



Flood inundation analysis resulting from two parallel reservoirs' failure

Kim, Byunghyun^a · Han, Kun Yeun^{b*}

^aInstitute for Disaster Prevention, Kyungpook National University, Daegu, Korea

^bDepartment of Civil Engineering, Kyungpook National University, Daegu, Korea

Paper number: 15-093

Received: 9 November 2015; Revised: 14 December 2015 / 24 December 2015; Accepted: 24 December 2015

Abstract

The DAMBRK is applied to Janghyeon and Dongmak reservoirs in Namdaechon basin, where two reservoirs were failed due to Typhoon Rusa in 2002. Relaxation scheme is added to DAMBRK to consider the tributary cross-section because two reservoirs are in tributary valleys. In addition, this study suggests the method to utilize the reservoir breach formation time of ASDSO (2005) and empirical formulas for peak break outflow from dam to reduce the uncertainty of reservoir breach formulation time. The single break of Janghyeon reservoir and consecutive break of Janghyeon and Dongmak reservoirs with the suggested method are considered. While the breach discharge from reservoirs rushes down, the discharge and water surface elevation along the river are predicted, and the predictions show the attenuation phenomena of reservoir break floodwave. The applicability of the model is validated by comparing the predicted height with field surveyed data, and showing good agreements between predictions and measurements.

Keywords: Two parallel reservoirs, Reservoir failure, DAMBRK, Flood inundation area

병렬로 위치한 2개 저수지 붕괴에 따른 홍수범람 해석

김병현^a · 한건연^{b*}

^a경북대학교 방재연구소, ^b경북대학교 토목공학과

요 지

본 연구에서는 DAMBRK 모형을 2002년 태풍 루사로 인해 붕괴된 남대천 유역의 장현저수지와 동막저수지에 적용하여 붕괴상황을 재현하였다. 두 저수지는 병렬로 위치하고 있으며, 이 두 저수지의 붕괴 모의를 위해 Relaxation 기법을 DAMBRK 모형에 추가하였다. 그리고 ASDSO (2005)에서 제안한 흙댐 붕괴지속시간과 침투붕괴유량 산정을 위한 Froehlich 등의 경험공식을 활용한 저수지의 붕괴지속시간 추정 방법을 제안하였다. 제안 방법으로 선정된 붕괴지속시간으로 장현저수지 단일붕괴와 장현 및 동막저수지 연속붕괴에 대해 적용하여 붕괴유출 수문곡선을 계산하였다. 계산된 붕괴유량이 하류로 전파하면서 예상되는 홍수량 및 홍수위를 주요 하도지점에서 계산하고, 유량이 감소되는 특성을 해석하였다. 그리고 계산 홍수위와 현장 조사된 홍수위와의 비교를 통해 적용 모형의 매개변수 및 정확성을 검증하였다.

핵심용어: 병렬 저수지, 저수지 붕괴, DAMBRK, 홍수범람지역

1. 서 론

전 세계적으로 기후변화로 인한 기상이변으로 예기치 못한 대규모 홍수 혹은 돌발홍수의 빈도가 잦아지고 있을 뿐아

니라, 우리나라도 국지성 집중호우나 태풍 등에 의한 홍수 발생 빈도가 증가하고 있다(Han, 2012). 또한, 대규모 강우나 산사태 그리고 지진과 같은 자연조건에 의한 댐·저수지 붕괴 발생 가능성이 상존하고 있으며, 댐·저수지 건설 후 상당기간이 경과한 경우, 관련구조물의 노후화로 인한 댐 체체 및 부속구조물의 결함이 발생하여 예기치 않은 비상상황이 초래될 수도 있다. 천재지변이나 예기치 못한 상황에 의하여 댐·저

*Corresponding Author. Tel: +82-53-950-5612
E-mail: kshanj@knu.ac.kr (K.Y. Han)

수지 붕괴와 같은 비상상황이 발생 할 경우 하류 지역에 많은 인명 및 재산피해를 가져올 수 있으므로, 사전에 이를 예방하거나 방지하는 것이 가장 바람직할 것이다.

국내외 대표적인 댐·저수지 붕괴를 살펴보면, 국외의 경우 미국에서는 1923년 St. Francis 댐과 1963년 Baldwin Hills 댐 붕괴로 각각 431명과 5명의 인명피해가 발생하였고, 1972년 Buffalo Creek 댐과 1976년 Teton 댐 붕괴로 각각 125명과 11명의 사망자가 발생하였다. 유럽에서는 1959년 프랑스 Malpasset 댐 붕괴로 423명의 인명피해가 발생하였고, 1963년 이탈리아의 Vajont 댐 붕괴로 2,500여명이 사망하였으며, 1983년 스페인 Tous 댐 붕괴로 30여명 그리고 1985년 이탈리아의 Val de Stava 댐 붕괴로 268명의 사망자가 발생하였다. 아시아에서는 1975년 중국 Banqiao 댐 붕괴로 인한 직간접적인 피해로 171,000명이 사망하였으며, 1979년 인도의 Machhu II 댐 붕괴시 5,000여명 이상의 인명피해가 발생하였다. 국내의 경우, 1961년 남원 효기리저수지의 붕괴로 인하여 155명의 사망자가 발생하였고 1972년 부산 구덕저수지 붕괴로 75명의 인명피해가 발생하였으며, 한탄강유역에 위치한 연천댐은 1996년에 이어 1999년에 2차례나 붕괴되었다. 그리고 강릉 남대천유역에 위치한 장현저수지와 동막저수지는 2002년 태풍 루사시 26시간동안 약 875 mm의 집중호우로 인해 연속으로 붕괴되었다. 2013년, 2014년에는 각각 경주 산대저수지와 영천 괴연저수지가 붕괴되어 저수지 안전에 대한 사회적 관심을 불러일으키는 계기가 되기도 하였다.

댐·저수지 붕괴는 엄청난 유량이 빠른 속도로 하류로 전파하게 되고 이는 안전한 장소로 대피하기 위한 대피시간을 짧게 함으로서, 다른 유형의 홍수와 비교해서 큰 인명피해를 야기하게 한다. 이와 같은 극한홍수에 대비해 생명과 재산피해를 최소화하기 위한 비구조적 대책의 일환으로 우리나라를 비롯하여 미국, 유럽, 일본 등 선진국을 중심으로 댐·저수지 붕괴에 대비한 비상대처계획(Emergency Action Plan, EAP) 수립을 의무화하고 그 대상범위를 확대하는 단계에 있으며, 일부 선진국의 경우는 다양한 시나리오와 시민의 복합적인 요구를 반영한 홍수위험지도 및 비상대피지도 등을 작성 중에 있다(Jeon et al., 2009).

미국은 1979년 댐 안전을 위한 연방지침서(Federal Guidelines for Dam Safety)를 마련하고 1998년에 재정비함으로써 댐의 비상상황에 대비한 비상대처계획 수립과 댐 운영계획 및 정기적인 댐 안전점검을 의무화하였다. 홍수위험지도는 연방재난관리청(Federal Emergency Management Agency, FEMA)에서 홍수위험지도 제작지침을 기준으로 작성하고, 제작된 홍수지도는 FEMA 홍수지도 서비스 센터(<https://msc.fema.gov>)에서 미국 전역에 대해 제공하고 있다(Kim et al., 2011).

유럽의 대부분 국가도 댐붕괴 해석 및 비상대처계획 수립을 법으로 의무화하고 있는데, 프랑스의 경우 1959년 Malpasset 댐 붕괴를 계기로 1968년 댐 관리자에게 댐 붕괴 홍수와 해석 및 EAP를 수립하고 이를 정기적으로 수정·보완토록 법으로 규정하였으며, 포르투갈은 1990년 댐 소유자가 댐 붕괴 해석 및 비상대처계획을 수립하도록 법으로 의무화하였다. 유럽에서의 홍수지도에 관한 연구는 1990년대 후반에 시작되어 2007년에는 유럽연합(European Union, EU)의 모든 회원국들이 2015년까지 각국 영토에 대한 홍수위험지도를 제작하도록 하는 유럽연합 홍수지침(EU Flood Directive)을 마련하였다(EXSCIMAP, 2007).

국내의 경우 1999년 수해방지종합대책에서 댐 붕괴해석 및 홍수의 전파양상분석이 포함된 댐의 비상대처계획수립을 법적으로 의무화할 것을 제시한 바 있으며, 2005년 자연재해대책법 개정안에서 댐을 포함한 각종 시설물에 대한 비상대처계획 수립을 의무화하는 제도를 도입하였다. 그리고 2008년 댐·저수지의 안전관리 및 재해 예방에 관한 법률이 제정되어 용도별로 관리주체가 분산되어 있던 전국의 댐과 저수지에 대한 국가차원의 일원화된 안전관리체계를 구축하였다(<http://www.moleg.go.kr>). 국내에서의 홍수위험지도 제작은 2001년 시험제작단계를 거쳐 2004년부터 2012년까지 낙동강, 영산강 및 한강권역에 대한 홍수위험지도 제작이 완료되었으며, 2013년부터 2015년까지 금강권역에 대한 홍수위험지도가 제작중이다. 국내에서의 홍수위험지도는 비상대처계획 수립, 재해지도 작성, 풍수해보험관리지도 작성 그리고 풍수해저감종합계획 수립 등에 활용되고 있다.

댐·저수지 붕괴와 같은 극한홍수 발생시 경보의 유무의 따라 사망자 수가 평균 19배정도 차이가 나는 것으로 보고되었다(USBR, 1988). 이처럼 댐·저수지 붕괴로 인한 인명피해 최소화를 위한 위험(발생)경보를 위해서는 비상대처계획, 홍수위험지도 그리고 사전경보시스템의 수립 및 제작이 중요하며, 이 3가지 요소의 수립 및 제작을 위해서는 정확한 댐·저수지 붕괴 모델링이 선행되어야 한다(Kim et al., 2010). 하지만 댐·저수지 붕괴로 인한 홍수는 다른 홍수유형에 비해 발생빈도가 낮으며, 실제 댐·저수지 붕괴를 토대한 한 홍수 모델링에 관한 연구는 많지 않다. 실제 붕괴가 발생한 댐에 대한 붕괴 모델링 연구로는 국외의 경우, Malpasset 댐(Valiani et al., 2002; Brufau et al., 2004; Yoon and Kang, 2004; Liang et al., 2007; George, 2011; Li and Duffy, 2011; Kao and Chang, 2012; Kim et al., 2014), Tous 댐(Abderrezzak et al.,

2009), Baldwin Hills 댐(Gallegos et al., 2012) 그리고 Vajont 댐(Bosa and Petti, 2013) 등이 있다. 국내의 경우, 연천댐(Jang et al., 2007), 장현 및 동막저수지(Han et al., 2005; Choi and Han, 2005) 그리고 산대저수지(Lee et al., 2015) 붕괴에 대한 모델링 연구가 있다.

Han et al. (2005)은 DAMBRK 모형을 이용하여 장현 및 동막저수지의 붕괴 모델링을 수행하였는데, 본 연구와는 홍수터 지형자료, 댐 붕괴 지형 반영, 댐 붕괴시간 그리고 댐 붕괴 지속시간 선정방법 등에서 차이가 있다. 즉, 본 연구에서는 연구구역의 홍수터 지형자료로 1:5,000 수치지도가 사용되어 홍수터로 범람된 홍수심을 더 정확하게 계산하였고, 붕괴된 두 저수지의 복구 사업에서 실측된 저수지의 붕괴 폭 및 높이를 적용하여 저수지 붕괴유량이 산정하였다. 또한, 두개 저수지의 붕괴시간에 최대한 가깝게 붕괴가 발생하도록 저수지 유입수문곡선의 유입시간에 대한 보정과정을 거쳤으며, 저수지 붕괴지속시간에 대한 불확실성을 줄이기 위해 ASDSO (Association of State Dam Safety Officials, 2005)에서 제안한 흙댐 붕괴지속시간을 DAMBRK 모형에 적용하여 계산된 침투유출량과 여러 연구자들이 제안한 침투유출량 공식의 계산값을 비교하여 저수지 붕괴 지속시간을 선정하는 방법을 제안하였다.

댐 · 저수지 붕괴 모델링에 관한 기존 대부분의 연구는 연속적인 붕괴보다는 단일 댐 · 저수지 붕괴에 대해 이루어졌으며, 더구나 국내의 경우는 실제 댐 붕괴에 대한 모델링 연구는 많이 이루어지지 않았다. 본 연구에서는 2002년 태풍 루사로 인해 붕괴된 강릉 섬석천에 위치한 장현저수지와 섬석천의 지류인 금광천에 위치한 동막저수지의 붕괴 모델링을 수행하였다. 이를 위해 태풍 루사 당시 장현과 동막저수지의 수리 · 수문자료 및 하천현황을 조사하고, DAMBRK 모형을 이용하여 두 저수지의 실제 붕괴상황을 재현하였다. 본류인 섬석천과 지류인 금광천에 각각 병렬로 위치한 두 저수지의 연속붕괴 상황을 재현하기 위해, DAMBRK 모형에 Relaxation 기법을 추가하여 지류에 대한 역류현상에 대한 모의를 용이하게 하였다. 그리고 붕괴 홍수파 해석을 통해 하류부에 대한 수리학적 분석을 실시하고 계산 결과를 현장 조사된 침수위와 비교함으로써 모형을 검증하였다. 병렬 댐 · 저수지 붕괴 모델링 연구 사례는 국내 · 외적으로 찾아보기가 어려우며, 본 연구에서 보여준 병렬 저수지 붕괴 모델링 방법론과 결과는 병렬 댐 · 저수지 붕괴에 대한 비구조적 대책 수립에 도움이 될 것으로 기대된다.

2. DAMBRK 모형

2.1 지배방정식

DAMBRK 모형은 Eq. (1) and (2)의 연속방정식과 운동방정식으로 구성된 Saint-Venant 식을 지배방정식으로 한 음해법 유한차분해석에 그 기본을 두고 있다(Fread, 1988).

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial(A+A_0)}{\partial t} - q = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(Q^2/A)}{\partial x} + gA\left(\frac{\partial h}{\partial x} + S_f + S_e\right) + L = 0 \quad (2)$$

여기서, x = 하천의 흐름방향거리, t = 시간, Q = 유량, h = 수위, A = 유수단면적, A_0 = 저류단면적, S_f = 마찰경사, S_e = 단면변화에 따른 손실경사, q = 측방유출입량, L = 측방유출입량에 의한 운동량의 변화량이다.

DAMBRK 모형은 댐 붕괴시 붕괴부 지형의 발달과정, 저수지 붕괴 유출수문곡선 및 감수곡선의 계산부분에서 강점을 가지고 있어 ICOLD (International Commission on Large Dams)는 댐 붕괴 EAP 수립을 위한 계산모형으로 DAMBRK 모형을 추천한바 있다(ICOLD, 1988). 실제로 DAMBRK 모형은 미국 및 국내의 댐(저수지) 붕괴로 인한 EAP 수립을 위한 많은 적용사례를 통해 그 적용성이 입증된 모형이기도 하다.

2.2 Relaxation 기법

댐 · 저수지 붕괴로 인한 하류부 홍수파 해석 시 댐 하류에 지류가 존재하는 유역일 경우, 본류와 지류가 만나는 합류부 인근에서 역류가 발생할 수 있다. 이러한 역류량을 계산하기 위해서 지류가 유입하는 합류부에 넓은 단면을 생성하고 이를 저류단면적으로 고려해서 연속방정식만으로 해석하는 방법이 많이 사용되고 있다(Kim et al., 2011). 하지만, 이 방법은 간단하기는 하나 댐 붕괴에 의한 홍수파가 가지는 동역학적 흐름 특성을 효과적으로 반영할 수 없는 단점이 있다. 따라서 본 연구에서는 병렬저수지 붕괴 해석에서 발생할 수 있는 역류량 계산의 문제점을 개선하기 위해서, Relaxation 기법이 추가된 DAMBRK 모형(Han et al., 2005)을 이용하여 병렬저수지 붕괴에 따른 합류부에서의 효율적인 계산이 가능하도록 하였다.

Relaxation 기법은 수지형 하도망의 정확한 계산을 위해 Fread (1973)가 제안하였으며, 주수로와 합류하는 지류를 가진 하천에 효과적으로 적용될 수 있다. Fread (1973)에서 제안한 Relaxation 기법은 본류와 1차 지류에 대한 해석에 주안점

을 둔 반면, Fread (1985), Lewis and Fread (1996), Fread and Lewis (1998)는 n차 지류까지 해석할 수 있도록 Relaxation 기법을 확장하였다. 본 연구에서는 하천의 합류점에서 본류와 지류의 상호 연관된 유량의 계산을 위해 Eq. (3)의 Relaxation 기법(Fread, 1985; Lewis and Fread, 1996; Fread and Lewis, 1998)을 이용하여 지류에서의 유·출입 유량을 계산하였다.

$$q^* = \alpha q + (1-\alpha)q^{**} \quad (3)$$

여기서 q 는 합류점에서 계산된 지류의 유량, q^{**} 와 q^* 는 각각 합류점에서 업데이트된 수위조건을 고려하여 계산된 유량 및 한 계산시간 단계에서 개선된 유량이다. 그리고 α 는 가중계수로 Fread (1985)에서는 $0.6 \leq \alpha \leq 0.8$ 의 값을 제안하고 있고, 본 연구에서는 0.8을 적용하였다.

Relaxation 기법의 계산과정을 구체적으로 살펴보면(Fig. 1), Relaxation 기법은 한 계산시간 간격에서 본류에 대해 Saint-Venant 방정식을 먼저 풀고 난 후 지류에 대한 해석을

수행한다. 즉, 합류점에서 지류 유량은 Eq. (1) and (2)를 이용하여 본류 해석을 수행할 때 측방유입량 q 로 고려되어지고, 이때 지류 유량(q)은 지류의 상류단 경계조건, 지류 구간에서의 측방유입량(2차 혹은 3차 지류가 있는 경우), 합류점에서의 수위(지류의 하류단 경계조건) 등에 의하여 결정된다. q 를 측방유입량으로 하여 계산된 합류점에서의 수위(h_c)를 고려하여 지류에 대한 해석이 다시 수행되어 q^{**} 가 산정되고, q 와 q^{**} 의 비교를 통해 계산의 반복여부를 결정한다. q 와 q^{**} 의 차이가 지정한 오차한계(ϵ_q) 보다 작을 경우 다음 계산시간 단계에서의 유량을 계산하고, ϵ_q 보다 클 경우 Eq. (3)의 의해서 새로운 지류유입량 q^* 로 개선되며, 이 값은 다음 반복 계산과정에서 q 로 치환되어 $|q - q^{**}| < \epsilon_q$ 의 조건을 만족할 때까지 계산을 반복한다.

지류의 유입 유속은 지류가 본류로 유입되는 각도(ω_t)를 규정한 Eq. (4)로 산정한다(Fread, 1985). 이 값은 Eq. (2)의 운동량방정식에서 사용된 ($L = qv_x$)의 항으로서 지류유입에 의한 운동량의 영향을 고려할 수 있다.

$$v_x = (Q/A)_N \cos \omega_t \quad (4)$$

여기서, N 은 지류의 마지막 부분의 단면을 나타낸다.

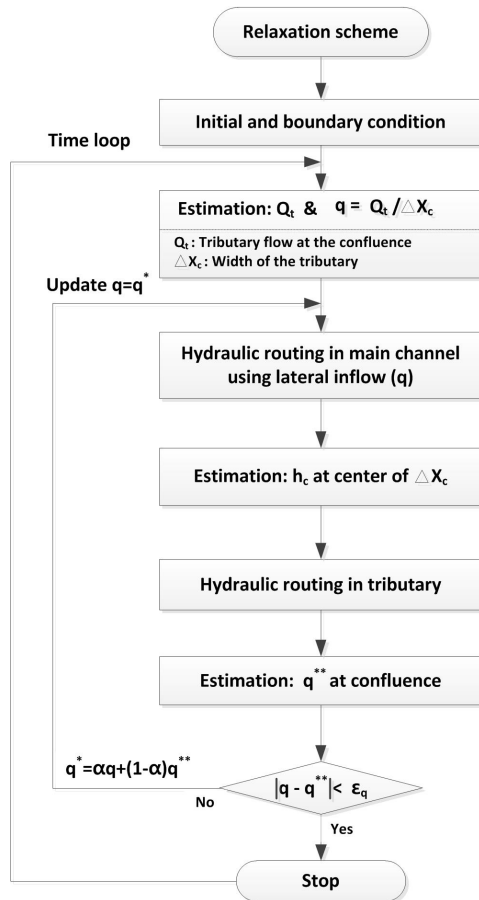


Fig. 1. Flowchart of relaxation scheme

3. 대상유역

본 연구의 대상유역은 2002년 태풍 루사로 인해 붕괴된 장현저수지와 동막저수지가 위치한 금광천, 섬석천 유역으로, DAMBRK 모형을 이용하여 저수지 붕괴 당시의 상황을 재현하고 연구유역에서의 저수지 홍수와 붕괴 해석을 본 연구에서 수행하였다.

3.1 장현 및 동막저수지

장현저수지와 동막저수지는 행정구역상 각각 강원도 강릉시 장현동과 구정면에 위치한다. 장현저수지 유역은 강릉 남대천 수계내 섬석천(지방2급) 상류부에 위치하며, 유역면적 11.52 km², 유로연장 8 km 정도이다, 동막저수지 유역은 섬석천과 합류되는 금광천(지방2급) 상류부에 위치하고 유역면적은 1.86 km², 유로연장 1.5 km 정도이다(KARICO, 2004). 본 연구의 대상유역은 Fig. 2에서 보여주듯이, 장현저수지~섬석천하류단 7.83 km 하도구간, 동막저수지~금광천하류단(섬석천 합류지점) 4.30 km의 하도구간 그리고 섬석천과 금

광천을 중심으로 하는 홍수터로 구성되어 있다.

장현저수지와 동막저수지는 각각 1947년과 1961년에 100년 빈도의 홍수량으로 설계된 저수지로 2002년 태풍 루사 내습시 강릉지역의 하루동안 870.5 mm, 시간당 최고 98 mm라는 기록적인 강우로 인해 완전 붕괴되었다(Chun, 2003). 일강우량 870.5 mm는 기존까지 연구구역의 일최대강우량인 305.5 mm (09/24/1921)의 3배 가까이 되며, 시간당 최대강우량(98

mm)은 기존 시간당 최대강우량인 60.0 mm (07/16/1987)의 1.5배가량 더 많은 양이다. 또한 870.5 mm/day는 이 지역의 500년 빈도 강우량(782.3 mm)을 넘어서며, 98 mm/hr는 200년 빈도 강우량(102.1 mm)에 육박하는 기록적인 수준이었다(KARICO, 2002a,b). Fig. 3은 이러한 태풍 루사의 기록적인 강우로부터 계산된 장현 및 동막저수지의 유입유량을 보여 준다.

3.2 피해현황 및 현장조사 자료

두 저수지의 붕괴로 하류부의 하천변 가옥, 교량, 공공시설물, 농경지도 홍수위의 제방 월류로 상당한 피해를 입었으며, 하구까지 하천내 수공구조물이 거의 전파되었다(Park, 2002). Fig. 4는 태풍 루사로 인해 붕괴된 장현저수지의 복구 전과 후 (Fig. 4(a), and (b)) 그리고 동막저수지의 여수로 붕괴 현장 (Fig. 4(c))과 하류부 피해상황(Fig. 4(d))을 보여준다.

태풍 루사로 인한 강릉지역의 막대한 홍수피해 조사를 위해 행정안전부 재해원인분석 조사단이 2002년 9월 3일부터~6일까지 홍수피해 현황에 대한 현장조사, 재해원인 분석 그리고 대책 수립을 위해 파견되었다(NIDP, 2002). 2004년 8월에는 장현 및 동막저수지의 안정성 평가 및 비상대처계획 수립을 위해 추가적인 현장조사가 이루어졌다(KARICO, 2004). 장현 및 동막저수지 붕괴로 인한 하류부 침수흔적 현장 조사가 이루어진 지점은 Fig. 2에 나타내었으며, Fig. 2에서 보여주듯이 침수흔적 조사 지점은 댐 직하류부터 하구까지 하도를 중심으로 골고루 분포되어 있다. 본 연구에서는 2002년과 2004년에 현장조사된 자료와 2차원 홍수범람 모형의 검증 을 위해 대상유역에 대한 적용한 Choi and Han (2005)의 자료를 바탕으로 1차원 홍수범람 해석모형의 구축 및 검증을 수행하였다.

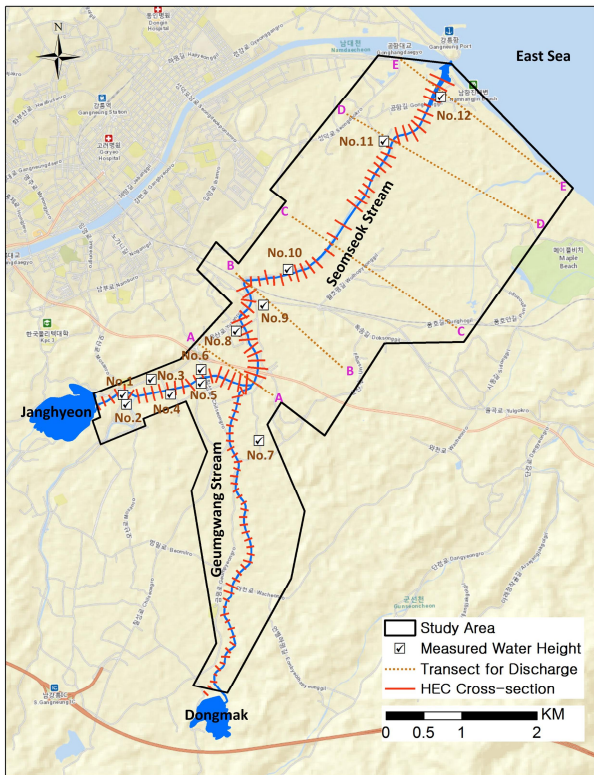


Fig. 2. Study area for JH and DM reservoirs break

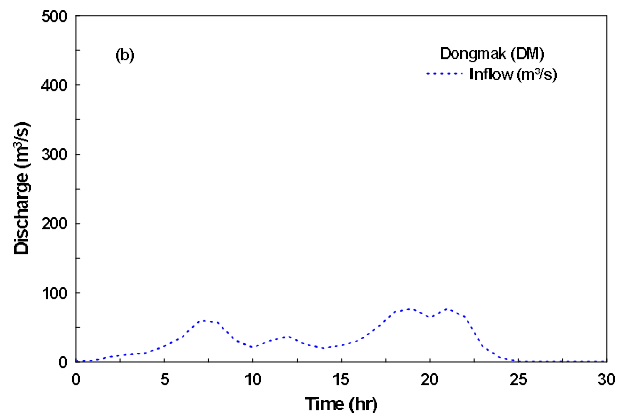
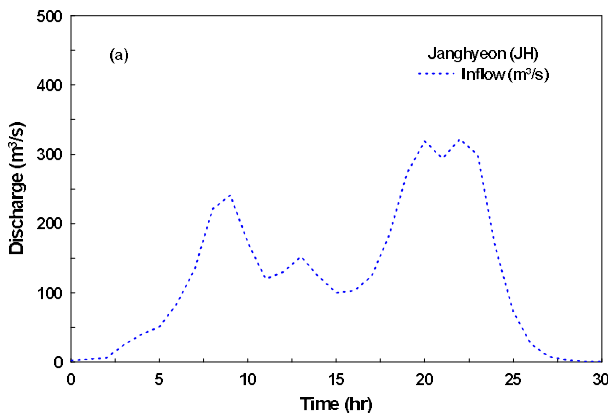


Fig. 3. Inflow hydrograph into (a) JH and (b) DM during Typhoon Rusa

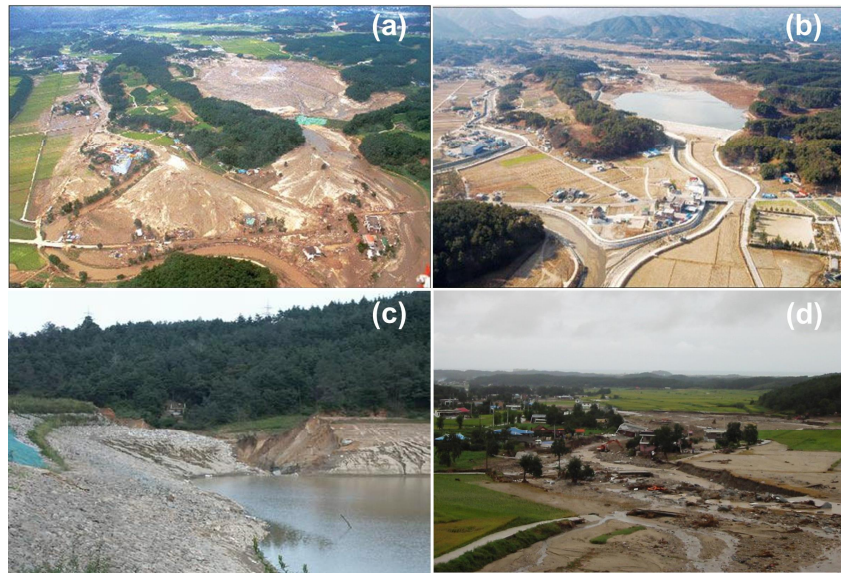


Fig. 4. Photographs of JH (a) before and (b) after reservoir restoration, and DM (c) reservoir breach and (d) downstream flood zone (K-water, 2002; KARICO, 2004)

4. 장현 및 동막저수지 붕괴 해석

본 연구에서는 1차원 수리해석모형인 DAMBRK 모형을 이용하여 태풍 루사 당시의 장현저수지와 동막저수지 붕괴를 재현하였다. 재현을 통해 두 저수지의 붕괴에 따른 붕괴유출 수문곡선을 유도하고, 붕괴유량이 하류부로 유하하면서 예상되는 홍수량 및 홍수위를 주요지점에서 계산하였다. 그리

고 계산된 붕괴유량과 저수지 하류부의 계산수위를 실측홍수위와 비교함으로써 적용모형의 매개변수 및 적합성을 검증하였다. Fig. 5는 장현 및 동막저수지 붕괴로 인한 하류부 홍수추적을 위해 본 연구에서 적용한 계산 흐름도를 보여준다.

4.1 DAMBRK 모형 구축

붕괴된 두 저수지의 복구 사업이 2002년 말부터 시행되었으며, 이 사업에서 두 저수지의 붕괴 폭과 높이를 포함하는 붕괴형상 및 저수지의 단면 등이 측량되었다(KARICO 2002a,b). 본 연구에서는 측량된 붕괴 제원 및 저수지의 기본 제원을 이용하여 저수지 제체 붕괴 형상을 재현하였으며, DAMBRK 모형의 저수지 붕괴부 구축을 위해 사용된 저수지의 제원은 Table 1에 나타내었다.

저수지 붕괴에 따른 하류부 홍수 추적을 위해, 하천단면은 섬석천과 금광천 구간 그리고 남대천 일부 구간에 대해서 100 m 간격(Fig. 2)의 종·횡단 측량 단면을 DAMBRK 모형의 입력단면인 표고-하천폭(HS-BS)의 관계로 변환하였다. 그리고 홍수터 지형은 1:5,000 수치지형도를 이용하여 구성하였다. 특히 홍수터의 영향을 고려할 수 있도록 하천폭을 유수단면과 저류단면으로 구분하여 계산할 수 있도록 지형자료를 구축하였고, 임의의 수위 또는 다양한 거리간격의 요구조건에 맞는 단면 특성치들은 선형보간 방법을 이용하여 각 수위에서의 수면폭, 단면적, 경심 등의 값들을 계산할 수 있도록 하였다. 주수로와 연결되어 있는 소류지가 존재하거나, 하폭이 급격히 넓어지는 경우에는 x 방향 유속은 주수로에서

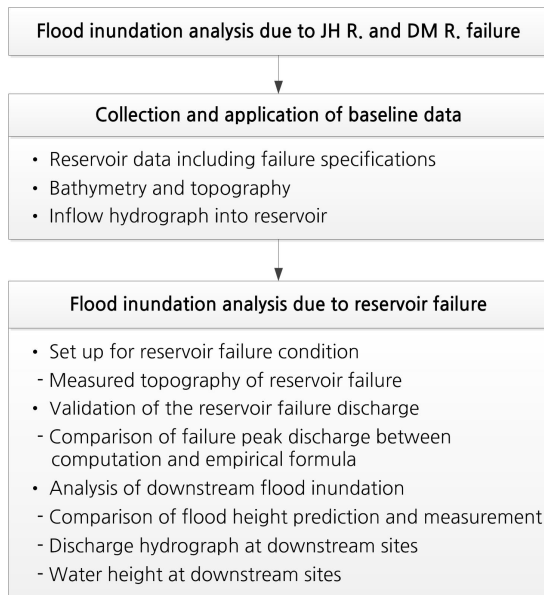


Fig. 5. Flow chart for flood inundation analysis due to reservoir failure

Table 1. Dam/Reservoir and breach characteristics

Parameter	Unit	Janghyeon (JH)	Dongmak (DM)
Dam/Reservoir			
Type	-	Earthfill	Earthfill
Drainage area	km ²	11.52	1.86
Height	m	14.8	22.0
Length	m	170.0	230.0
Crest elev.	El. m	26.14	88.22
Spillway length	m	80	16.5
Spillway crest elev	El. m	24.1	85.4
Breach			
Average width	m	96	34
Height	m	13.36	14.22
slope	m	3.509	1.541

의 유속에 비하여 무시할 만하므로 흐름을 소통시키지는 않고 저류만 시키는 역할을 하도록 유수단면과 구분하여 저류효과를 고려하였다.

대상유역에 대한 1차원 홍수추적을 위한 하도단면과 홍수터 지형자료의 통합 구축과정은 1차원 모형을 이용한 홍수모델링에 관한 기존의 연구(Kim et al., 2011; Kim et al., 2012)에서 보여준 방법과 동일한 방법을 사용하였다.

4.2 저수지 붕괴 수문곡선

장현저수지와 동막저수지의 유역면적은 각각 11.52 km²와 1.86 km²이며, 태풍 루사 내습시 연구유역에서의 강우자료 및 두 저수지의 유역면적을 기초로 HEC-HMS 모형으로 산정된 두 저수지로의 유입유량은 Fig. 3에서 보여준다(KARICO, 2004). DAMBRK 모형에서 저수지 붕괴유출량 산정을 위해서는 기본적으로 붕괴높이, 붕괴폭, 붕괴 평균경사, 붕괴 지속시간에 대한 정보가 필요하다. 추가적으로, level pool routing 기법을 이용한 저수지 추적을 위해서는 저수지 수위-수표면적 관계가 필요하며, dynamic routing 기법을 이용하기 위해서는 저수지의 횡단면 자료가 필요하다. level pool routing은 저수지 전체를 동일한 수위값으로 가정하여 운동항의 영향이나 시간미분항을 고려하지 않는 반면, dynamic routing은 저수지의 단면에서 시간별 유량 혹은 수위를 계산하기 위해서 Saint-Venant 방정식의 해를 기초로 하는 수리학적 저수지 추적 방법이다(Kim, 2005). 본 연구에서는 저수지 추적을 위해 저수지 유입곡선(Fig. 3)과 저수지 수위-수표면적 관계(Fig. 6, KARICO, 2002a, b)를 이용한 level pool routing 기법을 적용하였다.

저수지 붕괴 유출량은 하류부의 피해에 대한 가장 큰 직접

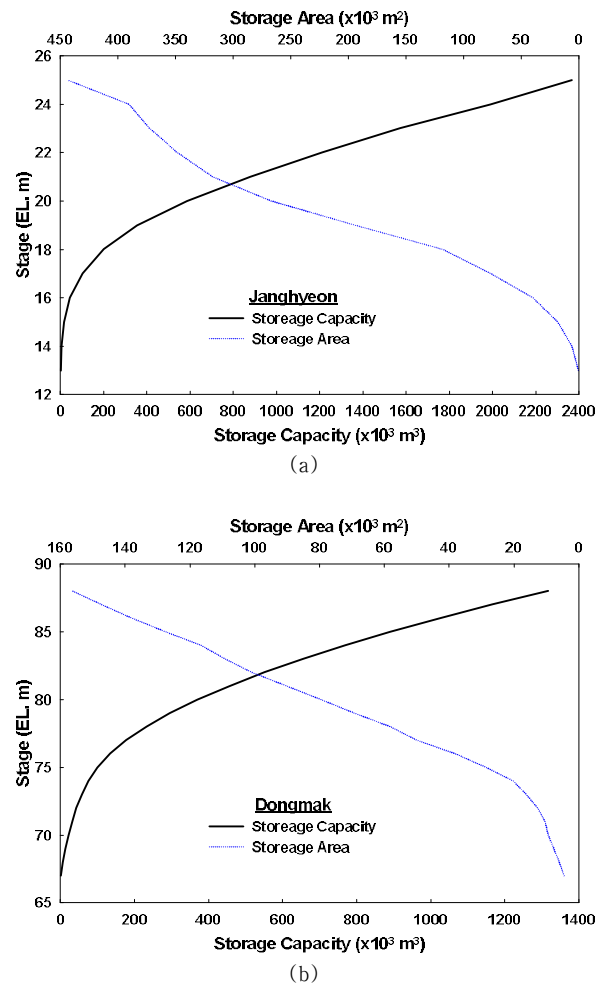


Fig. 6. Water level–surface area and water level–storage capacity relationship curve: (a) Janghyeon, (b) Dongmak (KARICO, 2004a, b)

적인 영향을 줄 수 있는 요소 중 하나이므로, 저수지 붕괴 영향을 해석하기 위해서는 정확한 계산이 요구된다. 하지만, 저수지 붕괴는 빈번하게 발생하는 자연재해가 아닐 뿐만 아니라 붕괴도 순간적으로 이루어지므로 저수지 붕괴 유량을 산정하기 위해 필요한 여러 가지 변수에 대한 실측자료나 정확한 정보를 얻기는 매우 어려운 과정이다. 본 연구에서는 장현 및 동막 저수지 붕괴유출 수문곡선 산정을 위해 필요한 저수지 기본제원 및 붕괴제원들을 여러 문헌(NIDP, 2002; KARICO, 2002a, b; K-water, 2002; KARICO, 2004)을 통해 수집하였으며, 수집한 정보는 Table 1에서 보여준다.

하지만, 저수지 붕괴유출량의 정확한 계산을 위해 필요한 매개변수중 하나인 붕괴 지속시간에 대한 실측자료나 정보는 구할 수가 없었으며, 실제 저수지 붕괴는 매우 짧은 시간에 발생하므로 이를 실측하는 것은 매우 어려운 일이다. 따라서 본 연구에서는 댐 붕괴 지속시간에 대한 실측자료를 대신하기

Table 2. Peak breach outflow (Q_P , m^3/s)

Investigator	Reference		This study			
	Formula	JH	DM	t_f (hr)	JH	DM
Kirkpatrick (1977)	$Q_P = 1.268(H_W + 0.3)^{2.5}$	874	1,019	0.5	2,603	1,040
Pierce et al. (2010)	$Q_P = 2.325 \cdot \ln(H_W)^{6.405}$	1,038	1,208	1.0	1,719	615
MacDonald and Langridge-Monopolis (1984)	$Q_P = 3.85(V_W \cdot H_W)^{0.411}$	1,389	1,057	1.5	1,309	445
Costa (1983)	$Q_P = 0.763(V_W \cdot H_W)^{0.42}$	1,054	798	2.0	1,090	355
Molinaro (1990)	$Q_P = 0.116 * (gH_W)^{1/2} H_W^2 (V_W/H_W^3)^{0.22}$	1,069	1,021	2.5	942	299
Froehlich (1995)	$Q_P = 0.607(V_W^{0.295} \cdot H_W^{1.24})$	1,129	985	3.0	828	261

Q_P = Peak breach outflow (m^3/s), V_W = Volume of water stored above breach invert at time of failure (m^3), H_W = Depth of water above breach invert at time of failure (m), t_f = Breach formation time (hr)

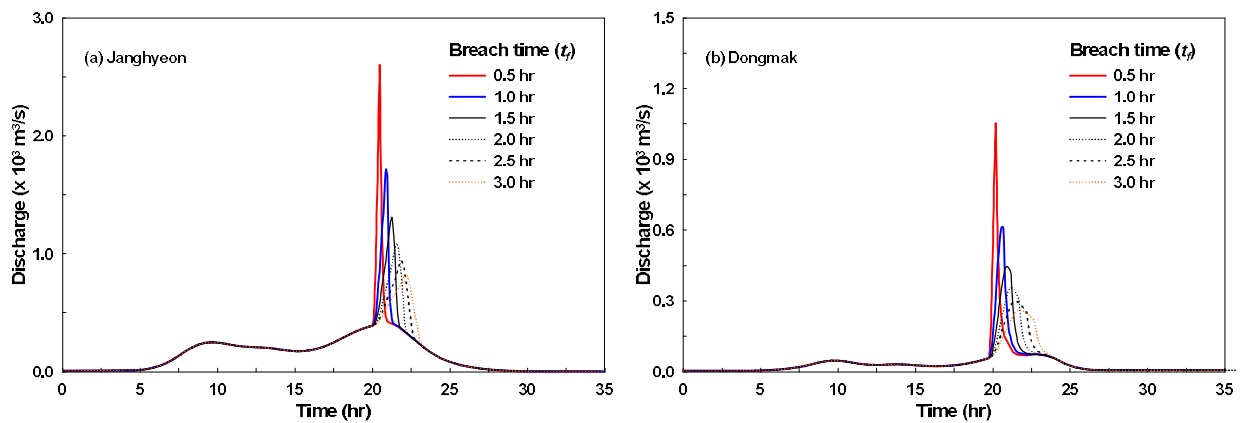


Fig. 7. Breach outflow hydrograph according to breach formulation time; (a) JH and (b) DM

위한 방안으로 ASDSO (2005)에서 제시한 흙댐의 붕괴지속 시간 범위인 $0.5 \leq t_f \leq 3.0$ hr와 기존의 여러 댐 · 저수지 붕괴 사례연구를 통해 제시된 침투 유출량 공식들을 적용하였다. 즉, 두 저수지에 대해 각각 붕괴지속시간(t_f)을 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 그리고 3.0 hr를 DAMBRK 모형에 적용하여 저수지 붕괴 유출수문곡선을 계산하고, 계산된 침투 유출량을 여러 연구자들이 제안한 침투유출량 계산식 (Table 2)과 가장 유사한 결과를 보여주는 지속시간을 각 저수지의 붕괴지속시간으로 선정하였다.

DAMBRK 모형을 이용하여 태풍 루사 당시 두 저수지의 붕괴상황을 재현하기 위해서 다음과 같은 방법론을 적용하였다. 저수지 초기수위가 상시만수위인 조건에서 두 저수지의 배수 구역 유출량(Fig. 3)이 저수지로 유입됨에 따라 저수지의 수위는 상승하고, 상승된 수위가 댐의 정부표고를 월류하면 조사된 저수지의 실제 붕괴형상(Table 1)에 따라 두 저수지가 붕괴되는 조건으로 설정하고 계산을 수행하였다. 이때 저수지의 붕괴

시간은 보고된(Park, 2002; K-water, 2002; KARICO, 2004) 두 저수지의 붕괴시간에 최대한 가깝게 붕괴가 발생하도록 저수지 유입수문곡선의 유입시간을 조정하였다. 저수지 붕괴유출수문곡선 유도를 위해 사용된 댐의 기본제원 및 실측된 붕괴제원은 Table 1에서 보여준다.

Fig. 7(a) and (b)는 각각 앞서 설명한 장현저수지와 동막저수지의 유입수문곡선, 수위-수표면적 관계 그리고 저수지의 기본제원 및 붕괴제원을 이용하여 DAMBRK 모형으로 계산된 저수지 붕괴 지속시간 시나리오(t_f)별 붕괴 유출수문곡선을 보여준다. Table 2는 여러 연구자들이 제안한 침투붕괴 유출량식으로 계산된 침투유출량과 장현 및 동막저수지 붕괴 지속시간 시나리오별 침투유출량의 비교를 보여준다. Fig. 7과 Table 2에서 보여주듯이, 두 저수지 모두 붕괴 지속 시간이 길어질수록 붕괴 침투유출량은 감소하는 경향을 보여준다. 그리고 ASDSO (2005)에서 제안한 최소값인 $t_f = 0.5$ hr에서는 다른 붕괴 지속시간에서보다 침투 붕괴유출

Table 3. Comparison of predicted water height and measurements

Case	Water height (m) at measured point in Fig. 1												RMSE (m)
	No.1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Measured	14.9	14.01	12.57	11.95	11.4	11.46	11.8	10.4	8.31	6.13	5.06	4.6	-
JH	14.56	14.39	13.56	11.85	11.69	11.61	11.21	9.97	7.54	6.35	4.37	4.1	0.52
JH+DM	14.56	14.39	13.60	12.16	12.09	12.05	11.77	10.44	7.85	6.65	4.93	4.5	0.46

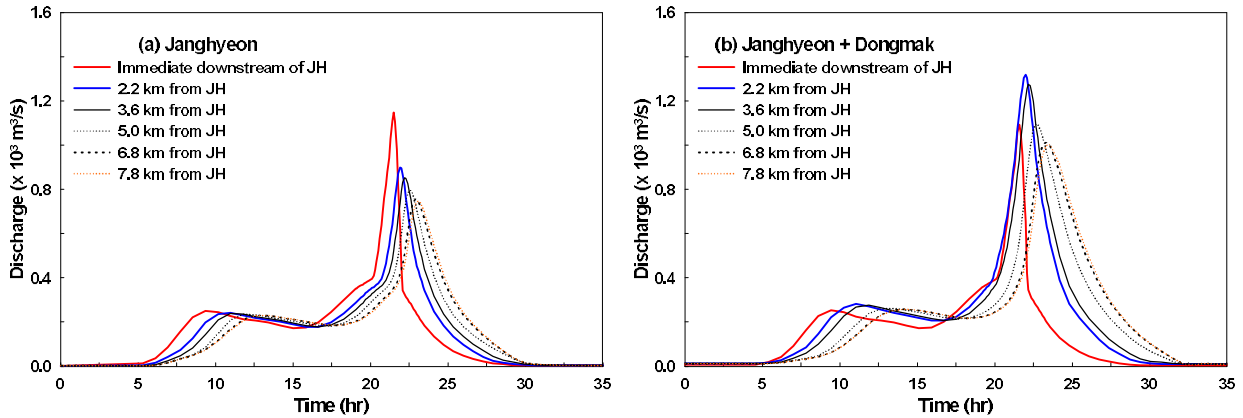


Fig. 8. Discharge along Seomseok Stream; (a) single break of JH, and (b) consecutive break of JH and DM

이 월등하게 크고, $t_f=1.0$ hr 이후에서는 침투 붕괴유량의 감소차이가 점차 줄어드는 경향을 보여준다. 침투 붕괴유량이 장현저수지 경우는 $t_f=2.0$ hr, 동막저수지 경우는 $t_f=0.5$ hr을 적용하여 계산된 값이 여러 연구자들의 침투 붕괴유량식으로 계산된 값과 가장 유사한 결과를 보여준다고 판단되어, 본 연구에서는 $t_f=2.0$ hr(장현)과 $t_f=0.50$ hr(동막)를 각각 두 저수지의 붕괴지속시간으로 결정하고, 이 두 붕괴유출수문곡선을 이용하여 저수지 하류부 홍수 추적을 수행하였다.

4.3 저수지 하류부 홍수추적

댐 붕괴 침투유량에 대해 기존연구와의 비교를 통해 적정성이 검증된 본 연구의 붕괴유량을 이용하여 저수지 하류부 홍수추적을 수행하였다. 본 연구에서는 태풍 루사로 인해 실제 30분 정도의 시간 차이를 두고 연속으로 붕괴된 두 저수지의 붕괴상황을 재현하기 위해 장현 및 동막저수지의 연속붕괴를 고려하여 하류부 홍수추적을 수행하였다. 추가적으로 장현저수지의 단일붕괴 모의를 수행하여 단일붕괴와 연속붕괴에 따른 하류부의 영향을 비교하였고, 동막저수지는 장현저수지에 비해 소규모 저수지이므로 동막저수지의 단일붕괴는 고려하지 않았다. 계산방법으로는 저수지 추적을 실시하고 이 결과를 저수지 하류 하도구간으로 전파시키는 연속계산방법을 채택하였으며, 홍수과가 하류로 전파되는 경우 홍수터

의 흐름 및 저류 효과를 고려하기 위해 넓은 홍수터를 반영할 수 있는 지형단면을 구축하였다.

Fig. 8(a) and (b)는 각각 장현저수지 단일붕괴 그리고 장현과 동막저수지의 연속붕괴로 인한 장현저수지 직하류부를 포함한 섬석천 주요 구간에서의 유량수문곡선을 보여준다. Fig. 8에서 보여주듯이, 섬석천과 금광천 합류점(2.2 km)부터 하구부(7.8 km)까지 장현 및 동막저수지의 연속붕괴로 인한 침투유량은 장현저수지의 단일붕괴로 인한 침투유량보다 약 380-450 m^3/s 증가하였음을 알 수 있다. 이는 동막저수지 붕괴로 인한 유량이 금광천에서 섬석천으로 흘러들어감에 따라 증가한 양이지만, 동막저수지의 침투 붕괴유량(1,040 m^3/s)과는 큰 차이를 보이고 있다. 이러한 차이가 나는 이유로는 장현저수지와 동막저수지가 병렬로 위치하고 있어 섬석천과 금광천의 합류부에서 두 저수지 붕괴 침투유량이 도달하는데 차이가 있을 수 있고, 동막저수지 붕괴유량이 금광천의 홍수터로 전파되어 홍수량의 일부가 저류되는 현상이 발생함에 따라 나타나는 것으로 판단된다.

Fig. 9는 장현저수지 단일붕괴와 장현 및 동막저수지 연속붕괴로 인한 거리에 따른 침투유량 종단형상을 보여준다. Fig. 9에서 보여주듯이, 두 저수지의 연속붕괴의 경우 섬석천과 금광천의 합류점(2 km 인근)부터는 동막저수지 붕괴유량이 유입됨에 따라 유량의 증가가 나타나는 반면, 장현저수지 단일붕괴의 경우는 동막저수지의 붕괴가 발생하지 않았으므로 이

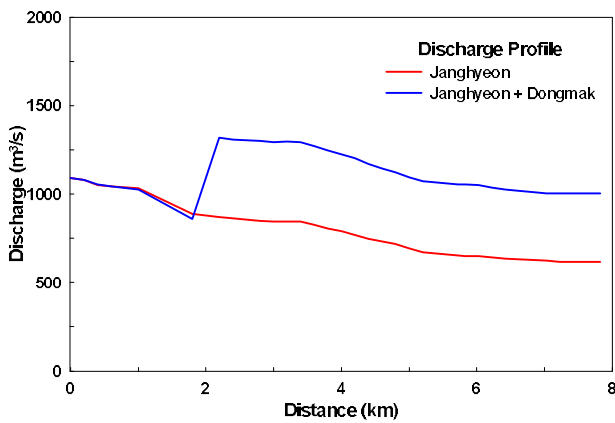


Fig. 9. Peak discharge profile along seomseok stream

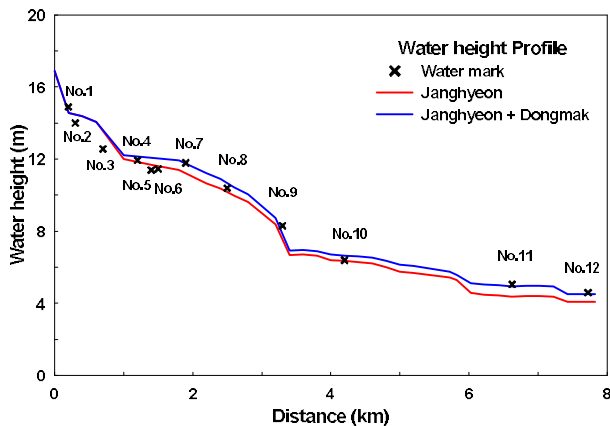


Fig. 10. Maximum water surface elevation

러한 유량증가는 나타나지 않는다. 또한 DAMBRK 모형에 Relaxation 기법을 추가함으로써 두 저수지의 연속붕괴의 경우 섬석천과 금광천의 합류점 인근단면에서는 $-7\text{ m}^3/\text{s}$ (1.0 km 지점)~ $-30\text{ m}^3/\text{s}$ (1.8 km 지점)의 역류 유량도 잘 계산할 수 있었다. 이와 같은 역류현상은 향후 대하천에 적용할 경우 더욱 중요한 변수가 될 것으로 판단된다.

Fig. 10은 장현저수지 단일붕괴와 장현 및 동막저수지 연속붕괴로 인한 거리에 따른 최고수위 종단형상 및 실제 두 저수지 붕괴 후 실측된 홍수흔적 수위와의 비교를 보여준다. 섬석천과 금광천의 합류 전까지는 두 경우 모두 최고수위에는 큰 차이가 없지만, 합류 후에는 장현저수지 단일붕괴의 최고수위는 실측 홍수위와 비교해서 다소 낮게 산정이 되었으며, 그 경향은 하류로 갈수록 점점 커지고 있음을 확인할 수 있다. 반면, 두 저수지의 연속붕괴로 인한 최고수위는 실측수위와 비교적 잘 일치하는 결과를 보여준다.

Table 3은 두 저수지 붕괴로 인한 피해현황 조사 당시 관측한 12개의 지점(Fig. 2)에서의 홍수흔적 자료와 장현저수지

단일붕괴와 장현 및 동막저수지 연속붕괴로 계산된 최고 홍수위와의 비교 및 RMSE (Root Mean Square Error)를 보여준다. 실제로 발생된 두 저수지의 붕괴를 재현한 연속붕괴의 계산수위가 장현저수지 단일붕괴의 계산수위보다 흔적수위와 더 가까운 결과를 보여주고 있다. 즉, 연속붕괴의 경우 계산수위와 홍수 흔적수위와의 RMSE가 46cm인 반면, 장현저수지 단독붕괴의 경우 계산수위와 홍수 흔적수위와의 RMSE는 52cm로 산정되었다. 그리고 섬석천과 금광천 합류전까지는 동일한 수위가 산정된 반면, 동막저수지 붕괴 유량의 고려 유무에 따라 두 하천의 합류후에는 30 cm (No.10)~56 cm (No.11)의 수위차이를 보여준다.

두 저수지 연속붕괴를 고려한 모의의 경우 실측홍수위와의 RMSE는 약 46 cm로 하천단면 및 수치지형도의 오차, 저수지 붕괴형상 및 붕괴 지속시간에 대한 오차, 저수지 유입수문곡선의 오차와 같은 저수지 붕괴모의에서 발생할 수 있는 여러 가지 불확실성에서 발생할 수 있는 오차를 고려하면, 본 연구에서 적용한 DAMBRK 모의결과는 현장에서 광범위하게 수집된 실측자료와 비교적 잘 일치하고 있다고 판단할 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 DAMBRK 모형을 이용하여 태풍 루사시에 붕괴된 장현저수지와 동막저수지의 실제 붕괴 조건과 동일한 상황을 모의하여 댐 지점에서의 붕괴유출수문곡선을 유도하고, 주요지점에서의 침투유량, 최고홍수위를 해석하여 실측 홍수위와의 검증을 실시하였다. 본 연구의 주요 연구결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 1) 2002년 태풍 루사가 동반한 극심한 강우로 인해 붕괴된 장현 및 동막저수지의 붕괴 상황을 DAMBRK 모형을 이용하여 재현하기 위해서 Relaxation 기법을 적용하여 병렬로 위치한 두 저수지의 연속붕괴 모의가 가능하도록 하였다. 그리고 연구유역의 강우량을 고려하여 계산된 저수지 유입량, 수위-수표면적을 포함한 저수지 제원, 현장조사를 통해 측량된 저수지 붕괴제원 및 하류부 하도단면 그리고 수치지형도로부터 추출된 홍수터지형 자료를 이용하였다.
- 2) 저수지 붕괴지속시간에 대한 불확실성을 줄이기 위해 ASDSO (2005)에서 제안한 흙댐 붕괴지속시간을 DAMBRK 모형에 적용하여 계산된 침투유출량과 여러 연구자들이 제안한 공식으로 구한 침투유출량을 비교하여 두 저수지에서 각각 가장 유사한 값을 보여주는 붕괴 지속시간을 선

정하였으며, 그 값은 장현저수지와 동막저수지의 경우 각각 2.0 hr과 0.5 hr로 산정되었다.

- 3) 선정된 붕괴 지속시간으로 계산된 붕괴 유출수문곡선으로 하류부 홍수추적을 수행하였으며, 병렬로 위치한 두 저수지의 붕괴 영향을 조사하기 위해 장현저수지 단일붕괴와 장현 및 동막저수지 연속붕괴를 고려하였다. 연속붕괴의 경우 분류와 지류의 합류부에서 역류현상을 잘 모의하였고, 실측 홍수흔적수위와 약 46 cm 정도의 오차를 보여주었으며, 단일붕괴의 경우는 연속붕괴의 경우보다 약 6 cm 정도 수위를 과소 계산하는 오차를 보여주었다.
- 4) 본 연구에서는 저수지 붕괴해석에서 불확실성이 큰 붕괴 지속시간 선정을 위해 기존의 댐 붕괴사례연구를 통해 제시된 붕괴유출량 계산식을 활용하는 방안을 제안하고, 제안된 방법으로 유도된 유출수문곡선을 이용한 하류부 홍수추적 결과를 실측홍수위와 비교함으로써 제안 방법의 적절성을 검증하였다. 제안된 방법은 국내의 댐(저수지) 붕괴로 인한 EAP 수립시에 검증방법으로 도움이 될 것으로 기대된다. 또한 전 세계적으로 사례가 드문 병렬로 위치한 두 저수지의 실제 붕괴에 대한 단일붕괴와 연속붕괴 모델링을 수행하고 실측홍수위와의 결과 비교를 통해, 본 연구 방법의 타당성을 보여주었다.

감사의 글

이 논문은 2013년도 경북대학교 학술연구비에 의해 연구되었습니다.

References

- Abderrezzak, K.E.K., Paquier, A., and Mignot, E. (2009). "Modelling flash flood propagation in urban areas using a two-dimensional numerical model." *Natural Hazards*, Vol. 50, No. 3, pp. 433-460.
- ASDSO(Association of State Dam Safety Officials). (2005). *Dam Failure Analysis*, National Dam Safety Program, Columbus, Ohio, USA.
- Bosa, S., and Petti, M. (2013). "A numerical model of the wave that overtopped the vajont dam in 1963." *Water Resources Management*, Vol. 27, No. 6, pp. 1763-1779.
- Brufau, P., Garcia-Navarro, P., and Vazquez-Cendon, M.E. (2004). "Zero mass error using unsteady wetting-drying conditions in shallow flows over dry irregular topography." *International Journal of Numerical Methods in Fluids*, Vol. 45, No. 10, pp. 1047-1082.
- Choi, K.H., and Han, K.Y. (2005). "Development of 2-D flood inundation model for dam Failure analysis: II. Applications." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 25, No.2B, pp. 143-149 (in Korean).
- Chun, I.G. (2003). "Reservoir rehabilitation project for flood disaster in Gang-neung region." *Korean National Committee on Irrigation and Drainage*, Vol. 10, No. 2, pp. 123-127 (in Korean).
- Costa, J.E. (1983). "Paleohydraulic reconstruction of flash-flood peaks from boulder deposits in the Colorado Front Range." *The Geological Society of America Bulletin*, Vol. 94, No. 8, pp. 986-1004.
- EXSCIMAP(European Exchange Circle on Flood Mapping). (2007). *Handbook on Good Practices for Flood Mapping in Europe*.
- Froehlich, D.C. (1995). "Peak outflow from breached embankment dam." *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 121, No. 1, pp. 90-97.
- Fread, D.L. (1973). "A technique for implicit flood routing in rivers with major tributaries." *Water Resources Research*, Vol. 9, No. 4, pp. 918-926.
- Fread, D.L. (1985). "Channel Routing." Chapter. 14, *Hydrological Forecasting*, (Editors: Anderson, M.G., and Burt, T.P.), John Wiley & Sons, 1985.
- Fread, D.L. (1988). *The NWS DAMBRK Model: Theoretical Background and User Documentation*, Office of Hydrology, National Weather Service, NOAA, Silver Spring, MD.
- Fread, D.L. and Lewis, J.M. (1998). *NWS FLDWAV Model: Theoretical Description and User Documentation*, Office of Hydrology, National Weather Service, NOAA, Silver Spring, MD.
- Gallegos, H.A., Schubert, J.E., and Sanders, B.F. (2012). "Structural damage prediction in a high-velocity urban dam-break flood: Field-scale assessment of predictive skill." *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol. 138, No. 10, pp. 1249-1262.
- George, D.L. (2011). "Adaptive finite volume methods with well-balanced Riemann solvers for modeling floods in rugged terrain: Application to the Malpasset dam-break flood (France, 1959)." *International Journal of Numerical Methods in Fluids*, Vol. 66, No. 8, pp. 1000-1018.
- Han, K. Y. (2012). *Flood Disaster Mitigation.*, R&D Press, Seoul, South Korea (in Korean).
- Han, K. Y., Kim, K.S., Kim, B.H., and Park, S.D. (2005). "Dam-break analysis from Janghyun and Dongmak reservoir due to typhoon Rusa." *Proceedings of the Korea Water Resources Association Conference 2005*, Korea Water Resources Association, pp. 105-108.
- ICOLD (International Commission on Large Dams). (1988). *Dam Break Flood Analysis-Review and Recommendations*, ICOLD, Bulletin No. 111, Paris, France.
- Jang, S.H., Sung, H.S., and Park, H.S. (2007). "Yoencheon dam failure simulation using the DAMBRK." *Proceedings of the*

- Korea Water Resources Association Conference 2007, Korea Water Resource Association, pp. 1757-1761 (in Korean).*
- Jeon, J.B., Lee, H.J., Kim, J.H., and Lee, S.M. (2009). "The study on development of emergency action system against extreme flood." *Proceedings of the Korea Water Resources Association Conference 2009*, Korea Water Resource Association, pp. 1482-1488.
- Kao, H.M., and Chang, T.J. (2012). "Numerical modeling of dambreak-induced flood and inundation using smoothed particle hydrodynamics." *Journal of Hydrology*, Vol. 448, pp. 232-244.
- KARICO(Korea Agricultural and Rural Infrastructure Corporation). (2004). *Dam safety risk assessment and developing emergency action plan.*, South Korea (in Korean).
- KARICO(Korea Agricultural and Rural Infrastructure Corporation). (2002a). *Rehabilitation Project Report for Flood Disaster in Janghyeon Region.*, South Korea (in Korean).
- KARICO(Korea Agricultural and Rural Infrastructure Corporation). (2002b). *Rehabilitation Project Report for Flood Disaster in Dongmak Region.*, South Korea (in Korean).
- Kim, B.H. (2005). *Flood inundation analysis in Janghyun and Dongmak reservoir due to Typhoon Rusa*, Master's thesis, Kyungpook National University, Daegu, South Korea, pp. 61-63 (in Korean).
- Kim, B., Sanders, B.F., Schubert, J.E., and Famiglietti, J. S. (2014). "Mesh type tradeoffs in 2D hydrodynamic modeling of flooding with a Godunov-based flow solver." *Advances in Water Resources*, Vol. 68, pp. 42-61.
- Kim, B.H., Choi, S.Y., and Han, K.Y. (2011). "An analysis method of 1D hydrodynamic model based on GIS for flood inundation mapping." *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 11, No. 6, pp. 227-235 (in Korean).
- Kim, K.H., Shin, H.S., Jung, S.H., and Kim, J.S. (2012). "Comparative study on flood inundation according to river terrain modification." *Proceedings of the Korea Water Resources Association Conference 2012*, Korea Water Resource Association, pp. 251-255 (in Korean).
- Kim, K.S., Kim, J.S., and Kim, W. (2010). "An analysis method of dam breach modeling." *Water and Future*, Korea Water Resource Association, pp. 44-49 (in Korean).
- Kirkpatrick, G.W. (1977). "Evaluation guidelines for spillway adequacy." *The evaluation of dam safety, Engineering Foundation Conf.*, ASCE, New York, 395-414.
- K-water(Korea Water Resources Corporation). (2002). *2002 National flood investigation report: Typhoon Rusa.*, South Korea (in Korean).
- Lee, J.Y. (2015). *2-D flood inundation analysis resulting from irrigation reservoir failure*, Master's thesis, Kyungpook National University, Daegu, South Korea (in Korean).
- Lewis, J.M., and Fread, D.L. (1996). "An extended relaxation technique for unsteady flows in networks", *North American Water and Environment Congress*, Reston, VA, ASCE.
- Li, S., and Duffy, C.J. (2011). "Fully coupled approach to modeling shallow water flow, sediment transport, and bed evolution in rivers." *Water Resources. Research.*, Vol. 47, pp. 1-20.
- Liang, D., Lin, B., and Falconer, R.A. (2007). "A boundary-fitted numerical model for flood routing with shock-capturing capability." *Journal of Hydrology.*, Vol. 332, No. 3-4, pp. 477-486.
- MacDonald, T.C., and Langridge-Monopolis, J. (1984). "Breaching characteristics of dam failures." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 110, No. 5, pp. 567-586.
- Molinari, P. (1990). "statistical methods for the estimate of the peak discharge following the breach of an earth dam." *International Repost EnEL-CRIS*, Milan, Italy
- NIDP (National Institute for Disaster Prevention). (2002). *The Field Survey Report of Damages Caused by the Typhoon Rusa in 2002.*, Seoul, South Korea (in Korean).
- Park, S.D. (2002). "Flood characteristics and prevention measure due to Typhoon Rusa." *Water and Future*, Korea Water Resource Association, Vol. 35, No. 6, pp. 36-47 (in Korean).
- Pierce, M.W, Thornton, C.I., and Abt, S.R. (2010). "Predicting peak outflow from breached embankment dams". *Journal of Hydrologic Engineering*, ASCE, Vol. 15, No. 5, pp. 338-349.
- USBR(United States Bureau of Reclamation) (1988). "Downstream hazard classification guidelines.", *ACER-Technical Memorandum No. 11*, Denver, Colorado.
- Valiani, A., Caleffi, V., and Zanni, A. (2002). "Case study: Malpasset dam-break simulation using a two-dimensional finite volume method." *Journal of Hydraulic Engineering-ASCE*, Vo. 128, No. 5, pp. 460-472.
- Yoon, T.H., and Kang, S.K. (2004). "Finite volume model for two-dimensional shallow water flows on unstructured grids." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 130, No. 7, pp. 678-688.
- <https://msc.fema.gov>
<http://www.moleg.go.kr/>