제내지에서 홍수위험지도의 작성

Delineation of Flood Risk Map in Protected Lowland

한건연* · ○최규현** · 백창현**

1. 서론

최근에 들어 이상기후에 따른 집중호우의 영향과 제내지의 토지이용 극대화로 인하여 홍수로 인한 재해가 증대되고 있다. 본 연구에서는 그러한 홍수피해 원인의 대부분이 하천 구조물의 붕괴와 관계하고 있음을 감안하여 붕괴된 구조물을 통한 월류 및 붕괴특성을 분석하고 이로 인해 발생한 홍수파로 인한 제내지에서의 침수위, 침수시간, 침수범위 등을 예측하고 피해예상 규모를 산정하는 홍수위험지도를 작성함에 그 목적이 있다. 이를 위해서 하도 구간에서는 1차원 부정류 해석을 통해 하천 홍수위를 예측하고, 제내지에서는 2차원 방정식에 기초한 수치해석 모형을 개발하였으며, 하천과 제내지에 대한 각각의 두 모형을 완전히 통합시킨 범람홍수모형을 통해서 하천에서의 홍수위 예측은 물론 제내지에서의 범람 홍수파의 전파특성을 정확히 예측할 수 있게 하였다. 본 연구에서는 우선 하천에서의 홍수파 해석과 제방의 붕괴양상을 고려하여 제내지 및 제외지의 수위를 산정하고, 붕괴에 따른 범람 수문곡선을 유도함으로서 제내지에서의 침수위, 침수시간, 침수범위 등을 예측하여 홍수위험지도를 작성할 수 있도록 하였다.

2. 범람홍수파 해석기법

하천 홍수해석 모형은 단일수로에서 댐 파괴류 해석을 위해 동역학적 흐름 방정식을 가중 4점 음해 유한차분 근사해법을 실시하여 그 해를 구한다. 홍수파 해석을 위한 Saint-Venant 식은 식 (1)~(2)와 같은 연속방정식과 운동량방정식으로 구성된다.

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

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

* 경북대학교 토목공학과 교수
** 경북대학교 토목공학과 박사과정

여기서, Q = 유량, A = 흐름단면적, A_0 = 저류단면적, q = 측방유입량, x = 거리, t = 시간, h = 수위, S_f = 마찰경사, S_e = 단면 확대·축소에 의한 손실경사, B = 하폭, n = 조도계수, W_f = 바람에 의한 응력, L = 지류에 의한 운동량의 변화를 나타내고 있다.

본 모형의 적용을 위해 제방의 월류 및 붕괴에 따른 홍수파가 제내지로 전파되는 경우에는 관성력의 항이 압력, 마찰력, 중력의 항과 비교하여 그 중요도가 작게 나타나게 되는 물리적인 특성을 고려하여 2차원방정식을 기본 식으로 수치해석 모형을 개발하고 이를 가상 및 실제유역에 적용하여 그 활용성을 입증하였다. 2차원 천수방정식을 x, y 방향 단위폭당 유량 q_x, q_y에 의하여 기술하면 식 (3)~(5)와 같은 연속방정식과 운동방정식으로 구성된다.

$$\frac{\partial h}{\partial t}+\frac{\partial q_x}{\partial x}+\frac{\partial q_y}{\partial y}=i \tag{3}$$

$$\frac{\partial Q_x}{\partial t}+\frac{Q_x}{A_x}\left(\frac{\partial Q_x}{\partial x}\right)+\frac{Q_y}{A_y}\left(\frac{\partial Q_x}{\partial y}\right)+gA_x\left(S_{fx}+\frac{\partial H}{\partial x}-S_{ox}\right)=\frac{ui}{b} \tag{4}$$

$$\frac{\partial Q_y}{\partial t}+\frac{Q_x}{A_x}\left(\frac{\partial Q_y}{\partial x}\right)+\frac{Q_y}{A_y}\left(\frac{\partial Q_y}{\partial y}\right)+gA_y\left(S_{fy}+\frac{\partial H}{\partial y}-S_{oy}\right)=\frac{vi}{b} \tag{5}$$

여기서, q_x, q_y = x, y 방향에 대한 단위폭당 유량, h = 수위, Q_x, Q_y = x, y 방향에 대한 전유량, A_x, A_y = x, y 방향에 대한 단면적, S_{fx}, S_{fy} = x, y 방향에 대한 마찰경사, S_{ox}, S_{oy} = x, y 방향에 대한 하상경사, i = 강우에 의한 유입량 또는 지표면 유하수에 의한 유입량, u, v = 지표면 유하수의 x, y 방향 유속, H = 수심, g = 중력가속도, b = 대상격자의 폭을 각각 나타내고 있다. 또한 토석류의 해석을 위해서는 지배방정식의 S_f 항이 단순한 에너지 경사항이 아닌 식 (6)으로 표시되어야 한다.

$$S_f=\frac{\tau_y}{\gamma_m h}+\frac{K\eta V}{8\gamma_m h^2}+\frac{n^2V^2}{h^{3/4}} \tag{6}$$

여기서, γ_m = 토석류의 단위중량, K = 저항계수, η = 동점성계수, n = Manning의 조도계수이다.

3. 홍수위험지도

홍수위험지도 작성시 향후 도입되어야 하는 위험지표의 개념은 다음과 같은 항목을 고려할 수 있다. 홍수위험수준(flood risk level)은 홍수위험지구의 선정과 재현기간에 따라 설정될 수 있다. 홍수위험지구는 대상구역에 따른 홍수피해의 가능성에 따라 개발금지구역, 개발제한구역, 개발자제구역, 개방구역 등으로 구분할 수 있다. 재현기간면에서 살펴보면 1~30년의 재현기간을 갖는 경우에는 홍수위험도가 높음, 30~100년의 경우 홍수위험도가 중간정도임, 100~300년의 경우 홍

수위험도가 낮음, 300년 이상의 경우 홍수위험도가 매우 낮음 등으로 분류할 수 있다.

홍수위험강도(flood risk intensity)는 홍수류가 가지는 피해강도를 의미하는 것으로서 홍수의 수심과 유속의 곱으로 표시된다. Metric 단위를 이용한 경우 그 값이 0.0~0.5인 경우 강도가 낮음을 의미하고, 0.5~2.0인 경우 강도가 중간정도임을 의미하며, 2.0 이상인 경우 강도가 높음을 의미한다. 홍수위험강도가 낮은 경우에 나타날 수 있는 상황은 사람은 큰 위험을 느끼지는 않으나, 건물 등에는 일부분 재산피해를 일으킬 수 있는 정도이고, 홍수위험강도가 중간정도 경우에 나타날 수 있는 상황은 실외에 있는 사람은 위험을 느끼며, 건물 등에는 상당부분 재산피해를 일으킬 수 있는 정도이다. 또한 홍수위험강도가 높은 경우에 나타날 수 있는 상황은 실내·외에 있는 사람이 위험을 느끼며, 건물, 수공구조물 등에는 파괴를 동반한 큰 재산피해를 일으킬 수 있는 정도이다.

홍수취약성(flood vulnerability)은 홍수범람에 따라 제내지 지역이 가지는 홍수에 대한 인명 및 재산에 대한 취약성의 정도를 나타내는 것으로서 이의 설정을 위해서는 하천유역별 제내지에 대한 수위-피해도 곡선의 확립이 필요하다.

그림 1은 홍수위험수준을 발생확률과 홍수위험강도에 의해 나타낸 것이다. 그림 1에서 보는 바와 같이 높은 강도를 가진 구간이 어떤 홍수사상의 발생확률과는 독립적으로 매우 위험한 영역으로 나타나 있으며, 낮은 홍수강도를 갖는 영역에서는 홍수위험수준이 홍수강도와 발생확률에 의존하는 것으로 나타나 있다.

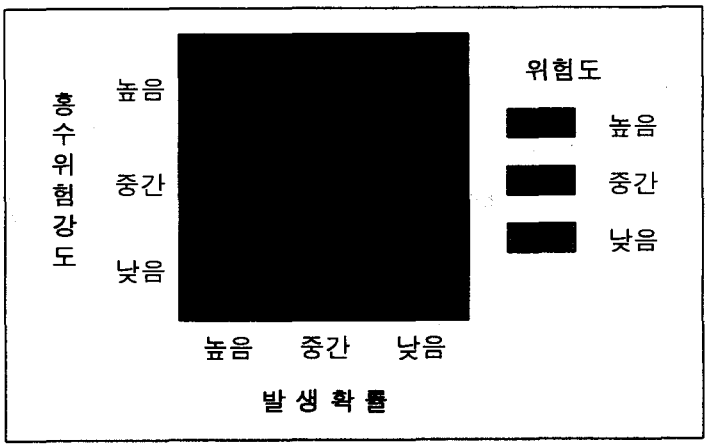

그림 1. 발생확률과 위험강도에 의해 표시한 홍수위험수준

UN의 재난구조국(United Nations Disaster Relief Office, UNDRO)에서는 침수구역에 대한 홍수위험도를 나타내는 변수로 식 (7)을 사용하였다.

$$R = H_t E V \tag{7}$$

여기서, H_t = 재현기간 rp를 가지며, 기간 t 동안에 최소한 한번 발생하는 사상의 확률을 가진 침수위험도로서 식 (8)에 의해 정의된다.

$$H_t = 1 - \left(1 - \frac{1}{rp}\right)^t \tag{8}$$

여기서, rp와 t의 단위는 년(year)이다. 또한 E는 홍수에 의해서 위험을 받는 항목들을 나타내는데, 범람구역내의 인구, 산업, 주택의 밀도, 농작물 경지면적 등 제내지가 가지는 경제·사회적인 가치를 포함하게 된다. V는 홍수범람에 따라 제내지 지역이 가지는 홍수에 대한 인명 및 재산에 대한 취약성의 정도를 나타낸다.

4. 모형의 적용

본 연구에서 구축된 모형을 실제유역인 문산천유역에 대해서, 1996년 및 1999년 홍수범람을 재현하기 위해 유출해석결과를 기초로 하여 먼저 범람모의를 실시하였다. 그림 2는 1996년 및 1999년 범람모의에 필요한 제내지에서의 격자 분포도 및 표고도를 나타내고 있으며, 그림 3~4는 대상지역에 대한 '96년 및 '99년 대홍수시 문산천 일대지역(문산천, 동문천)에 대한 범람 해석의 결과를 도시한 것이다.

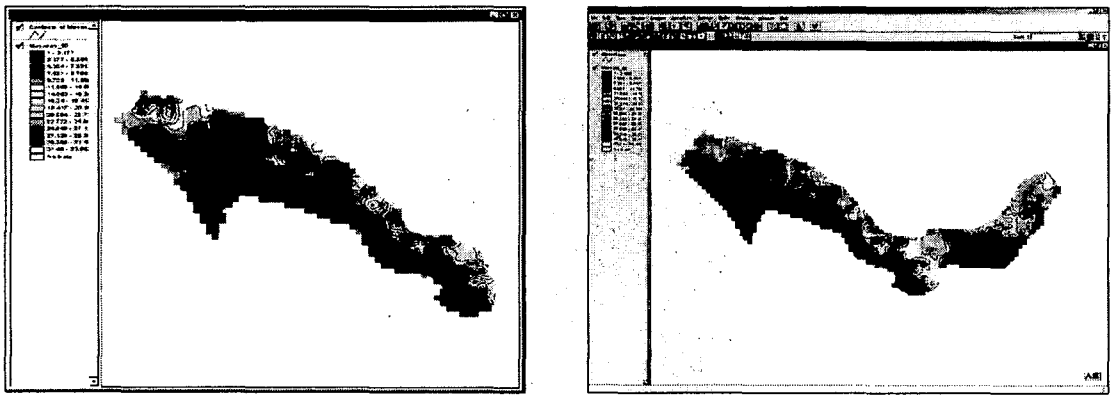

그림 2. 제내지의 표고 및 격자 분포도('96년 및 '99년 홍수모의시)

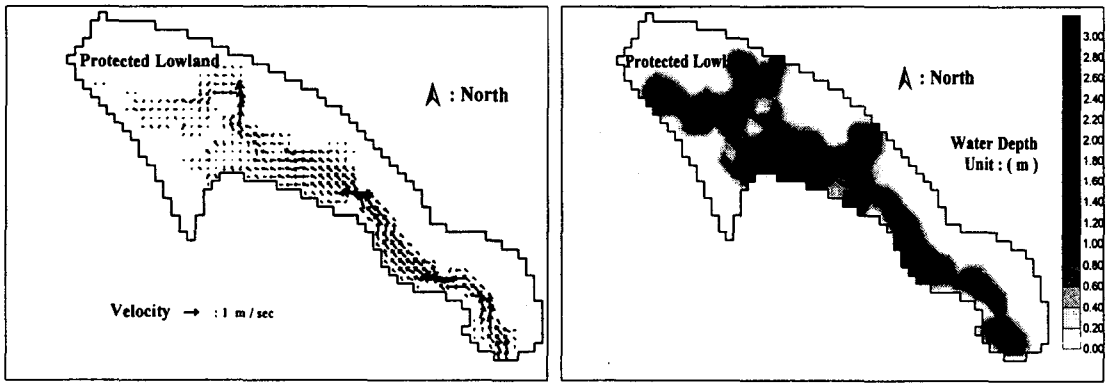

그림 3. 유속분포도 및 범람수심도('96년 홍수모의시)

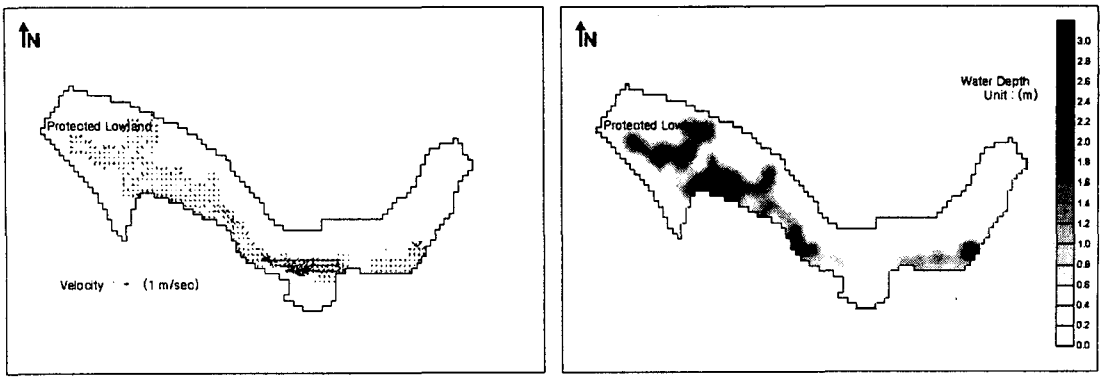

그림 4. 유속분포도 및 범람수심도('99년 홍수모의시)

홍수위험지도의 작성시 도입되어야 하는 위험지표의 개념을 홍수위험수준, 홍수위험강도, 홍수취약성 등으로 분류하여 이미 제시한 바 있다. 이중 본 연구의 모의결과를 이용하여 도시할 수 있는 지표로서 홍수위험강도를 선정하였다. 따라서, 본 연구에서는 문산천 유역에 대하여 모의한 침수수심과 침수속도를 이용하여 홍수위험강도를 표시하였다. '96년과 '99년에 대한 도시결과는 그림 5에 나타나 있다. 그림에서 보는 바와 같이 넓은 구간에서 홍수위험강도가 중간~높은 강도로 나타나 있음을 확인할 수 있었다.

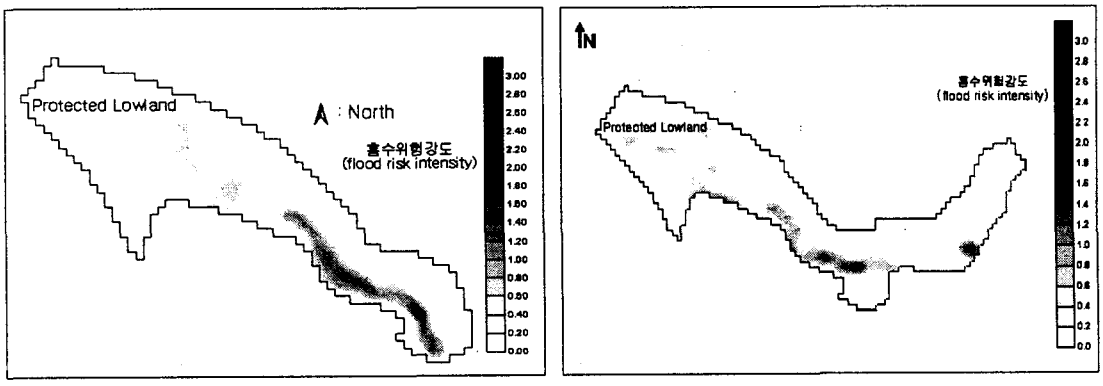

그림 5. 홍수위험지표에 의한 도시결과('96년 및 '99년 홍수모의시)

5. 결론

본 연구에서 하천에 대한 홍수해석은 Preissmann 기법에 의한 홍수류 해석을 실시할 수 있도록 구성하였고, 제내지에서의 범람해석은 2차원 모형을 적용하여 해석할 수 있도록 구성하였으며, 이들을 연결할 수 있는 수치해석 모형을 개발하였다. 연구모형에서는 제방붕괴류에 대한 잠수효과의 해석을 위한 관련방정식을 도입하여 제내지에서의 수위상승에 따른 하천으로부터의 월류량을 정확하게 계산할 수 있도록 구성하여 이를 실제 제방붕괴의 경우에 대해서 적용하였으며, 제내지

에서의 2차원 범람양상을 유속분포와 범람수심을 주요 시간대별로 계산하여 도시하였다.

본 연구모형을 1996년과 1999년 문산천 유역의 실제 제방붕괴의 경우에 대해서 적용하여 모형의 검증을 실시하였다.

(1) 제방붕괴기간 동안의 문산천에서의 홍수해석을 실시하였고, 제방붕괴에 따른 제내지 내로 유입되는 범람 홍수량을 산정하였다. 제내지에서의 2차원 범람양상의 도시를 위해 유속분포와 범람수심을 주요 시간대별로 계산하였다.

(2) 모의결과 당시의 범람수심과 범람면적의 분포 등에 있어 실측자료와 비교적 잘 일치되는 것으로 나타났다.

(3) 문산천 유역에 대하여 모의한 침수수심과 침수속도를 이용하여 홍수위험강도를 표시하였다. '96년과 '99년에 대한 도시결과는 제시하였는 바 넓은 구간에서 홍수위험강도가 중간~높은 강도로 나타나 있음을 확인할 수 있었다.

(4) 홍수위험지도 작성시 향후 도입되어야 하는 위험지표의 개념을 홍수위험수준, 홍수위험강도, 홍수취약성 등으로 분류하여 이에 대한 지침을 제시하였고, 향후 증분 위험도 해석기법에 의한 홍수재해평가기법의 필요성을 기술하였다.

6. 참고문헌

건설교통부 (1997). **문산천 하천정비기본계획 보고서**

건설교통부 (2000). **한국하천일람**

파주시 (1987). **갈곡천 하천정비기본계획 보고서**

파주시 (1989). **동문천 하천정비기본계획 보고서**

파주시 (1995). **동문천 하천정비기본계획 보고서**

파주시 (1998). **수해백서**

파주시 (1996). **수해백서**

파주시 (1999). **시정백서**

Han, Kun-Yeun, Lee, Jong-Tae, and Park, Jae-Hong (1998). "Flood Inundation Analysis Resulting from Levee-Break." ***J. of Hydraulic Research,*** Vol. 36, No. 5, pp. 747-759