

수치모형을 이용한 순차적 댐 붕괴 모의

박세진* · 한건연** · 최현구***

Park, Se Jin*, Han, Kun Yeun**, Choi, Hyun Gu***

Flood Routing of Sequential Failure of Dams by Numerical Model

ABSTRACT

Dams always have the possibility of failure due to unexpected natural phenomena. In particular, dam failure can cause huge damage including damage for humans and properties when dam downstream regions are densely populated or have important national facilities. Although many studies have been conducted on the analysis of flood waves about single dam failure thus far, studies on the analysis of flood waves about the sequential failure of dams are lacking. Therefore, the purpose of this study was to calculate the peak discharge of sequential failure of dams through flood wave analysis of sequential failure of dams and this analysis techniques to predict flood wave propagation situation in downstream regions. To this end, failure flood wave analysis were conducted for Lawn Lake Dam which is a case of sequential failure of dams among actual failure cases using DAMBRK to test the suitability of the dam failure flood wave analysis model. Based on the results, flood wave analysis of sequential failure of dams were conducted for A dam in Korea assuming a virtual extreme flood to predict flood wave propagation situations and 2-dimensional flood wave analysis were conducted for major flooding points. Then, the 1, 2-dimensional flood wave analysis were compared and analyzed. The results showed goodness-of-fit values exceeding 90% and thus the accuracy of the 1-dimensional sequential failure of dams simulation could be identified. The results of this study are considered to be able to contribute to the provision of basic data for the establishment of disaster prevention measures for rivers related to sequential failure of dams.

Key words : Sequential failure of dams, DAMBRK, Flood wave propagation, One- and two-dimensional flood inundation analysis

초록

예상하지 못한 자연 현상으로 인해 붕괴될 가능성을 항상 내포하고 있으며 특히 댐 하류부 지역이 인구밀집 지역이거나 중요 국가 시설물이 위치하고 있는 경우에는 인명 및 재산피해 등 막대한 손실을 초래할 수 있다. 지금까지의 연구는 단독댐 붕괴에 따른 홍수와 해석에 대한 연구는 많이 있었으나 세계적으로 유명한 테네시강 등의 순차적 댐이나 우리나라의 북한강 상류로부터 연속으로 이어진 댐 등에 대한 붕괴 홍수와 해석에 대한 연구는 미흡한 실정이다. 따라서 본 연구의 목적은 순차적 댐 붕괴 홍수와 해석을 통해 순차적 댐 붕괴 침두유량을 계산하고 하류부에서의 홍수와 전파상황을 예측할 수 있는 해석기법을 제시하는데 있다. 이를 위해 DAMBRK를 이용하여 실제 붕괴 사례 중 순차적 댐 붕괴 사례인 Lawn Lake Dam에 대하여 붕괴 홍수와 해석을 실시하여 댐 붕괴 홍수와 해석 모형의 적절성을 검증하였다. 이를 기초로 하여 가상의 극한홍수에 대하여 국내의 A 댐에 대하여 순차적 댐 붕괴 홍수와 해석을 실시하여 홍수와 전파상황을 예측하였으며, 범람 중요 지점에 대하여 2차원 홍수 범람해석을 수행하여 1:2차원 홍수와 해석을 비교·분석한 결과 적합도가 90%를 상회하여 1차원 순차적 댐 붕괴 모의의 정확성을 확인할 수 있었다. 이는 순차적 댐 붕괴와 관련된 하천에서의 방재대책 수립을 위한 기본자료를 제공하는데 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

검색어 : 순차적 댐 붕괴, DAMBRK, 홍수와 전파상황, 1, 2차원 홍수범람해석

* 정희원 · 경북대학교 건축토목공학부 박사과정 (sjin3615@naver.com)

** 정희원 · 경북대학교 건축토목공학부 교수 (kshanj@knu.ac.kr)

*** 정희원 · 교신저자 · 경북대학교 방재연구소 박사후연구원 (Corresponding Author · Kyungpook National University · honorguard99@msn.com)

Received February 15, 2013/ revised May 20, 2013/ accepted August 5, 2013

1. 서론

최근 지구온난화에 따른 전 지구적 이상홍수 발생으로 국내 댐 및 저수지 붕괴 우려가 증대되고 있는 실정이며 지진 역시 최근까지 계속해서 발생하고 있어 지진에 대해서도 우리나라가 안전지대가 아니라는 것이 판명되었다. 이러한 대규모 수공 구조물의 설계빈도를 초월하는 이상홍수나 지진과 같은 자연현상에 의하여 댐 등의 수공 구조물의 붕괴와 같은 비상상황이 발생할 수 있을 뿐 아니라 댐 건설 후 오랜 기간이 경과한 경우 댐 관련 구조물의 노후화로 인하여 댐체 및 부속구조물의 결합이 발생하여 예기치 않은 비상상황이 초래될 수 있다. Jansen(1980)과 Lou(1981)에 의해 조사된 자료에 의하면 실제로 20세기 들어 전 세계적으로 약 200건 이상의 댐 붕괴 사고가 발생하여 댐 하류 지역에 막대한 인명 및 재산피해가 발생하였으며, 약 11,000여명 이상의 인명피해가 발생한 것으로 조사되었다. 국내의 경우 1996년 이후로 지속적으로 발생하고 있는 이상홍수로 인해 1998년에는 40개, 1999년에는 5개의 소규모 저수지가 붕괴된 바 있다. 특히 2002년 태풍 루사 시에는 강릉 남대천 유역의 장현저수지와 동막저수지가 붕괴되어 하류부 유역에 큰 피해를 입힌 바 있고, 강릉시 상류부의 오봉저수지와 고령군 사류부의 성주댐의 경우 붕괴 직전까지 도달하여 하류부에서 붕괴위험에 따른 큰 혼란이 야기된 바 있다. 또한, 2003년 태풍 매미에 따른 추가적인 저수지 붕괴 발생 후 비상대처계획 수립에 관한 전 국민적인 관심이 고조되고 있는 상황으로서, 현재 댐·저수지의 붕괴 위험 증대 등으로 댐 및 저수지에 대한 비상대처계획 수립이 필요한 실정이다.

이처럼 대규모 홍수나 지진과 같은 자연 현상으로 인해 댐이 붕괴할 수 있는 위험을 내포하고 있으므로 이에 따른 댐 붕괴 해석이 필요하다. 붕괴사례에서 볼 수 있듯이 지금까지는 단독댐 붕괴로 인한 피해가 주로 발생하였으나 세계적으로 유명한 미국의 테네시강이나 러시아의 볼가강의 순차적 댐이나 우리나라의 북한강 상류로부터 순차적으로 건설된 댐 등이 붕괴될 시 지금까지의 댐 붕괴 피해보다 훨씬 큰 피해를 안길 것이며 처음에는 하나의 댐의 붕괴로 시작하여, 그 붕괴 홍수파에 의해 다음 댐이 순차적으로 붕괴될 수 있는 위험성을 가지고 있으므로 순차적 댐 붕괴 홍수파의 해석이 더욱 중요할 것이다. 그러나 지금까지의 연구는 단독댐 붕괴에 따른 홍수와 해석에 대한 연구는 많이 있었으나 연속으로 이어진 댐에 대한 붕괴 홍수파 해석에 대한 연구는 미흡한 실정으로 본 연구에서는 실제 붕괴 사례 중 순차적 댐 붕괴 사례인 Lawn Lake Dam에 대하여 붕괴 홍수파 해석을 실시하여 댐 붕괴 홍수파 해석 모형의 적절성을 검증하고 가상의 극한홍수에 대하여 국내의 A 댐에 대하여 순차적 댐 붕괴 홍수파 해석을 실시하였다.

댐 붕괴에 따른 홍수파 해석에 관한 연구에서 Fread(1977)는

댐의 붕괴가 일어날 때 하류지역에서의 홍수파 추적을 목적으로 하면서 Fill 댐의 붕괴 양상을 나타내는 DAMBRK 모형을 개발하였다. Hoggan 등(2000)은 DAMBRK 모형을 이용하여 Utah 유역의 Sevier 강에 대한 1차원 비정상류 해석을 실시하였으며, Ross 등(2005)은 FLDWAV 모형 및 HEC-RAS 모형과 DAMBRK 모형의 댐 붕괴 해석을 비교하였다. Rydlund(2006)은 Missouri 유역의 Taum Sauk Pump-Storage 붕괴로 인한 침투유량 및 범람양상 등에 대한 연구를 실시하였으며, Hoogestraat(2011)은 South Dakota 유역의 4개의 저수지에 대하여 홍수의 수문학적 및 수리학적 댐 붕괴 양상을 분석하였다.

국내에서 이 분야에 대한 연구는 이종태(1982)가 Preissmann기법에 의한 1차원 부정류의 해석을 실시하였으며, 한건연 등(1985)은 Earth Dam 파괴로 인한 유출 수문곡선의 유도를 연구하였다. 한건연(1987)은 Fill Dam 파괴에 따른 홍수파 예측 모형을 개발하였으며, 한건연 등(1988)은 댐 붕괴 수치모형에 대한 적용성 평가에 대해 연구한 바 있다. 이재영(1996)은 댐 붕괴 홍수파 해석에 대한 수치모형의 적용 및 평가에 대해 연구하였고, 김극수 등(2011)은 물리기반 댐 붕괴 모형 적용 방안에 대해 연구하였다.

본 연구에서 실제 붕괴사례와의 비교분석을 통하여 신뢰도 높은 순차적 댐 붕괴 홍수파 해석을 수행하고자 하였으며, 향후 본 연구를 다양한 상황에 적용하여 댐 붕괴 유출량 및 하류부에서의 홍수파 전파 상황을 예측하는데 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

2. 순차적 댐의 붕괴모의기법

2.1 댐 붕괴 모의 모형 검토

댐 붕괴는 극한홍수의 상황이기 때문에 이를 수리모형실험을 통해서 그 영향을 평가하기는 매우 어렵다. 이 경우 수치모형은 하류지역에서의 홍수의 영향에 대한 평가를 신속하고 정확하게 해석하기 위해 가장 편리한 방법이다. 댐 붕괴 모의 모형을 검토해보면 다음과 같다. 먼저 미국 기상청(NWS)의 동역학적 홍수추적 모형인 DAMBRK는 1980년 Fread에 의해 개발된 모형이다. 본 모형은 댐으로부터의 유출수문곡선의 유도와 하류에서의 홍수추적을 수리학적으로 해석하기 위하여 개발되었으며, 본 모형에서 사용하는 지배방정식은 부정류에 관한 1차원 Saint-Venant 방정식으로서 하류구간에서의 급변류, 단면의 변화, 교량 등의 영향을 내부경계 조건으로 수용할 수 있도록 설계되었다. 하류의 흐름은 상류 및 사류에 대하여 모두 계산 가능하며 홍수 수문곡선은 붕괴 지점의 시간, 크기, 형태 등의 변수들로부터 산정된다. 또한 하도의 홍수터의 영향, 만곡의 영향 등도 고려할 수 있도록 하였다. SMPDBK 모형(Wetmore와 Fread, 1989)은 계산에 필요한 시간이 제약되어 있는 경우에 적용될 수 있도록 개발되었으며, 비교적 단시간 내에 최소한

의 수리특성자료만으로 비교적 타당한 홍수량을 예측하는 것으로 검토되었다. BREACH 모형은 저수지의 점진적인 파괴에 의해 발생하는 유출수문곡선을 구하고 파괴의 성질을 예측하는 것을 목적으로 미국 기상청에서 개발하였다. 이 모형은 수리학, 토사의 이동, 토질 역학, 댐 재료의 성질과 형상 및 저수지의 특성에 기초하여 구성되었다. 미육군공병단에서는 기존의 정상류 흐름해석 모형에 복잡한 하도망에 대해 부정류모의를 수행할 수 있는 UNET 모형을 추가하여 HEC-RAS 3.1을 제공하고 있다. 이 모형은 적용에 있어 하천 횡단면 및 하도의 개수에 제한이 없으며, 수문, 여수로, 교량, 보 등 하천 수리구조물의 영향을 고려할 수 있다. 특히 복잡한 하도망에 많은 횡단면이 있는 경우의 흐름해석에 매우 효과적이다. HEC-RAS 모형에서는 저수지에 대한 제원의 입력은 하천의 하도단면과 같은 형태로 입력되며, 붕괴부의 발달은 넓은 마루 웨어식으로 처리한다.

타 모형들과 비교해 보았을 때, DAMBRK모형은 댐의 연속붕괴 모의와 동시붕괴모의를 모두 수행할 수 있으며 댐 붕괴에 따른 저수지 감수곡선을 모의할 수 있고, 댐 붕괴 모의에 대한 전 세계적으로 많은 적용 예를 가지고 있으며 GIS 해석과 댐 붕괴시에 나타나는 불확실도 분석 등과의 연계 측면에서 볼 때 모형의 확장성도 우수한 것으로 판단되어 본 연구에서 댐 붕괴 모의 모형으로 채택하였다.

2.2 DAMBRK 모형의 계산알고리즘

DAMBRK 모형은 저수지 붕괴로부터의 유출수문곡선을 분석하고 하류단으로 유출되는 홍수를 수리학적으로 추적하기 위해 사용된다. 모형의 지배방정식은 1차원 Saint-Venant 방정식이며, 시간에 따른 결괴를 형성하는 댐과 교량, 제방과 같은 구조물을 통해 발생하는 빠르게 변화하는 넓은마루웨어 흐름을 나타내는 내부 경계 조건 방정식과 관련되어 있다. 댐 지점에서의 붕괴시의 유출수문곡선이 구해지면 하류부에서의 홍수파의 도달시간, 홍수량, 홍수위 등이 하도의 홍수 추적과정을 통하여 예측될 수 있다. 댐 붕괴로 인한 홍수파의 특징은 첨두유량의 값이 과거에 동일유역에서 발생되었던 강우-유출에 의한 홍수의 경우보다도 그 값이 수배 이상 크고, 수문곡선의 상승기점에서 첨두발생까지의 시간이 매우 짧게 나타나, 매우 큰 가속성분의 영향이 발생한다는 것이다. 그러므로 댐 붕괴로 인한 홍수파의 경우에 있어서는 동역학적 방법에 의한 수리학적 홍수추적 방법을 사용하여야 하며, 이 방법은 관성력과 자유수면에서의 영향도 해석할 수 있어 매우 효과적이다.

2.3 순차적 댐 붕괴 홍수파 해석 기법

본 연구에서는 순차적 댐 붕괴 홍수파 해석을 실시하였는데, DAMBRK 내에 연속계산방법(sequential method)과 동시계산방법(simultaneous method)을 선택하여 적용할 수 있도록 구성되어

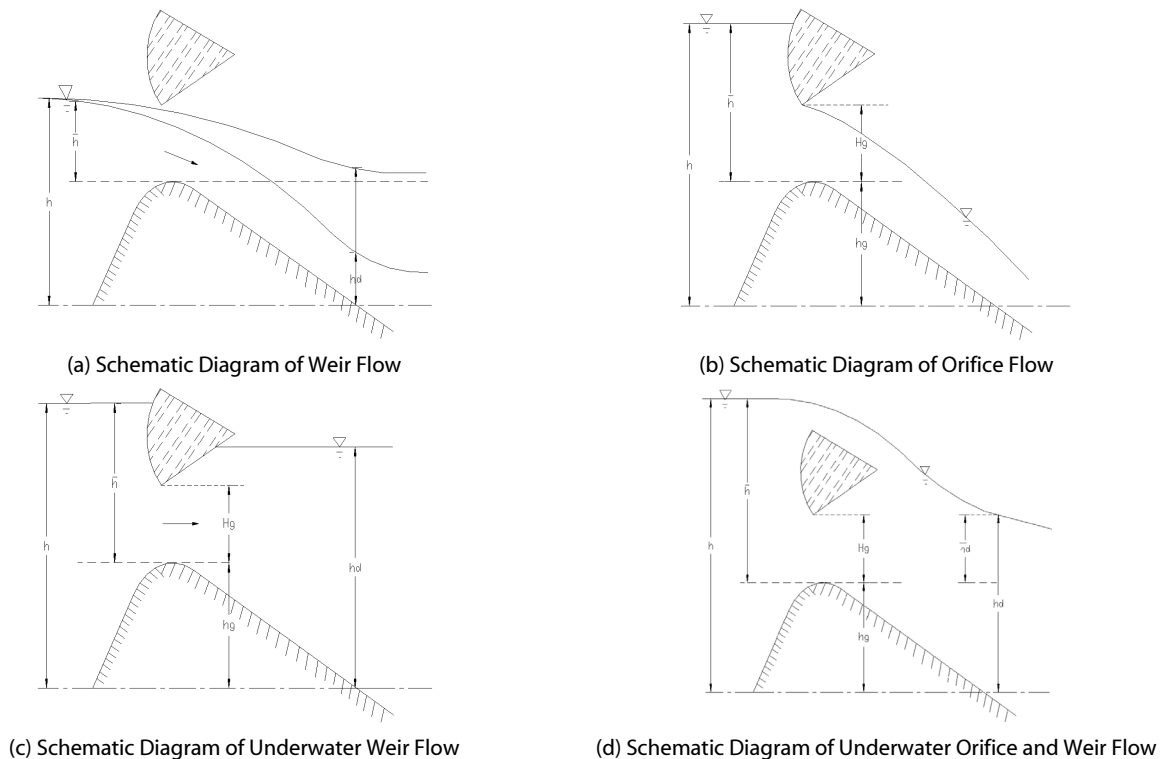


Fig. 1. Schematic diagram for Weir and Orifice flow

있어 이 기법들을 활용하였다. 연속계산방법은 하나 또는 그 이상으로 연속하여 위치해 있는 저수지를 통해서 홍수추적을 실시할 때 적용된다. 이 기법은 각 내부 댐에 대해서 상류단에서 구간별로 연속적인 계산을 수행하게 되고, 수위가 각 댐에 대해서 지정된 값에 도달했을 때 파괴될 수 있다. 동시계산법은 상류 댐과 내부 댐을 하나의 시스템으로서 다루게 된다. 이 방법은 댐 아래의 수위가 하류 댐이나 다른 제약으로부터 배수영향을 받는 구간에 대해서 유용하다. 각 경우 댐에서의 수위-유량 관계의 해석을 위해서 다음과 같은 계산 알고리즘을 적용하였다. 즉, 홍수류가 수문을 충만하여 흐르거나, 하류부 수위영향으로 인해서 수증잡수 상태로 유하하는 경우에는 Orifice 흐름을 적용하였고, 수문이 충분히 잠수되지 않는 경우와 저수지 수위가 충분히 댐 정부 상위에 위치하여 월류 흐름이 발생하는 경우에는 Weir 흐름을 적용하였다. Orifice 흐름과 Weir 흐름에 대한 유량식은 다음과 같고, 각 흐름조건을 Fig. 1에 나타내었다.

2.3.1 Orifice형 수문 유량

$$Q_g = \sqrt{2g} C_o W_g H_g \left(\bar{h} - \frac{H_g}{2} \right)^{0.5} + Q_{og} \quad (\bar{h} > 1.2 H_g \text{ 일 경우}) \quad (1)$$

여기서, H_g = 수문 끝단의 높이 h_g 의 상위에 위치한 가동 수문의 높이

W_g = 수문개방부의 폭으로서 시간에 대한 함수

Q_{og} = 저수지 수위가 충분히 댐 정부 상위에 위치한 경우의 월류 유량

$$C_o = \frac{0.712}{W_g} \left[W_d - 2 \left(\frac{0.002 W_d}{4D} + 0.1 \bar{h}_d \right) \right] \left(\frac{\bar{h}}{h_d} \right)^{0.1}$$

(단, $0.6 \leq C_o \leq 0.72$)

2.3.2 Weir형 수문 유량

$$Q_g = Q_d \left[1 - \left(1 - \frac{H_g}{\bar{h}} \right)^{1.5} \right] \left(\frac{\bar{h}}{h_d} \right)^{1.6} \quad (H_g \leq \bar{h} \leq 1.2 H_g \text{ 일 경우}) \quad (2)$$

$$Q_g = Q_d \left(\frac{h}{h_d} \right)^{1.6} \quad (0 \leq \bar{h} \leq H_g \text{ 일 경우}) \quad (3)$$

여기서, $Q_d = 3.9 k_g \left[W_d - 2 \left(0.02 \frac{W_d}{4D} + 0.1 \right) \bar{h}_d \right] \bar{h}_d^{-1.5}$

$$k_g = 1.0 - 27.8 \left[\frac{(h_t - h_g)}{\bar{h}} - 0.67 \right]^3$$

$\left(\frac{(h_t - h_g)}{\bar{h}} > 0.67 \text{ 일 경우} \right)$

$$k_g = 1.0 \left(\frac{(h_t - h_g)}{\bar{h}} \leq 0.67 \text{ 일 경우} \right)$$

3. 실제 사례에 대한 적용

3.1 대상유역 및 기본자료

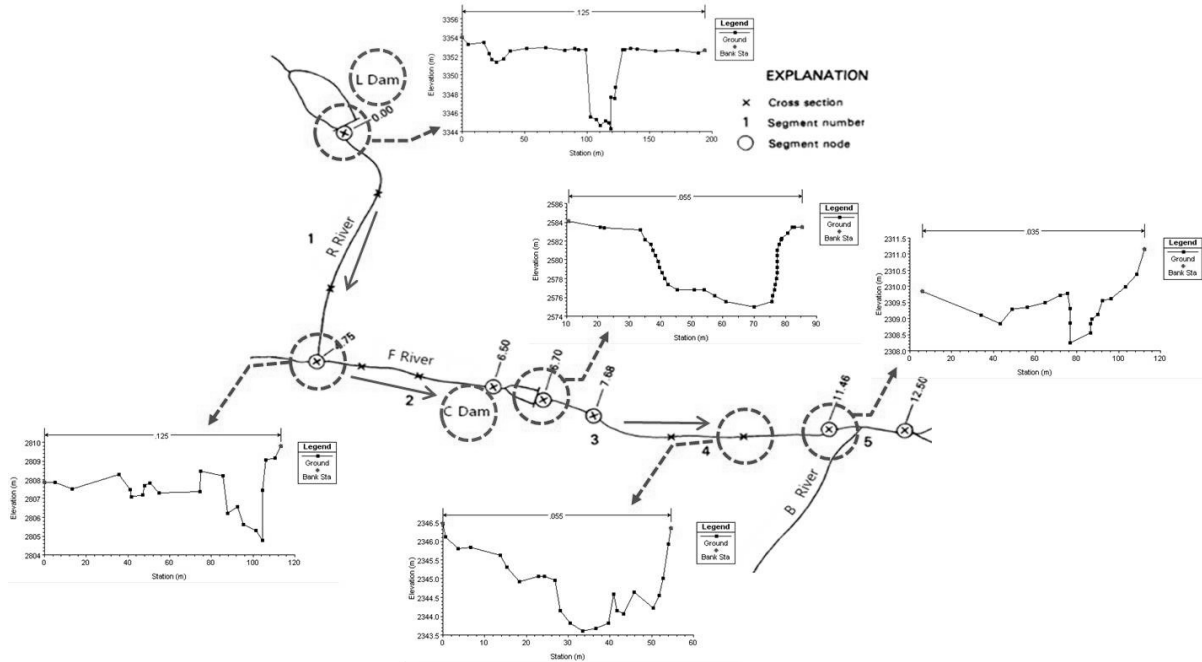
댐 붕괴시 유출수문곡선을 유도하고 그로 인한 홍수과가 하류부로 전파되어 나가는 과정을 해석하기 위해서는 댐 및 각종 저수지의 각종 제원과 하류부 하천의 지형자료 및 조도계수 등이 필요로 하며, 모형에 의한 계산결과치와 비교하기 위하여 붕괴 당시의 수위, 유량, 도달시간 등의 실측치가 필요하다. 본 연구에서 실제 사례로 적용한 Lawn Lake Dam은 높이 8m, 길이 170.69m, 총 저수용량 0.8백만m³의 댐이며, 0.83백만m³의 물을 방류하며 붕괴되었다. 침투 유량은 509.7m³로 추산되며 3명이 사망하고 피해액은 3,100만 달러를 기록했다.

Lawn Lake Dam의 붕괴 후 붕괴유출유량으로 인해 하도가 변하였으며 그 유량은 Fall River을 따라 계속 이동하여 Cascade Lake Dam의 붕괴 원인이 되었다. Cascade Lake Dam 댐은 Fall River에 위치하고 있는 높이 5m, 길이 43.59m의 콘크리트 중력댐으로 원래 수력 발전소의 하류에 있는 관로를 위해 건설되었다.

Lawn Lake Dam의 붕괴는 출구 파이프와 게이트 밸브 사이의 연결에 사용되는 납 코킹의 퇴화로 인해 누수가 발생하여 출구 파이프를 따라 구멍을 만들어 파이프에 의해서 붕괴되었으며, 내부 댐인 Cascade Lake Dam은 Lawn Lake Dam의 붕괴유출량으로 월류에 의해 붕괴되었다. 다음과 같은 붕괴 원인을 바탕으로 입력자료를 구성하여 DAMBRK 모형을 수행하였다.

3.2 입력자료의 구성

국내·외 사례에서는 이상홍수로 인한 월류 붕괴가 일반적이거나 대상 댐인 Lawn Lake Dam의 경우 파이프에 의한 붕괴가 일어난 경우로 모의 경계조건 등에 있어 차이가 있다. 먼저 Lawn Lake Dam의 경우 상류단 경계조건인 유입수문곡선이 없다. 그리고 본 연구에서는 하류단 경계조건으로 하천 하구부 수위수문곡선도 사용하지 않았다. 대신 파이프에 의한 붕괴이므로 댐 붕괴 모의를 위해 DAMBRK 옵션에서 파이프 모의를 실시하였으며, 하류단 경계는 loop rating 조건을 부여하였다. loop rating 옵션은 등류상태에 대한 Manning의 식을 기초로 한 loop형 수위-유량 관계곡선을 계산하여 사용하는 것이다.



※ L Dam : Lawn Lake Dam, C Dam : Cascade Lake Dam

Fig. 2. Schematic Diagram for Simulation Applicable Sections of the Lawn Lake Dam

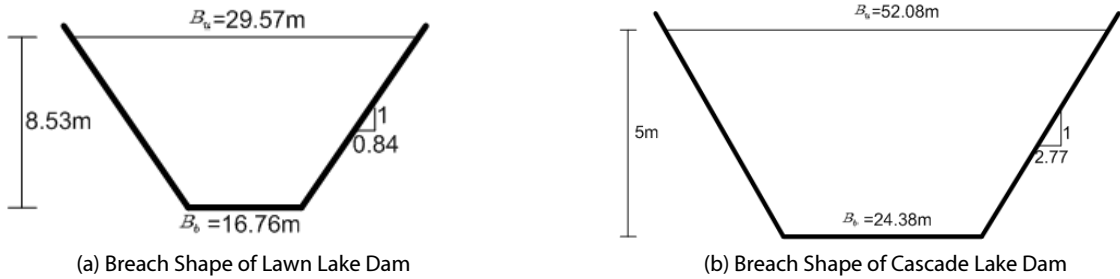


Fig. 3. Breach Shape of Dams

대상유역에 유입되는 지천은 2개로 각각 $4.25\text{m}^3/\text{s}$, $10.90\text{m}^3/\text{s}$ 의 유량으로 유입이 되고 있다. 모형의 입력자료는 초기 및 경계 조건뿐만 아니라, 저수지, 댐 그리고 하도의 물리적인 설명이 필요하다. 두 댐간의 거리는 5.02km이며, Lawn Lake Dam의 붕괴지속시간은 30분이며 측벽면 경사는 붕괴형상에 나타나 있듯이 1:0.82으로 구성하였고 콘크리트 댐인 Cascade Lake Dam은 10분의 붕괴지속시간을 가지며 측벽면 경사는 1:0으로 구성하였다. 다음 Fig. 2는 모의 적용 구간 모식도와 하도의 기하학적 구조를 나타낸 것이며 Fig. 3은 Lawn Lake Dam과 Cascade Lake Dam의 붕괴형상이다.

3.3 적용결과

Fig. 4에 Lawn Lake Dam과 Cascade Lake Dam 직하류부의 침투붕괴유출량을 나타내었으며 Fig. 5에는 Lawn Lake Dam 직하

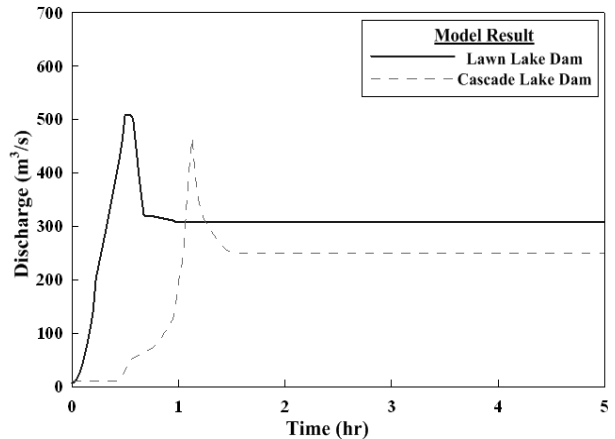
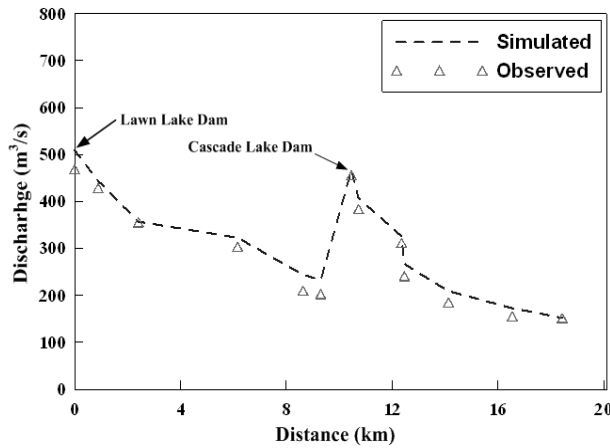
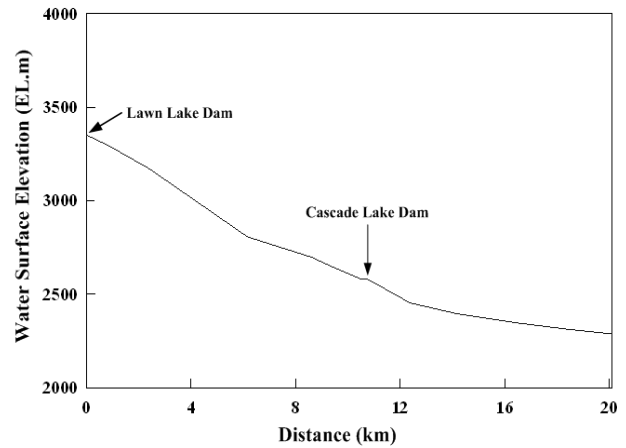


Fig. 4. Point-by-Flow Hydrograph due to the Failure of the Dam



(a) Longitudinal Shape of Peak Flow



(b) Longitudinal Shape of Water Level

Fig. 5. Longitudinal Shape of Peak Flow and Water Level due to the Failure of the Dam

Table 1. Comparison of Major Point-by-Water Level due to the Failure of the Dam

Point	Distance from dam (km)	Water level (m)	
		Observed	Simulation
1	0.00	3,347.20	3,351.71
2	6.16	2,804.80	2,807.14
3	12.36	2,452.10	2,456.25
4	16.54	2,343.60	2,346.17
5	18.43	2,308.70	2,313.61

류부터 종단을 따라 침투유량 종단형상 및 최고수위 종단형상을 나타내었다. Cascade Lake Dam의 저수용량으로 인하여 유량이 증가하였으며 점차 댐의 유출량이 증가함으로써 댐 직하류부터 Fall River 하구에 이르기까지 감소하는 곡선의 형태를 띄우고 있다. 내부 댐인 Cascade Lake Dam의 붕괴로 댐의 저수용량이 붕괴유출량에 더해지는 것을 나타내는데 이를 통해 순차적 댐 붕괴 모의가 잘 수행됨을 확인할 수 있었다. 또한 실측치와 침투유량 종단형상을 비교한 결과 Lawn Lake Dam에서의 붕괴유출량 실측치는 $509.71m^3/s$, 모의결과는 $509m^3/s$ 를 나타내었으며, Cascade Lake Dam에서의 붕괴유출량 실측치는 $456.02m^3/s$, 모의결과는 $467m^3/s$ 를 나타내는 것을 보아 실측치보다 다소 큰 값이 계산되었지만 종단형상의 형태가 비슷한 것으로 나타났으며, Fig. 3에 표시된 주요지점에 대해 수위차도 비교해 본 결과 Table 1과 같이 5m 이내로 나타나 모형의 정확성을 확인할 수 있었다.

4. 국내 사례에 대한 시나리오 적용

실제 붕괴 사례를 통해 적용 모형의 정확성을 확인하였으며, 이를 바탕으로 가상의 극한홍수에 대해 국내의 A 댐에 적용하여

순차적 댐 붕괴 홍수와 예측을 해보았다. 국내 사례로 적용한 A 댐은 높이 169m, 길이 50m의 중앙삼벽식 사력댐으로 댐 유역면적은 $51.70km^2$, 총 저수용량은 32.7백만 m^3 이며, B댐은 높이 22m, 길이 208m의 농업용 저수지로 댐 유역면적은 $33.88km^2$, 총 저수용량은 1.017백만 m^3 이다. 먼저 대상유역에 대하여 1차원 모형인 DAMBRK 모형을 수행하였으며, 주요 지점에 대하여 2차원 모형인 FLUMEN 모형을 수행하여 각각의 경우와 1, 2차원 모형을 비교하였다.

4.1 가상붕괴 시나리오 구성

댐의 붕괴시간, 붕괴단면의 형상 등은 붕괴 홍수량 및 하류부로의 홍수파에 큰 영향을 준다. 따라서 대상 댐의 가상붕괴에 따른 유출수 문곡선을 유도하기 위해서 본 연구에서는 댐의 설계도면과 기존의 보고서 자료를 참고하여 붕괴지속시간, 붕괴부 평균폭, 붕괴부 측면면 경사의 변화에 따라 다양한 모의를 수행함으로써 발생하는 붕괴부 유량 수문곡선을 도출하여 각각의 조건들이 붕괴과 형상에 미치는 영향에 대한 분석을 실시하였다. 일반적으로 댐의 붕괴부 형상은 역삼각형, 직사각형, 사다리꼴등으로 발생하며, 흙 댐의 붕괴는 월류 및 침투과피에 의해 역삼각형의 초기형상을 가지다가, 제체를

Table 2. Failure Virtual Scenario of a Dam

Name	Type	Failure Condition and Scenario							
		Scenario Name	A1-1	A1-2	A2-1	A2-2	A3-1	A3-2	
A Dam	Rock Fill Dam	Failure Condition	B(m)	50(h_d)	100($2h_d$)	100($2h_d$)	100($2h_d$)	100($2h_d$)	100($2h_d$)
			Z	1.0	1.0	1.0	1.0	0.5	0.75
			Tf(hr)	0.5	0.5	1.0	2.0	1.0	1.0

이루는 재료가 기초 암반이나 침식이 어려운 조건에 도달할 때까지, 혹은 붕괴부를 통과하는 저수지 수위가 더 이상 제방을 침식시킬 유속이 발생하지 않을 때까지 아래쪽으로 발달하게 된다.

만약 제체의 침식작용이 기초 암반 등과 같은 어떠한 저항력을 가진 지반층에 의해 저지된다면, 수직방향으로의 침식작용이 측방향으로 계속해서 발행하고 붕괴부는 결국 사다리꼴의 형상을 나타내게 된다. 이는 여러 국내·외 댐 붕괴사례(Sisk댐, Fontenelle댐, Baldwin Hills댐, Teton댐, 장현/동막 저수지댐, 효기리댐 등)에서도 확인할 수 있으며, 따라서 본 연구에서는 사다리꼴의 형상으로 붕괴부 형상을 가정하였다. 붕괴부 평균폭과 붕괴지속시간은 댐 붕괴부의 특성치 기준 자료를 바탕으로 설정하였다. 대상 댐의 축조형식이 중앙심벽식 사력댐으로 댐 제체높이인 50m를 붕괴깊이로 하였다. 붕괴시간은 0.5, 1.0, 2.0hr으로 구분하였다. 이 때의

붕괴부 평균폭은 100m($B=2h_d$) 그리고 50m($B=h_d$), 붕괴부 측면 경사는 0.5, 0.75, 1로 각각 설정하였다. 이상의 조건들을 고려하여 본 검토에서는 다음 Table 2와 같이 6개 case들을 가상붕괴시나리오로 구성하였다. 내부 댐인 B 댐의 경우 댐 제체높이인 22m를 붕괴깊이로 하여 붕괴부 평균폭은 44m($B=2h_d$), 붕괴시간은 0.35hr, 붕괴부 측면경사는 1로 설정하여 붕괴모의를 수행하였다.

4.2 입력자료의 구성

본 연구에서는 극한홍수붕괴조건시 댐의 가상붕괴에 따른 댐 지점에서의 붕괴 유출수문곡선을 산정하고 그 결과를 검토하려고 한다. PMF 유입수문곡선을 상류단 경계조건으로 사용하였으며, 대상유역에 유입되는 지천은 각 지천의 계획홍수량 및 유입수문곡선을 산정한 결과를 하도 구간에서의 측방유입조건으로 사용하였다.

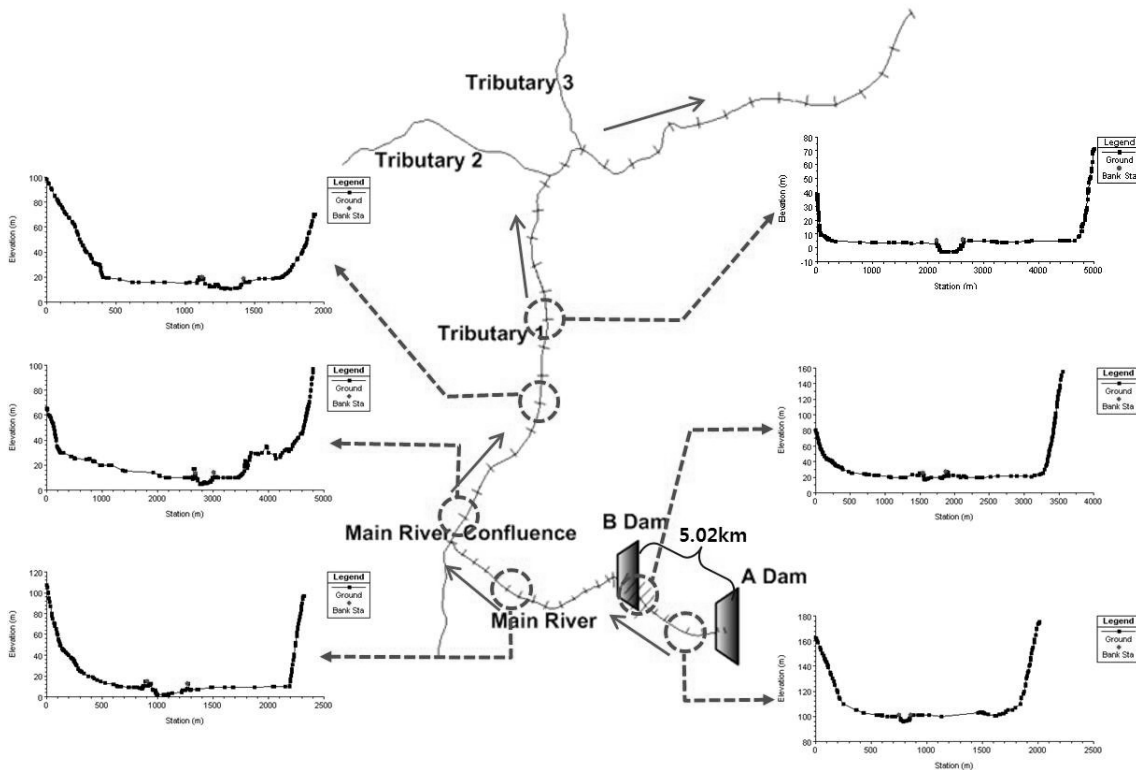


Fig. 6. Schematic Diagram for Simulation Applicable Sections of a Dam

하류단 경계조건으로는 지류-1 하구의 계획홍수위를 하류단 경계조건으로 채택하였다.

모의 적용 하도격점망을 Fig. 6에 나타내었으며, A 댐에서 시작하여 내부 댐인 B 댐을 거쳐 지류-1으로 합류하여 지류-1 하구까지 이르게 된다. 댐 하류부의 영향을 검토하기 위해 댐 직하류부로부터 지류-1 하구까지의 구간 약 41.9km의 하도에 대한 56개의 단면을 구성하여 모의에 적용하였다.

하도단면 자료는 유역에서 조사된 자료를 이용하였다. 이 자료의 주하도를 바탕으로 GIS와 HEC-GeoRAS를 이용하여 좌우 홍수터

의 넓은 지역까지 하도단면으로 구성하였다. 하도내의 홍수류의 주방향을 지형도로부터 파악하여 주수로부, 좌우 홍수터부 및 저류부를 추출하였다.

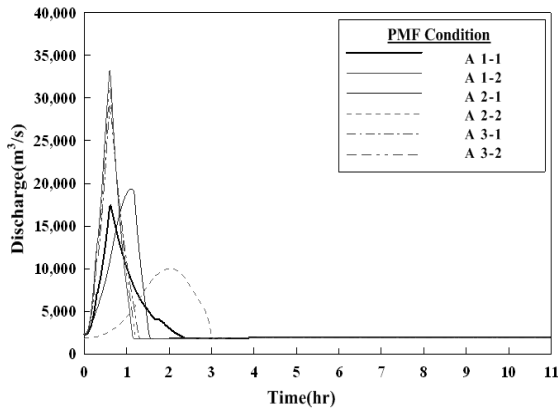
4.3 적용결과

구성한 입력자료를 바탕으로 1차원 모형인 DAMBRK 모형을 수행하였다. 먼저 A 댐의 극한홍수붕괴조건(PMF)일 때의 가상시나리오별 모의결과를 통해서 최대 붕괴 유출량이 산정되는 시나리오를 채택하여 붕괴부 특성치를 구하였다.

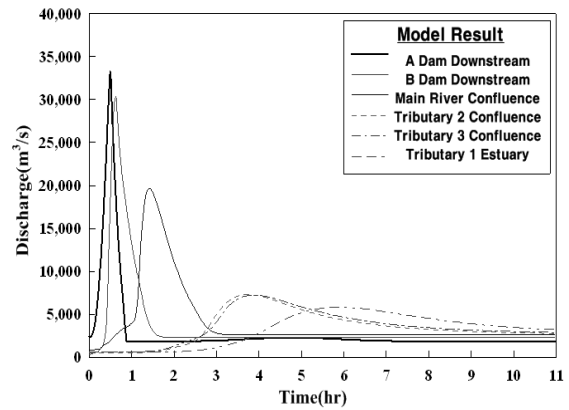
Table 3. Failure Conditional Peak Failure Runoff of a Dam

Name	Type	Scenario, Failure Condition and Peak Failure Runoff							
		Scenario Name	A1-1	A1-2	A2-1	A2-2	A3-1	A3-2	
A Dam	Rock Fill Dam	Failure Condition	B(m)	50(h_f)	100($2h_f$)	100($2h_f$)	100($2h_f$)	100($2h_f$)	100($2h_f$)
			Z	1.0	1.0	1.0	1.0	0.5	0.75
			Tf(hr)	0.5	0.5	1.0	2.0	1.0	1.0
		Peak Failure Runoff(m^3/s)	17,412	33,306	19,341	10,010	29,156	31,386	

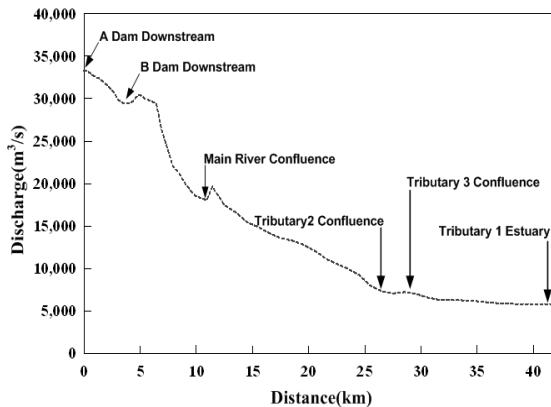
※ Adopted failure scenario of 0.5hr failure duration time according to study of Fread.



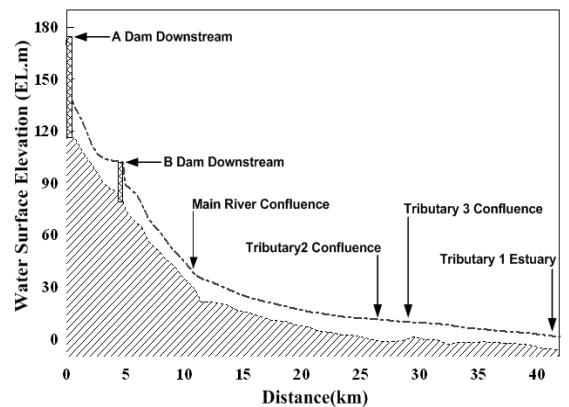
(a) Failure Simulation Results of Scenario



(b) Discharge Hydrograph



(c) Longitudinal Shape of Peak Flow



(d) Longitudinal Shape of Water Level

Fig. 7. Scenario Failure Simulation Results of a Dam

A 댐의 붕괴에 있어서 극한홍수붕괴조건일 경우, 모의결과 A1-1~A3-2의 경우에서 댐 직하류부에서 발생하는 최대붕괴유출량은 댐 및 저수지 제원을 고려한 붕괴시간과 붕괴부 평균폭을 적용했을 때 A1-2 조건에서 붕괴유출량이 가장 크게 산정되어 본 연구 붕괴해석에서의 극한홍수붕괴조건은 A1-2(붕괴시간 0.5hr)를 채택하였다. Fig. 7(a)는 가상시나리오별 붕괴유출수문곡선이다. 붕괴시나리오별 모의결과 붕괴지속시간이 짧을수록, 붕괴부 폭이 클수록 그리고 붕괴부 측벽면의 경사가 클수록 침투붕괴유출량이 큰 것으로 나타났다. 위에서 나타난 결과에서 볼 수 있듯이, 댐의 붕괴시 침투유출량에 민감한 영향을 주는 인자는 붕괴지속시간과 붕괴부 평균폭으로서 이들 값이 붕괴유출량 변화에 많은 영향을 주는 것으로 나타났다.

가상붕괴시나리오 A1-2의 경우에 대하여 댐 붕괴과를 모의하였다. 이때 PMF의 강우조건을 채택하였으며, 지류 및 합류구간으로의 유입수문곡선은 계획홍수규모를 채택하였다. 아래 Fig. 7(b)에 각 지점별 유량수문곡선을 나타내었고, 지점별 홍수위는 하류로 진행될수록 저감되는 것으로 분석되었다. Fig. 7(c)~Fig. 7(d)에는 A

댐 직하류부터 종단을 따라 침투유량의 종단형상 및 최고수위 종단형상을 나타내었으며, 일부구간에서는 지천유입의 영향으로 침투유량의 변화가 발생하였다. B 댐의 저수용량과 각 지류 합류점에서 유량의 유입으로 인하여 유량이 증가하였으며 점차 댐의 유출량이 증가함으로써 댐 직하류부터 지류-1 하구에 이르기까지 감소하는 곡선의 형태를 띄우고 있다.

4.4 2차원 홍수범람해석

모의 결과의 정확도를 검증하기 위하여 1차원 댐 붕괴의 경우의 부정류 해석에 적용하여 동역학적 모형에 의한 해석결과와 비교검토하였다. 이를 위해 홍수과가 넓게 퍼지기 시작하는 Main River 합류부를 대상으로 선정하였다. 본 연구에서는 A 댐 붕괴시 1차원 모형인 DAMBRK모형을 이용한 1차원 모의 결과와 2차원 모형인 FLUMEN모형을 이용한 모의 결과를 비교하였다. 그림 8은 모형검증을 위한 대상유역을 나타낸다. 분석대상지역의 범람해석 지형을 구축하기 위하여 수치지형도(1/5,000, 1/25,000) 및 하천기본계

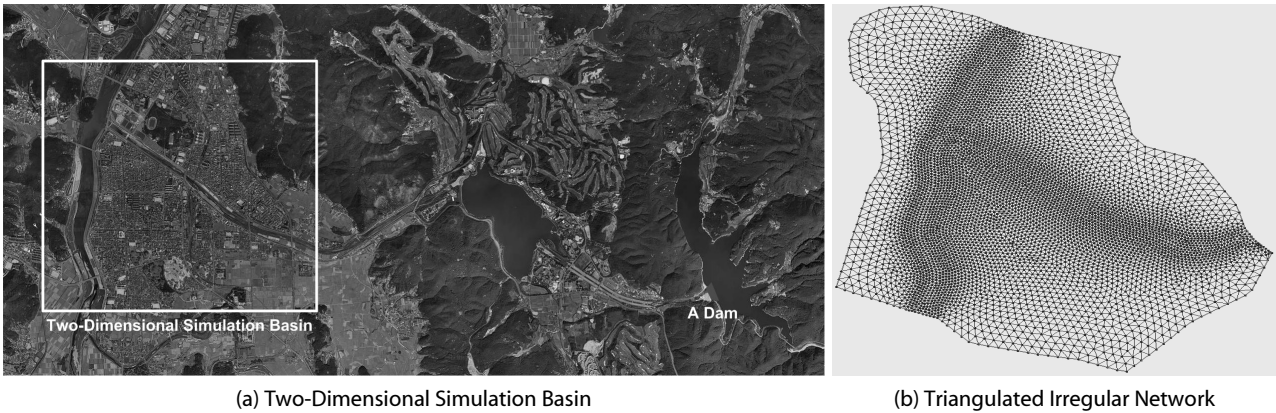


Fig. 8. Two-Dimensional Simulation Basin and Triangulated Irregular Network

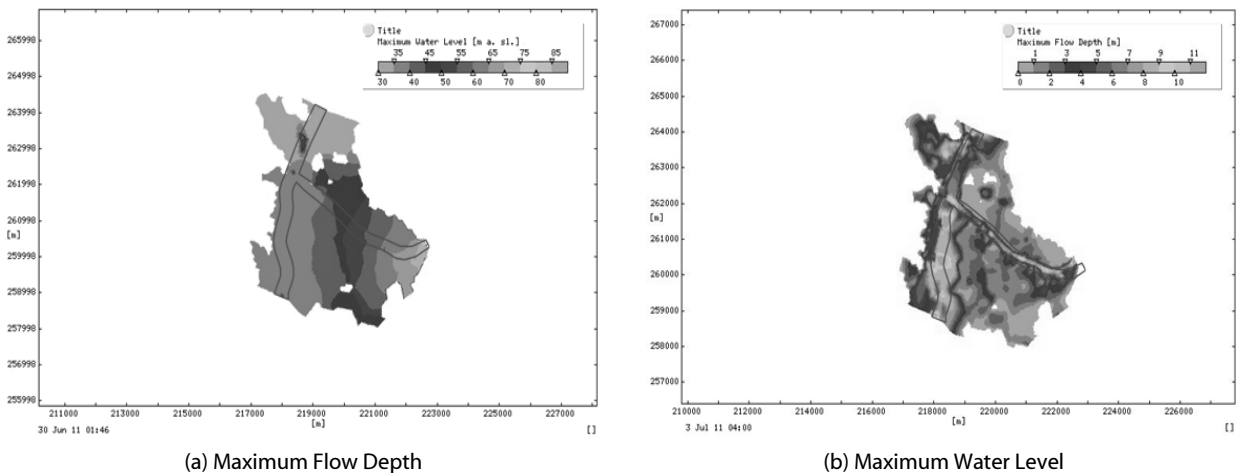


Fig. 9. Maximum Flow Depth and Maximum Water Level by FLUMEN Model

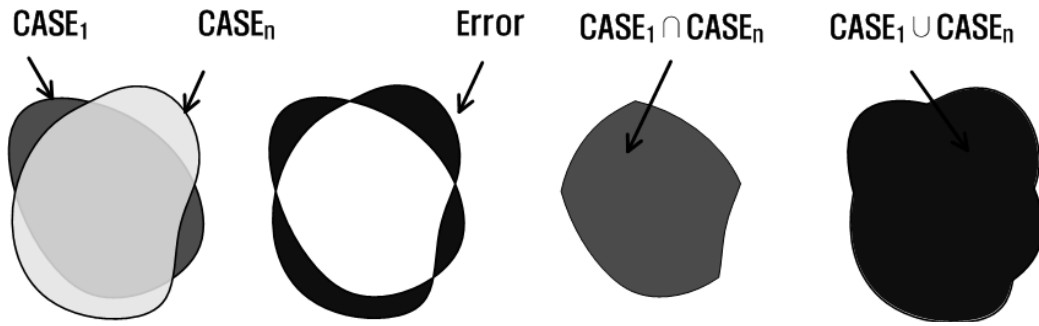
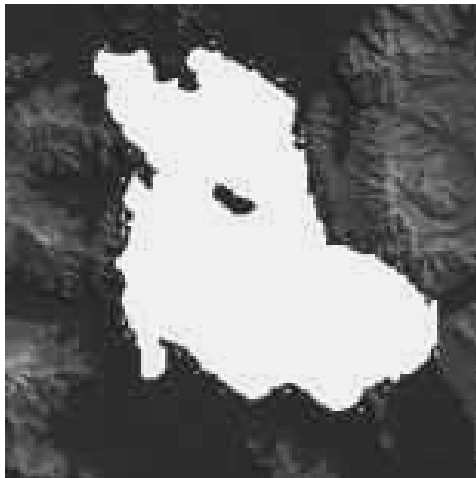
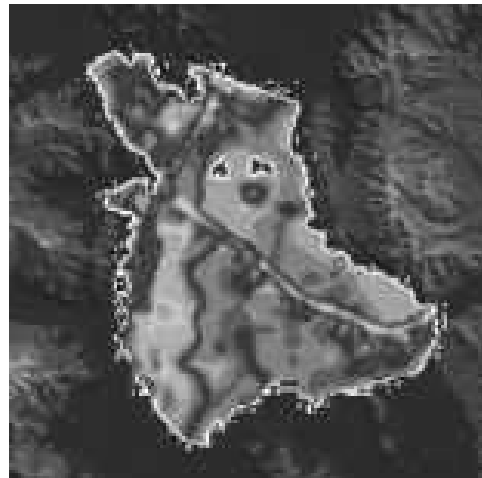


Fig. 10. Concept of Suitability



(a) 1-dimension Inundation Area



(b) 2-dimension Inundation Area

Fig. 11. Comparison of 1- and 2-Dimension Inundation Area

획, 측량 자료를 이용하였다. 수집된 수치지형도 및 기본계획 현황 평면도를 이용하여 Break Line을 설정하였다. 지형표고자료는 하도 제방부, 제내지의 3가지 구역으로 나누어 다른 정밀도를 갖도록 불규칙삼각망을 작성하였다. 3차원 지형자료를 구축하기 위하여 지형자료로부터 등고선, 삼각점 및 표고점들의 3차원 x, y, z값을 추출하였다. 지형특성을 고려하여 삼각망작성 프로그램에 의해 작성되며 Break Line은 삼각망 격자 밀도를 세밀하게 조정하여, 홍수 범람 해석시 그 역할을 가능한 정확히 구현할 수 있도록 하였다.

모의 구간은 A 댐의 직하류부로부터 모의지역까지 유로연장은 약 6.5km이다. 특히 모의 구간은 시가지 지역으로 지류가 유입될 뿐만 아니라 댐의 직하류부로부터 빠른 유속으로 인한 피해가 클 것으로 판단되어 모의 구간으로 선정되었다. 부정류의 흐름을 다룰 때 유입부에서의 상류경계조건으로 수문분석을 통한 계산된 홍수량 수문곡선을 사용하였으며, 하류측은 홍수위를 경계조건으로 하였다. 2차원 모의 결과 댐 붕괴시 유출량의 증가로 인해 댐 직하류에서는 급격한 홍수위 상승이 나타났으며 1차원 해석 결과와 유사한

결과가 나타났다. Fig. 9는 최대홍수위와 최대홍수심 분포를 나타내고 있다. 또한, 1, 2차원 홍수범람면적의 적합도를 비교하기 위해 1차원 침수 범위 폴리곤과 2차원 침수 범위 폴리곤의 교집합 침수면적과 합집합 침수 면적을 구하였다. 적합도에 대한 개념도는 Fig. 10과 같으며 1, 2차원의 홍수범람범위는 Fig. 11에 나타내었다.

$$\text{적합도}(\%) = \frac{\text{Area}(CASE_1 \cap CASE_n)}{\text{Area}(CASE_1 \cup CASE_n)} \times 100 \quad (5)$$

여기서, $CASE_1$ 은 기준이 되는 침수 면적이고, $CASE_n$ 은 비교 대상 면적이다.

Table 4. Suitability of One-and Two-Dimensional Flood Inundation Analysis

Intersection (m^2)	30,188.743
Union (m^2)	33,120.085
Goodness of fit (%)	91.15

침수 면적 자료를 바탕으로 적합도 공식을 적용하여 침수 면적의 교집합 및 합집합, 적합도를 도출하였다. 면적의 교집합과 합집합의 계산은 GIS Tool을 활용하였다. 1, 2차원 홍수범람해석을 비교한 결과 Table 4에서 보는바와 같이 적합도가 90%를 상회하여 이는 1차원 홍수와 예측이 정확함을 보여준다고 할 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 순차적 댐 붕괴 홍수와 해석에 대한 수치모형의 수리적 특성을 분석하고 이를 실제 붕괴 사례에 적용하여 계산값과 실측치를 비교하여 적용 모형의 적절성을 검증하였으며, 가상의 극한홍수에 대해 국내 댐에 적용하여 홍수와 해석을 예측하였다. 본 연구에서의 주요결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 내부 댐의 동시붕괴 조건을 위해서 DAMBRK 모형은 연속계산방법과 동시계산방법을 선택하여 적용할 수 있도록 구성되어 있다. 연속계산방법은 하나 또는 그 이상으로 연속하여 위치해 있는 저수지를 통해서 홍수추적을 실시할 때 적용되며, 동시계산방법은 상류 댐과 내부 댐을 하나의 시스템으로 다루게 된다. 본 연구에서는 동시계산방법을 이용하여 홍수류가 수문을 충만하여 흐르거나, 하류부 수위영향으로 인해서 수중잠수 상태로 유하하는 경우에는 Orifice 흐름을 적용하였고, 수문이 충분히 잠수되지 않는 경우와 저수지 수위가 충분히 댐 정부 상위에 위치하여 월류 흐름이 발생하는 경우에는 Weir 흐름을 적용하였다.
- (2) 실제 붕괴 사례인 Lawn Lake Dam에 대하여 순차적 댐 붕괴 홍수와 해석을 실시하였다. 순차적 댐 붕괴 모의로 인해 Cascade Lake Dam 지점에서 유량이 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 내부 댐인 Cascade Lake Dam의 붕괴로 댐의 저수용량이 붕괴유출량에 더해지는 것을 나타내는데 이를 통해 순차적 댐 붕괴 모의가 잘 수행됨을 확인할 수 있었다. 또한 실측치와 첨두유량 중단형상을 비교한 결과 실측치보다 다소 큰 값을 나타내었지만 중단형상의 형태가 비슷한 것으로 보아 모형의 정확성을 확인할 수 있었다.
- (3) 실제 붕괴 사례에 적용해 본 결과 A 댐 직하류부터 중단을 따라 첨두유량의 중단형상은 일부구간에서 지천유입의 영향으로 첨두유량의 변화가 발생하였다. B 댐의 저수용량과 각 지류 합류점에서 유량의 유입으로 인하여 유량이 증가하였으며 점차 댐의 유출량이 증가함으로써 댐 직하류부터 지류-1 하구에 이르기까지 감소하는 곡선의 형태를 나타내었다.
- (4) 1차원 순차적 댐 붕괴 홍수와 모의의 정확도를 검증하기 위하여 2차원 모형인 FLUMEN 모형의 모의 결과와 비교·검토하였다. 모의 대상구역은 홍수과가 넓게 퍼지기 시작하는 주하도 합류부

를 대상으로 선정하였다. 대상구역의 침수면적을 비교한 결과 1차원 해석결과와 90%이상의 적합도를 보이고 있어 1차원 순차적 댐 붕괴 홍수와 해석이 정확함을 확인할 수 있겠다.

References

- Fread, D. L. (1977). "The development and testing of a dam-break flood forecasting model." *Proceedings of the Dam-Break Flood Routing Model Workshop*, Bethesda, Maryland, pp. 164-197.
- Han, K.-Y. (1987). *A Forecasting model for the floodwave propagation resulting from fill dam-break*, Doctor Dissertation, Yonsei University. pp. 1-86 (in Korean).
- Han, K.-Y., Lee, J.-Y., Lee, E.-R. and Song, J.-W. (1988). "Appicability evaluations of dam breach floodwave models." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol .31, No. 2, pp. 189-198 (in Korean).
- Hoggan, D. H. and Chauhan, S. (2000). "Dendritic one-dimensional unsteady flow (FLDWAV / DAMBRK) model of the sevier river." *Utah. Joint Conference on Water Resource Engineering and Water Resources Planning and Management*, Section 22, Chapter 1, pp. 1-10.
- Hoogstraat, G. K. (2011). *Flood hydrology and dam-breach hydraulic analyses of four reservoirs in the Black Hills, South Dakota*. U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report, Vol. 5011, pp. 37.
- Jansen, R. B. (1980). *Dams and public safety*, A Water Resources Technical Publication, Denver, CO (Water and Power Resources Service, U.S. Department of the Interior).
- Kim, K.-S., Kim, J.-S., Kim, Y.-J. and Kim, W. (2011). "Applying methodology of physical - Based dam breach model." *Korea Water Resources Association Conf*, p. 428 (in Korean).
- Lee, J.-T. (1982). "An analysis of unsteady flow with preissmann scheme." *Journal of Korean Association of Hydrological Sciences*, Vol. 15, No. 1, pp. 57-62 (in Korean).
- Lee, J.-T., Han, K.-Y. and Lee, J.-S. (1986). "A forecasting model for the floodwave propagation from the hypothetical earth dam-break." *Journal of Korea Society of Civil Engineers*, Vol. 6, No. 4, pp. 69-78 (in Korean).
- Lee, J.-Y. (1996). *Application and evaluation of dam breach flood wave models*, Master Dissertation, Kyungpook National University. pp. 1-33 (in Korean).
- Lou, W. C. (1981). *Mathematical modeling of earth dam breaches*, Unpublished Ph.D. Dissertation, Colorado State University, Fort Collins, CO.
- Paul H. and Rydlund, Jr. (2006). *Peak discharge, Flood profile, Flood inundation, and debris movement accompanying the failure of the upper reservoir at the taum sauk pump strage facility near lesterville*, Missouri, Scientific Investigations Report, Vol. 5284.
- Ross D., David G. and C. Donnelly, R. (2005). "Comparison of HEC-RAS with FLDWAV and DAMBRK models for dam break analysis." *CDA Annual Conference*.