하천과 제내지를 연계한 2차원 홍수범람 해석체계 구축 및 남강유역에의 적용

Establishment and Application of 2-Dimensional Flood Inundation Analysis System by the
Collaboration of River and Lowland in Nam River Basin

박세진* · 최현구** · 허윤형*** · 한건연****

Park, Se Jin · Choi, Hyun Gu · Huh, Yun Hyoung · Han, Kun Yeun

Abstract

Due to the recent proliferation of hurricanes and heavy rains, occurrence probability of the collapse of river banks and overflow has increased and has brought about large loss of life and severe property damage in lowland. It is imperative information related to the collapse of levee and overflow systems, flood inundation ranges and overflow spots be generated. Real damage causes include flood waves; understanding streams of flood waves as they flow into the lowland is vitally important. The purpose of this study is to generate data that will protect life and the property of residents in damage areas. Flood analysis is preformed to prepare for emergency situations in lowland due to the collapse of dams and river banks due to extraordinary foods and severe rains. Additionally, through simulation and analysis related to flood distribution patterns in lowland, forecasted inundation depth and time, range of flood, and estimated size of damage expectation can be generated. Data targets include the Nam River watershed using the FLDWAV model. Calculating the water level in lowland and introducing flooding hydrograph are vital to success. This is all related to the collapse of river banks and takes into consideration analysis of flood waves and collapse patterns of river banks. Using this data to create a two-dimensional flood model and by examining flood wave transfer characteristics at the point of real bank collapse, progress can be made. Calculating the range of flood, inundation depth and time in lowland, comparing and reviewing results with actual data and flood marks that showed the goodness of fit is over 90% is key. Calculate the range of flood data by assuming extreme situation of 200 years frequency on the same region, these results are able to contribute establishment of flood damage mitigation measures.

Key words : collapse of river banks, flood wave, FLDWAV, two-dimensional flood model

요 지

최근 태풍 및 집중호우로 인하여 하천 제방의 붕괴 및 월류 발생 확률이 증가하면서 제내지에서의 많은 인명손실과 극심한 재산피해 뿐만 아니라 사회적 문제까지 야기되고 있다. 따라서 홍수 예·경보 및 피난대책 수립을 위해서는 홍수 범람 구역에 대한 제방 붕괴 및 월류지점 파악과 해당 지점에서의 제방붕괴폭, 붕괴시간 등을 통한 범람범위의 정확한 추정이 필요하다. 이러한 홍수범람구역의 정확한 추정을 위해서는 대상지역의 수문, 지형, 토지이용현황 등이 중요한 요소이나 실제로 피해를 일으키는 요인은 홍수파로 제방붕괴에 따라 제내지로 유입되는 홍수파의 흐름을 파악하는 것이 무엇보다 중요하다. 본 연구의 목적은 이상홍수 및 국지성 호우에 의해서 댐 및 하천 제방의 붕괴로 인한 제내지에서의 비상상황 발생에 대비하여 하도 내 홍수 해석을 실시함으로써 피해 예상지역 내 주민의 생명과 재산을 보호하기 위함에 있으며, 또한 제내지에서의 침수분포양상의 모의 및 해석을 수행하여 홍수파로 인한 제내지에서의 침수범위, 침수위, 침수시간 등을 예측하고 피해예상규모를 산정하는 것이다. 이를 위해 남강 유역을 대상으로 1차원 부정류 모형인 FLDWAV모형을 이용하여 하천에서의 홍수파 해석과 제방의 붕괴양상을 고려하여 제내지 및 제외지의 수위를 산정하고 붕괴에 따른 범람 수문곡선을 유도하였다. 이를 기초로 하여 2차원 범람 모형에 적용하여 실측 제방 붕괴 지점에서의 홍수파 전달특성을 검토하였으며 제내지의 침수범위, 침수시간, 침수위 등을 계산하여 실측 자료 및 홍수흔적과의 비교·검토한 결과 90%를 상회하는 적합도를 나타내었다. 그리고 같은 지역에서 200년 빈도의 극한상황을 가정하여 범람범위를 산정하였으며, 이 결과는 수방제 및 홍수피해 경감대책 수립에 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

핵심용어 : 제방붕괴, 홍수파, FLDWAV, 2차원 범람해석

*정회원 · 경북대학교 공과대학 건축 · 토목공학부 석사과정(E-mail : sjin3615@naver.com)

**정회원 · 경북대학교 공과대학 건축 · 토목공학부 박사수료(교신저자)

***경북대학교 공과대학 건축 · 토목공학부 석사

****정회원 · 경북대학교 공과대학 건축 · 토목공학부 교수

1. 서론

지구온난화와 이상기후에 따라 최근 우리나라를 둘러싼 기후변화의 변화가 가속화되고 있으며 한반도는 장마기간이 소강상태를 보이는 반면, 장마 후 국지성 집중호우가 증가하고 태풍이 내습하는 현상이 빈번해짐으로써 홍수피해의 빈도가 늘어나고 있다. 이러한 태풍 및 집중호우로 인하여 하천 제방의 붕괴 및 월류 발생 확률이 증가하며, 제방의 붕괴 혹은 월류시 제내지에서는 많은 인명손실과 극심한 재산피해를 줄 뿐만 아니라 사회적 문제를 야기하기도 한다. 최근의 이상기후로 인하여 수자원의 효율적 이용 측면 보다 홍수방어적 측면에서의 어려움이 더욱 가중되고 있으며, 이를 해결하기 위해 다양한 연구와 투자를 통한 기존의 구조적 한계에서 벗어나 홍수 예·경보, 홍수터의 관리, 유역의 강우-유출분석 등의 비구조적 대책의 병행을 통한 치수 안정성을 모색하고 있다. 따라서 홍수 범람 구역에 대한 홍수 예·경보 및 피난대책 수립을 위해 제방 붕괴 및 월류지점을 파악하는 것이 무엇보다도 중요하며 해당 지점에서의 제방붕괴폭, 붕괴시간 등을 통한 범람범위의 정확한 추정이 필요하다. 이러한 홍수범람구역의 정확한 추정을 위해서는 대상지역의 수문, 지형, 토지이용현황 등이 중요한 요소이나 실제로 피해를 일으키는 요인은 홍수파이기 때문에 제방붕괴에 따른 제내지로 유입되는 홍수파의 흐름을 파악하는 것이 무엇보다도 중요하다.

이에 본 연구에서는 1차원 부정류 모형인 FLDWAV 모형으로써 홍수위 분석을 통한 제방 붕괴 및 월류지점을 파악하고 해당 지점에서의 제내지로 유입되는 제방 붕괴유량을 산정하여 2차원 범람해석모형으로써 제내지에서의 효과적이고 정확한 범람구역의 해석을 수행하고자 한다. 앞서 언급한 하천과 제내지에 대한 각각의 두 모형을 연계시킨 홍수범람모형을 통해서 하천에서의 홍수위 예측은 물론 제내지에서의 범람 홍수파의 전파특성을 정확히 예측할 수 있게 하였다. 그리고 모의 결과는 수치지도와 GIS상에 도시하여 가시적인 침수양상을 제시함으로써 효과적인 도시치수대책의 기초자료로 활용할 수 있도록 하였다.

제방붕괴 및 월류에 따른 범람 홍수파 해석은 주로 댐 붕괴의 문제와 연관되어 왔는데 Schoklitsch(1917)와 Stoker(1957) 등에 의하여 급격한 붕괴로부터 발생하는 부정류의 근사해를 단순한 하도에 대하여 유도한 바 있다. Xantopoulos와 Koutitas (1976)는 2차원 범람홍수파 해석을 위하여 Eulerian 좌표상에서 양해법 유한차분모형을 이용하여 그 해를 구하였고, Strelkoff(1977) 등은 Baldwin Hill 댐의 파괴가 Los Angeles 지역에 미치는 영향을 Manning의 식과 질량보존식에 의하여 범람홍수도를 작성하였다. Fread(1985)는 제방범람으로 인한 홍수파를 주수로와 연결된 네트워크로 고려하여 제내지에서의 1차원 홍수파 해석을 실시하였고, Hromadka와 DeVries(1985)는 Orange County 저수지의 가상의 붕괴에 따른 범람 홍수파를 통합유한차분 모형을 이용하여 해석하였다. 2차원 범람홍수의 흐름에 대한 수치모형들이 최근에 많이 연구되고 있다(Bradford와 Sanders, 2002; Brufau와 Garcia-Navarro, 2000; Jha 등, 2000). 그러나 모든 연구모형들은 범람수심의

그림 1. 연구 흐름도

예측에 대한 내용들을 주로 언급하였으며, 하도 및 홍수터에서의 범람유속에 대한 자세한 언급은 없다. Ponce 등(2003)은 댐 붕괴 유출수문곡선의 체적, 첨두유량, 댐 하류 하도의 경사 등 다양한 조건에 대한 댐 붕괴 홍수파의 감쇠영향을 해석적 모형을 이용하여 계산하였다.

국내에서는 하천 제방붕괴에 대한 연구동향으로는 박재홍 등(2009)이 제방붕괴모형과 하천해석모형을 통합하여 실제하도에 적용하였으며, 김주영 등(2011)은 수리실험과 수치모의를 통해서 제방붕괴의 흐름해석을 실시하였다. 이종태와 한건연(1989)은 가상 수치실험을 통한 월류 및 제방붕괴로 인한 제내지의 침수를 예측을 수행하였으며, 한건연 등(2004)은 2002년 집중호우로 인한 제방붕괴와 제내지에서의 범람을 분석하였다. 장수형 등(2006)은 저류지역을 구성하여 외수월류의 저류효과와 범람 영향을 분석하였으며, 김형준과 조용식(2005)은 내수침수모의는 ILLUDAS 모형을 사용하고 외수범람 모의는 2차원 수치모형을 개발하여 적용하는 방법으로 도시하천에서의 제방붕괴를 모의하였다. 최승용 등(2009)은 기본 GIS 자료를 이용하여 수문매개변수를 추출하고 이를 이용하여 유역의 유출량을 산정하고, 제내지의 구조물의 영향을 고려한 홍수범람양상을 분석하였다.

본 연구에서 실제 침수피해지점과의 비교분석을 통하여 정확한 범람 홍수파의 해석이 수행될 수 있었으며, 하천제방 계획시 홍수피해와 투자액을 감안한 경제적인 하천 제방단면 결정을 위한 기본자료로 활용될 수 있으며, 국가 중요 시설물의 입지 선정시 홍수피해에 대한 판단자료로 이용될 수 있을 것이다.

2. 대상유역의 현황 및 홍수피해 특성

2.1 대상유역의 일반현황

남강은 경상남도 함양군 덕유산 1,503m 지점의 ‘참새미’에서 발원하여 진주시·함양군·산청군·의령군·함안군을 흘러 낙동강으로 유입되는 하천으로 낙동강의 제 1지류이다. 남강유역의 지형은 경상남도 함양군 덕유산(EL. 1,614.0 m)에서

그림 2. 대상유역 및 태풍으로 인한 제방 붕괴지점

전라북도와 경상남도의 경계 및 황강유역과 분수령을 이루고 있다. 덕유산에서 분기된 산맥은 유역의 서남쪽으로 깃대봉(EL. 1,014.8 m), 백운산(EL. 1,278.6 m)으로 이어지면서 금강유역과 분수령을 이루고 있으며, 서측으로는 백두대간의 지리산 자락 노고단(EL. 1,508.0 m)에서 분기된 토끼봉(EL. 1,533.7 m), 영신봉(EL. 1,651.9 m)과 이어지면서 섬진강유역과 경계를 이루고 있다. 유역의 남측으로는 광로산(EL. 720.2 m), 서부산(EL. 738.5 m), 천황산(EL. 342.5 m), 봉대산(EL. 409.6 m) 등으로 둘러싸여 있고 낙남정맥을 분수령으로 하여 낙동강 남해 대권역과 경계를 이루고 있다.

남강의 유역면적은 3,467.52 km²으로써 낙동강 전 유역면적 23,326.3 km²의 약 14.8% 정도이며 유로연장은 189.83 km, 유역평균폭 18.27 km, 형상계수는 0.10이다. 그리고 유역의 평균고도는 EL. 319.96 m이고, 평균경사는 31.86%이다. 남강 유역의 총 면적 3,467.52 km² 중 농경지 면적이 592.32 km²로서 총면적의 17.1%를 차지하고 있으며 임야는 2,402.35 km²에 69.3%, 대지는 57.44 km²에 1.7%로서 대부분 농경지 및 임야로 이용되고 있는 것으로 조사되었다. 본 연구에서는 태풍 “매미”, “에위니아” 때 제방이 붕괴되고 피해가 많았던 지역인 남강댐 하류부에서 낙동강 합류부 지점, 즉 남강하류부 지역으로 국한하여 연구를 진행하였다. 그림 2에서는 연구대상유역과 태풍으로 인한 제방 붕괴 지점을 도시하고 있다.

2.2 대상유역 홍수피해 특성

남강유역의 수문지형학적인 가장 큰 특징은 남강댐을 기준으로 남강댐 상류와 하류로 대별된다. 남강댐 상류는 높은 산지 비율과 급한 하상경사로 인하여 내수배제 불량에 의한 내수침수보다는 지류하천의 급한 하상경사로 인하여 지류하천으로부터 홍수량이 일시에 유입되며 증가된 홍수량이 만곡부 및 협착부 구간에서 홍수위가 급격히 상승을 초래하고 있다. 반면 남강댐 하류는 남강댐 상류 홍수량이 남강댐에서 대부분 가화천 방수로로 방류됨에 따라 남강댐 하류에 영향을 감소시키지만 남강댐 하류부의 하도특성이 사행이 심하며 넓은 고수부지의 발달로 인하여 홍수 시 통수단면적을 축소

시켜 수위상승을 초래하고 있다. 또한 완만한 하도경사와 낙동강 본류 배수영향으로 인해 홍수위가 장기간 지속됨에 따라 제내지 내수불량 및 제방누수에 취약한 제방구조를 가지고 있으며 남강의 지류하천 또한 본류의 배수영향으로 홍수소통에 문제가 있는 것으로 나타났다. 남강유역의 피해양상을 살펴보면 연도별로 차이는 있으나 사망이나 이재민 발생 등의 인명피해는 전반적으로 감소한 반면 공공시설 등 시설물 피해는 증가하는 것으로 나타났는데 이는 사회, 경제의 발달로 토지이용이 고도화됨에 따라 재해의 위험이 높은 지역에도 각종 시설이 들어서기 때문인 것으로 판단된다. 최근 남강 유역인근에 발생한 주요 홍수사상은 2003년도 “매미”, 2006년도 “에위니아” 등이 있으며, 각 사상별 특성 및 피해상황은 다음과 같다.

제14호 태풍 “매미”는 9월 6일 15시경 괌섬 북서쪽 약 400 km 부근 해상(16.0N, 141.5E)에서 발생하여 한반도에 상륙한 태풍 중에서 가장 강한 중심기압 950 hPa, 최대풍속 40 m/s의 세력으로 상륙하였다. 남강유역에는 9월 11~13일에 강우가 발생하였는데 총 강우의 지속시간은 48시간을 넘지 않았지만 바람을 동반한 집중호우의 성향을 보임으로써 남강댐 상·하류에 지역에 많은 피해가 발생하였다. 남강 유역에서만 2,860억원의 재산피해와 13명의 인명피해가 발생하였다. 단시간에 쏟아진 많은 양의 비는 곳곳의 하천을 범람시켜 농경지가 침수되고 주택가에는 물이 들어차 많은 이재민이 발생했다. 남강 하류부 지역 등에서 주목할 만한 제방 붕괴와 그로 인한 농경지 등의 침수, 유실 피해가 발생하였다. 경상남도 의령군 정곡면 중교리의 월현2제, 경상남도 의령군 지정면 오천리의 오천제 등이 붕괴되었으며 월현2제는 50 m의 제방이 붕괴되고 침수면적은 108 ha에 이르렀으며 1011번 국도까지 침수되어 예동, 무곡마을 등 100여 가구가 고립되었다. 이 부분의 붕괴 원인은 집중호우 및 수위 상승에 의한 배수영향으로 월류에 의한 것으로 추정된다.

태풍 “에위니아”는 2006년 7월 1일 미국 괌 남서쪽 약 1,010 km 부근 해상에서 발생하여 북상하였다. 태풍 자체의 피해보다는 장마와 집중호우로 인해서 큰 피해가 발생하였다. 태풍 상륙 전 후로 하여 남부지방에 100~200 mm의 비가 내렸으며 태풍 통과시에 남해군과 거제시 등 남부 지방에 200 mm 이상의 큰 비가 집중되었다. 전국적으로는 태풍 “에위니아” 내습시 1조 8천억원의 재산피해와 40명의 인명피해가 발생하였으며 남강유역에서는 800억여원의 재산피해와 20명의 이재민이 발생하였다. 특히 진주시 대곡면과 영천강 유역인 문산읍, 금곡면 및 영현면에서 제방 월류 및 붕괴로 막대한 침수피해가 발생하였다. 진주시 대곡면 덕곡리 좌안제방에서는 40미터의 제방이 붕괴되었고 붕괴된 부분은 지방2급 하천 대곡천의 합류부 제방이 붕괴된 것으로 지류대안측의 우안제방보다 상대적으로 낮은 구조로 인해 월류로 인한 제체파괴로 추정된다. 그리고 대곡면 마진리의 마진제와 대곡제 또한 제체 월류에 의한 붕괴가 일어났으며 그로 인해 막대한 침수피해가 일어났다.

3. 하천의 수리해석

3.1 모형의 기본이론

미국 기상청(NWS)의 동역학적 홍수추적 모형인 FLDWAV 모형은 두 개의 널리 쓰이는 DWOPER 모형과 DAMBRK 모형의 통합모형으로 단일수로나 수지형 수로에서의 1차원 부정류 해석을 위한 동역학적 홍수추적모형의 일반형태를 가지고 있다. FLDWAV 모형은 부정류에 대한 Saint-Venant 방정식의 형태를 음해적 유한차분 형태로 해석한 것으로 질량 보존의 식과 운동량보존의 식은 각각 다음과 같다.

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

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

St. Venant 방정식은 쌍곡선형, 비선형, 편미분계 함수로서 특수한 경우를 제외하고는 해석해가 존재하지 않는다. 그러나 여러 수치해석 기법에 의해 근사해를 얻을 수 있다. 유한차분 기법에서는 미분방정식이 차분화된 비선형 대수방정식으로 표현되어진다. 이러한 대수방정식계는 초기 및 경계조건을 이용하여 해석이 가능하게 된다. 유한차분기법은 양해법과 음해법으로 해석할 수 있다. 양해법에서 임의의 시간에 대한 해석은 단지 이전시간에 대한 값에 의존하는 반면, 음해법에서는 이전 및 현재의 시간에 대한 값으로 구해진다. 많은 음해기법이 시간 및 공간 미분항을 근사화하기 위해서 개발되었으며 효율적인 계산을 위한 다양한 방법들이 연구되어왔다.

그림 3. 남강유역 모식도

(a) 태풍 “에위니아” 사상 결과

본 연구에서는 쌍곡선형, 비선형, 편미분계 함수인 St. Venant 방정식을 비선형 대수방정식의 형태로 변환하기 위해 가중 4점 음해 유한차분 근사해법을 이용하였다(Fread, 1988).

3.2 매개변수 검 · 보정

확산형 범람홍수파모형으로 모의를 수행하기 이전에, FLDWAV 모형을 이용한 하도내 홍수해석 모의를 실시하여 실측값과의 비교를 통한 매개변수 검·보정을 실시하였다. 연구대상지역으로는 남강유역에서 상류부를 제외한 남강댐 하류부에서 낙동강 합류부 지역으로 남강하천정비기본계획확상의 계획 홍수량에 대한 매개변수 검·보정에 이용된 태풍 “매미”, “에위니아” 사상에서의 소유역 유출량을 이용하였다. 그림 3은 남강유역 모의를 위한 하도망을 나타내고 있다.

모의에 적용된 구간 중 상류단은 남강댐으로부터, 하류단은 거룡강 수위표까지 모의를 수행하였으며 상류단 경계조건 및 하류단 경계조건으로는 WAMIS(국가수자원관리종합정보시스템)에서의 태풍 “에위니아”시의 남강댐 방류량 및 거룡강 수위표의 수위값을 적용하였다. 모의 결과의 검증은 모의 구간 내의 정암 수위표의 자료를 활용하였다. 앞서 진주 수위표의 경우에는 태풍 “에위니아”시 집중호우로 인해 정확한 수위 측정이 되지 않아 정암 수위표의 자료를 활용한 것이며 FLDWAV 모형을 실제 남강유역에 모의를 실시한 결과 태풍 “에위니아”시 정암수위표에서의 실측 수위값과 모의한 결과가 잘 일치하고 있으며 전체적인 하도 흐름 양상이 모의에 잘 반영된 것으로 판단된다. 그림 4(a)는 남강 내 정암수위표에서 모의결과와 실측 수위값과의 결과를 비교한 것이다.

산정된 매개변수를 검증하기 위하여 태풍 “매미” 사상으로 상·하류 경계조건 및 지류유입유량의 변화를 주어서 정암수위표 지점에서의 실측 수위값과 모의결과값의 비교를 통한 검증을 실시하였다. 다음 그림 4(b)는 남강 내 정암 수위표에서 모의결과와 실측 수위값과의 결과를 비교한 것이다. FLDWAV 모형을 태풍 “매미” 사상으로 모의를 실시한 결과, 수위의 침두치가 나타나는 63 hr 이후의 결과값이 매우 정확하게 나타났으며 실측치 누락지점인 45 hr~59 hr, 87 hr~91 hr, 110 hr~114 hr에서도 거의 일치할 것으로 예상된다.

(b) 태풍 “매미” 사상 결과

그림 4. 모의결과 비교

4. 제내지 범람분석

하천제방의 월류 및 파괴로부터 야기되는 범람 홍수파는 제내지에서의 홍수 피해정도를 증대시키고 있다. 제방 파괴에 따른 홍수파가 제내지로 전달되는 경우에 홍수터의 저류, 홍수의 감쇠, 건물 주위에서의 흐름, 가로에서의 흐름 등에 따라 그 물리적인 양상을 수식으로 표시하기에 큰 어려움이 있다. 본 연구에서는 제방의 월류 및 붕괴에 따른 홍수파가 제내지로 전파되는 경우에 대해 관성력의 항을 압력, 마찰력, 중력의 항과 비교하여 그 중요도가 작게 나타나게 되는 물리적인 특성을 고려한 2차원 천수방정식을 기본식으로 하여 이를 확산형 방정식으로 근사화시킨 홍수확산 모형을 수치해석 기법으로 개발하고 이를 가상 및 실제유역에 적용하여 그 활용성을 입증하고자 한다.

2차원 동역학적 모형은 댐 및 제방 파괴 홍수와 해석시 단순한 지형조건 하에서는 수치적인 정확해를 보장할 수 있으나 지형조건이 복잡한 제내지에서의 홍수와 해석시에는 홍수터에서의 각종 지형지물의 조건을 효과적으로 고려하지 못하고 계산과정에서의 수렴성 보장의 어려움과 함께 큰 오차가 발생하게 된다. 본 연구에서는 일반적으로 제방 파괴에 따른 홍수류의 경우 선단부에 단파가 발생되지 않으며 이동속도도 비교적 점진적인 제내지에서의 홍수전파에 대하여 실용성에 관점을 두고 해석하였다.

4.1 제내지 침수특성

범람 홍수 모형은 그림 5에 나타난 바와 같이 크게 저류형, 직진형 및 방사형 등에 따라 0, 1, 2 차원 모형을 각각 적용할 수 있다. 저류형의 경우는 범람수가 한정된 지역내에 저류되어 그 침수위는 점차 상승되다가 어느 시점에 이르면 범람은 중지되며 감수기에 들면 침수위는 하강되어 범람수의 일부는 하천으로 복귀하기도 한다. 확산형의 경우 파괴지점으로부터 유출되는 범람수는 제내지의 지형조건에 의하여 확산되고 유하되어 버려 감수기에도 하천으로 복귀되는 양은 극히 적다.

일반화한 범람 홍수파 모형은 수심 평균치를 취한 2차원 유동으로 볼 수 있으므로 2차원 천수방정식을 기초로 한 수

그림 5. 제내지의 침수형태 분류

치모형의 적용이 바람직하다. 이에 본 연구에서는 2차원 천수방정식에서 관성항을 무시하여 간략화 시킨 확산형의 식을 지배방정식으로 하고 이를 유한차분기법에 의하여 해석하는 2차원 수치모형을 개발하였다. 복합적인 지형특성을 가지며 확산형 범람 양상과 넓은 구역에서 저류형 범람 특성이 나타나는 경우에 대하여 본 연구에서의 2차원 유한차분모형은 0 또는 1차원 모형이 제시하지 못한 해석상의 난점들을 효율적으로 처리할 수 있었다.

4.2 모형 기본 이론

2차원 천수방정식은 식 (3)~(5)과 같은 연속방정식과 운동량방정식으로 구성된다.

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial(HV_x)}{\partial x} + \frac{\partial(HV_y)}{\partial y} = i \quad (3)$$

$$S_{fx} = S_{ox} - \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{V_x \partial V_x}{g \partial x} - \frac{V_y \partial V_x}{g \partial y} - \frac{1}{g} \frac{\partial V_x}{\partial t} \quad (4)$$

$$S_{fy} = S_{oy} - \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{V_y \partial V_y}{g \partial y} - \frac{V_x \partial V_y}{g \partial x} - \frac{1}{g} \frac{\partial V_y}{\partial t} \quad (5)$$

여기서, H 는 흐름방향의 수심, V_x , V_y 는 x , y 방향의 수심평균 유속, i 는 대상유역에 내리는 초과 강우량이다. 운동량방정식에 대한 확산형의 근사해는 식 (4), (5)의 뒷부분 세항을 무시하여 고려한 경우이고 압력항까지 무시하면 이론운동파의 식이 유도된다. 본 연구모형은 이론운동파(kinematic wave) 모형과 확산형(diffusion wave) 모형의 근사해가 모두 가능하도록 구성하였다. 확산형 모형의 근사해는 이론운동파 모형보다도 더욱 넓은 적용범위를 갖는데, 완전한 동역학적 모형과 비교하면 매우 작은 정도의 손실만이 있게 된다. 또한, 완전한 동역학적 모형에 비하여 확산형 모형의 근사해의 경우 계산시간에 있어서의 큰 개선이 있게 된다.

확산형 방정식을 해석하기 위하여 본 연구에서는 양해법의 중앙차분법을 변형한 격자망 계산방법(nodal domain integration method)을 사용하였다.

적용대상지역을 직사각형 격자로 분할 구분하였고, 각 격자에 대한 표고, 조도계수, 위치 등을 분포시켰다. 흐름해석은 유량을 계산하기 위하여 흐름의 수심치를 해석하여 격자 시스템 내에서 추적될 수 있다. 그림 6에서와 같이 임의의 격자

그림 6. 확산형 모형에서의 유한차분망

의 중심점을 C 라하고 상하좌우의 경계면을 각각 1, 2, 3, 4 방향이라 하면 이웃한 구간에 대한 유량은 식 (6)~(9)과 같이 기술된다.

$$q_{dir_1} = -(F_x)_{dir_1} \left[\frac{h_1 - h_c}{\Delta x} \right] \quad (6)$$

$$q_{dir_2} = -(F_y)_{dir_2} \left[\frac{h_2 - h_c}{\Delta y} \right] \quad (7)$$

$$q_{dir_3} = -(F_x)_{dir_3} \left[\frac{h_3 - h_c}{\Delta x} \right] \quad (8)$$

$$q_{dir_4} = -(F_y)_{dir_4} \left[\frac{h_4 - h_c}{\Delta y} \right] \quad (9)$$

여기서, 예를 들면 C 구간과 우측의 1번 구간에 대한 식 (6)에서 F_x 는 식 (10)과 같이 기술된다.

$$(F_x)_{dir_1} = \frac{1}{n} H^{\frac{5}{3}} \left[\frac{h_1 - h_c}{\Delta x \cos \theta} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$

계산수행은 H_c 와 $H_i (i=1,2,3,4)$ 가 수렴 범위 내에 들어가도록 수행되는데 실용적으로 $|H_c - H_i| < 10^{-4} \text{m}$ 가 적용될 수 있다. 주어진 격자와 시간대에 대하여 각 격자의 경계 각 면에서의 유량이 계산되고 합산되었다. 그 결과로 나온 유량변화는 구간 내에 대하여 균등하게 분포되어 수심이 계산되었다. 이제 시간간격(k)과 ($k+1$)간에서 C 구간에서의 수체적의 변화를 Δq 라 하고 수위의 변화를 Δh 라 하면 Δq , Δh 는 식 (11), (12)와 같이 기술되며 ($k+1$)시간대에서의 C 점의 수위는 식 (13)으로 기술된다.

$$\Delta q_c^k = q|_{dir_1} + q|_{dir_2} + q|_{dir_3} + q|_{dir_4} \quad (11)$$

$$\Delta h_c^k = \frac{\Delta q^k (\Delta t)}{\Delta x \Delta y} \quad (12)$$

$$h_c^{k+1} = h_c^k + \Delta h^k \quad (13)$$

4.3 하도-제내지의 연결부 모형

하천과 제내지의 연결부 해석을 위해 연결부 모형을 도입하여 해석하였다. 본 연구에서는 하천에 대한 홍수해석은 FLDWAV 모형에 의한 홍수류 해석을 실시하였고 제내지에서는 본 연구의 확산과 모형을 적용하여 해석할 수 있도록 구성하였으므로 이들을 연결할 수 있는 수치모형을 개발하게 되었다. 연결부 모형에서는 잠수효과의 해석을 위한 관련방정식을 도입하여 제내지에서의 수위상승에 따른 하천으로부터의 월류량을 정확하게 계산할 수 있도록 구성하였다. 동역학적 모형에 의한 하천홍수 모의와 확산과 모형에 의한 홍수터 모의에 있어서 두 지점의 상대적인 수위에 따라서 제방 월류 유량은 그 방향을 바꾸어 홍수터에서 하천으로 되돌아 갈 수도 있다. 제방월류 및 파괴에 따른 제내지로의 범람 홍수 유입량을 산정은 그림 7, 8과 같다.

하천으로부터 제내지로 유입하는 범람 수문곡선을 유도하기 위해서는 하천의 수위, 제방과파양상, 제내지의 지형조건 등이 필요하다. 범람수의 흐름은 제방 내·외측의 수위로부터 완전 및 불완전 월류로 구분하여 불완전 월류일 경우에는 잠수영향을 고려하였다. 또한 연결부의 효율적인 계산을 위하여 최적 시간간격의 설정을 위한 계산 알고리즘도 도입하여 해석하였다(최규현, 2005).

그림 7. 제방 월류에 의한 범람 홍수량의 계산

그림 8. 제방 붕괴에 의한 범람 홍수량의 계산

5. 대상유역에의 적용

본 연구에서는 남강유역에서 1차원 동역학적 홍수추적 모의 수행을 바탕으로 실제 제방이 붕괴되어 침수되었던 지역에서 제방 붕괴 유출량을 산정하여 2차원 범람모형으로서 제내지에 대한 범람양상을 모의하였다. 붕괴폭은 표 1과 같이 실제 측정된 값을 사용하였으며 붕괴시간은 붕괴직후 최종 파계폭의 2분의 1이 붕괴되고 그 후 1시간동안 최대붕괴폭까지 확대되는 것으로 하였다. 총 모의시간은 입력값으로 사용된 범람 유량수문곡선의 시간을 고려하여 20 hr~30 hr로 모의를 하였다.

5.1 태풍사상

본 모의를 위하여 DEM기반 범람 모형을 이용하였으며 DEM 자료를 구축하기 위해서 대상유역에서의 1 : 25,000 수치지도를 이용하였으며, GIS 프로그램을 적용하여 대상유역의 TIN 및 GRID를 생성하였다. 그림 9(a), (c)는 DEM을 추출하기 위해 수치지도의 등고선과 표고값을 이용하여 추출된 불규칙 삼각망이며 그림 9(b), (d)은 불규칙 삼각망으로부터 추출된 DEM을 나타내고 있다.

그림 9. 대상유역의 지형자료 구축

표 1. 각 사상별 제방붕괴 폭

	제방명	붕괴폭
태풍 “매미”	월현2제	50m
태풍 “에위니아”	대곡제	68m
	마진제	50m

표 2. 태풍 “매미”, “에위니아” 사상에서의 적합도

	월현2제	대곡제	마진제
교집합 (ha)	99.48	30.32	90.24
합집합 (ha)	108	32.7	93.5
적합도 (%)	92.1	92.7	96.5

그림 10은 제방붕괴시 하도에서 제내지로 유입되는 범람 유량수문곡선을 나타낸 것이다.

유역 또는 홍수터에 대한 침수 면적 비교는 기준대상에 대하여 비교가 되어 진다. 따라서 침수면적에 대한 정확도를 분석하기 위해 비교 대상의 기준을 본 연구에서 적용하였던 대상 태풍 사상에서의 침수범위로 하여 모의결과의 침수범위의 적합도를 비교하였다. 그림 11은 실제 침수범위와 모의치의 최대침수면적을 비교한 그림이다.

그림 11. 실제 침수범위와 모의값의 비교

그림 10. 제내지로 유입된 범람 유량수문곡선(월현2제, 대곡제, 마진제)

침수 면적 자료를 바탕으로 적합도 공식을 적용하여 표 2에 침수 교집합 및 합집합, 적합도를 도출하였다. 면적의 교집합과 합집합의 계산은 GIS Tool을 활용하였다. 표 2에서 보는 바와 같이 DEM기반 범람 모형을 이용한 모의결과의 침수실적도에 대한 적합도가 모두 90%를 상회하며 이는 상당한 적합도를 보여준다고 할 수 있다.

5.2 빈도별 사상

본 연구에서는 앞서 연구하였던 실제 침수지역과의 비교분석에서 더 확장하여 빈도별 모의를 실시하고자 한다. 계획 확률 강우 100년 빈도, 200년 빈도의 1차원 모의 결과 중에서 침두값이 크게 나타나는 200년 빈도를 적용하여 2차원 모의를 실시하였다. 1차원 동수역학적 홍수추적 모의는 개수된 남강유역에서 이루어졌으며 그로 인하여 대상지역의 수위가 위험수위까지 도달하지 않기 때문에 다른 제방붕괴요인(침투, 침식, 체체불안정) 등으로 인하여 붕괴되었다고 가정하고 붕괴유량을 산정하였다.

본 연구에서는 태풍사상으로 검·보정된 매개변수를 활용하여 남강댐 하류부 유역에서 100년 빈도의 재현기간을 가지는 유량 및 수위를 산정하였다. 상류단 경계조건으로는 남강댐 방류량을 입력하였으며 하류단 경계조건으로는 거룡강 수위표 지점의 유량을 수위-유량 관계곡선을 활용하여 수위수문곡선으로 변환하였다. 그리고 변환된 수위수문곡선을 무차원화 과정을 거친 후 하천정비기본계획에서 산정된 100년 빈도 최고홍수위 값(14.42 m)을 무차원곡선의 최고값으로 입력하여 FLDWAV 모형의 하류단 경계조건으로 입력하였다. 그

리고 각 소유역의 측방유입으로 계산된 유량은 하천정비기본계획서에서 나와있는 각 소유역 유출량을 입력하였다.

총 모의 시간은 72시간으로 산정하였고 그림 12에 100년 빈도의 재현기간을 가지는 정암 수위표 지점에 대해서 산정한 유량 및 수위 결과를 도시하였다. 최대유량은 3,400 cms를 넘는 유출량을 보이고 있으며 최고 수위는 15.76 m로 남강하천정비기본계획(2009)에 기입되어있는 15.69 m와 거의 일치하였다.

200년 빈도 모의에서는 하천정비기본계획에서 산정된 200년 빈도 최고홍수위 값(15.05 m)을 무차원곡선의 최고값으로 입력하여 무차원화 과정을 거쳤으며, 그림 13은 200년 빈도의 재현기간을 가지는 정암 수위표 지점에 대해서 산정한 유량 및 수위 결과를 도시한 것이다. 최고 수위는 16.30 m로 남강하천정비기본계획(2009)에 기입되어있는 16.20 m와 거의 일치하였다.

1차원 FLDWAV 모형을 이용하여 빈도별 홍수량에 대하여 하천 홍수위 해석을 실시하였다. 이 모의결과로 실제 제방이 붕괴되었던 지점에 대하여 파제유량을 산정할 것이며 그 값은 2차원 범람해석의 입력값으로 사용하게 된다.

제방의 붕괴폭 및 붕괴시간의 설정은 붕괴유량을 계산하는데 있어서 중요한 인자로 분류된다. 붕괴형상은 실측값이 있는 경우 그것을 참고로 하는데 실측이 없는 경우 붕괴폭 $y(m)$ 는 파제개소가 합류점 부근인지 아닌지를 나누고 하천폭 $x(m)$ 으로부터 다음 식에 의해 산정한다. 또 합류점부근이란 합류의 영향을 무시할 수 없는 규모의 하천이 합류하고 있는 경우로 그 기준은 지천의 하천폭이 본 천의 하천폭의 30%이상으

그림 12. 100년 빈도 정암수위표 지점의 수위 및 유량결과

그림 13. 200년 빈도 정암수위표 지점의 수위 및 유량결과

그림 14. 제내지로 유입된 범람 유량수문곡선(월현2제, 대곡제, 마진제)

표 3. 모의 지점에서의 계산된 붕괴폭

CASE	조건	하천폭(m)	합류점 여부	붕괴폭(m)
1	월현2제	582	월현천 합류	172.37
2	대곡제	No. 69 175	ave. 195	-
		No. 70 215		
	마진제	415	-	124.01

로 영향구간은 합류전에서 상하류로 본천 하천폭의 2배정도의 구간을 기준으로 한다.

$$\text{합류점 부근의 경우} : y = 2.0 \times (\log_{10} x)^{3.8} + 77 \quad (14)$$

$$\text{합류점 부근이외의 경우} : y = 1.6 \times (\log_{10} x)^{3.8} + 62 \quad (15)$$

붕괴시간의 산정은 붕괴 직후 최종 붕괴폭의 2분의 1(1/2)이 붕괴되고 그 후 1시간동안 최종붕괴폭까지 확대되는 것으로 하며 이 사이의 붕괴폭의 확대속도는 일정하도록 하였다. 표 3은 모의 지점에서의 계산된 붕괴폭을 나타낸다.

붕괴폭의 산정은 합류점의 여부까지 고려하여 계산식을 사

용하였으며 월현2제의 경우에는 월현천과의 합류지점이기 때문에 붕괴폭이 예상보다 더 크게 계산되었다. 산정된 제방의 붕괴폭과 시간으로 범람유량을 산정하게 되며 그림 14는 범람유량수문곡선을 나타내고 있으며 그림 15와 16은 각 대상 유역에서의 시간별 범람양상을 표시하였다.

본 연구의 모의결과로 계획 확률 강우 200년 빈도에서의 침수 범위 및 침수심은 태풍 “매미”나 “에위니아”에서의 침수 범위 및 침수심보다 더 큰 값을 보여주었다. 월현2제의 경우에는 102.76 ha로 태풍 “매미”에서의 99.48 ha 보다 침수심이 조금 더 넓었다. 이는 월현천의 제방이 제내지의 최저바닥보다 4 m 이상 높은 관계로 물이 논에 갇혀서 더 이상 높은 지점까지 전파가 되지 않았음을 의미하며 평균 침수심은 3.12 m로 태풍 “매미”에서의 1.49 m 보다 1.6 m 가량 높음을 알 수 있다. 그리고 대곡제의 평균 침수심은 2.27 m로 태풍 “에위니아”에서의 1.65 m 보다 0.62 m 높게 나타났으며 논 중심부를 가르는 도로를 월류하여 아래의 마을까지 홍수파가 전파됨을 알 수 있었다. 마진제의 평균 침수심은 2.67 m로 태풍 “에위니아”에서의 1.24 m 보다 1.43 m 높게 나타났다. 표 4는 각 제방에서의 침수 면적과 침수심을 나타내고 있다.

그림 15. 시간별 제내지에서의 홍수범람도(월현 2제, 200년 빈도)

그림 16. 시간별 제내지에서의 홍수범람도(대곡제&마진제, 200년 빈도)

표 4. 사상별 빈도별 모의결과 비교

CASE	조건		평균 침수심	침수 면적
1	월현2제	태풍 “매미” 사상	1.49 m	99.48 ha
		200년 빈도	3.12 m	102.76 ha
2	대곡제	태풍 “에위니아” 사상	1.65 m	30.32 ha
		200년 빈도	2.27 m	74.52 ha
	마진제	태풍 “에위니아” 사상	1.24 m	90.24 ha
		200년 빈도	2.67 m	90.28 ha

6. 결 론

감사의 글

본 연구에서는 제방의 월류 및 붕괴에 따른 홍수과가 제내지로 전파되는 경우에서 물리적인 특성을 고려하여 2차원 범람해석을 수행 하였다. 실제 제방이 붕괴되어 침수피해가 일어난 지역과의 비교분석을 통한 적합성을 판단하였다. 그리고 같은 피해지역에서 제방붕괴폭 및 시간을 재산정한 후 개수된 지역에서의 200년 빈도 홍수량으로써 범람유량을 산정하여 2차원 범람해석을 수행하였다. 본 연구에서의 주요결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 하천에 대한 홍수해석은 FLDWAV모형을 이용하여 홍수류 해석을 실시할 수 있도록 구성하였고 제방붕괴폭 및 시간을 고려하여 범람유량을 산정하여 확산과 범람홍수와 모형과의 연계를 통해 제내지에서의 2차원 범람해석을 할 수 있도록 구성하였다. 대상유역인 남강 하류부 유역에서 과거 태풍 “매미”, “에위니아”를 적용하여 하도에서의 매개변수 검·보정을 수행 하였으며 빈도별 홍수량으로 1차원 홍수위 해석을 실시함으로써 제방붕괴 조건에서의 범람유량을 계산할 수 있도록 모의를 수행하였다.
- 2) 태풍 “매미” 사상에서의 제방붕괴는 월현2제이며, 태풍 “에위니아” 사상에서는 대곡제 및 마진제로 같은 사상의 제방붕괴는 동시에 일어났다고 가정하여 모의를 수행하였다. 제방 붕괴폭은 실제 측정된 값을 사용하였다. 모의결과인 제내지에서의 2차원 범람양상과 침수실적도에 대해 적합도를 분석하였다. 그 결과 월현제 92.1%, 대곡제 92.7%, 마진제 96.5%로써 모두 90%를 상회하며 이는 상당한 적합도를 보여준다고 할 수 있다.
- 3) 200년 빈도 홍수량에서의 범람 홍수과 분석을 위하여, 제방 붕괴의 가상시나리오를 생성하여 적용하였다. 모의결과에서 침수 범위 및 침수심은 태풍 “매미”나 태풍 “에위니아”에서의 침수 범위 및 침수심보다 더 큰 값을 나타내었다.

본 연구를 통해서 제방붕괴 및 월류시 침수해석을 통하여 정확한 침수구역설정이 가능하며 침수구역에 대한 적절한 예경보 및 피난대책 수립에 응용될 것으로 판단된다. 또한 국내의 홍수위험지도 작성 등의 각종 치수 및 방재계획과도 연계하여 정확도 높은 홍수정보시스템 구축에 크게 기여할 것으로 판단된다.

본 연구는 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁 시행한 건설기술혁신사업(08기술혁신F01)에 의한 차세대홍수방어기술개발연구단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- 국토해양부 (2009) 남강 하천정비 기본계획.
 건설교통부 (2006) 태풍 및 집중호우 피해조사.
 김주영, 이정규, 이진우, 조용식 (2011) 수리실험 및 수치모의를 이용한 제방붕괴 흐름해석, **한국수자원학회 논문집**, 제44권, 제6호, pp. 461-470.
 김형준, 조용식 (2005) 홍수범람모의를 위한 내외수 연계모형개발, **한국수자원학회 학술발표회 초록집**, pp. 222-222.
 박재홍, 한건연, 안기홍 (2009) 하천제방붕괴 해석모형의 개발, **한국수자원학회 논문집**, 제42권, 제7호, pp. 571-578.
 이종태, 한건연 (1989) 하천제방의 붕괴로 인한 제내지의 침수 예측모형, **한국수문학회 논문집**, 제22권, 제2호, pp. 223-231.
 장수형, 윤재영, 윤용남, 김원석 (2006) 제내지와 하도를 연계한 하천유역의 홍수유출해석 : I. 제내지 침수해석에의 적용, **대한토목학회논문집**, 제26권, 제1B호, pp. 79-88.
 최규현, 한건연 (2005a) 댐 붕괴 해석을 위한 2차원 홍수범람모형의 개발: I. 이론 및 모형의 검증, **대한토목학회논문집**, 제25권, 제2B호, pp. 135-142.
 최규현, 한건연 (2005b) 댐 붕괴 해석을 위한 2차원 홍수범람모형의 개발: II. 적용 예, **대한토목학회논문집**, 제25권, 제2B호, pp. 143-149.
 최승용, 한건연, 조완희 (2009) 구조물의 영향을 고려한 GIS기반의 제내지 홍수범람해석, **한국지리정보학회지**, 제12권, 제4호, pp. 1-17.
 한건연, 김지성, 김종찬 (2004) 하천 제방붕괴에 따른 범람시물레이션, **대한토목학회 학술발표회 논문집**, pp. 3285-3288.
 Bradford, S.F. and Sanders, B.F. (2002) Finite-volume model for shallow-water flooding of arbitrary topography. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*. Vol. 128(3), pp. 289-298.
 Brufau, P. and Garcia-Navarro, P. (2000) Two-dimensional dam break flow simulation. *International Journal of Numerical Methods in Fluids*, Vol. 33, pp. 35-57.
 Fread, D.L. (1988) The NWS DAMBRK model: theoretical background/user documentation. Office of Hydrology, National Weather Service NWS, Md.
 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.
 Jha, A.K., Akiyama, J. and Ura, M. (2000) Flux-difference splitting schemes for 2d flood flows. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*. Vol. 126, No. 1, pp. 33-42.

Schoklitsch, A. (1917) Uber Dambruchwellen, Sitznnings-breicht der Akademik der Wissenschaften, Vienna. Vol. 126, pp. 1489-1514.

Stoker, J.J. (1957) Water Waves, the Mathematical Theory wiith Applications, Wiley Interscience Publishers, New York, pp. 5-58.

Strelkoff, T., Schamber, D.R. and Katopodes, N.D. (1977) Comparative Analysis of Routing Techniques for the Floodwave from a Ruptured Dam. Proceedings of the Dam-Break Flood Routing Workshop, Water Resources Council, pp. 229-291.

Xanthopoulos, T. and Koutitas, C. (1976) Numerical Simulation of a Two-dimensional Flood Wave Propagation Due to Dam Failure. *Journal of Hydraulic Research, IAHR*, pp. 321-331.

◎ 논문접수일 : 11년 09월 26일
◎ 심사의뢰일 : 11년 09월 29일
◎ 심사완료일 : 11년 12월 06일