

이상기후에 대비한 GIS 기반의 선택적 홍수방어 의사결정시스템 개발



김 병 식 |
한국건설기술연구원 수자원연구실 선임연구원
hydrokbs@kict.re.kr



장 대 원 |
인하대학교 토목공학과 박사과정

1. 서론

국내의 홍수에 관한 연구는 몇 십년간 지속적으로 이루어져 왔으나, 도시화와 산업화 그리고 집중호우와 같은 기상현상의 변화 등으로 인하여 매번 사전에 대비하지 못하고 사후에 대응하고 있는 현실이다. 최근과 같이 기후변화로 인한 이상 기상현상은 이러한 피해를 가중시키는 요인이 되고 있다. 이러한 이유로 최근 기후변화와 관련된 다양한 연구가 진행되면서 기상학적인 변동성을 고려, 미래에 대응하려는 인식이 고취되고 있으나, 이러한 연구가 실질적으로 홍수로 인한 재해는 막지 못하고 있는 실정이다.

일반적으로 홍수에 대응하기 위해서는 구조적(Structural), 비구조적(Non structural) 대책이

시행되어야 하지만 아직까지 한국에서는 구조적인 홍수대책에만 노력이 집중되어 있다. 이는 방재(Disaster)에 목적을 두고 구조적인 대책에 치중하고 있음을 보여주는 것이다. 특히 이상홍수의 경우, 이를 대비하기 위하여 무한정 구조적인 대책으로 설계기준을 높이는 힘들다. 따라서 미래의 기후변화 하에서 극한강우사상이 어떻게 변화하고 이에 따른 지역의 취약성을 평가하는 것이 중요하다. 이와 함께 이상홍수에 대응하기 위한 전략으로 구조적인 분석과 함께 비구조적인 접근으로 적절한 완화(Mitigation), 적응(Adaptation), 위험관리(Risk management) 전략이 필요하다. 이러한 전략 수립을 위해서는 홍수방어 대책을 수립할 때 어느 지역이 홍수에 취약한가를 파악하여 제일먼저 투자가 이루어지고 대책이 세워져야 하나 이를 객관적으로 평가할 만한 근거에 대한 연구가 부족한 실정이다.

현재 유역종합치수계획에서 치수구역단위별로 홍수피해잠재능(PFD)을 산정한 후 이를 참고로 치수안전도(시설물의 설계빈도)를 설정하여 궁극적으로 홍수방어대안을 분석 및 평가하고 있다. PFD는 특정 치수단위구역의 홍수에 대한 잠재적인 홍수피해의 취약정도를 나타내는 지수로서 홍수에 의한 잠재적인 피해 정도를 나타내는 잠재성 요소(인구, 재산, 도시화율, 사회기반시설)와 홍수피해가 발생할 가능성 및 이에 대한 방어능력 정도를 나타내는 위험성 요소(홍수피해액, 확률강우량, 하천개수율,

홍수조절용량)로 구성되며 각 요소별 분석을 통하여 A, B, C, D 4개의 그룹으로 구분하여 치수방향을 설정한다. 그러나 PFD(Potential Flood Damage)를 이용하여 유역의 잠재홍수피해능을 산정하고 있으나 이는 일정 크기 이상의 유역에서 상대적인 잠재홍수피해 정도를 파악하는데 이용될 뿐 실질적인 홍수대응에는 이용할 수가 없다.

이에반해 국외에서는 이미 재해 유형별 위험성에 대한 분석연구가 완료되었거나 국가별로 분석 시스템 개발을 진행 중에 있으며 단순히 위험성 분석으로는 재해에 대한 피해를 줄일 수 없다고 판단하고 위험성 분석의 한계를 극복하고 홍수로 인한 피해에 대해서 정성적인 예측이 가능할 수 있도록 위험성과 함께 취약성에 대한 연구가 활발하게 진행 중이다. 위험취약성평가 툴(Risk Vulnerability Assessment Tool; RVAT)은 이러한 연구 흐름에서 주요 방재 선진국에서 중점적으로 개발하는 기술이다. 국내에서는 이러한 부분에 대한 연구가 아직 초기 단계이고 적절한 분석 표준 방법도 제시되지 않은 상태이다. PFD가 어느 정도 위험성과 취약성을 포괄하고 있으나 이는 대규모 중규모 이상 단위에서 유역의 잠재피해능 정도를 나타낼 뿐, 실질적인 지역 또는 지구단위의 피해 정도 및 피해 취약성을 나타내지는 못하고 있다.

일반적으로 재난관리측면에서는 예방, 대비, 대응, 복구의 4단계로 재난관리를 수행하고 있다. 여기에서 예방은 댐, 하천 등의 구조적 대책 및 내홍수화와 같은 시설물별 대책을 의미하고, 대비는 위험성 평가 즉 홍수모형이나 통계적 방법을 통한 위험성을 근거로 대비책을 세우는 것을 의미하며, 대응은 비구조적인 부분에서 신속한 대피나 상황보고 등을 통한 인명피해 최소화 과정을 의미하고, 복구는 다음 홍수 사상이나, 다음해의 홍수에 대비하기 위한 다양한 활동을 의미한다. 우리들이 말하는 홍수 예측 기술이나 위험성 분석은 대비의 단계에서 필요한 기술이었다. 그러나 최근 전세계적으로 패러다임이 전환되면서, 대비의 단계에서 위험성 평가와 합

계 홍수에 대한 취약성 및 노출성 평가가 강조되고 있다. 중요 시설물이나, 중요 지역에 한해서는 어떠한 피해도 일어나지 않는 방재의 개념에 따른 설계가 필요하고, 어떤 지역은 시설물의 재건설 비용이 피해액보다 훨씬 커서 다른 대안이 필요할 수 있다.

이러한 측면에서 한국건설기술연구원의 “이상기후 대비 시설기준강화 연구단”은 홍수피해 발생 시 어느 지역의 피해가 더 크게 나타날 것인지를 각 지역별 홍수 취약성을 분석하고 치수 우선순위 선정 및 적정 홍수방어 대책수립의 근거를 제시할 수 있는 “GIS 기반의 선택적 홍수방어 의사결정 시스템”을 개발하였고 시스템을 이용하여 지역의 재해에 대한 강함과 약함 정도를 정량적으로 용하여, 지역 특성에 맞는 홍수대응 방고 시수립하는데 있어서 근거를 제시하고자 하였다. 이러한 근거를 제공하기 위한 연구립하는데 위험성 및 취약성 등을 용하할 수 있는 지표를 선정하고 시할 용하여 지정량적으로 제시하며 시할 통하여 지역의 중요도에 따른 선택적 홍수 방안 수립이 가능한 방안을 개발하였다. 또한 모든 자료의 활용성을 높이고 사용자 요구에 따라서 취약성의 변동 여부를 분석하기 위하여 GIS 기반의 시스템으로 구축하였다.

2. GIS 기반의 이상홍수 취약성 시스템

본 연구단에서 개발한 GIS 기반의 선택적 홍수방어 의사결정 시스템은 먼저 지역의 기후변동에 따른 영향을 고려한 이상홍수취약성시스템(Excess Flood Vulnerability System, EFVS)을 기반으로 하고 있다. 시스템은 기본적으로 이상홍수취약성지수(Excess Flood Vulnerability Index, EFVI)를 분석하는 자동화 시스템으로 홍수에 대한 취약성을 평가하기 위해서 지형-수문학적 요인(지형의 상태), 기상학적 요인(지역기후 상태), 사회-경제학적 요인(지역거주민의 상태), 홍수방어능력 요인(홍수방어시설물의 상태)의 4개 그룹으로 취약

표 1. 이상홍수 취약성 지표

대분류	이상홍수 취약성 지표		
	지표명	의 미	평가방법
기상학적 취약성	극한강우 사상빈도	강우량 80mm/hr 발생 빈도	30년간 기상관측소 기록중 강우강도 80mm/hr 이상의 발생 횟수
	극한강우 변동지수	현재와 미래의 동일 빈도강우량의 강우량 변동폭	$\left(\frac{\text{미래강우량} - \text{현재강우량}}{\text{현재강우량}} \right)$
사회-경제적 취약성	인구밀도	유역내 인구밀도	시군구 인구밀도를 소유역의 포함 면적비를 이용해서 산출평균
	재정지수	유역별 재정지수	인구밀도와 동일 방법
	고령화지수	65세 이상, 장애자 등 의존인구 비율	인구밀도와 동일 방법
수문-지형학적 취약성	홍수위험지역	홍수가 발생한 지역	침수흔적도 작성 기준
	홍수피해 규모지수	태풍 및 호우로 인한 홍수 피해액(1994-2008년 금액 기준)	2008년 기준금액으로 환산하고 소유역의 포함 면적비를 이용해서 산출평균
	유역경사도	소유역의 평균경사	소유역별 평균경사(30mX30m 격자)
	유출계수	유역의 토지이용에 따른 유출계수	토지이용에 따른 도시화율을 평가하는 것으로 유출계수로 환산
	홍수범람 예상지도	설계홍수량 초과 강수에 의한 월류 홍수범람 지역	Hec-hms, hec-Ras를 이용한 범람 해석 결과
시설물 취약성	중요시설물지수	소방서, 응급시설(대피소), 정수처리장, 하수처리장, 배수펌프장, 발전소, 병원	각 시설물별 개소수
홍수방어 취약성	하천제방 정비율	하천정비 개수율	$\frac{\text{국가하천연장} \times \text{개수율} + \text{지방하천연장} \times \text{개수율}}{\text{국가하천연장} + \text{지방하천연장}}$

성 지표를 구분한다(표 1).

이러한 취약성 지표는 일차적으로 국내의 문헌을 통하여 선택되고, 선택된 지표는 다시 세부적인 자료 구축 여부 등을 고려하여 지표를 선정하게 된다. 이러한 지표의 선정은 단순 조사를 기반으로 이루어진 것이 아니라 위험관리 측면에서 상향식과 하향식 접근법을 적용하기 적합한 지표로 선정되었다. 상향식과 하향식 접근법은 강우가 생성되는 기상적 측면과 강우가 홍수로 변화되는 지상에서의 과정을 대표할 수 있는 인자들을 이용하는 방법으로 그림 1과 같이 흐름을 나타낼 수 있다.

각 지표는 표준화와 정규화를 거쳐 1-10의 10개 등급으로 구분하였고, 각 지표별 가중치는 수자원 분야의 종사자들의 설문을 거쳐 설정하였다(한국건설기술연구원, 2008). 가중치가 고려된 각 지표별 값을 합산하고 이 결과를 이용하여 1-10 등급으로 최종

취약성 평가 결과를 제시하였다(그림 2). 특별히 그 지역(소유역)이 갖고 있는 홍수취약성이 어느 부분에서 발생했는지를 확인하기 위하여 수문-지형학적 취약성, 홍수방어 취약성, 사회-경제적 취약성, 기상학적 취약성으로 구분하여 제시를 하며, 시설물 취약성은 지수결과를 바탕으로 홍수대안을 설정할 때 이용하고자 하였다(그림 3).

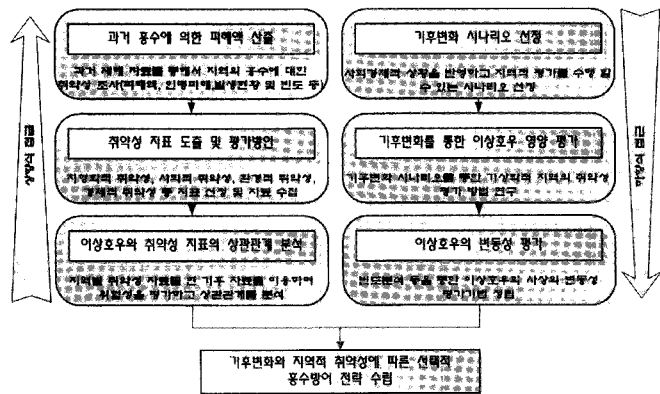


그림 1. 취약성 평가 흐름도

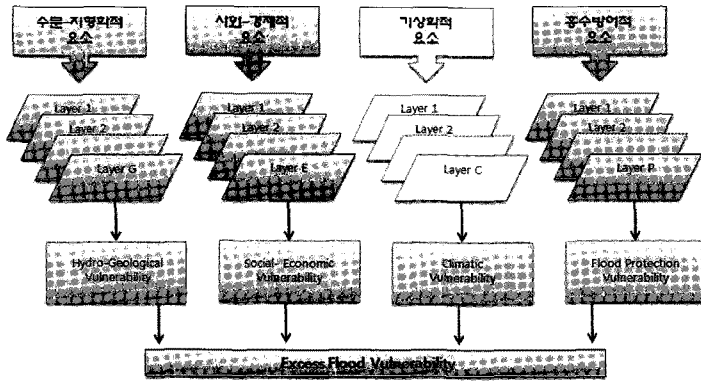


그림 2. 이상홍수 취약성 분석 시스템의 구성 요소

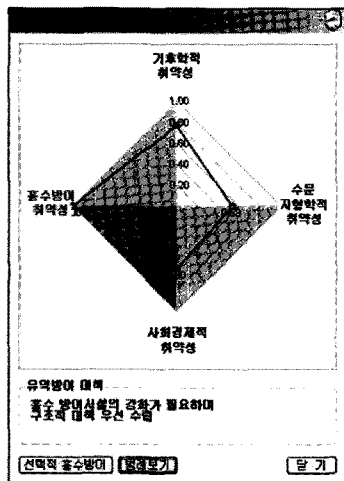


그림 3. 그룹별 이상홍수 취약성 결과 제시

2.1 하향식 취약성

하향식 취약성을 분석하기 위하여 현재까지의 극

한 강우($p \geq 80\text{mm/hr}$) 발생 횟수를 이용하고, 추가적으로 기후변화에 대한 취약성을 고려하기 위하여 극한강우변동지수를 이용하였다. 극한강우 변동지수는 RCM 강수량자료부터 산정된 재현기간별 확률강우량과 현재 자료를 이용한 재현기간별 확률강우량의 차를 이용하여 미래 기후변화와 현재의 강우량 변동폭을 이용하여 극한강우변동지

수(Extreme Volatility Index; EVI)를 개발하였다. EVI의 산출방법은 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$EVI = RL(T) - RL(t)$$

여기서, $RL(T)$ 은 재현기간이며, $RL(t)$ 는 미래 모의 값이고, $RL(t)$ 은 현재의 설계 값이다.

기후변화 시나리오는 1971년부터 2000년을 참조기간(reference period)으로 모형이 구축되었으며 100년(2001~2100)까지의 강수량을 모의한 결과를 이용 확률적 적합기법을 이용해서 편의 보정된 자료를 이용하였다.(김병식 외, 2008) 분석된 결과를 보면 한강유역의 경우, 이미 내렸던 강우사상이 극치에 가까운 값이어서 미래 모의치와의 차이가 별로 없어서 현재의 수공 구조물들에 대한 취약

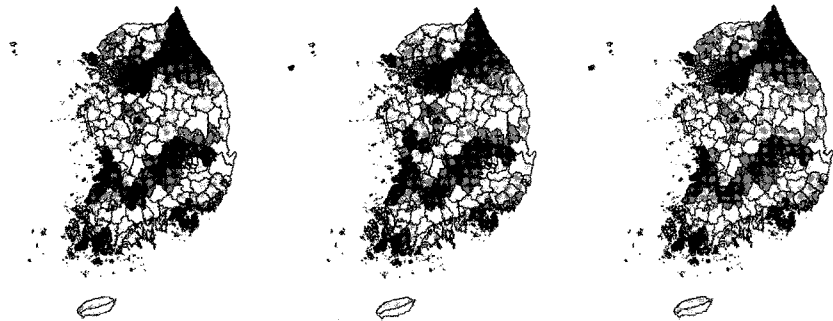


그림 4. 극한강우변동지수 결과(좌부터 100년, 200년, 500년 빈도)

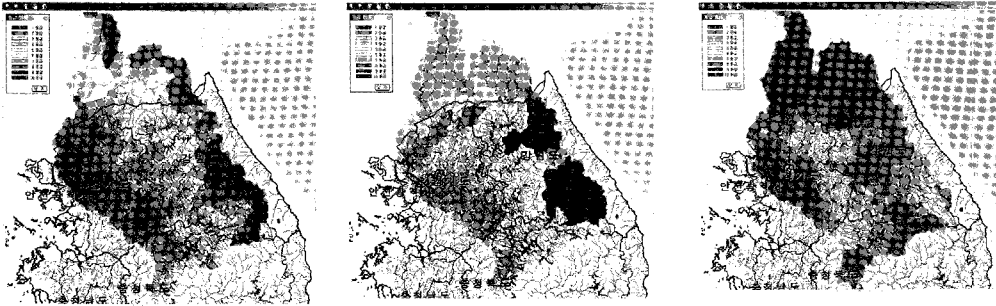


그림 5. 상향식 취약성 분석 결과(좌부터 유역경사도, 홍수피해규모지수, 재정지수)

성이 높지 않게 나타났다.

2.2 상향식 취약성

한강유역에 취약성 분석을 수행하기 위하여 사회-경제, 수문-지형, 홍수방어능력, 중요 시설물에 따른 상향식 취약성 지표 적용 결과는 다음과 같다.

2.3 이상홍수 취약성 시스템 적용 결과

한강유역에 대한 이상홍수 취약성 분석 결과, 그림 6과 같은 결과가 나타났다. 강원도 지역 외에 서울과 경기도 일부지역의 취약성이 높게 나타났다. 이러한 결과는 인구밀도 및 중요 시설물에 대한 취약성이 서울 경기도에서 비교적 높게 나타났고, 특히 안성천 유역이 취약하게 나타났다. 기본적으로 홍수와 관련있는 수문-지형학적 취약성의 가중치

홍수방어시설의 강도가 불충분하며 구조적 대책 수립	10	10등급 전체
홍수방어시설의 강도가 불충분하며 A지역에 비해 지역적 여건을 고려하여 구조적 대책 모색	9	홍수방어 취약성 > 0.75 & 수문지형학적 취약성 > 0.75
	9	A그룹을 제외한 9등급 전체
홍수방어시설의 강도가 불충분하며 홍시 수첩	8	홍수방어 취약성 > 0.75 or 수문지형학적 취약성 > 0.75 or 사회경제적 취약성 > 0.75
	8	C그룹을 제외한 8등급 전체
홍수방어시설이 불충분한 비구조적 대책에 중점	7	홍수방어 취약성 > 0.75 or 수문지형학적 취약성 > 0.75 or 사회경제적 취약성 > 0.75
	7	C그룹을 제외한 7등급 전체
홍수방어시설은 충분 비구조적 대책에 중점	6	6등급 전체
	6	6등급 전체
취약성항목 중 시계열 수첩에 따른 유역 관리	5	홍수방어 취약성 > 0.5 & 수문지형학적 취약성 > 0.5 & 사회경제적 취약성 > 0.5
	5	C그룹을 제외한 5등급 전체
	4	4등급 전체
	4	4등급 전체
	3	홍수방어 취약성 > 0.5 or 수문지형학적 취약성 > 0.5 or 사회경제적 취약성 > 0.5
	3	B그룹을 제외한 3등급 전체
	2	2등급 전체
	2	2등급 전체
	1	1등급 전체

그림 7. 취약성 등급에 따른 방어 대책

에 의해 강원도 지역은 취약성이 높은 지역임을 알 수 있다.

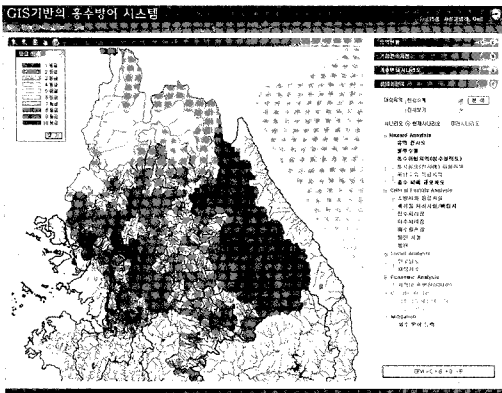


그림 6. 이상홍수 취약성 분석 결과(한강유역)

3. 선택적 홍수방어 대안 설정 및 분석

3.1 선택적 홍수방어를 위한 대상 지구 분석

홍수방어 대안 설정에서 가장 중요한 것은 '어떤 대안을 세우는 것인가'이지만 '어느 지역을 목표로 최선의 대안을 세울 것인가도 매우 중요하다. 기존의 유역종합치수계획은 유역의 최종 출구에서의 홍수량을 만족시키기 치수안전도를 설정하고 있는데

이러한 접근 방법은 실질적으로 유역 내부의 중요 시설물에 대한 중요도를 고려하지 못하는 것이다. 본 연구단에서는 EFVI의 결과를 바탕으로 유역보다 작은 지구 단위에서 적정 홍수대안을 선정하고자 하였다. 즉, EFVI값이 높게 나타난 지역을 선택하여 그 지역의 과거 피해이력 및 여러 특성을 살펴보고 이 지역을 선택하고, 유역내에 침수 흔적이 많은 곳이 선택되어 지도록 시스템을 구성하였다. 물론 여기에는 그림 7과 같이 EFVS의 1단계에서도 PFD와 유사한 가능한 대응책을 일차적으로 제시하는 것도 포함된다.

본 연구팀에서 개발한 시스템은 GIS 기반의 격자 구조로 모든 계산을 하고 있다(그림 7 참조). 그림 2는 이렇게 시스템에서 나눈 격자 한 가운데 중요 시설물이 위치해 있을 경우, 그 시설물의 중요도를 색으로 표현한 방법으로, 지역내의 위험시설물 별로 동일한 방법으로 평가되어 하천의 상류, 하류, 좌안, 우안에서 중요 시설물의 가치가 어디가 더 높은지를 상대적으로 비교 할 수 있게 된다. 이를 위하여 먼저 지구를 일정 격자로 나누어서(현재는 30m 격자 사이즈 이용) 격자내의 위험성 정도를 시설물을 이용하여 평가하였다. 여기에서 중요도를 표시하는 시설물의 대상은 소방서와 응급시설, 병원, 학교 등 홍수 발생시 효율적 대응 및 피해를 감소시키기 위한 시설과 폐기물 처리시설, 매립지, 정수처리장, 발전시설 등 환경 및 경제적 영향이 있는 시설물, 그리고 마지막으로 배수 펌프장처럼 치수 시설물이 그 대상으로 선정하였다(그림 7).

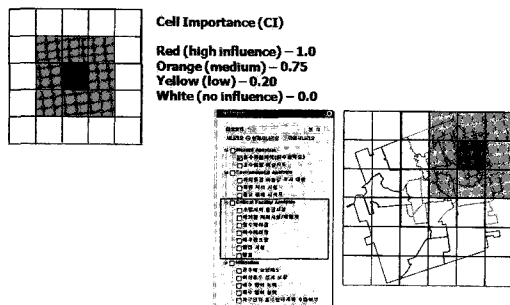


그림 8. 중요 시설물에 대한 중요도 평가

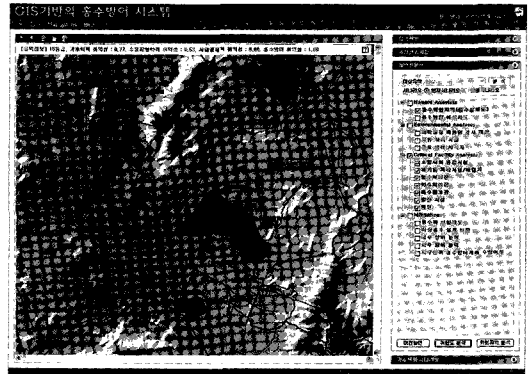


그림 9. 한강 유역중 중랑천 부근에 대한 시설물 중요도 평가 예

이러한 결과는 침수흔적도를 이용한 취약성 분석 결과일 경우, 실제로 시스템에서 취약성이 높게 나타난 유역을 선택하면 그림 8과 같이 지역으로 좁아지고 그 지역의 침수흔적도가 나타나게 된다.

그림 8에서처럼 시설물의 중요도 평가가 이루어지면 그 시설물이 과거 침수 흔적도(그림에서 파란 부분)에 있는지 여부를 판단할 수 있으며 시설물이 하천을 중심으로 어디에 위치해 있는지도 쉽게 판단할 수 있다. 이렇게 시설물 중요도 분석이 끝나면 이러한 과정을 통해서 지역 내에서도 어느 하천을, 그리고 하천의 좌안과 우안 중 어디를 선택적으로 홍수 대응해야 할지를 결정할 수 있다.

3.2 홍수대안 설정

앞에서 이루어진 홍수방어 대상 지점이 선정이 되면, 적정 홍수대안을 선정하는 과정이 필요하다.

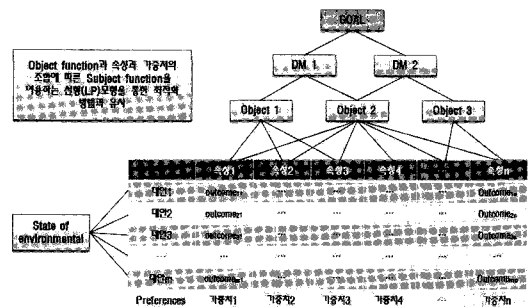


그림 10. 선택적 홍수대안 설정을 위한 구조

의사결정

실정된 가중치와 선택 기준치를 (대상으로 최적대안)을 분석합니다.

분류	수문지형학적 취약성	사회경제적 취약성	홍수방어 취약성	B/C
가중치	1.1	1.2	0.9	-
선택 기준치	0.5	0.4	0.4	1.1
대안명				
대안 1	0.1	0.6	0.6	0.8
대안 2	0.3	0	0.4	1.1
대안 3	0.2	0	0.5	1.2
대안 4	0.7	0	0.2	1.3
대안 5	0.5	0.2	0.2	1.5
대안 6	0.7	0	0.1	0.7
대안 7	0.4	0	0.3	1
대안 8 (EAP)	0.9	0.5	0	0
대안 9 (상홍수대)	0.7	0.3	0.4	1.5
대안 10	0.1	0	1	0.5

Reference 보기 닫기

그림 11. 실제 의사결정 시스템 화면

본 연구단에서는 서바이벌 방식의 조건 수렴여부에 따라 최적 대안 설정하고, 설정된 대안을 외국의 이상홍수 대응 사례와 비교하여 의사결정에 참조 사항 제공할 수 있는 방법을 선택하였다.

이 방법은 그림 3에서와 같이 어느 지역의 취약성 분석이 이루어지면 가장 큰 취약성을 감소시키는 대책부터 순서대로 생존(survival)에 필요한 임계치를 만족시키는 대안을 구분하는 방법이다.

이 방법을 적용하기 위해서 그림 9와 같은 홍수대안 설정의 기본 구조를 설정하였다. 그림에서 속성은 기상학적, 수문-지형학적, 사회-경제적, 홍수방어 취약성의 4개의 속성이 되며, 대안은 앞에서 언급한 구조적 대안과 비구조적 대안이 입력된다. 홍수대안의 입력이 끝나면 선택 기준에 따라서 대안별 만족 여부를 판단하여 최종 만족하는 대안들을 제시하는 것이 의사결정 지원 기법의 흐름이다

(그림 10). 각각의 가중치는 퍼지 다기준 의사결정 방법을 이용하여 결정하게 된다. 이렇게 선택된 항목에 대해서는 B/C 분석을 통하여 최종 대안을 선정하거나, 외국의 유사 유역의 홍수대응 사례 레퍼런스를 검색하여 의사결정권자가 적정 홍수대안을 선정하게 된다(그림 11).

4. 맺는말

본 연구단에서 개발한 GIS 기반의 시스템은 지역별 사회경제적 특성 및 홍수방어시설물, 공공시설물 등의 속성정보를 모두 포함하고 있으므로 유역내의 특정 지점이나 지역에 대해 개별적인 홍수방어 취약성을 검토할 수 있어 지역별 특성을 고려한 선택적인 홍수방어전략을 수립하는데 큰 도움이 된다.

본고를 통하여 시스템의 각 지표별 가중치를 사용자가 임의로 입력할 수 있는 부분, 과거 침수흔적 및 홍수피해액, 홍수 발생 이력 등의 조회 등 많은 부분들을 다 소개할 수는 없으나 그림 11과 같이 단순 빈도에 따른 위험성이 아닌 위험성과 실제 홍수피해를 입는 시설 및 주민들에 대한 다양한 취약성 고려를 통하여 홍수 방어 계획의 기본 자료로 이용할 수 있다는 것이 본 시스템의 가장 큰 장점이라고 할 수 있다. 또한 기후변화에 의한 미래의 기상학적 취약성을 러프하게 볼 수 있다는 점 등을 본다면 이

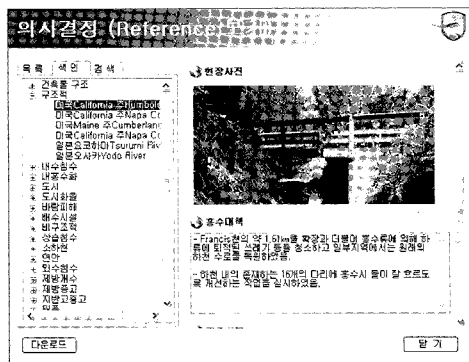
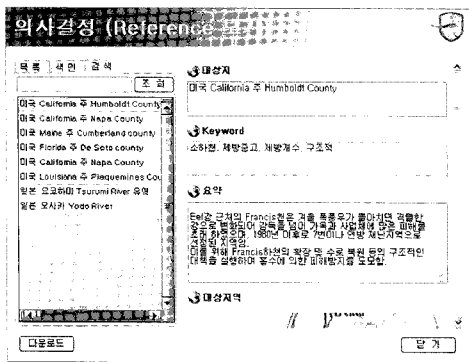


그림 12. 시스템을 통한 지식기반의 홍수대안 제시

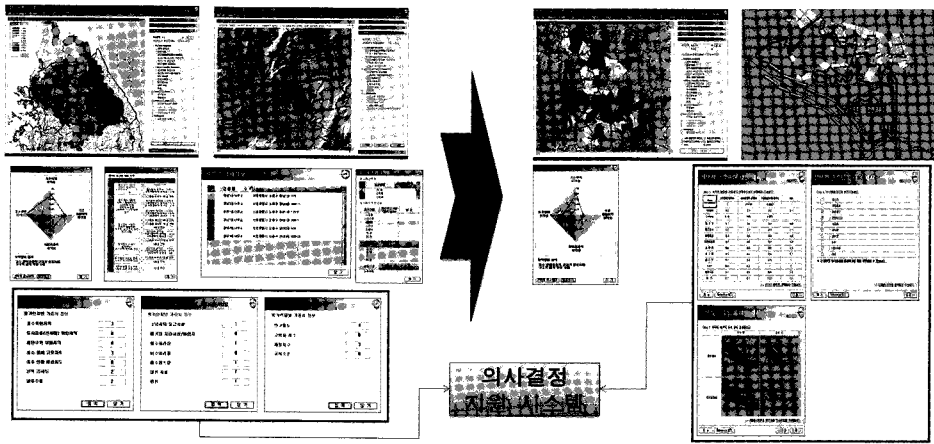


그림 13. GIS 기반의 선택적 홍수방어 의사결정 시스템

시스템의 도입으로 미래의 기후변화에 대응한 “Room for the water” 를 위한 유역 위주의 線+面+空間의 3차원 홍수방어 관리 개념, 홍수대책 패러다임이 도입될 수 있을 것이다. 즉 하천의 제방 위주의 선적개념의 홍수대책에서 선택과 집중전략을 통한 절대적으로 홍수로부터 방어할 지역과 피해를 최소화 시킬 지역을 선택하고 홍수와 관련된 지자체나 지역이 유기적으로 협력하여 홍수를 효과적 그리고 입체적으로 극복할 수 있게 될 것이다. 일반 시민들도 집안에서 인터넷과 같은 매체를 통해 재

해 상황에 따른 위험지역, 취약지역을 지도를 통해서 알 수 있게 되고, 이를 통한 안전한 대피로 제공 등 자신이 거주하는 지역에서의 홍수위험 관리정보를 제공받을 수 있을 것이다. 또한 무엇보다도 국토 계획 및 방재관련 공무원들이 실제 예상되는 위험과 취약정도를 시스템을 통해서 확인할 수 있게 함으로써 사후 복구 위주의 방재 정책이 아닌 사전의 예방, 대비 차원으로의 수요자중심의 방재행정이 이루어지게 할 수 있을 것이다. ☞