the sensitivity of the results to model parameters. The TR66 procedure is applied with the peak discharge at dam computed with the TR66 model and FLDWAV, with channel routing by TR66 in both cases. SMPDBK and the Dimensionless Graph procedure are applied without particular difficulties being encountered in both real world cases. It is necessary to analyze numerical limit of existing numerical models and then to apply the relatively accurate numerical model in real basin. It is found that FLDWAV model is superior in numerical accuracy and stability to any other model. This study will contribute to improve defect of numerical models and develop more precise numerical model for a efficient and rapid dam breach flood disaster predict.

Keywords : dam-break, floodwave, flood disaster, numerical model

요 지

FLDWAV, SMPDBK, HEC-1, TR66, HEC Dimensionless Graph의 다섯 개의 댐 붕괴 홍수파 모형들이 두 개의 실측자료인 Teton Dam과 연천댐의 자료를 이용하여 평가되었다. FLDWAV는 조도계수와 붕괴부 크기에 대한 홍수파의 민감도를 검증하는데 이용되었다. HEC-1은 모형 매개변수에 대한 결과의 민감도를 검증하였다. TR66 절차는 TR66과 FLDWAV로 계산된 댐에서의 침투유량과 TR66에 의한 수로추적의 두 경우에 대해서 적용되었다. SMPDBK와 Dimensionless Graph 절차는 실제경우에 있어 발생하는 특별한 어려움 없이 적용되었다. 그 결과 FLDWAV 모형이 수치적 정확성 및 안정성 면에서 우수한 것으로 나타났다. 기존의 수치모형들의 수치적 한계를 분석해서 상대적으로 정확한 수치모형을 실제유역에 적용하는 것이 필요하다. 본 연구는 효율적이고 신속한 댐 붕괴 재해 예측을 위해서 수치적 모형들의 결합을 보완하여 보다 정확한 수치모형개발에 기여할 것으로 사료된다.

핵심용어 : 댐붕괴, 홍수파, 홍수재해, 수치모형

- * 경북대학교 공과대학 토목공학과 교수
- ** 경북대학교 공과대학 토목공학과 박사과정
- *** 홍익대학교 공과대학 토목공학과 교수

1. 서 론

댐 및 제방의 붕괴는 주로 집중호우로 인하여 댐의 여수로 및 하천의 수로단면에서의 홍수소통 능력이 충분하지 못하여 수위가 댐 및 제방을 월류하는 경우 또는 제체내에서 발생하는 침투, 파이핑, 활동 등이 주요 원인이다. 댐 붕괴로 인한 홍수피해는 댐의 하류부에서 막대한 피해를 야기하므로 이것에 대처하기 위해서는 댐 붕괴에 따른 침투유량을 산정하며, 이로 인한 홍수피해가 하류로 전파되어 나감에 따라 하도 각 지점에서의 침투유량, 최고수위, 홍수도달시간 등을 예측하는 것은 매우 중요한 작업이다.

댐 붕괴로부터의 홍수파 해석을 위한 방법은 그 해석 알고리즘이 비교적 정교한 해석모형으로서는 동력학적 홍수추적 방법을 사용하는 미국기상청의 FLDWAV (Fread와 Lewis, 1995), 수문학적 홍수추적 방법을 사용하는 미국육군공병단의 HEC-1(Hydrologic Engineering Center, 1987)이 있으며, 비교적 간단한 해석모형으로서는 미국기상청의 SMPDBK(Wetmore와 Fread, 1989), 미국토양보존국의 TR66(Soil Conservation Service, 1979), 미국육군공병단 수문연구소의 Dimensionless Graph(Sakkas, 1976) 등이 있다. 따라서 본 연구에서는 기존의 5개 수치모형의 계산 알고리즘을 비교·검토하여 이를 실제 실제유역에 적용함으로써 댐 붕괴와 관련된 하천에서의 방재대책 수립을 위한 실용적이고 경제적인 해석 수단을 제시함에 그 목적이 있다. 이를 위해서 미국의 Teton댐 및 국내의 연천댐에 대한 실제의 댐 붕괴자료를 바탕으로 댐 붕괴에 따른 침투홍수량을 예측하고 하류부의 영향을 비교·검토하였다.

댐 붕괴에 따른 홍수파 해석에 관한 연구의 효시는 Ritter(1892)에 의하여 단순화된 이론적인 해가 유도되었으며, Dressler(1954), Whitham(1955)은 홍수파 선단에서의 수심이 'h'에 가까운 값에 접근함에 따라 수면형의 경사는 무한히 커질 수 있다는 사실을 연구하였다. 미국육군공병단의 WES에서는 급격한 파괴로부터 발생하는 홍수파에 관한 연구를 위하여 수리모형실험을 실시하여 많은 실험자료를 발표하였고, 파괴부의 형상과 침투유출률간의 관계를 제시하였다.

댐 하류부의 홍수추적과정에 관한 수치해석기법은 대부분의 경우 Saint-Venant식을 기초로 하고 있는데 Sakkas와 Strelkoff(1973), Rajar(1978), Katopodis와 Strelkoff(1985), Chen과 Ambuster(1980), Ponce와 Tsivoglou(1981)는 유한차분기법을 이용하여 댐붕괴

홍수파를 해석하였다.

최소의 자료로 신속하게 침투홍수량을 추정하는 단순화 수치해석 모형에 관한 연구는 SMPDBK모형, 수문학적 방법으로 붕괴부에서의 수분곡선을 구한 후 Attenuation-Kinematic모형으로 일컫는 저수지 추적방법을 사용한 TR66모형, 일반적인 포물선형 단면에 대해서 특성곡선방법으로 홍수추적을 실시한 Dimensionless Graph 등이 있다.

국내에서 이 분야에 대한 연구는 한건연 등(1985), 이종태 등(1986), 한건연(1987)에 의하여 댐의 파괴양상을 실측치를 중심으로 유출수문곡선을 유도하고 홍수파를 Preissmann scheme에 의하여 차분화한 후 double-sweep, fore sweep 알고리즘으로 해석한 바 있다. 오남선과 선우중호(1989)은 홍댐의 점진적인 파괴에 대해 연구한 바 있고, Lee와 Lee(1990)은 기존의 DAMBRK, HEC-1, SMPDBK모형에 대해서 Teton댐 붕괴의 경우에 대해 적용하고 이를 검토하였다. 한건연(1990)은 급격한 댐 파괴로부터의 홍수파가 마른하도상에 전파되는 양상을 Hartree의 이동기법에 의하여 해석한 연구가 있으며, 이종태와 한건연(1992)은 SMPDBK모형을 시류 해석의 영역까지 확장 발전시켰고, 한건연 등(1996, 1997)은 유한요소법에 의해 댐 붕괴의 경우를 포함한 부정류 해석을 실시하였다.

본 연구를 통하여 이상강우의 영향을 고려한 국내 댐에 대한 가상붕괴에 따른 홍수범람 피해를 방지할 수 있는 수공학적 방재대책 수립을 위한 기초자료가 제시될 수 있을 것이다. 또한, 댐 하류부에 주요도시 및 중요한 국가시설물이 위치하고 있는 경우에 댐 붕괴에 따른 홍수범람 해석 및 방재공학적 대책수립 등에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

2. 댐 붕괴 홍수파 해석모형

2.1 FLDWAV 모형

FLDWAV 모형(Fread와 Lewis, 1995)은 그 기본 알고리즘에 있어 DAMBRK 모형과 동일하며 댐 붕괴로부터 유출수문곡선을 유도하고 하류부 하도를 통한 홍수파를 수리학적으로 추적하는데 이용된다. 이 모형은 다양한 수준의 입력자료를 포함함으로써 폭넓은 적용성을 지닌다. 붕괴부를 통한 유출량은 월류파괴인 경우 넓은 마루웨어식을 이용하여 계산한다.

$$Q_b = C_r K_s [C_1 b_f (h - h_b)^{1.5} + C_2 Z (h - h_b)^{2.5}] \quad (1)$$

여기서 C_1, C_2 는 직사각형 및 삼각형 넓은마루웨어의 유량계수, C_3 는 접근유속에 대한 보정계수, b_n 는 순간적인 붕괴부의 저면폭, Z_n 는 붕괴부 측면면 경사, h_n 는 댐 직상류부의 수위, h_{bn} 는 붕괴부의 최저면 수위, K_n 는 하류부 수위에 의한 잠수보정계수를 나타낸다.

하류부의 댐 붕괴 홍수와 추적에 대해서는 동역학적 방법에 의한 수리학적 방법이 사용된다. 동역학적 방법에 의한 댐 파괴 홍수 수문곡선을 추적하는데 이용되는 기본방정식은 확장된 Saint-Venant식으로 구성된다. FLDWAV에서는 가중된 four-point implicit 유한차분기법에 의해서 수위와 유량을 구할 수 있도록 되어있다.

2.2 SMPDBK 모형

SMPDBK 모형(Wetmore와 Fread, 1989)은 계산에 필요한 시간이 제약되어 있어 정교한 계산기법을 효율적으로 이용하기 어려운 경우에 적용될 수 있도록 개발되었다. SMPDBK 모형은 비교적 단시간내에 최소한의 수리특성자료만으로 비교적 타당한 홍수량을 예측하는 것으로 검토되었다. 댐 붕괴로부터 최대유출량은 넓은마루 웨어식을 이용하여 식 (2)와 같이 구할 수 있다.

$$Q_{bmax} = Q_o + 3.1B_r \left(\frac{C}{\frac{t_r}{60} + \frac{C}{\sqrt{H}}} \right)^3 \quad (2)$$

여기서 $C = 23.4A_s/B_r$, A_s 는 저수지 만수시에서의 저수지 표면적(acres)이고 H 는 최종 붕괴수위에서의 저수지 만수시의 수심(ft)이며 B_r 는 평균 최종 붕괴폭(ft), t_r 는 붕괴시간(min)이고 Q_o 는 시간 t 에서 부가적인(비붕괴) 유출(cfs)을 나타낸다.

침투 붕괴유출량이 산정되면 추적매개변수 개념을 도입하고 무차원 추적곡선을 이용하여 하류부에서의 홍수 추적이 실시된다. 이러한 곡선들은 DAMBRK 모형의 다양한 실험으로부터 개발되었다. 무차원추적곡선은 침투홍수파와 관계된 Froude수에 기초한 곡선군으로 분류된다.

2.3 HEC-1 모형

HEC-1(Hydrologic Engineering Center, 1987)은 댐 붕괴를 통한 유출량을 산정하기 위해서 3가지 경우의 흐름을 고려해야 한다. 즉 평평한 정부인 경우의 댐 월류와 평평하지 않은 정부인 경우의 댐 월류, 그리고 댐 붕괴를 통한 유량을 각각 고려한다. 댐 붕괴를 통한 유량은 식 (3)으로부터 구할 수 있다.

$$Q = C1 \times BRWD \times (WSEL - BREL)^{1.5} + C2 \times (WSEL - BREL)^{2.5} \quad (3)$$

여기서 $WSEL$ 은 저수지의 수면표고, $BREL$ 은 붕괴 저면 표고, $BRWD$ 는 붕괴폭, $C1$ 은 직사각형 넓은마루웨어의 유량계수, $C2$ 는 측면경사가 Z 인 삼각형웨어의 유량계수이다.

하도부 홍수추적 방법으로는 수정 Puls 방법과 Working R&D 홍수추적 방법이 이용된다. 수정 Puls 방법은 하도추적에 적용될 수 있는데 이와 같은 경우 하도구간의 길이와 하나의 구간내에서 세분되는 추적단계의 수(NSTPS)에 따라 홍수와 감쇠의 정도가 좌우됨을 주의해야 한다.

2.4 TR66 모형

TR66(Soil Conservation Service, 1979)은 댐의 붕괴에 따른 홍수파의 특성을 추정하는 단순화된 Att-Kin(Attenuation-Kinematic) 기법이다. 이러한 특성들은 흐름 최고수심과 관련된 홍수파의 경로에서 미리 정한 위치에서의 침투홍수량과 댐 붕괴로 인한 홍수파에 대한 상하류단간의 경과시간을 포함한다.

붕괴 유출수문곡선은 침투유량, 총체적 및 두 형태에 의해 정의된다. 붕괴 유출수문곡선의 형태를 선택하는 기준은 댐 아래에 접한 하류구간에서 예상된 흐름이 사류라면 적용할 수 있는 형태는 삼각형이고 그렇지 않은 경우의 수문곡선 형태는 곡선형이다. 붕괴된 댐 하류부에 접한 유역에서의 흐름이 상류라면 하류수위는 댐으로부터의 유출에 의해 잠수될 것이고 그때 유출수문곡선은 곡선형태로 가정될 것이다. 흐름이 사류라면 하류수위는 더 낮아지게 될 것이고 이 경우의 수문곡선의 형태는 삼각형형태가 될 것이다. 그림 1은 Att-Kin 기법에 의한 곡선형 붕괴 유출수문곡선을 나타내는데, 그림에서 무차원 매개변수인 Q^* , K^* , t_o^* 는 식 (4)와 같이 정의된다.

$$Q^* = \frac{Q_o}{Q_i} \quad K^* = \left(\frac{S_f}{V_f} \right) \quad t_o^* = \frac{t_o Q_i}{V_f} \quad (4)$$

여기서 Q_i 는 침투유입량이고 Q_o 는 하류부의 침투유출량, S_f 는 Q_i 와 관계된 하도저류량, V_f 는 붕괴유출수문곡선하에서의 물의 총체적, t_o 는 침투유출량까지의 도달시간이다.

하류부 추적을 위해 주어진 하도구간에 대해 단일 값의 유량과 하도저류의 관계가 결정되어야 한다. 임의 구

CURVILINEAR BREACH HYDROGRAPH

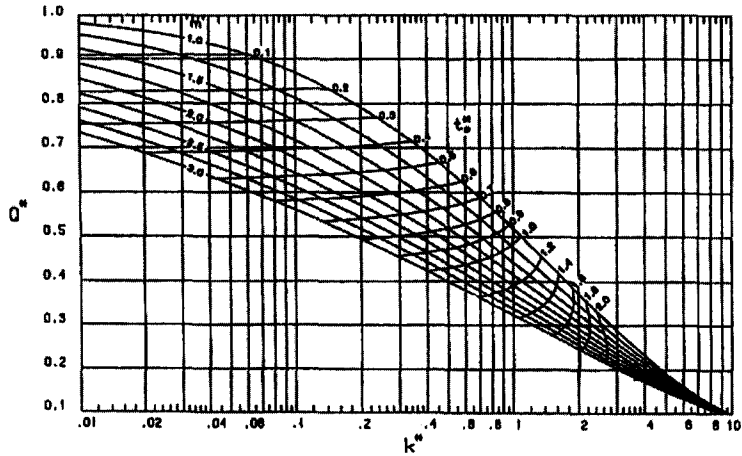


그림 1. TR66에서의 곡선형 붕괴 유출수문곡선(SCS, 1979)

간에 대한 유출량-저류량 관계를 결정하기 위해서는 단면자료, 조도계수 및 구간길이가 요구된다. 하도구간에 대한 유출량-하도저류량 관계는 식 (5)에 의해 나타내어진다.

$$Q_i = k_j (S_{i,j})^{m_j} \quad (5)$$

여기서 Q_i 는 단면 i 에서의 유량, $S_{i,j}$ 는 유량 Q_i 와 관련된 하도구간 j 에서의 하도저류량, j 는 1에서 $m-1$, i 는 1에서 N , m_j 는 하도단면의 수, N 은 유량과 하도저류량 자료의 수이다. k_j 와 m_j 값은 하도구간 j 에 대한 $\log(Q_i)$ 와 $\log(S_{i,j})$ 의 한 쌍의 값을 선형 회귀해석의 적용을 통해서 결정된다. 하도단면에 대한 하도저류와 관련된 식은 식 (6)과 같이 적용되었다.

$$Q = k_o A^m = \frac{k_o}{L_m} S^m \quad (6)$$

등류에 대한 식 (6)에서 k_o 와 m 의 값들은 적절한 마찰공식에 의해 계산된 한 쌍의 Q 와 A 의 값으로부터 직접 결정될 수 있다. 최대수심은 수면곡선의 계산으로부터 유도된 대상 단면에서의 수위-유량 관계곡선에 의해 결정된다.

2.5 Dimensionless Graph

Dimensionless Graph(Sakkas, 1976)는 다른 하도로

유하하는 댐 붕괴 홍수파를 추적하는데 이용된다. 홍수파의 세가지 중요한 특성들은 파의 선단부의 도달시간, 최대홍수수심 및 최대홍수수심의 발생시간이다. 추적곡선은 Saint-Venant식의 무차원 형태를 푸는 수치적 모의수행 실험의 결과로부터 구성되었다. 저수지의 상류경계로부터 반사되는 부파의 전달뿐 아니라 마른 하도상의 홍수침투치의 전파가 계산되어졌다. 이러한 그래프를 활용하기 위해서는 불규칙한 자연단면을 전형적인 균일 단면으로 변환하는 것이 필요하며 이와 관련된 중요한 수리특성치들은 저류와 통수능이다. 하도형상은 포물선 단면의 수로로 표시되며 F_o , M , C 인 3개의 매개변수 및 종속변수 y 와 V 그리고 독립변수 x 와 t 를 포함한다. 수위수문곡선으로부터 실제적으로 구하는 변수는 시간 t_M 에서 발생하는 수심의 최대값 y_M 이다.

$$t_M = s(x, F_o, M, C) \quad (7)$$

$$y_M = u(x, F_o, M, C) \quad (8)$$

여기서 x 는 무차원 거리, F_o 는 Froude 수, M 과 C 는 수심 y 와 폭 B 의 관계인 $B = C y^M$ 에서의 상수, B 는 하폭, y 는 수심이다.

파의 선단부에서의 전파속도 w 는 파면에서의 흐름속과 같다. 만일 x_w 와 t_w 가 $x-t$ 평면에서 파면위치를 지정하면 t_w 에 대한 해는 식 (9)와 같이 구한다.

$$t_w = V(x_w, F_o, M, C) \quad (9)$$

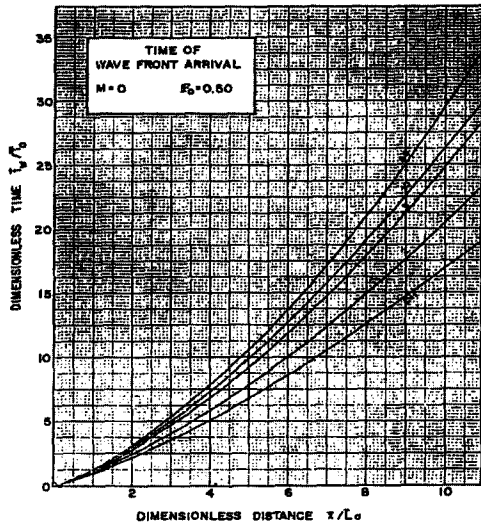


그림 2. 시간에 대한 Dimensionless Graph (Sakkas, 1976)

실질적으로 중요한 댐 파괴 홍수변수들을 구성하는 각각의 식 (7), (8), (9)의 좌변은 F_0 와 M 의 주어진 값에 대해 한 매개변수로서 x 에 의한 C 를 도출할 수 있다. 그림 2는 M 과 F_0 에 따른 시간에 대한 무차원 홍수추적곡선의 예이고, 그림 3은 M 과 F_0 에 따른 수심에 대한 무차원 홍수추적곡선의 예이다. 그림에서 \bar{x} 는 댐으로부터의 거리이고 \bar{L}_0 는 임의지점의 거리, \bar{T}_w 는 홍수도달시간, \bar{T}_0 는 임의지점에서의 수심발생시간, \bar{y}_m 는 최대수심, \bar{Y}_0 는 임의지점에서의 수심이다.

3. Teton Dam 붕괴에 대한 적용

3.1 모형의 적용결과

Teton 댐은 미국 Idaho주에 위치한 높이 91 m, 댐 체체의 길이 914 m, 저류용량 $3.08 \times 10^8 \text{ m}^3$ 인 fill 댐으로서 1976년 6월 5일 붕괴되어 11명의 사망자와 4억불의 피해액을 입혔다(한건연, 1986). Teton 댐에 대한 적용은 다양한 수치모형을 적용하여 비교검토하기 위해서 Teton 계곡구간인 0~5 mile까지의 하도단면을 기본으로 하고 5~50 mile까지는 넓은 홍수터 및 급변하는 자연하도단면을 완전하게 고려하지 못하고 그 하폭이 평균 15% 증대된 하도단면으로 고려하였다.

FLDWAV 모형이 최종 붕괴폭과 Manning 조도

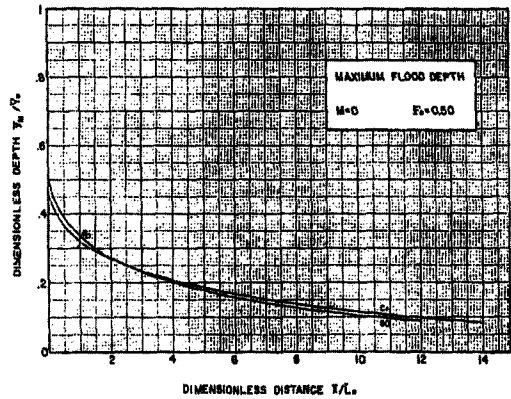


그림 3. 수심에 대한 Dimensionless Graph(Sakkas, 1976)

계수에 대한 댐 붕괴 홍수와 특성의 민감도를 모의하는데 이용되었고 이러한 매개변수들을 이용하여 댐 파괴 시 침투유량, 최고수심 그리고 홍수도달시간에 대한 변동양상을 비교, 검토하였다(이재영, 1996).

계산결과로부터 최종 붕괴폭이 증가할수록 침투유량과 최고수심이 증가하고 또한 홍수도달시간은 감소되며 하도의 조도계수가 증가할수록 침투유량이 감소하고 최고수심이 증가되며 홍수도달시간이 증가된다는 것을 확인할 수 있었다.

SMPDBK 모형의 최종 붕괴폭과 조도계수에 대한 댐 붕괴 홍수파에 의한 침투유량, 최고수심, 홍수도달시간에 대해 변동양상을 비교, 검토하였다(이재영, 1996). 계산결과 댐 하류부의 최고수심은 증가하는 양상을 보이고 있으나 유량과 홍수도달시간은 계산상 발산하는 경향을 보이고 있다. 조도계수는 증가시킬수록 침투유량이 감소되고 최고수심이 증가되며 홍수도달시간이 증가되는 것으로 나타났다. 여기서 댐 하류부의 침투유량과 홍수도달시간은 FLDWAV에 비해 그 변동양상이 뚜렷하지만 최고수심에서는 상당한 수치적 불안정이 발생하였다. 이는 SMPDBK에서의 최고수심이 결정되기 위해 댐 하류부의 단면을 일정형태로 보정하여 계산하는 과정에서 발생한 단면 형상의 오차에 기인하는 것으로 사료된다. 따라서 실제 유역에 적절한 적용을 위해서는 적절한 조도계수의 선정만큼이나 댐 하류부의 단면형상을 얼마나 정확하게 보정하느냐에 달려 있다고 할 수 있겠다.

HEC-1 모형으로 적용하는데 있어서 근사화된 결과를

재현하는 관건이 되는 매개변수는 NMIN과 NSTPS이다. 여기서 NMIN은 계산시간간격이며 NMIN값의 선택은 정확성과 계산효율에 필수적인 요소이다. 지류추적에 사용되는 계산 시간간격의 수 NSTPS는 계산된 수문곡선에 두드러지게 영향을 미칠수 있는 매개변수이다. 이러한 NSTPS는 대개 식 (10)에 의해 계산된다.

$$NSTPS = (\text{구간길이} / \text{평균유속}) / \text{시간간격} \quad (10)$$

이러한 NSTPS와 NMIN값의 선택에 따라 댐 하류부의 최대유출량과 최고수심 및 최고수심 도달시간의 변동양상을 나타낼 수 있었다. 여기서, NSTPS값은 댐 하류부의 다섯 개의 구간에 대해 각각 일정한 1, 5, 10의 값으로 선택적으로 가정되었고 NMIN 4, 10에 대해서는 다섯 개의 구간에 대해 4, 5, 7, 8, 13의 변동적인 NSTPS값을 취하였다.

NMIN값의 4와 10에 대한 결과는 매우 유사하게 나타났으나 매개변수 NSTPS의 변동은 유량과 수위 결과를 두드러지게 변화시킨다는 것을 알 수 있었다. 그 결과 Run 4(NMIN=4, NSTPS=4, 5, 7, 8, 13)가 가장 실제적인 결과로 나타났다.

TR66의 모의과정은 수문 계산절차로서 선택된 위치에서의 침투유량과 수심을 나타낸다. 댐에서의 침투유량은 과거 실제 댐 파괴로부터의 자료에 근거한 침투유량과 지수시 수심과의 관계로부터 결정된다. TR66로부터 계산된 침투유량은 다른 모형에 의해 계산된 500 feet 붕괴폭으로부터의 침투유량 크기의 대략 절반 정도로 나타났다. 그러므로 추가적인 모의수행은 FLDWAV 모형으로 계산된 댐에서의 침투유량이 TR66의 하도추적 절차로 하류부에서 추적되는 것으로 고려하였다.

Dimensionless Graph를 활용하는데 있어서 선행되어야 할 것은 불규칙한 자연단면을 대표적인 단면으로 변형시키는 것이 필요하다. Dimensionless Graph의 계산 절차는 순간적인 댐의 완전한 파괴 가정에 근거를 두고 있다. 따라서 다른 모형들에 사용되는 붕괴 특성(폭 500 feet, 붕괴시간 1시간)은 Dimensionless Graph의 계산 절차에 반영되지 않았다(이재영, 1996).

3.2 각 모형들간의 비교검토

본 절에서는 이제까지 적용된 FLDWAV, HEC-1, SMPDBK, TR66, Dimensionless Graph의 계산절차를 통해 얻은 결과를 비교 검토하였다. 각 모형들의 매개변수는 최대 붕괴시간 1 hour, 붕괴폭 500 feet, 조도계수 0.04로 일치시켰다. 모형별 계산결과는 그림 4~6에 나

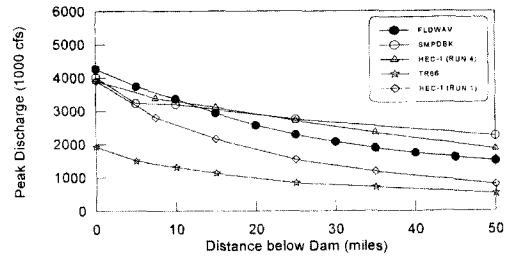


그림 4. 각 지점에 대한 침투유량(Teton 댐)

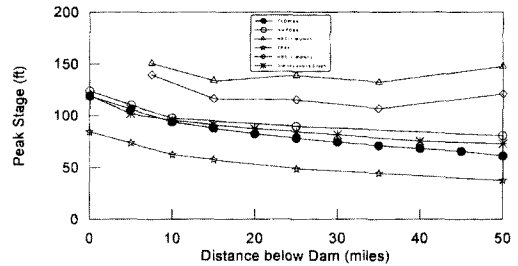


그림 5. 각 지점에 대한 최고수위(Teton 댐)

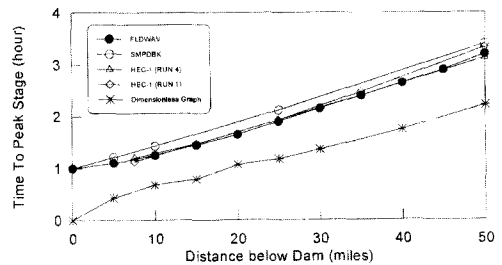


그림 6. 각 지점에 대한 홍수도달시간(Teton 댐)

타난 바와 같이 구간별 침투유량, 최고수심, 홍수도달시간의 변동양상이 모형들간에 상당한 차이가 있다는 것을 알 수 있었다.

FLDWAV 모형은 침투유량과 최고수심의 변동양상이 일정하고 상당한 정확성을 가지는 반면에 SMPDBK 모형은 하도 구간별 변동양상이 부분적으로 다소 불규칙하다는 것을 알 수 있었다. HEC-1은 침투유량은 어느 정도 비슷하게 재현되는 반면 최고수심은 상대적으로 너무 과도하게 나타나며 댐 하류부로 갈수록 수위변동이 불규칙하게 상승하는 양상을 볼 수 있었고 특히 댐

직하류부 단면의 수위변동을 추적하는데 상당히 미흡한 것을 알 수 있었다. 수동 계산절차인 TR66은 침두유량 및 수심이 다른 모형들에 비해 너무 과소하게 나타나 홍수와 해석의 신뢰도에 상당히 미흡하게 나타났다. 또한 Dimensionless Graph의 최고수심 변동양상은 기존의 모형과 비교해 어느 정도 일관성을 유지하고 있었다. 홍수도달시간의 하도구간별 변동양상은 대부분의 수치모형들이 비슷한 양상을 보여주고 있으나 Dimensionless Graph의 경우 상당한 오차가 있음을 보여주고 있었다.

표 1. 침두유량의 비교(연천댐)

댐으로부터의 거리 (km)	침두유량 (cms)			
	FLDWAV	HEC-1	SMPDBK	TR66
0	9883	10277	9690	4466
10	9355	9751	7661	2090
13	9268	9741	7505	1929
16	9185	9729	7454	1581
21	9098	9686	7442	1135

4. 연천댐 붕괴에 대한 적용

4.1 모형의 적용결과

1996년 7월 27일에 경기도 연천군 한탄강 일대에서 발생한 연천댐 붕괴에 대하여 이제까지의 5가지 수치모형을 적용하여 댐 붕괴 홍수파의 특성을 비교 검토하였다(이재영, 1996).

본 연천댐은 댐 길이 243.5 m인 콘크리트 문비형과 토사댐의 혼성형식으로써 저수지의 총 저수량이 1300만 m³, 유효저수량 850만 m³, 총 유역면적 1838 km²로 댐 붕괴시간은 1.17 hr, 댐 붕괴폭은 20 m이다. 검토구간은 연천댐~임진강 합류부구간으로 총 길이는 20.55 km이다(한국수자원학회, 1996). 사용된 자료는 임진강 하천정비기본계획(1980), 임진강 유역조사보고서(1995) 및 주요

지점에 대한 실측자료와 현지답사를 통하여 수집, 정리하였고 지류의 영향은 다양한 수치모형을 적용하여 비교검토하기 위해서 본 연구에서 고려하지 않았다.

FLDWAV 모형의 적용에 있어 한탄강유역은 하도경사가 부분적으로 역경사가 나타나고 하도폭의 변화가 심하여 상당히 불규칙한 하도형상을 지니고 있다. 계산 결과 댐 하류부로 갈수록 침두유량은 뚜렷하게 감소하지 않는 반면 최고수위는 두드러지게 감소하였고, 홍수도달시간도 구간별로 일정하게 상승하는 양상을 보여주고 있었다.

SMPDBK 모형에서는 한탄강 유역의 하도를 균일 단순하도로 보정하여 근사적인 해석을 실시하였다. 그 결과 침두유량은 댐 직하류부에서 중간지점까지 두드러지게 감소하는 양상을 보이고 있으나 이 지점부터 하류단

표 2. 최고수위의 비교(연천댐)

댐으로부터의거리 (km)	최고수위 (m)				
	FLDWAV	HEC-1	SMPDBK	TR66	Dimensionless Graph
0	49.8	54.5	46.6	46.7	45.1
10	38.6	29.7	36.4	40.5	41.8
13	34.9	28.1	33.5	37.5	41.2
16	31.4	25.2	28.2	37.2	40.8
21	25.2	19.4	21.5	36.1	40.2

표 3. 홍수도달시간의 비교(연천댐)

댐으로부터의 거리 (km)	홍수도달시간 (hour)			
	FLDWAV	HEC-1	SMPDBK	Dimensionless Graph
0	1.17	1.20	1.17	0.00
10	1.58	1.93	2.14	1.33
13	1.76	2.07	2.58	1.62
16	1.94	2.33	2.96	2.09
21	2.22	2.80	3.45	2.66

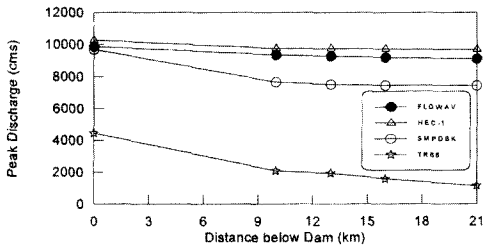


그림 7. 각 지점에 대한 첨두유량(연천댐)

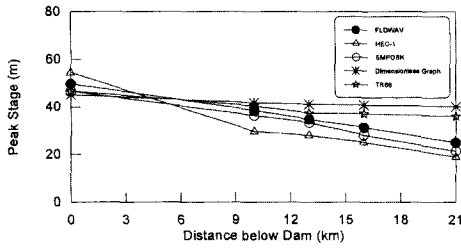


그림 8. 각 지점에 대한 최고수위 (연천댐)

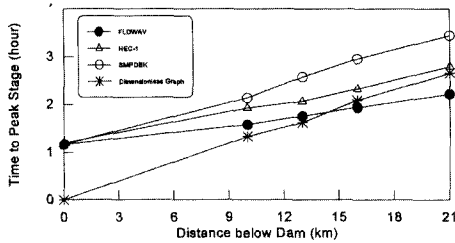


그림 9. 각 지점에 대한 홍수도달시간 (연천댐)

까지는 완만하게 감소하는 추세를 보이고 있다. 최고수위는 중간지점에서부터 하류단까지 더 뚜렷한 감소 추세를 보이고 홍수도달시간은 하류부까지 규칙적으로 증가하는 양상을 볼 수 있었다. 본 모형에서는 FLDWAV 모형과는 달리 개략적인 비봉피 유량이 고려됨으로써 발생한 유량값의 부정확성이 결과에 반영된 것으로 예상되며, 정확한 입력유량의 산정과 하도단면의 정확한 보정이 결과의 정확성에 관건이 되는 것으로 판단된다.

HEC-1 모형에서는 배계변수 NSTPS를 구간별로 변동시킨 RUN 4로 수행하였다. 그 결과 첨두유량은 중간 지점에서 불규칙하게 감소하는 것을 볼 수 있는데, 이는 하도단면의 변화가 불규칙하여 실제단면과 근사화시킨 단면간의 오차에서 오는 수치적 불안정에 기인하는 것

으로 사료된다. 이에 반해 최고수위와 홍수도달시간은 하류부로 갈수록 점차 각각 일정하게 감소 또는 증가하는 것을 알 수 있었다.

TR66 모형의 적용결과 Teton댐의 경우와 같이 계산된 첨두유량은 다른 모형의 첨두유량값의 대략 절반 정도에 미친다는 것을 알 수 있었고, 계산결과는 첨두유량과 최고수위가 대체적으로 지점별로 일정하게 감소하고 있으나 단면의 변화가 불규칙한 구간에서는 역시 급격한 변화양상이 나타나는 것을 알 수 있었다. 이러한 수동 계산절차의 정확성은 다른 수리적 특성은 고려되지 않고 수집된 하도단면자료와 유량과 수심과의 상관자료의 정확성에 관계됨으로 다른 모형과 마찬가지로 정확한 단면 근사화작업이 선행될 것으로 사료되었다.

Dimensionless Graph의 적용결과 보정된 균일단면의 하도를 무차원 추적매개변수를 통하여 하도부를 추적하여 그 결과를 나타냈다. 최고수위와 홍수도달시간은 하류부로 갈수록 비교적 일정하게 감소 또는 증가하는 양상을 나타내고 있다. 이는 Dimensionless Graph가 다른 모형과는 달리 순간적인 댐의 완전파괴로 가정하였기 때문에 비교적 구간별 수위의 변동양상과 홍수도달시간이 상당히 일정한 추세로 나타내고 있는 것을 알 수 있었다. 이와 같이 적용된 수치모형 중 비교적 정교한 FLDWAV의 홍수위결과와 수위실측자료와의 비교검토 결과 댐으로부터 12.95 km 지점인 한탄강 유원지에서의 수위실측치는 34.7 m로 나타났고, 본 연구에서의 모의수행결과 해당지점 홍수위가 34.9 m로 나타나 비교적 잘 일치하고 있었다.

4.2 각 모형들간의 비교검토

연천댐 붕괴에 5가지 수치모형을 적용한 홍수파의 해석결과는 표 1~3과 그림 7~9에 요약하였다. 그림 7에서와 같이 첨두유량은 FLDWAV, SMPDBK, HEC-1이 거의 비슷한 양상을 보이는 반면 TR66은 Teton댐의 경우에서와 같이 다른 모형에 비해 절반 정도밖에 되지 않았다. 그림 8에서와 같이 최고수위는 HEC-1이 다른 모형에 비해 구간별 변화폭이 크고 또한 댐 직하류부의 수위가 너무 과도하게 나타나는 경향이 있었다. Dimensionless Graph는 구간별 변화폭이 작지만 다른 수치적모형들과 거의 비슷한 값을 가지고 그 변동양상도 상당히 일정하게 나타나고 있다는 것을 알 수 있었다. 홍수도달시간은 그림 9에서와 같이 순간적인 댐 파괴를 고려한 Dimensionless Graph를 제외한 나머지 모형들의 변화양상이 비슷하게 나타나고 있으나 하류부로

갈수록 점차 홍수도달시간의 차이가 커지는 것으로 나타났다. 정교한 수치모형인 FLDWAV를 기준으로 볼 때 TR66을 제외한 모형들이 유량은 어느 정도 비슷한 양상을 보이는 반면 수위는 모형별로 구간별 변화폭이 심하다는 것을 알 수 있었다. 홍수도달시간은 Dimensionless Graph를 제외한 나머지 모형들이 비교적 비슷한 변화양상을 보이고 있다는 것을 알 수 있었다.

5. 결 론

본 연구는 댐 붕괴 홍수파 해석에 대한 수치모형의 수치적 특성 및 적용성을 분석하고 이를 실제유역에 적용하여 해석을 실시하였다. 본 연구의 수치모형은 FLDWAV, SMPDBK, HEC-1, TR66, Dimensionless Graph 계산과정으로 구성하여 각 모형들간의 수치적 특성을 고려하여 적절한 홍수파모형을 선택하여 실제유역에 적용하고자 하였다.

FLDWAV 모형과 SMPDBK 모형은 댐 파괴시 최대 홍수량 및 수위변동의 계산에서 비슷한 양상을 나타내고 있으나 SMPDBK 모형의 경우 부분적인 수치적 오차가 존재함에도 불구하고 적당한 정확성을 갖는 것으로 나타났다. 따라서 하도가 단순하고 균일한 유역에 경우 적용상에 큰 문제가 없을 것으로 판단되었다. HEC-1 모형은 최고수위가 너무 과도하게 나타나고, 그 변동양상도 상당히 불규칙하며 댐 파괴시 댐 직하류부의 홍수위 추적이 상당히 미흡하다는 것을 알 수 있었다. TR66의 경우 침두유량 및 최고수위가 너무 과소하게 나타나 해석의 신뢰도가 떨어지며, Dimensionless Graph의 계산결과에서는 침두유량을 산정하지 못하는 결함을 가지는 반면에 최고수위는 근사적인 계산임에도 불구하고 상당히 정확성을 지니는 것으로 나타났다.

각 모형들의 상대적인 비교를 통해 댐 붕괴 홍수파 해석을 위해 실제 유역에 적용하는데 있어서 각 수치모형들의 부분적인 결함이 나타나고 있음을 기초로 할 때, FLDWAV 모형이 상대적으로 수치적 정확도 및 안정성 면에서 우수하다는 것이 판명되었다. 연천댐 붕괴의 경우 한탄강 유원지에서의 수위실측치는 34.7 m로 나타났고, FLDWAV 모의수행 결과는 홍수위가 34.9 m로 나타나 비교적 잘 일치하고 있었다.

대상 적용유역에 따라 다른 모형들의 부분적인 적용도 가능한 만큼, 본 연구결과는 효율적이고 신속한 댐 붕괴 홍수재해 예측을 위해서 수치적 모형들의 결함을 보완하여 보다 정확한 수치모형개발에 기여할 수 있을 것으로 판단되었다.

감사의 글

본 연구는 1996년도 한국대댐회 분과위원회(댐수문 및 수리분과) 연구사업으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 오남선, 선우중호. (1989). "홍담의 점진적 파괴에 관한 연구." 한국수문학회논문집, 제22권 제2호, pp. 213-221.
- 이재영. (1996). 댐 붕괴 홍수파 해석에 대한 수치모형의 적용 및 평가. 경북대학교 공학석사학위논문, pp. 1-80.
- 이종태, 한건연. (1992). "댐 붕괴 홍수파 해석을 위한 무차원 홍수추적곡선의 유도." 대한토목학회 논문집, 제12권 제2호, pp. 87-99
- 이종태, 한건연, 이정식. (1986). "Earth dam의 가상파괴로 인한 홍수파의 예측모형." 대한토목학회논문집, 제6권, 제4호, pp. 69-78.
- 건설부. (1980). 임진강 하천정비기본계획.
- 건설부. (1995). 임진강 유역조사보고서.
- 한건연, 이종태, 이원환. (1985). "Earth dam 파괴로 인한 유출수문곡선의 유도." 대한토목학회 논문집, 제5권, 제2호, pp. 41-50.
- 한건연. (1986). Fill Dam의 파괴에 대한 홍수파 예측 모형의 개발. 연세대학교 대학원 공학박사학위논문, pp. 1-86.
- 한건연. (1987). "하천에서의 홍수파 해석을 위한 수치모형의 개발." 한국수문학회논문집, 제20권, 제4호, pp. 285-294.
- 한건연. (1990). "댐의 파괴형태와 하도부 양상에 따른 홍수파의 전달특성 해석에 관한 연구." 한국수문학회논문집, 제23권, 제4호, pp. 467-476.
- 한건연, 박재홍, 이종태. (1996). "개수로내의 점변 및 급변 부정류에 대한 유한요소해석: I. 이론 및 수치안정성 해석." 한국수자원학회논문집, 제29권 제 6호, pp. 167-178.
- 한건연, 박재홍, 이을래. (1997). "개수로내의 점변 및 급변 부정류에 대한 유한요소해석: II. 적용 예." 한국수자원학회논문집, 제 30권 제 1호, pp. 35-44.
- 한국수자원학회. (1996). "96년 7월 경기, 강원 북부 지역 홍수 피해." 수자원학회조사보고서.

- Chen, C.L., and Ambruster, J. T. (1980). "Dam-break wave model: formulation and verification." *J. of Hyd. Div.*, ASCE, Vol. 106 No. 7, pp 747-767.
- Dressler, R.F. (1954). "Comparison of theories and experiments for the hydraulic dam-break wave." *International Association of Scientific Hydrology*, Publ. No. 38, pp. 319-328.
- Fread, D.L. (1985). "DAMBRK : The NWS dam-break flood forecasting model." *NWS Report*, NOAA, Silver Springs, MD.
- Fread, D.L., and Lewis, J.M. (1995). "FLDWAV : The NWS FLDWAV model." *NWS Report*, NOAA, Silver Springs, MD. Hydrologic Engineering Center. (1987). *HEC-1 Flood Hydrograph Package, User's Manual*. U.S. Army Corps of Engineers, Davis, CA.
- Katopodes, N.D., and Strelkoff, T. (1975). "Computing two-dimensional dam-break flood wave." *J. of Hyd. Div.*, ASCE, Vol. 109, No. HY9, pp. 1269-1288.
- Lee, C., and Lee, K.S. (1990). "Comparative evaluation of dam-break models." *Korean J. of Hydrosiences*, Vol. 1, pp. 27-38.
- Ponce, V.M., and Tsivoglou, A.J. (1981). "Modeling gradual dam breaches." *J. of Hyd. Div.*, ASCE, Vol. 107, No. HY7, pp. 829-838.
- Rajar, R. (1978). "Mathematical Simulation of dam-break flow." *J. of Hyd. Div.*, ASCE, Vol. 104, No. HY7, pp. 1011-1026.
- Ritter, A. (1892). "Die Fortpflanzung der Wasserwallen." *Zeitschrift des vereines deutscher ingenieure*, Vol. 36, No. 33, pp. 947-954.
- Sakkas, J.G. (1976). *Dimensionless Graphs for Routing Floods from Ruptured Dams*. Hydrologic Engineering Center, US Army Corps of Engineers, pp. 1-67.
- Sakkas, J.G., and Strelkoff, T. (1973). "Dam-break flood in a prismatic dry channel." *J. of Hyd. Div.*, ASCE, Vol. 99, No. HY12, pp. 2195-2216.
- Soil Conservation Service. (1979). *Simplified dam-breach routing procedure*. Technical Release No. 66., U.S. Department of Agriculture, pp. 1-39.
- Wetmore, J.N., and Fread, D.L. (1989). *The NWS dam break flood forecasting model for desk-top and handheld calculators*. NWS Report, NOAA, Silver Springs, MD.
- Whitham, G.B. (1955). "The effects of hydraulic resistance in the dam break problem." *Proc. of Royal Society of London, Series A227, London, England*, pp. 399-407.

<최종본 접수일 : 1998년 2월 10일>