하천 제방붕괴로 인한 침수재해 위험도 산정기법 개발

Development of Technique to Estimate Inundation Hazard Level Caused by River Levee Failure

박재홍*

Park, Jae Hong

Abstract

The inundation prediction of protected area due to river levee failure should be carried out simultaneously by unsteady analysis of the time-varying aspects of the flow in the river and the process of the collapse of the levees and inland flooding. However, previous studies associated with levee failure cannot exactly explain actual non-linearity of levee failure, because of using multi-purpose commercial model with assuming instantaneous or linear levee collapse. In this study, the modelling of the process of levee failure by river flow is tried, introducing soil mechanical theory based on levee stability theory. Through the introduction of the levee failure analysis module, inundation analysis, the river flows and levee failure model are organically combined to comprehensive levee failure analysis model. The developed model is applied to Gamcheon and the results shows that in case of river flood, this model simulate reasonably inundation depth on the inland area, 2 dimensional floodwave propagation, breach flow velocity etc. according to aspect of development of breach width. If the accuracy and applicability of this model is improved by the more application to practical cases, the model is expected to effectively analyze levee collapsed flooding and establish action plan against inland inundation.

Keyword : levee failure, inland inundation, hazard level map. 2-Di flood analysis.

요 지

제방붕괴로 인한 제내지의 침수 예측은 하천의 흐름, 제방의 붕괴과정 및 제내지의 침수양상을 시간에 따라 변화하는 비정상 해석에 의해 동시에 수행되어야 한다. 그러나 제방붕괴와 관련된 기존의 연구는 범용화된 프로그램을 이용하여 제방 붕괴 해석과정을 시나리오에 의한 선형적 붕괴나 순간적 완전 붕괴로 가정하여 실제 제방붕괴의 비선형성을 제대로 구현할 수가 없었다. 본 연구에서는 이를 지양하고 제방의 토질역학적 이론을 도입하여 제방 안정이론에 기반한 하천 흐름에 의한 제방붕괴과정을 물리학적으로 모형화하고자 하였다. 이러한 제방붕괴 해석모델의 도입을 통해 하천흐름과 제방붕괴 그리고 제내지의 침수해석이 유기적으로 계산될 수 있는 종합적 제방붕괴 제내지 침수해석 모형으로 구축되도록 하였다. 개발된 모형을 감천 유역에 적용한 결과 하천 부정류 홍수흐름의 경우 제방 붕괴폭의 발달정도에 따라 제내지에서의 침수위, 2 차원 홍수와 전파 양상 및 속도 등이 합리적으로 모의되고 있었다. 본 모형을 보다 실제 제방붕괴 사례의 다양한 적용을 통해 정확성과 실용성이 검증되어진다면 제방붕괴로 인한 제내지 침수해석에 크게 이용될 수 있을 것으로 예상되었고 하천 붕괴 침수예상 및 대처방안 수립에 활용 가능할 것으로 판단되었다.

핵심용어 : 제방붕괴, 제내지 침수해석, 침수위험도, 2차원 홍수해석

1. 서 론

이상기후에 의한 극대 홍수로 수많은 인명과 재산피해가 발생하고 있다. 홍수 발생빈도가 증가하고 홍수 규모가 증대하는 등 강우 패턴이 과거와 달라지고, 극한 호우의 발생 가능성이 증가함으로써 홍수 시 피해의 규모도 증가하고 있다. 특히 경제발전과 인구증가에 따라 하천변에 많은 사람들이

주거하게 되었으며 기상이변에 따른 태풍 등의 대규모 호우로 인해 댐 및 제방 붕괴와 같은 재해는 하천변 유역의 침수로 인해 심각한 인명 및 재산 피해를 야기하게 되었다.

집중호우로 인한 제방붕괴로 발생하는 침수피해는 1990년 9월에는 일산제 제방붕괴로 인한 일산지역의 대침수 피해를 비롯하여 1991년 8월에는 태풍 클레디스에 의한 부산 수영강 상류부의 제방유류에 따른 저지대 침수로 인한 큰 피해가

*교신저자. 정회원. 세명대학교 공과대학 토목공학과 교수(Tel: +82-43-649-1332, Fax: +82-43-649-1778, E-mail: jhpark@semyung.ac.kr)
Corresponding Author. Member. Professor, Department of Civil Engineering, Semyung University

있었다. 1992년 9월 방조제 붕괴로 인한 목포시의 침수피해와 1995년 태풍 제니스와 집중호우로 인해서 금강, 남한강, 북한강, 삽교천, 내성천 등 전국에 걸친 하천유역에서 범람침수 피해가 있었다. 2002년 태풍 루사에 의한 강릉시 등의 막대한 침수피해가 발생하였고 2003년 매미에 의해 마산, 부산, 대구 등에서 하천내 구조물의 증가로 인해 유수 소통장애, 급경사와 사행하천으로 기성제 붕괴 및 수충부 제방 유실 등으로 큰 피해를 입은 바 있으며 2006년 태풍 에위니아 및 빌리스에 의해 집중호우로 인해 남한강 유역 홍수범람 침수피해가 가중되었고 산간계곡에는 산사태에 의한 토석류가 발생하여 유출된 토석류가 하천을 매우고 수목 등이 교량에 걸리면서 하천범람 및 제방붕괴로 이어져 하천변 주택, 농경지, 도로 유실 등의 피해가 발생하였다. 이와 같이 집중호우로 인한 하천의 제방붕괴 및 월류, 통수능의 부족 등으로 인해 범람이 발생할 경우 인명 손실 및 피해 저감을 위해서 하천의 흐름 해석 및 제내지의 침수의 양상을 먼저 파악하고 그로 인한 피해대책을 수립할 수 있어야 한다. 즉, 시간에 따른 침수위의 변화, 침수면적의 확장 및 감소, 홍수파의 전달속도 등의 정확한 예측을 통해 사전대책 수립 및 피해 예측, 피해복구 방안 강구 등이 이루어 질 수 있도록 하여야 한다. 본 연구에서는 제방붕괴로 인한 제내지의 침수가 발생할 경우 제내지의 침수위 및 침수범위, 홍수파의 전달속도 등을 산정하고 이러한 정보를 종합하여 제방 붕괴로 인한 침수에 대한 종합적 위험도를 수치화하여 나타내고자 하였다.

제방붕괴 및 월류에 따른 홍수해석 연구는 홍수파 해석을 통한 침수해석이 Strelkoff 등(1977), Fread(1985), Hromadka와 DeVries(1985)에 의해 이루어져 왔으며 제방붕괴 및 유출에 관한 연구는 Cristofano(1965)와 Harris와 Wagner(1967)에 의해 이루어졌다. 최근들어 확률적 개념에 의한 제방 시스템의 안전도를 평가 하기 위해 월류, 파이프, 사면안정 등을 고려한 모형을 Steenbergen 등(2004)에 의해 개발되었다. 국내의 제방붕괴에 관한 연구는 한건연 등(2006)에 의해 제방월류 붕괴로 인한 제내지의 침수 예측모형을 개발하였고, 윤광석과 김규호(2006)은 수공학적 측면에서 하천제방의 안

정성을 조사하였으며 박재홍 등(2011)에 의해 수치모형을 이용하여 하천제방의 설계인자 들을 수치모형을 이용하여 검토하였다. 이러한 연구들은 대부분 제방붕괴를 연구내용의 과제로 포함하였지만 단순붕괴로 고려하여 제방에 따른 붕괴폭의 발달과정을 해석과정에 포함되지 못하였고 그에 따른 붕괴 월류량은 해석적 근거가 미미하였다. 박 등에 의한 연구는 제방붕괴의 물리적 과정을 해석하였지만 본격적 2차원 제내지 침수해석은 이루어지지 못하였다. 본 연구에서는 제방의 기초공학적인 안정성에 기반하여 세굴양상에 따른 붕괴폭을 예측하고 붕괴폭에 따른 붕괴 홍수량을 산정하여 2차원 제내지의 침수를 예측하고자 하였다. 또한 산정된 제내지의 침수심을 이용하여 제내지의 홍수위험도를 계산하고 산정하며 이를 침수위험도에 나타내고자 하였다. 개발된 침수 위험도는 다양한 강우조건에 따라 하류부 제방의 붕괴가 발생할 경우 제내지의 침수에 따른 위험도를 나타낼 수 있어 범람 재해가 발생할 경우, 대피의 우선순위 부여, 대피로 설정 및 범람으로 인한 재해위험도를 설정할 수 있고 지금까지 일률적으로 정해지던 재해보험의 보험요율을 위험도에 따라 개별 산정할 수 있는 기초자료로 이용될 수 있을 것으로 판단된다.

2. 제방붕괴해석 모형의 개발

2.1 서론

제방붕괴로 인한 제내지의 침수 예측은 그림 1과 같이 하천의 흐름, 제방의 붕괴과정 및 제내지의 2차원 침수양상을 시간에 따라 변화하는 비정상 해석에 의해 동시에 수행되어야 한다. 그러나 제방붕괴와 관련된 기존의 연구는 범용화된 프로그램을 이용하여 제방 붕괴 해석과정을 시나리오에 의한 선형적 붕괴나 순간적 완전 붕괴로 가정하고 모의하여 실제 제방붕괴의 비선형성을 제대로 구현할 수가 없었다(Fread, 1982). 본 연구에서는 이를 지양하고 제방의 토질역학적 이론을 도입하여 제방 안정이론에 기반한 하천 흐름에 의한 제방 붕괴과정을 물리학적으로 모형화하고자 하였다. 이러한 제방 붕괴 해석모듈의 도입을 통해 하천흐름과 제방붕괴 그리고

Fig. 1. Conceptual Diagram of Levee Failure Analysis

제내지의 침수 해석이 유기적으로 계산될 수 있는 종합적 제방붕괴 제내지 침수해석 모형으로 구축되도록 하였다.

2.2 모형의 개발

본 연구는 홍수시 하천에서의 하도윙류나 파이핑 현상으로 인해 제방이 붕괴될 경우 수치모형을 이용하여 토질역학적 과정에 기반한 제방붕괴 메카니즘을 해석하고 그 결과 발생하는 제방붕괴 홍수로 인한 제내지의 범람현상을 모의하고자 하였다. 본 모의모형의 개발을 위해 제내지 침수모형, 하천흐름 해석 및 제방붕괴 해석과정이 유기적으로 연구모형에 결합되었다.

토사로 이루어진 하천 제방의 윙류나 파이핑 현상으로 인한 붕괴를 모의할 수 있는 NWS 의 BREACH 모형(Fread, 1988)을 도입하였다. 이 모형은 댐의 붕괴를 해석하기 위해 개발되었으나 하천 수위를 제방붕괴단면의 상류단 수위로 이용할 수 있도록 윈시 코드를 수정하여 하천 제방의 붕괴에 이용할 수 있도록 개선하였다.

제방의 붕괴해석 과정은 먼저 윙류 붕괴가 모의된다면 작은 사각형태의 초기 세굴수로가 제방 하류 사면을 따라 존재하는 것으로 가정한다. 세굴수로로 흐르는 유량은 식 (1)과 같은 넓은 마루 웨어 공식에 의해 결정되었다.

$$Q_b = 3B_o(H-H_c)^{1.5} \quad (1)$$

여기서 Q_b 는 세굴수로로 통하여 흐르는 유량, B_o 는 초기 사각형 수로의 순간 폭, H 는 H_c 를 저면으로 붕괴면의 안정 수면높이, 그리고 H_c 는 붕괴면 저면의 높이이다.

만약 파이핑으로 인한 붕괴면이 모의된다면 붕괴관내의 유량은 오리피스 유량식에 의해 계산될 수 있으며 식 (2)와 같다.

$$Q_b = A \left(\frac{2g(H-H_p)}{1+fL/D} \right)^{0.5} \quad (2)$$

여기서 Q_b 는 붕괴관을 통한 유량(m^3/sec), g 는 중력가속상수, A 는 붕괴관의 단면적(m^2), $(H-H_p)$ 는 붕괴관 위의 정수압 수두(m), L 은 붕괴관의 길이(m), D 는 붕괴관의 직경 혹은 폭(m)이고 f 는 다음의 Moody곡선의 수학적 표현식(Morris와 Wiggert, 1972)으로부터 계산된 마찰계수이다.

초기에 가정된 초기 세굴수로가 윙류나 파이핑에 의해 세굴되면서 폭과 높이가 점차 발달되어진다. 이때 점차 확대되는 세굴수로(breach channel)의 폭은 BREACH 모형에서는 두 가지 메카니즘에 의해 결정된다. 먼저 초기의 붕괴면은 그림 2에서 보여지는 것처럼 사각형 형상을 가진다. 세굴수로의 폭(B_o)는 식 (3)에 의해 결정되어진다.

$$B_o = B_r y \quad (3)$$

여기서, B_r 는 수리학적 최랑단면에 기초한 인자이고 y 는 붕괴면의 흐름깊이이다. 파이핑 붕괴에서는 B_r 이 1.0으로 설정되는 것에 반해 윙류붕괴시 B_r 값은 2.0이다.

붕괴면의 폭을 제어하는 두 번째 역학적 과정은 사다리꼴 단면의 측면경사의 안정성해석으로부터 유도되어진다(Spangler, 1984). 초기 사각형태의 수로는 세굴수로 수로의 측면들의 활동이 시작되면서 수직면에 대한 경사각(α)을 형성하고 사다리꼴 수로로 변화한다. 측면들의 붕괴는 붕괴단면의 깊이(H_c)가 댐 재료의 내부마찰각(ϕ), 점착력(C), 제방재료의 단위중량(γ)의 함수인 한계수심(H_k)에 도달할 때 일어난다.

$$H_k' = \frac{4C(\cos\phi \sin\theta_{k-1}')}{\gamma[1 - \cos(\theta_{k-1}' - \phi)]} \quad (k = 1, 2, 3) \quad (4)$$

여기서, θ_k 는 수평면과 붕괴수로가 이루는 각, $\theta_k' = (\theta_{k-1}' + \phi)/2$, 첨자 k 는 계속해서 연쇄되는 붕괴를 나타낸다.

침식은 파제단면의 바닥과 측면에서 동일하게 발생한다고 가정한다. 그러므로 파제순간에는 파제면의 바닥은 측면을 따라 붕괴된 토사의 체적이 수로의 유사이송 능력의 비율로 완전하게 제거될 때까지 하부방향으로의 침식은 계속되지 않는 것으로 역시 가정된다.

파제단면의 침식율은 침식되는 토사를 유송하는 제방붕괴부의 윙류 유량에 달려 있다. 파제면의 유사침식량을 산정하기 위해 Meyer-Peter와 Muller 유사이동식을 급경사 하천에 대해 개선한 식 (5)를 이용한다(Smart, 1984).

$$Q_s = 3.64(D_{90}/D_{30})^{0.2} P \frac{D^{2/3}}{n} S^{1.1} (DS - \Omega) \quad (5)$$

여기서, Q_s 는 유사이동율(cms), D_{30} , D_{50} , $D_{90}(mm)$ 은 각각 총 무게 30, 50, 90%의 크기에 해당하는 입자의 크기, D 는

Fig. 2. Plain View of Breach Section

유량의 수리수심(m), S 는 댐의 하류경사면의 경사, Ω 는 토사의 점착력에 따라 결정되는 전단응력 값이다.

일단 파제단면이 생성되면 단면을 통한 유출되는 파제유량은 단면의 상류단에 해당되는 하천에서의 수위에 의해 결정된다. 홍수시 하천에서의 흐름은 대표적인 부정류이므로 홍수 하천수위를 산정하기 위해 가장 범용적인 부정류 해석 모형으로 이용되는 FLDWAV 모형을 도입하였다.

FLDWAV 모형의 하천수위 해석을 위한 기본식은 1차원 부정류 방정식인 Saint-Venant 방정식이다. 모형에서 이용된 방정식들은 질량보존식과 운동량보존식으로 구성되어 있으며 식 (6), (7)과 같다(Fread, 1985).

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial(A+A_o)}{\partial t} - q = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial\left(\frac{Q^2}{A}\right)}{\partial x} + gA\left(\frac{\partial h}{\partial x} + S_f + S_e\right) + L + W_f B = 0 \quad (7)$$

여기서, Q 는 유량, A 는 흐름단면적, A_o 는 저류단면적, q 는 측방유입량, x 는 거리, t 는 시간, h 는 수위, S_f 는 마찰경사, S_e 는 단면 확대·축소에 의한 손실경사, B 는 하폭, n 는 조도 계수, W_f 는 바람에 의한 응력, L 는 지류에 의한 운동량의 변화를 각각 나타낸다.

비선형 쌍곡선형 편미분방정식인 Saint-Venant 방정식을 비선형 대수방정식의 형태로 변환하기 위해 가중 4점 음해 유한차분 근사해법을 도입하면 Eq. (1), (2)는 시간대 $(j+1)$ 에서 (i) 및 $(i+1)$ 점에 대한 미지수 h , Q 의 비선형 방정식이 된다. 시간대 (j) 와 관련된 모든 항들은 초기조건에 의하거나 바로 이전 시간단계로부터 구해진 기지의 값이 되며 시간대 $(j+1)$ 에서는 (i) 및 $(i+1)$ 점에서 h , Q 가 4개의 미지수로 존재하여 두 개의 식만으로는 직접적으로 그 해를 구할 수 없는 두 개의 비선형 대수방정식이 된다.

이렇게 구해진 대수방정식을 상류 및 하류경계간의 $(N-1)\Delta x$ 개의 구간 각각에 대하여 적용하고 상류단 경계조건과 하류단 경계조건식을 도입하면 $2N$ 개의 미지수를 가진 $2N$ 개의 비선형식이 만들어 질 수 있으며 Newton-Raphson 방법에 의하여 그 해가 구해질 수 있다.

하천제방의 월류 및 붕괴로 인해 파제단면에서 유출로 기인된 홍수파가 제내지로 전달되는 경우에 홍수터의 저류, 홍수의 감쇠, 건물주위에서의 흐름, 가로에서의 흐름 등에 따라 그 물리적인 양상은 매우 복잡하게 된다. 홍수터 침수해석을 위해 동수역학 방정식에 기초한 2차원 홍수파 해석은 수치해석상의 어려움으로 인해 홍수터 지형조건을 고려하면 적용이 어렵게 된다. 이를 고려하여 본 연구에서는 2차원 확산과 해석기법에 기초한 DHM(Diffusion Hydrodynamic Model)모형을 이용하였다.

DHM 모형은 제방의 월류 및 붕괴에 따른 홍수파가 제내지로 전파되는 경우에 관성력의 항이 압력, 마찰력, 중력의 항과 비교하여 그 중요도가 작게 나타나게 되는 물리적인 특성을 고려하여 2차원 천수방정식(two-dimensional shallow water equation)을 기본식으로 하여 이를 확산형 방정식으로

Fig. 3. Schematic Diagram of This Study Model

근사화시킨다.

2차원 확산형 모형의 일반식은 식 (8)과 같다(Hromadka와 Yen, 1987).

$$\frac{\partial}{\partial x} F_x \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} F_y \frac{\partial h}{\partial y} = \frac{\partial h}{\partial t} \quad (8)$$

여기서,

$$F = \frac{\Phi H^{5/3}}{n} \left[\frac{\partial h}{\partial s} + M_s \right]^{-1/2} \quad (i = x, y) \quad (9)$$

H 는 수심, h 는 수위, 첨자 s 는 x 방향에 대해 $\theta = \tan^{-1}(q_x/q_y)$ 를 이루는 흐름방향을 나타낸다.

확산형 방정식을 해석하기 위하여 DHM 모형에서는 양해석법의 중앙차분법을 변형한 격자망 계산방법 (nodal domain integration method)을 사용한다. 적용대상 지역을 직사각형 격자로 분할 구분하고, 각 격자에 대한 표고, 조도계수, 위치 등을 분포시킨다. 흐름해석은 유량을 계산하기 위하여 흐름의 수심치를 해석하여 격자 시스템 내에서 추적될 수 있다.

그림 3과 같이 하천흐름 모형 FLDWAV, 제방붕괴 해석모형 BREACH, 제내지 침수모의 모형 DHM 을 이용하여 새롭게 구성된 제방해석 모형은 종래의 원시 코드를 새롭게 구성하여 완전 연계하였으며 하나의 실행파일을 생성하여 하천수위, 제방붕괴 과정, 제내지 침수 진행 양상 등이 시간별로 일관성 있게 나타날 수 있도록 구성되었다.

3. 유역에 대한 모형의 적용

3.1 가상하도에 대한 개발모형의 적용

본 모형의 제내지 침수모의 적용성을 검토하기 위해 가상 제내지를 가진 하천에 대해 모의를 수행하였다. 수행된 하천의 제원은 하천길이 64 Km, 최대하폭이 304 m인 삼각형 단면으로 구성되었으며 제방붕괴 유형은 월류붕괴로 수행되었다. 제내지의 구성은 533×1067 m로 이루어진 2차원 공간으로 붕괴지점은 상류로부터 32 Km 떨어진 지점에서 붕괴되어 제내지로 붕괴유량이 유입되는 것으로 가정하였다.

유입수문곡선은 그림 4와 같이 최대유량이 141.6 cms이고 하류경계조건은 등류조건을 적용하였다. 계산결과는 그림 5~8과 같다.

그림 5에서 보이는 바와 같이 제방붕괴는 27.4 시간에 발생하여 27.5 시간에 붕괴면을 통한 월류 유량이 급격하게 증가하였고 이로 인해 제내지의 침수가 발생하였다. 계산시간 45 시간에 이르러 하천 본류의 수위강하로 인해 제내지로 붕괴유량의 유입이 중지되었다. 제방붕괴 결과를 계산시간 30 시간에 대해 수면형상, 등수심도, 유속벡터도를 통하여 나타

Fig. 4. Inflow and Outflow Hydrograph in Hypothetical River

Fig. 5. Flowrate at just Up, Downstream of Breach and Breach Flow

내었으며 그림 6~8과 같다.

그림 5는 제방 붕괴지점의 직상·하류단면인 단면 5와 6 그리고 파제단면을 통한 제내지로 유입되는 붕괴유량을 나타낸 것이다. 단면 6에서는 붕괴유량으로 인해 유량이 붕괴가 발생하면서 유량이 급격하게 감소하였으며 그에 따라 제내지 침수유량은 급격하게 증가하고 있는 양상을 나타내고 있다.

그림 6과 그림 7은 계산시간 30 시간에서 제내지의 침수위와 등수심선을 나타내었다. 그림에서 보여지는 바와 같이 붕괴부와 가까울수록 침수위가 크고 멀어질수록 알아지는 모습이 시각적으로 잘 나타나고 있었다. 그림 8은 계산시간 30 시간에서 붕괴유량으로 인해 제내지로 유입되는 유량의 유속을 벡터로 나타낸 것으로 제내지에서 붕괴부와 가까운 지역에서 유속이 크게 나타나며 붕괴부와 멀어질수록 유속이 감소하고 있는 모습을 보여주고 있다.

그림들에서 보이는 바와 같이 본 모형의 해석 결과는 하천 제방붕괴로 인해 발생하는 하천의 흐름의 수심 저하, 제방의 붕괴 양상, 제내지에서의 침수위, 선단 홍수파의 속도 등을 합리적으로 나타낼 수 있다고 판단되었고 실제 제방붕괴 모의에 효과적으로 적용될 수 있다고 판단되었다.

하천 제방붕괴로 인한 침수재해 위험도 산정기법 개발

Fig. 6. Water Surface Shape at Computation Time $t=30$ hr

Fig. 7. Topographic Contour Line at Computation Time $t=30$ hr

Fig. 8. Velocity Vector at Computation time $t=30$ hr.

3.2 실제하천에 대한 적용

연구모형을 실제 유역에 적용하기 위해 그림 9와 같이 김천시 개령면 감천에 대해 하도망을 구성하고 2002년 8월 30일~9월 1일 기간동안 태풍 루사로 인한 제방 붕괴상황에 대해 적용하였다. 계산구간은 그림 10에서 보는 바와 같이 상류단 감천국가하천 시점부터 하류단 선산수위표의 35.63 km 구간으로 전체 단면의 개수는 80개 이다. 이 구간에서 주요 지류로는 직지사천이며 감천 합류부 상단 4.3 km 지점이다. 또한 강곡천·대방천 유역, 아천 유역, 울곡천 유역, 대천 유역의 유량을 측방유입량으로 계산하였다.

Fig. 9. Gamcheon Basin Applied This Model, in Gimcheon City

Fig. 10. River Network for Numerical Analysis of Actual Levee Failure in Gamcheon

Fig. 11. Upstream Boundary Condition at Gamcheon and Jikisa cheon

Fig. 12. Downstream Boundary Condition (Sunsan Water Mark)

감천과 직지사천의 상류단 유입유량은 그림 11과 같고, 하류단 경계조건으로는 선산수위표의 실측 수위를 사용하였으며 그림 12에 도시하였다. 그림 13은 측방유입량을 나타내고 있다.

제방붕괴 모형을 이용하여 감천에 적용한 결과 제방 붕괴면을 통해 유출되는 유량은 그림 14와 같다. 그림에서 보여지는 바와 같이 짧은 시간에 최대 붕괴유량에 이르는 것으로 나타나 기존의 모형에서 붕괴면의 선형적 가정이나 순간 붕괴 등은 타당치 않은 것으로 판단되었다. 그림 15~21은 제방붕괴로 인한 제내지에서의 침수심, 홍수접근유속을 계산 44 시간, 48 시간, 51 시간에서 나타낸 것이다. 그림에서 보이

듯이 제내지 저지대에서 침수심이 크게 나타나며 이 지역이 상대적으로 제내지 범람에 위험한 지역으로 나타날 수 있었고 홍수유량으로 인한 유속은 제방 붕괴부에서 크게 나타났으며 제방 붕괴부에서 과다한 유속으로 인한 피해가 예상되었다.

그림들에서 나타난 바와 같이 본 연구에서 개발된 모형은 실제 하천인 감천의 적용에서도 제방붕괴 상황을 잘 모의하고 있었으며 특히 제방붕괴 상황 고려시 기존의 모형은 붕괴 발달과정을 순간 혹은 선형붕괴와 같은 시나리오를 입력하여야 하였으나 본 모형은 제방의 기하학적 특성과 물리적 특성 자료를 이용하여 예측 가능하였다. 붕괴폭의 발달양상의 비선

Fig. 13. Lateral Inflow in Gamcheon

Fig. 14. Breach Outflow

Fig. 15. Inundation Depth at Computation time t=44 hr

형성과 하천흐름의 1 차원적 해석특성은 박 등(2011)의 결과에서 자세히 설명되어 있다. 모형의 결과의 일부로써 제시된 제방붕괴 발달과 더불어 붕괴유량으로 인해 2 차원 제내지의 침수양상도 잘 모의되고 있었으며 시간별 침수위의 증가, 침수면적의 확대, 홍수파의 전달 등과 같은 결과를 가시적으로 나타낼 수 있었다.

하천 제방붕괴로 인한 침수재해 위험도 산정기법 개발

Fig. 16. Inundation Depth at Computation time t=48 hr

Fig. 17. Inundation Depth at Computation time t=51 hr

3.3 침수위험도

소방방재청의 출범과 더불어 댐·저수지 붕괴와 같은 대형 재해에 대비하여 풍수해 비상대처 계획(Emergency Action Plan, EAP)의 일부로써 우리나라에서도 홍수재해 지도를 작성토록 하고 있다. 홍수재해지도는 댐·저수지 붕괴와 같은 재해 발생 시 침수예상지역, 대피로 등의 침수정보와 피난정보를 도면에 나타낸 것으로 평상시에는 침수피해의 가능성이 있는 구역과 그 정도를 주민들에게 알려 수방에 대한 관심을 높이고 긴급시에는 행동방침과 대피로, 대피지역 등에 대한 정보를 제공할 수 있다.

그러나 유속이나 수심 등, 복수의 물리정보를 지도상에 한꺼번에 나타내면 정보의 판독에 고도의 판단이 요구되어 급박한 위기의 순간에 쉽게 이해하기 어렵게 된다. 따라서, 위

Fig. 18. Velocity Vector at Computation time t=44 hr

Fig. 20. Velocity Vector at Computation time t=48 hr

Fig. 19. Velocity Vector at Computation time t=48 hr

험도와 같은 지표를 도입하고, 침수정보의 하나로써 정의하는 것도 필요하다(일본하천정보센터, 2002). 일본의 경우 표 1과 같이 위험도의 설정과 위험도의 물리적 지표를 설정하기도 하였다. 이러한 침수위험도는 홍수범람해석결과를 이용해서 유속과 침수깊이의 관계로부터 도출되는 것이며, 격자마다에 위험도의 순위 표현이 되는데, 침수깊이의 순위구분과 동일형태로, 지형의 상황, 지반고등을 고려한 표현으로 하는 것이 바람직하다.

본 연구에서도 침수위험도 작성을 위해 본 모형적용 결과인 침수심을 이용하여 위험도 분석을 실시하였다. 위험도의 물리적 지표로써 여러 인자가 이용될 수 있으나 침수심을 기

Table 1. Establishment of Inundation Hazard Level in Japan

위험도구분	내용
1	가옥의 파괴 · 유출 우려가 있고, 침수시의 피난은 불가능
2	보행불가능이며, 침수시의 피난은 불가능
3	침수시의 피난은 곤란
4	침수시의 피난은 가능하나 주의가 필요

Table 2. The Example of Physical Index of Inundation Hazard Level in Japan

수심 \ 유속	$1.0 \leq h$	$0.5 \leq h < 1.0$	$h < 0.5$
$1.0 \leq V$	1	2	3
$0.5 \leq V < 1.0$	2	3	4
$V < 0.5$	3	4	4

Table 3. Standard of Inundation Hazard Level in this Study

구분	1 등급	2 등급	3 등급	4 등급
수심	80 cm 이상	60 cm 이상	40 cm 이상	20 cm 이상

준으로 위험도 기준을 마련하였으며 위험도 기준은 표 2와 같다. 일본에서는 위험도를 산정하는 경우 홍수접근 속도 등 여러 인자를 위험도 산정인자로 고려하는 경우도 있으나 본 연구에서는 우선 침수심만을 기준으로 위험도를 산정하였다.

표 3에서 제시된 기준을 바탕으로 계산된 침수심을 이용하여 위험도를 산정하여 그림 21에서 나타내었다. 그림 21에서 나타난 바와 같이 일부 지역에서 높은 등급의 위험도를 나타내어 침수로 인한 재해가 발생할 경우 피해가 클 것으로 예상되었다. 그림에서 나타난 침수위험도는 홍수재해지도의 복잡한 인자들을 생략하고 위험도 인자로 단일화 하여 각 지점별 침수로 인한 재해위험 정도를 객관적 수치로 나타낼 수

Fig. 21. Hazard Level Map using Inundation Depth

있어 홍수 재해 비전문가들에게도 빠르게 판단이 가능케 하여 평소 침수위험 지역에 대한 경각심 고취 및 재해발생시 신속한 대피를 가능케 할 수 있다고 판단된다. 또한 우리나라의 재해보험의 경우 행정구역별 보험요율을 일정하게 정하고 있으나 이는 재해 발생가능성에 따라 보험요율의 정하는 것이 아니라 행정구역에 따라 정하여 지는 것이므로 보험의 형평성에 어긋나고 있다. 그러므로 홍수로 인한 침수재해의 경우 재해위험도에 따라 개별요율의 도입도 고려해 볼 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결 론

집중호우로 인한 하천 제방붕괴시 제내지에서 막대한 재산과 인명피해가 발생하고 있다. 이에 본 연구에서는 하천 제방붕괴의 경우 제방의 역학적 특성을 고려한 제방붕괴 모형을 도입하여 제내지에서 2차원 침수해석 모형 및 하천 부정류 해석모형과 완전 연계하였다. 연계된 모형은 하천 홍수흐름, 제방 붕괴양상 모의, 제내지 침수해석을 동시에 모의할 수 있었고 이를 감천 유역에 적용하였으며 본 연구를 통해 연구된 결과는 다음과 같다.

- 1) 하천 흐름해석-제방붕괴모의-제내지 2차원 해석이 완전 연계되어 하천의 수위, 제방붕괴 턱의 높이 및 폭, 제내지 침수위가 계산되는 제방붕괴로 인한 제내지 침수해석 모형으로 개발될 수 있었다.
- 2) 개발된 모형을 감천 유역에 적용한 결과 하천 부정류 홍수흐름의 경우 제방붕괴 폭의 발달정도에 따라 제내지에서의 침수위, 2차원적 홍수와 전과 양상, 붕괴 유량 속도 등이 합리적으로 모의되고 있었다.
- 3) 모의 적용 결과를 바탕으로 제내지에서 침수재해 위험도

를 산정하였으며 이를 바탕으로 홍수재해보험요율 산정 기법으로 발전될 수 있을 것으로 판단되었다.

- 4) 본 모형을 보다 많은 적용을 통해 정확성과 실용성이 검증되어진다면 하천 제방붕괴로 인한 제내지 침수해석에 크게 이용될 수 있을 것으로 예상되었고 하천 붕괴 침수예상 및 대처방안 수립에 활용 가능할 것으로 판단되었다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행 한 첨단도시개발사업 (11첨단도시C07)에 의한 기후변화 대응형 도시 빗물관리시스템 연구과제의 일부로 수행되었습니다.

References

- Cristofano, E.A. (1965) Method of computing erosion rate for failure of earthfill dams. *United States Bureau of Reclamation*, Denver, Colorado.
- Foundation of River & Basin Integration Communication, JAPAN (2002). The Example of Writing Tips and Order for Flood Disaster Prediction Map.
- Fread, D.L. (1980) Capabilities of NWS model to forecast floods caused by dam failures. *Proceedings of the Second Conference on Flash Floods.*, American Meteorological Society, pp. 171-178.
- Fread, D.L. (1982) DAMBRK: The NWS dam-break flood forecasting model., *Hydrologic Research Laboratory*, National weather Service, Silver Spring, Maryland, pp. 56.
- Fread, D.L. (1985) "Channel Routing", in Anderson, M.G., and Burt, T.P.(eds), *Hydrological Forecasting*, John Wiley & Sons, New

- York, pp. 437-503.
- Fread, D.L. (1988) Breach: An Erosion Model For Earthen Dam Failure. *Hydrologic Research Laboratory*, National weather Service, Silver Spring, Maryland.
- Gimcheon City (2003) White Paper on Flood Damage 2002 (Typhoon RUSA, Maemi).
- Han, K.Y. and Park, J.H. (2006) Development of Urban Inundation Analysis Model, Urban Flood Disaster Management Research Center.
- Han, K.Y., Lee, J.T., and Lee, W.H. (1985) An Analysis of Outflow Hydrograph Resulting from an Earth Dam-Break, *Journal of KSCE*, Vol. 5. No. 2, pp. 41-50.
- Harris, G.W. and Wagner, D.A. (1967) Outflow from breached earth dams. University of Utah, Salt Lake City, Utah.
- Hromadka, T.V. and DeVries, J.J. (1985) "A Two-Dimensional Dam-Break Model of the Orange Country Reservoir", Int. Symposium on Urban Hydrology, Hydraulic Infrastructures and Water Quality Control, Univ. of Kentucky.
- Hromadka, T.V. and Yen, C.-C. (1987) A Diffusion Hydrodynamic Model, *Water Resources Investigations Report 87-4137*, U.S. Geological Survey.
- MLTM, Busan Regional Construction Management Administration (1997). Fundamental Maintenance Plan of Gamcheon(Improved).
- Park, J.H., Kim, S.H., and Lee, C.H. (2011) Investigation about Design Parameter of Levee using Numerical Model. *Journal of Korea Society of Hazard Mitigation*. Vol. 11, No. 6, pp. 259-268.
- Smart, G.M. (1984) "Sediment transport formula for Steep Channels." *Journal of Hydraulics Division*, American Society of Civil Engineers, 110(HY3), pp. 267-276.
- Spangler, M.G. (1984) Soil Engineering. 4th Ed. Harper & Row Publishers, New York, pp. 482-484.
- Steenbergen, H.M.G.M., Lassing, B.L., Vrouwenvelder, A.C.W.M., and Waats, P.H. (2004) "Reliability analysis of flood defence system." *HERON*, Vol. 49, No. 1, pp. 51-73.
- Strelkoff, T., Schamber, D.R., and Katopodes, N.D. (1977) "Comparative Analysis of Routing Techniques for the Floodwave from a Ruptured Dam", Proc. of the Dam-Break Flood Routing Workshop, Water Resources Council, pp. 229-291.
- Yoon, K.S. and Kim, K.H. (2006) Stability of River Levee (Aspect of Hydro-Engineering), *Water and Future*, KWRA, Vol. 39, No. 5, pp. 14-19.

© 논문접수일 : 2012년 10월 15일
 © 심사의뢰일 : 2012년 10월 19일
 © 심사완료일 : 2012년 11월 22일