농업용 소규모 저수지의 붕괴에 따른 하류부 피해예측 모델링

Modeling Downstream Flood Damage Prediction Followed by Dam-Break of Small Agricultural Reservoir

박종윤* · 조형경* · 정인균* · 정관수** · 이주현*** · 강부식**** · 윤창진***** · 김성준*****†

Park, Jong-Yoon · Joh, Hyung-Kyung · Jung, In-Kyun · Jung, Kwan-Soo ·

Lee, Joo-Heon · Kang, Bu-Sik · Yoon, Chang-Jin · Kim, Seong-Joon

ABSTRACT

This study is to develop a downstream flood damage prediction model for efficient confrontation in case of extreme and flash flood by future probable small agricultural dam break situation. For a Changri reservoir (0.419 million m³) located in Yongin city of Gyeonggi province, a dam break scenario was prepared. With the probable maximum flood (PMF) condition calculated from the probable maximum precipitation (PMP), the flood condition by dam break was generated by using the HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System) model. The flood propagation to the 1.12 km section of Hwagok downstream was simulated using HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center - River Analysis System) model. The flood damaged areas were generated by overtopping from the levees and the boundaries were extracted for flood damage prediction, and the degree of flood damage was evaluated using IDEM (Inundation Damage Estimation Method) by modifying MD-FDA (Multi-Dimensional Flood Damage Analysis) and regression analysis simple method. The result of flood analysis by dam-break was predicted to occurred flood depth of 0.4m in interior floodplain by overtopping under PMF scenario, and maximum flood depth was predicted up to 1.1 m. Moreover, for the downstream of the Changri reservoir, the total amount of the maximum flood damage by dam-break was calculated nearly 1.2 billion won by IDEM.

Keywords: Agricultural reservoir; dam break; flood damage; prediction model; Inundation Damage Estimation Method; HEC-HMS; HEC-RAS

1. 서 론

최근 전세계적으로 지구 온난화 등과 같은 기후변화에 따른 강우의 양이나 패턴의 변화로 인해 이상홍수 피해가 속출하고 있는 실정이며, 우리나라의 경우에도 최근 루사, 매미 등에 의한 대규모 홍수 피해가 빈번히 발생하고 있는 상황이다 (이동률 등, 2004). 이러한 기상이변에 따른 국지성 집중호우와 태풍은 대규모 댐의 설계빈도를 초월하는 폭우를 동반함으로써

댐 제체의 수문학적 안정성을 위협함과 동시에 구조물의 노후화로 인한 구조적 결함이 발생할 경우 댐 붕괴와 같은 예기치 않은 비상상황을 초래할 수 있다.

국내에는 농업용수 공급목적으로 축조된 저수지가 2008년 통계연보기준으로 전국 17,649개가 있으며, 이 중 약 81 %에 해당하는 14,208개의 저수지가 시·군·구 관리 저수지로서 14,154 (99.6 %)개소의 저수지가 30만톤 이하의 중소규모 저수지이다. 또한, 저수지의 축조년도를 보면 시·군·구 관리 저수지의 58 %인 8,352개의 저수지가 1948년 이전에 축조된 저수지로, 축조된 지 60년 이상 된 시설물은 공용내구연한이 경과한 시설로서 노후손상부위를 복구해야 함은 물론 이상기후에 따른 강우사상의 변화로 설계빈도를 달리하여 재해대비 보강이 필요한 시설이다. 따라서 시·군·구 관리 저수지의 안전관리 방안의 마련을 통한 재해대비보강 및 기능강화가 시급한 실정이다. 또한 구조물 노후화로 집중호우 발생시 상대적으로 취약한 중소규모 저수지의 경우, 댐 붕괴에 따른 별도의 피해예측 기법 및 피해규모를 정량화 하는 방안이 체계적으로 구축되지

* 건국대학교 대학원 사회환경시스템공학과
** 충남대학교 토목공학과 교수
*** 중부대학교 토목공학과 부교수
**** 단국대학교 토목환경공학과 부교수
***** 한국농어촌공사 농어촌연구원
***** 건국대학교 사회환경시스템공학과 교수
† Corresponding author Tel.: +82-2-450-3749
Fax: +82-2-444-0186
E-mail: kimsj@konkuk.ac.kr

2010년 9월 6일 투고
2010년 11월 8일 심사완료
2010년 11월 8일 게재확정

않은 관계로 중소규모 저수지에 대한 피해예측모델 개발이 시급히 요구된다.

지금까지의 피해예측모델에 관한 국내외 연구 및 기술동향을 살펴보면, 미국의 경우 댐 붕괴와 관련하여 해석모형 및 분석기법, 홍수위험지도 구축 기술과 관련한 연구 및 실용화 부문에서 가장 선진화되어 있으며, 홍수위험도 평가와 관련하여 현재 모든 댐을 대상으로 Downstream Hazard Classification (DHC)을 설정하고 있으며 가이드라인이 제시되어 있다. 2000년 유럽연합 (EU)과 중국은 협조관계를 통하여 ANFAS (Data Fusion For Flood Analysis And Decision Support) 계획을 수립하고, 최근의 가장 발달된 자료처리 및 관리 기술을 결합하여 홍수 예방 및 보호를 위한 의사결정시스템을 개발하였다. 이 시스템은 홍수재해 발생 시 주민의 대피, 제방의 보완 등, 이에 대한 가장 적절한 조치를 취할 수 있도록 의사결정시스템을 제공하고 있다. 3개 시험 구역 (슬로바키아의 Vah 강 상류, 중국 양쯔강의 Dongtin 호수를 따라 접한 JingJiang 유역에서 시스템을 수립하고, 프랑스의 Loire 계곡 중부에서 검증·보완)을 통하여 적용·검증되었으며, 유럽 공동체와 중국 등의 연구 협조 체계에서 이들은 상호간에 인공위성 기술이나 인터넷 기술, GIS (Geographic Information System) 기술 및 지식기반 시스템, 지반공학 등 다양한 영역의 기술들을 교환할 수 있도록 하였다. 독일에서는 1999년부터 개발을 시작하여 현재까지 시험 적용되고 있는 FLOMASY (FLOOD MAnagement SYstem)을 개발하였다. 이 시스템은 강력한 위험정보 및 관리시스템에 대한 필요에 의하여 홍수방지 센터를 중심으로 홍수 예측과 재해의 관리를 위해 운영되고 있다. FLOMASY는 분포형 정보체계를 기반으로 설계된 컴퓨터로서 각 터미널들이 중앙 데이터베이스에 온라인으로 연결된 유기적 연결체제로 구성되었다. 현재 GIS와의 결합이 진행 중이며, 이를 통한 범람지도 제작이 이루어지고 있다. 일본의 경우 유역에 관한 정보를 신속하고 확실하게 방재관련기관 및 국민들에게 제공하는 것을 목적으로 1985년에 중앙정부와 지방단체의 협력을 통해 하천정보센터 (Foundation of River & Basin Integrated Communications, FRICS)를 설립하고, 각종 수문관측정보의 수집 및 제공은 물론 재해에 관한 최첨단 기술을 활용하여 과거-현재-미래의 정보를 종합적으로 제공하고 있다. 반면, 국내에서는 최근 기상이변과 수리구조물의 노후에 따른 댐 붕괴, 홍수피해 등에 관한 우려가 높아지면서 홍수예보, 재해대비체계에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히, 2003년과 2004년 농업기반공사 (현 한국농어촌공사)에서는 농업용 저수지에 대한 EAP (Emergency Action Plan) 수립 요령을 작성하고 홍수지도의 작성방안뿐만 아니라 재해위험도를 고려한 기존저수지의 보강방안을 제시하였다. 소방방재청에서는 2004년 비상대처계획 수립지침 작성방안 연구를 통

해 이에 포함될 기본요소 등을 제시한 바 있다. 또한 최근에는 컴퓨터 모형을 활용한 댐 붕괴 모의 및 하류부 홍수범람 모의 등의 연구가 활발히 진행되고 있다. 이홍래 등 (1998)은 댐 붕괴에 따른 홍수류의 해석시 불확실도를 규명하기 위해 DAMBRK (A Dam-Break Flood Forecasting Model) 모형을 Monte-Carlo 기법을 이용하여 수정, 보완함으로써 댐 및 하천제방에 대한 붕괴 위험도를 산정할 수 있는 DAMBRK-U 모형을 개발하였으며, 김원 등 (2001)은 댐 붕괴시 발생하는 천이류 해석을 위해 수치기법인 음해적 ENO (Essentially Non-Oscillatory) 기법을 이용하여 균일 및 비균일 하도에서 발생하는 댐 붕괴류 해석을 실시한 바 있다. 이종석 (2002)은 댐의 안전성 평가를 위한 위험도 해석기법의 적용을 위해 DMABRK모형을 이용하여 미국 Arizona주 중서부에 위치한 Alamo 댐의 안정성 평가를 실시하고 각 댐의 붕괴 위험성과 하류부의 피해를 예측하였다. 최규현과 한건연 (2005a, 2005b)은 댐 붕괴로 인한 범람 홍수파전달특성해석, 침수범위 및 침수위의 추정, 예상 피해 규모 등을 보다 정교하게 예측할 수 있는 2차원 홍수범람해석 수치모형을 개발하고 그 적용성을 평가하였다. 홍승진 등 (2009)은 소양강댐을 대상으로 HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System)와 HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center - River Analysis System) 모형을 이용하여 두 모형간의 댐 붕괴 홍수량을 비교 분석하여, 동일 붕괴 조건하에서 HEC-HMS 모형으로 부터의 침투유출량이 HEC-RAS 모형보다 크게 산정된다고 밝힌바 있다. 한편, 홍수피해산정과 관련하여 최현상 등 (2005)과 이준우 등 (2006)이 다차원법을 이용한 홍수피해산정을 통해 행정구역별 평균 피해액이 아닌 침수 발생지역에 대한 홍수피해액을 산정하였다. 하지만 국내의 경우 홍수피해액 산정을 위한 주거, 농업, 산업시설의 통계자료와 정밀한 토지이용도, 홍수지도 등의 자료구축이 미비할 뿐만 아니라 피해예측을 위한 절차 및 분석방법 등에 관한 연구가 더욱 필요한 실정이다.

이에 본 연구에서는 이상홍수와 급속한 도시화로 인하여 설계 및 축조 당시의 수문, 기상환경이 변화함에 따라 해마다 증가하는 저수지관련 홍수피해에 효율적으로 대처하기 위하여 국내 30만 m^3 미만의 농업용 소규모 저수지를 대상으로 댐 붕괴에 의한 저수지 하류의 피해규모 및 피해양상을 정량화 할 수 있는 피해예측 모델링기법을 제시하고자 한다. 이를 위해 HEC-HMS, HEC-RAS 모형을 이용한 댐 붕괴 모의, 댐 하류부 홍수해석을 실시하였으며, 홍수피해액 산정을 위한 침수피해추정곡선법 (Inundation Damage Estimation Method, IDEM)의 적용을 통해 기존의 홍수피해액 산정방법을 단순화 시켰으며, 소규모 저수지 하류하천 위험기준을 수립 할 수 있는 홍수 피해예측기법의 적용성을 검토하였다.

Fig. 1 Study area: Location of the Wanjang-Cheon Watershed (a), HEC-HMS stream network and subbasins (b), and the Changri reservoir (c)

II. 재료 및 방법

1. 대상지역 및 자료구축

본 연구에서는 경기도 용인시 처인구, 완장천유역내 창리저수지를 대상지역으로 선정하였다 (Fig. 1). 완장천은 진위천의 제1지류이고 창리저수지를 포함하는 제3지류인 화곡천이 흘러 들어가는 하천으로써 유로연장 8.86 km, 유역면적은 19.36 km²이다. 위치상 동경 127° 09' 11"~127° 12' 06", 북위 37° 06' 32"~37° 10' 58" 사이에 위치하고, 행정구역상으로는 용인시 남사면 완장리, 창리, 아곡리, 방아리 등에 해당되어 1개 시 1개면 4개리에 걸쳐 유역이 형성되어 있다. 1971년 준공된 창리저수지는 하류부에 농업용수를 공급하고 있으며, 저수지 상류부 구간은 취락부, 농경부, 산지가 혼재하는 전원하천구간으로 이루어져 있으며, 저수지 제원은 다음 Table 1과 같다.

홍수량 산정을 위해 용인, 진위 강우관측소에 대한 확률강우량을 「진위천수계 하천기본계획 (2006)」 보고서의 결과를 이용하였으며, 저수지저수량을 통해 댐 붕괴모의를 위한 댐 마루

높이, 바닥 높이 등의 초기입력자료를 구축하였다. 하류부 홍수 해석을 위해 댐 직하류의 화곡천 (1.12 km)구간에 대하여 50 m 간격의 하천단면자료를 구축하였으며, 홍수범람도 작성과 홍수피해액 산정을 위한 GIS자료는 환경부의 1:25,000 중분류 토지이용도와 1:5,000 수치지형도, 행정구역도 등의 지형자료를 이용하였다.

2. 댐 붕괴 모의

댐 붕괴 발생원인은 크게 자연적 원인과 인위적 원인으로 구분 할 수 있는데, 본 연구에서는 설계 및 시공 상의 오류, 유지관리 오류, 지진발생과 같은 원인을 배제하고 창리저수지에 대하여 월류 (Overtopping)와 파이프 (Piping)에 의해 붕괴되는 극한홍수조건에 대한 댐 붕괴 시나리오를 작성하였다.

홍수량 산정 및 댐 붕괴 모의는 미 공병단에서 개발한 강우-유출 모형인 HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center-Hydrologic Modeling System) 모형을 이용하여 창리저수지 유입지점과 출구점, 화곡천과 완장천 합류점에 대한 빈도별 홍수량 및 가능최대홍수량 (Probable Maximum Flood, PMF)을 산정하였다. 댐 붕괴 모의는 HEC-HMS 모형의 Dam Break 모듈을 이용하여, 창리저수지 유입, 출구점에서의 댐 붕괴 홍수량을 산정하였다.

먼저, 확률강우량 및 가능최대강수량 (Probable Maximum Precipitation, PMP) 산정은 년 최대치 자료를 수집하고 기본적인 통계치를 산정하여 분포형에 대한 매개변수 (모수)추정을 실시한 후, 매개변수 적합성 검토를 실시하여 최종적인 확률분포형을 결정하였다. 이때, 매개변수의 추정은 강우 관측년수가 짧아 자료수가 충분하지 못한 관계로 자료수나 이상치에 왜곡 특성이 크게 나타나지 않는 확률가중모멘트법을 이용하였다. 또

Table 1 Dimension of the Changri reservoir

Characteristic		Value
Dam	Type	core zone
	Height (m)	10.0
	Length (m)	159.0
	Upper slope	1 : 2
Reservoir	Bottom slope	1 : 2.5
	Watershed area (km ²)	3.47
	Storage area (km ²)	0.84
	Total Storage (1000 m ³)	41.9

Table 2 Evaluation Result of Time of Concentration for Each Subbasin in the Wangjang-Cheon Watershed

Subbasin	Area (km ²)	Length (km)	Inlet Time (min)	Travel Time (min)					Time of Concentration (min)
				Kirpich	Kerby	Kraven	Rziha	Adopted	
Basin 1	3.89	3.02	10	14.7	54.1	43.2	5.1	14.7	24.4
Basin 2	3.08	2.87	"	11.9	41.8	34.8	3.8	11.9	21.9
Basin 3	1.56	8.45	"	12.9	44.7	33.6	4.3	12.9	22.9
Basin 4	1.55	1.83	"	12.3	37.1	19.8	4.3	12.3	22.3
Basin 5	3.26	2.89	"	15.3	54.1	37.2	5.5	15.3	25.3
Basin 6	2.32	3.12	"	19.4	65.1	31.8	7.8	19.4	29.4
Basin 7	1.89	1.94	"	12.3	38.2	22.2	4.2	12.3	22.3
Basin 8	2.70	2.89	"	18.9	61.5	28.2	7.7	18.9	28.9

한 본 연구에서는 용인, 진위 강우관측소에 대한 확률강우량을 Huff 방법으로 시간분포 시켰으며, 수원관측소의 무차원 누가 확률 곡선을 이용하여 다항회귀분석을 실시한 결과 13 hr 이상에서는 2분위가 지배적인 것으로 나타나 중호우 기준으로 최빈구간인 2분위를 적용하였다. PMP의 추정은 수문기상학적 방법을 이용하여, 실제 호우 전이방법과 가능최대강수량도 이용법(PMP도 이용법)을 각각 적용하여 큰 값을 가지는 PMP도 이용법을 사용함으로써 완장천유역의 유역면적 19.4 km²에 대한 PMP를 추정하였다.

빈도별 홍수량 및 가능최대홍수량 (Probable Maximum Flood, PMF)은 HEC-HMS 모형을 이용하여, 완장천 유역의 창리저수지 유입지점과 출구점, 화곡천과 완장천 합류점에 대해 산정하였다. 본 연구에서 유효홍량 산정을 위해 SCS 유출곡선지수법(USDA-SCS, 1970)을 이용하였으며, 미계측유역임을 고려하여 직접유출량 산정을 위한 합성단위도 작성은 Clark 단위도법(1945)을 적용하여 직접유출량을 산정하였다. HEC-HMS 모형의 합성단위유량도 방법에는 Clark, SCS, Snyder 단위도법이 있으나 본 연구에서 채택한 Clark 단위도법이 단위도의 특성에 대한 제어가 가장 우수한 것으로 알려져 있어 국내에서 가장 널리 사용되고 있다. 홍수량 산정을 위한 HEC-HMS 모형의 주요 매개변수로는 집중시간, 지체시간 및 유역 저류상수 등이 있다. 이들 매개변수 결정에 따라 홍수량 계산의 신뢰도가 결정되는데, 본 연구에서의 소유역별 집중시간은 자연하천 유역에 대해 국내에서 널리 사용되고 있는 Kraven, Kirpich, Kerby, Rizha 공식을 적용하여 비교 검토한 후 Table 2와 같이 각 소유역별 홍수도달시간(집중시간)을 산정하였다. 또한 Clark 유역 홍수추적방법에서의 유역저류상수는 Clark, Linsley, Sabol, Russel 공식을 각각 적용하여 비교 검토한 후 유역별 상황에 맞게 적용하였다.

HEC-HMS 모형의 댐 붕괴 모의를 위한 모듈은 저수지추적 모듈의 부모 모듈(sub module)로 구성되어 있으며 수문학적 홍수추적 개념에 이론적 근간을 두고 있으므로 수리학적인 방법

Table 3 Parameters for dam-break simulation

Parameter	Length of bottom section (m)	Duration of breach time (hrs)	Breach side slope (h:v)	Adopted
MacDonald and Langridge-Monopolis	15.87	0.31	0.5	●
Froehlich	Overtopping : 23.02 Piping : 16.44	0.42	Overtopping : 1.4 Piping : 0.9	
Von Thun and Gillette	23.6	0.35	0.5	

에 의한 댐 붕괴 모의와 달리 많은 가정과 제약조건을 갖고 있다. HEC-HMS에서 지원하는 댐 붕괴 모의 방법으로는 월류 붕괴(Overtop Breach)와 파이프 붕괴(Piping Breach)가 있으며, Overtop Breach의 경우 댐의 방류량이 일정 수위가 넘어갔을 때 붕괴가 일어나는 현상을 모의한 것이고, Piping Breach는 댐의 사면에 균열이 발생하여 그 균열로 인한 댐 붕괴 현상을 모의한 것이다. 한편, 댐 붕괴 모의를 위한 매개변수(Dam Breach Parameter)의 결정은 붕괴 지속시간, 폭, 사면경사 등과 같은 댐의 구조적 매개변수를 결정하는 것으로서 대부분 과거의 관측자료를 통한 경험공식에 의존하고 있다. 이에 본 연구에서는 기존에 제시된 여러 가지의 댐 붕괴 매개변수 산정 공식 중에서 산정결과가 지나치게 크거나 작지 않은 MacDonald and Langridge-Monopolis (1984), Froehlich (1995), Von Thun and Gillette (1990) 공식을 적용하였다. 최종 산정된 매개변수는 MacDonald and Langridge-Monopolis 공식에 의해 창리저수지에 대한 댐 붕괴 시간은 공식별로 약 30~40분, 붕괴단면의 하부폭은 20 m 내외로 계산되었다(Table 3).

3. 홍수해석

댐 붕괴 홍수파 모형의 선택은 댐과 하류부의 특성, 댐 붕괴 해석의 정도 등 이용목적에 따라 그 분석 방법이 다를 수 있

다. 즉 본 연구에서와 같이 소규모 저수지에 대한 개략적인 평가를 위해 단순화된 방법을 활용하기 위해서는 입력 매개변수에 제약을 받게 된다. HEC-RAS 모형은 1964년 미육군공병단에 의해 개발된 하천 해석 시스템인 HEC-2 모형에서 사용자 편리성, 기능성 등의 GUI (Graphical User Interface)로 구축된 Window Version이다. HEC-RAS 모형은 홍수시 여수로를 통한 방류나 댐 붕괴 모의시 홍수추적은 물론 하천형상에 대한 결과물의 3차원 도지도 가능하며, 상류 및 하류 모의가 가능하고, 교량, 수문, 압거 등에 대한 부정류 및 부정류 해석도 가능하다. 또한 HEC-RAS의 후처리 모듈인 HEC-GeoRAS를 이용하여 현황측량 자료 없이도 수치지도와 같은 지형자료를 통해 하류부 하도단면 추출 등의 지형자료 구축이 용이하여 개략적이고 효율적인 평가가 가능하다. HEC-RAS 모형의 부정류 기본 방정식은 HEC에서 개발한 UNET모형으로 1차원 부정류 해석이 가능하며, 지배방정식은 Saint-Venant 미분방정식이며, 수치해석기법으로는 가중 4점 음해법을 사용한다.

본 연구에서 댐 붕괴에 따른 하류부 홍수해석은 창리저수지 직하류 하천인 화곡천 1.12 km 구간에 대하여 HEC-RAS 모형의 저류지 기능을 적용하여 댐 붕괴 시, 저지대 침수해석을 모의하였다. 여기서 저지대는 침수예상지역으로서 모형에 Storage로 입력되며 부정류해석에 따른 제방월류시 제내지의 침수예상 지역내 수위-내용적 곡선으로부터 월류된 유량에 대한 침수위를 산정하고, 모형의 해석결과를 GIS 기법과 연계하여 침수예상지역의 범람도 작성이 가능하다.

흐름에 대한 하도의 저항의 정도를 표시하는 조도계수는 하천의 여러 가지 수리계산을 시행할 경우 가장 중요하고 기본적인

인 인자의 하나이다. 일반적으로 하천수위 계산에는 Manning의 조도계수가 가장 많이 사용되고 있다. 그러나 조도계수를 정확하게 결정하는 것은 현실적으로 매우 어려운 문제이므로 세심한 주의가 필요하다 (정중호와 윤용남, 2005). 따라서 본 연구에서는 관측자료 확보의 어려움으로 인해 도표에 의한 방법으로 조도계수를 산정하였다. 이때 하천의 상태는 현지조사에 의한 현장사진자료를 이용하며, 적용한 하도구간별 조도계수는 하천설계기준 (한국수자원학회, 2000)에서 제시하고 있는 값을 적용하였다.

4. 홍수피해 모델 개발

피해예측모델 개발은 댐의 부분적 혹은 전체적인 파괴, 그리고 월류 등으로 인하여 하류부에서 발생하는 피해를 산정하고, 잠재적인 피해액을 예측할 수 있는 모델을 개발함으로써 인명과 재산피해를 추정하는 기법을 제시하는데 목적이 있다. 이러한 피해예측모델의 수립으로, 잠재적인 위험구역을 정량적으로 등급화함으로써 홍수에 대한 취약지구를 확인하고 사전에 수리시설물의 홍수대비능력을 강화할 수 있는 계기를 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

홍수피해액 산정에 대한 연구는 1970년대부터 치수경제성 분석의 필요성이 대두되면서 시작되었다. 홍수피해액을 산정하는 방법은 간편법 (건설교통부, 1993), 개선법 (건설교통부, 2001), 다차원법 (건설교통부, 2004) 순으로 발전되어 왔다. 기존의 방법들은 인력이 많이 필요하고, 조사된 피해규모가 실제 피해규모보다 매우 작게 추정되며, 지역적으로 평균값을 사용하므로

Table 4 Comparison of the methods for flood damage evaluation

Evaluation method		Regression Analysis	MD-FDA	IDEM
Life damage	Life	No. of life loss by flood (person/ha) × loss unit (won/person) × flood area (ha)	No. of life loss by flood (person/ha) × loss unit (won/person) × flood area (ha)	No. of life loss by flood (person/ha) × loss unit (won/person) × flood area (ha)
	Victims	No. of victims by flood (person/ha) × Evacuation period (day) × Daily average income per capita (won/person-day) × Flood area (ha)	No. of victims by flood (person/ha) × Evacuation period (day) × Daily average income per capita (won/person-day) × Flood area (ha)	No. of victims by flood (person/ha) × Evacuation period (day) × Daily average income per capita (won/person-day) × Flood area (ha)
Property damage	Building	Flood area-Damage equation	Building area × Damage rate × Construction unit price	Building property in flood area (won) × Building flood damage by flood depth
	Contents of building	Do not reflect	No. of households × Damage rate × Household item unit price	Property of building contents in flood area (won) × Flood damage rate of building contents
	Agricultural land	Flood area-Damage equation	Flood area of agricultural land × Loss unit price (buried or lost)	Damage by buried and lost in flood area (won) × Damage rate of crop by flood depth
	Crop	Agricultural area of maximum flood in history × Crop yield per unit area (10a) × Damage rate × Crop unit price	Crop yield × Damage rate × Crop unit price	Property of crop in flood area (won) × Damage rate of crop by flood depth
Public facilities damage		Flood area-Damage equation	Amount of property damage × Certain Rate	Amount of property damage × Certain Rate
Benefit		Flood area-Damage equation	Do not reflect	Do not reflect

낮은 정확도 등의 문제점을 안고 있었다. 특히, 간편법은 계산 과정이 간단하여 기본적인 통계자료만으로 피해액 산정이 가능하나, 용도별 자산가치 및 산산의 공간적 변화를 반영하기 어렵고 90년대에 개발되어 현 시점에서 적용에 한계가 있다. 또한 다차원법은 GIS와 연계한 침수면적과 침수구역내 자산의 공간적 변화를 고려할 수 있는 장점을 가지고 있으나 요구되는 자료가 많고 소규모 지역에 적용하기에 무리가 있다. Table 4는 기존의 홍수피해산정기법과 침수피해추정곡선법을 비교한 것으로 본 연구에서는 기존 방법들의 문제점을 일부 개선하여 홍수의 규모 (심각성)와 지역적 특성을 고려하여 홍수피해산정 방법으로 개발된 다차원법 (MD-FDA, Multi-Dimensional Flood Damage Analysis)과 기존 회귀분석법 (간편법)의 장점을 살린 침수피해추정곡선법을 적용하고자 한다. 본 침수피해추정곡선법의 특징은 계산과정이 간단하여 기본적인 통계자료만으로 피해액 산정이 가능하며, 통계적 수치를 이용하여 자산가치와 GIS를 연계하는 기존의 방식에 비해 침수면적과 자산의 공간적인 분포, 지역적 특수성을 고려하기 때문에 침수구역내 자산의 공간적 변화를 고려할 수 있다. 또한 침수심-피해액 관계 곡선의 적용을 통하여 저수지 하류부의 예상 피해액 산정에 효율적인 기법이라 할 수 있다.

홍수피해액 산정을 위해, HEC-RAS의 댐 붕괴에 따른 하류부 홍수범람구역에 해당하는 각 행정구역의 자산 DB를 구축하는데 다차원법에서 산정하는 직접피해액 항목은 인명 피해액, 건물 피해액, 건물 내용물 피해액, 농경지 피해액, 농작물 피해액, 사업소 유형·재고자산 피해액, 공공시설 피해액의 7가지로 분류된다 (건설교통부, 2004). 여기서 인명 피해액과 공공시설 피해액을 제외한 5가지 항목은 통계적인 평가액을 지표로 활용하여 산정하였다. 또한 자산가치, 침수면적, 침수심 등을 공간적으로 적용하기 위하여 창리저수지 홍수피해지역의 행정구역도, 환경부 중분류 토지이용도, 1:5,000 수치지형도를 구축하였다.

III. 결과 및 고찰

1. HEC-HMS를 이용한 댐 붕괴 모의

댐 붕괴 해석을 위해 완장천유역의 유역면적 19.4 km²에 대한 가능최대강수량 (PMP)을 산정한 후 강우량-지속시간별로그래프를 선형화하여 Table 5와 같이 PMP를 산정하였다. 또한 PMP 적용에 따른 HEC-HMS 모형을 이용한 완장천유역의 PMF를 산정하였는데, 창리저수지 (Resv.), 화곡천과 완장천 합류점 (Junction) 및 완장천 출구점 (Outlet)의 PMF는 창리저수지의 저수지 추적결과 월류현상이 발생하기 때문에 댐 붕괴

모의에 의한 결과를 반영하였다.

Table 6은 HEC-HMS 모형을 이용한 창리저수지의 댐 붕괴 모의결과로서, 댐 붕괴를 위한 초기입력자료로 댐 마루 높이 55 EL.m, 댐 바닥 높이 48 EL.m에 대하여 현장조사를 통해 파악된 평시 관리수위 53.6 EL.m를 초기수위로 적용하였다. 파이프 위치의 높이는 여수로와 본댐이 연결되어 있는 관리수위와 동일하게 적용하였다. 또한 댐 붕괴 시작 수위는 54.8 EL.m로 설정하였으며, time step은 10분 간격으로 모의 하였다. 이는 소규모 저수지 특성상 댐 붕괴 모의시 small time step을 적용해야 하기 때문에 침투유출량의 변화를 좀 더 면밀히 관찰하기 위해서이다. 창리저수지의 빈도별 홍수량 및 PMF 적용에 따른 창리저수지의 유·출입점의 홍수량 산정결과를 살펴보면, 창리저수지의 월류에 의한 댐 붕괴 모의결과 200년 빈도 미만의 홍수량에서는 월류가 발생하지 않는 것으로 나타났으며 200년 빈도 홍수량 및 PMF의 경우에 지속시간별로 월류현상이 나타나는 것으로 분석되었다. 따라서 200년빈도 홍수량과 PMF로 인한 댐 붕괴 모의를 수행하였는데 200년 빈도 홍수의 경우에는 지속시간이 6 hr일 때, 침투홍수량이 262.2 m³/sec로 댐 붕괴가 발생하는 것으로 분석되었으며, PMF의 경우에는 3 hr~24 hr일 때 월류에 의한 댐 붕괴가 일어나는 것으로 나타났다. PMF의 경우에도 지속시간 6 hr에서 침투홍수량이 417.7

Table 5 The results of PMP and PMF evaluation for Wanjangcheon watershed

Rainfall duration	1hr	2hr	4hr	6hr	8hr	12hr	18hr	24hr	48hr	72hr
19.4 km ² (mm)	71.0	143.0	216.0	302.0	344.0	430.0	579.0	648.0	693.0	750.0
PMP (mm)	73.0	135.0	233.0	309.0	368.0	457.0	543.0	600.0	712.0	759.0
PMF (cms)	Junction	79.2	172.2	448.2	520.8	465.1	426.2	-	375.5	-
	Resv.	6.7	43.3	296.8	414.7	288.2	278.3	-	267.1	-
	Outlet	77.5	169.1	409.3	528.1	510.2	474.6	-	406.8	-

Table 6 The results of HEC-HMS dam-break simulation for Changri reservoir

Rainfall duration			Peak flow (cms)					
			1hr	2hr	3hr	6hr	12hr	24hr
Overtopping	200yr	Inlet	32.3	47.8	51.3	48.7	39.1	31.3
		Outlet	9.3	30.0	39.3	262.2	38.7	31.2
	PMF	Inlet	29.0	62.8	95.8	104.2	83.8	68.7
		Outlet	6.7	43.3	296.8	414.7	278.3	267.1
Piping	200yr	Inlet	32.3	47.8	51.3	48.7	39.1	31.3
		Outlet	223.5	245.0	249.0	240.1	228.2	219.8
	PMF	Inlet	29.0	62.8	95.8	104.2	83.8	68.7
		Outlet	220.2	238.7	263.1	255.5	235.6	223.1

Fig. 2 Hydrograph of flood wave by dam-break

m^3/sec 의 최대규모의 홍수파가 하류로 방류되는 것으로 나타났다. 파이프에 의한 댐 붕괴 모의는 200년 빈도 홍수량과 PMF에 대하여 수행하였으며 모의 결과, 220.2 m^3/sec ~263.1 m^3/sec 의 첨두홍수량이 발생하는 것으로 분석되었다. Fig. 2는 창리저수지 출구점에서의 PMF시 월류에 의한 댐 붕괴에 따른 지속시간별 홍수파 수문곡선을 나타낸 것이다.

2. HEC-RAS를 이용한 하류부 홍수해석

댐 붕괴 시나리오에 따른 창리저수지 하류부 홍수범람모의를 위해 HEC-RAS 모형을 이용하여 부정류해석을 실시하였다. 분석 대상구간에서 부정류 해석을 위한 경계조건을 나타낸 것으로서, 상류단 경계조건으로 PMF overtoping 6 hr의 댐 붕괴 홍수파 수문곡선을 적용하였으며 하류단 경계조건으로 평균하상경사를 고려한 등류수심 (Normal Depth)을 적용하였다. 내부경계조건으로는 하도와 측방구조물 (Lateral Structure)이 연결된 각각의 저류지 표고별 내용적을 경계조건으로 설정하였다 (Fig. 3).

댐 붕괴에 따른 홍수해석결과 분석을 위해 화곡천 구간에 대

Fig. 3 Extraction of storage area in lowland areas using GIS

해 50 m 간격의 대표단면을 총 25개 지점에 대해 선정하였다. 대표단면은 창리저수지 댐 직하류에서 화곡천 중점인 완정천 합류부까지의 총 1,115 m 구간이며 (Fig. 4), 각각의 대표단면에

Fig. 4 The representative stream cross section for flood routing

서의 최대홍수량, 최고홍수위, 홍수파 도달시간, 최고홍수위 도달시간 및 홍수파 배수시간을 분석하였다 (Table 7). 그 결과, 붕괴 시점에서 화곡천 말단 완장천 합류점까지 홍수파 도달시간은 약 8분 정도로 평균 유속은 2.3 m/sec로 분석되었으며, 최초 홍수파 도달 후 약 10분 후, 최고 수위에 도달하는 것으로 분석되었다. Fig. 5는 부정류 해석에 따른 하곡천 구간의 최고 홍수위 분석결과로서 홍수피해지역을 분석한 결과, 댐 직 하류부에서 월곡교 (측점번호: 11.46)까지 좌안쪽으로 제방월류에 의한 침수피해가 발생하였는데 이는 표고분석결과 우안의 표고가 상대적으로 높으며, 좌안 제내지의 토지이용이 대부분 경사지가 없는 완만한 평지이기 때문인 것으로 분석되었다. 이지역의 침수면적은 약 2.1 ha이며, 침수심은 1 m 이내인 것으로 나타났다. 또한 화곡천-완장천 합류점으로부터 상류쪽 측점번호 7번까지 약 350 m 구간에서 제방월류에 의한 침수피해가 발생하였다. 이 구간의 침수피해는 상류에서부터 내려온 댐 붕괴 홍수파가 완장천을 만나면서 배수지연 또는 Backwater 발생과 제

Table 7 The results of flood analysis for dam-break simulation by PMF overtopping

Stream	Station	Distance (m)	Peak flow (m ³ /s)	Maximum water stage (EL.m)	flood-wave travel time (hr:min)	Travel time at max. water stage (hr:min)	Drain time (hr:min)
H w a g o k C h e o n	Junction	0	235.01	40.04	00:08	00:19	02:50
		1	204.05	40.43	00:07	00:19	02:45
		2	179.87	40.52	00:07	00:18	02:45
		3	148.37	40.57	00:06	00:18	02:40
		4	133.26	40.68	00:06	00:17	02:40
		5	142.91	40.92	00:06	00:17	02:35
		6	156.15	41.48	00:05	00:16	02:30
		7	192.62	41.86	00:05	00:16	02:25
		8	231.83	41.99	00:05	00:16	02:25
		9	233.76	42.35	00:04	00:15	02:20
		10	240.16	43.08	00:04	00:15	02:15
		11	260.67	44.07	00:03	00:14	02:15
	Bridge	11.46	261.44	44.38	00:03	00:14	02:10
		12	259.69	44.43	00:03	00:14	02:10
		13	232.43	45.06	00:02	00:13	02:05
		14	200.81	45.27	00:02	00:13	02:00
		15	191.51	45.48	00:02	00:13	01:50
		16	206.72	45.74	00:01	00:12	01:50
		17	230.39	46.34	00:01	00:12	01:45
		18	268.00	46.70	00:01	00:12	01:40
		19	255.13	47.59	00:00	00:11	01:40
		20	276.44	48.36	00:00	00:11	01:30
		21	296.25	49.16	00:00	00:11	01:20
		22	297.93	52.48	00:00	00:10	01:10
Spillway	22.15	1115	298.70	54.55	00:00	00:10	01:10

Fig. 5 Max water stage for each station by dam-break

방월류에 의한 것으로 해석될 수 있다. 이 지역의 침수면적은 약 14.3 ha이며, 침수심은 0.5~1.0 m 사이인 것으로 나타났다.

3. 홍수피해액 산정

침수피해추정곡선법 (IDEM)을 이용하여 창리저수지 하류부 홍수범람도 작성에 따른 댐 하류부의 총 홍수피해액은 인명피해액과 일반자산피해액, 공공시설물 피해액의 합으로 산정하였다 (Table 8). 먼저, 인명피해액은 다차원법의 손실원단위 (원/명)는 1998년 불변금액으로 사망자 2억 5천만 원, 부상자 2천만 원을 적용하는데 이는 본 연구의 시점과 많은 차이를 보임에 따라 간편법에 쓰이는 단위피해액 (최근의 1인당 국민소득 $\times$ 기대 잔여수명)으로 수정하여 산정하였다. 그 결과 최대 침수심 발생시 약 12,941천원의 인명피해액이 발생하는 것으로 분석되었다. 일반자산피해액은 침수구역내 건물자산가치 및 건물내용물 자산가치를 함께 고려한 침수심별 건물자산피해액과 농작물 피해액과 농경지 피해액의 합으로 계산된 농업자산 피해액을 합하여 산정한 것으로, 최대 침수심 발생시 약 411,107천원의 피해액이 발생하였다. 마지막으로 본 연구에서 모의된 침수구역도 내에는 하천과 소하천만이 존재하기 때문에 하천에 대한 피해율 0.87, 소하천에 대한 피해율 0.58을 적용하여서 공공시설물 피해액을 산정하였다.

창리저수지 댐 붕괴에 따른 하류부 홍수피해액은 최대 1.1 m 침수심을 보이며 총 1,020,153천원의 피해액이 예상되었으며, 침수심이 0.5 m를 넘으면 농경지의 침수면적이 급격히 커지기 때문에 피해액 또한 침수면적에 비례해서 커지는 것으로 나타났다. 또한 침수심이 1.0 m 넘을 경우에만 농경지 피해액을 산정하기 때문에 1.0 m의 침수심 이상에서도 홍수피해액의 증가가 두드러지게 나타났다. Fig. 6은 창리저수지 붕괴시 예상되는 침수심-피해액 곡선으로 홍수피해액의 증가가 커지는 지점을 파악하여 피해를 최소화 시킬 수 있는 연구 및 저수지 제방의 위험도 분석에도 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

Table 8 The evaluation of damage classified with flood depth (Unit: 1,000won)

Flood depth (m)	Life	Private	Public	Total amount
0.1	211	256	372	839
0.2	402	458	664	1,524
0.3	602	672	975	2,249
0.4	827	910	1,319	3,056
0.5	1,859	142,832	207,107	351,798
0.6	8,576	167,748	243,234	419,558
0.7	12,342	174,656	253,250	440,248
0.8	12,469	174,780	253,431	440,680
0.9	12,591	174,897	253,601	441,090
1.0	12,651	410,527	595,264	1,018,442
1.1	12,941	411,107	596,105	1,020,153

Fig. 6 Flood depth-damage curve

IV. 결 론

국내 소규모 저수지의 안전관리대책이 시급한 가운데 본 연구에서는 소규모 저수지에 대한 보다 효율적이고 단순화된 방법으로 저수지의 댐 붕괴에 따른 홍수피해액 산정을 위한 침수피해추정곡선법 (IDEM)의 적용에 따른 피해예측 모델링을 실시하였다. 그 결과, 완장천유역내 창리저수지 (41.9 m³)에 대한 수문분석 및 댐 붕괴 모의, 홍수범람 모의에 따른 하류부의 홍수피해는 PMF조건하에 월류에 의한 댐 붕괴로 인하여 0.4 m의 침수심에서 제내지의 침수피해가 발생하였으며, 최대 1.1 m의 침수가 발생하는 것으로 분석되었다. 최대 피해규모는 약 1,300만원의 인명피해, 41,000만원의 일반자산피해, 60,000만원의 공공시설물피해가 발생하여 총 10.2억원의 피해액이 발생할 것으로 분석되었다.

본 연구에서 적용한 홍수피해액 산정을 위한 침수피해추정곡선법은 기존의 홍수피해액 산정방법의 장점을 살려 농업용 저수지 하류부의 피해액산정이 가능하도록 피해액 산정 절차가 간단하기 때문에 관리기관의 비전문가들 또한 적용 및 갱신,

수정이 가능할 것으로 예상되며, 향후 여러 형태의 소규모 저수지에 대한 적용성을 검토하고 신뢰성 있는 최신의 자산DB와 다양한 댐 붕괴 시나리오에 따른 침수상황을 고려한다면 보다 객관적이고 신뢰성 있는 홍수피해액 산정이 가능할 것으로 기대된다.

또한, 앞서 언급한 우리나라 지자체관리 소규모 저수지의 현황을 통해 알 수 있듯이 약 8,352개의 저수지가 축조된 지 60년 이상 된 시설물로 구조적, 지반공학적, 수문학적 안전진단 등의 재해대비 보강이 필요한 실정으로 100만 m^3 급의 대규모 저수지에 치중되어 왔던 피해예측모델을 소규모 저수지에 적용함으로써 관리자들로 하여금 저수지의 보강 및 보수를 위한 우선순위 결정 및 기타 의사결정과 예상 피해액 산정에 따른 비상대처계획수립(EAP)에 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

이 연구는 소방방재청 자연재해저감기술개발사업 [NEMA-09-NH-05] 연구비 지원으로 한국농어촌공사와 공동으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

REFERENCES

- Choi, H. S., J. H. Koo, and J. W. Lee, 2005. A Study of Web-GIS System Development for Supporting the Multi-dimensional Flood Damage Analysis (MD-FDA). *Korean Society of Civil Engineers, 2005 KSCE Annual Conference*, pp.2629-2635 (in Korean).
- Choi, K. H., and K. Y. Han, 2005a. Development of 2-D Flood Inundation Model for Dam Failure Analysis: 1. Theory and Model Verification. *Korean Society of Civil Engineers* 25(2B): 135-142 (in Korean).
- Choi, K. H., and K. Y. Han, 2005b. Development of 2-D Flood Inundation Model for Dam Failure Analysis: 2. Applications. *Korean Society of Civil Engineers* 25 (2B): 143-149 (in Korean).
- Clark, C. O., 1945. Storage and Unit Hydrograph. *Transactions of the American Society of Civil Engineers* 110: 1419-1446.
- Froehlich, D. C., 1995. Embankment Dam Breach Parameters Revisited. *Proceedings of the 1995 ASCE Conference on Water Resources Engineering*, San Antonio, Texas, pp.887-891.
- Hong, S. J., S. J. Kim, H. S. Kim, and M. S. Kyung, 2009. Dam Break Analysis with HEC-HMS and HEC-RAS. *Korean Society of Civil Engineers* 29(4B): 347-356 (in Korean).
- Jung, J. H., and Y. N. Yoon, 2005. *Water Resources Practical Design*. Goomibook, Seoul.
- Kim, W., K. Y. Han, and S. H. Kim, 2001. Numerical analysis of dam-Break flow by the implicit ENO scheme. *Korean Society of Civil Engineers* (21)4: 417-426 (in Korean).
- Korea Water Resources Association, 2000. River design criteria.
- Lee, D. Y., W. T. Kim, and C. S. Yoo, 2004. Climate Change Impacts on Meteorological Drought and Flood. *Journal of Korea Water Resources Association* 37(4): 315-328 (in Korean).
- Lee, H. R., K. Y. Han, and W. C. Cho, 1998. Uncertatiny analysis for dam-break floodwave simulation. *Journal of Korea Water Resources Association* 31(3): 337-345 (in Korean).
- Lee, J. S., 2002. Application of risk analysis for dam safety assessment. *Journal of Korea Water Resources Association* 35(6): 651-664 (in Korean).
- Lee, J. W., J. H. Koo, and H. S. Choi, 2006. The application of the Multi-Dimensional Flood Damage Analysis (MD-FDA) in Gyeongang-cheon Watershed. *Korea Spatial Information System Society, 2006 KSISS proceeding*, pp.21-26 (in Korean).
- McDonald, T. C., and J. Langridge-Monopolis, 1984. Breaching characteristics of dam failures. *ASCE Journal of Hydraulic Engineering* 110(5): 567-586.
- Ministry of Construction and Transportation, 1993. River facility criteria.
- Ministry of Construction and Transportation, 2001. A study on implementation of economic analysis for the flood control project.
- Ministry of Construction and Transportation, 2004. A study on methodology of economic analysis for the flood control project.
- Ministry of Construction and Transportation, 2006. The Jinwie river basic plan.
- USDA Soil Conservation Service, 1972. National Engineering Handbook. Section 4 Hydrology (Chapters 4-10).

20. Von Thun, J. L., and D. R. Gillette, 1990. Guidance on Breach Parameters. unpublished internal document, U. S. Bureau of Reclamation, Denver, Colorado, March 13, 1990, 17 p.