

GIS 및 신경망을 이용한 지역 돌발홍수 예측시스템 연구

Study on Regional Flash Flood Forecasting System Based on GIS and Neural Networks

신현석 * / 정휘철 **/ 박무중 ***

1. 서 론

최근 10년간 우리나라에서는 다양한 유형의 홍수로 인하여 엄청난 규모의 홍수 피해를 경험하여 왔다. 1987년 금강 유역에는 대홍수로 인하여 약 1 조원의 재산 피해를, 1990년에는 한강 하류 유역에 그리고 1994년에는 태풍 글래디스에 의한 낙동강 유역 전역에 300 mm 이상의 호우로 인해 어마어마한 홍수 피해를 경험하였다. 1996년에는 임진강 유역내 한탄강 소유역에의 600 mm가 넘는 국지적 집중호우로 인하여 연천댐이 붕괴되어 하류 지역에 막대한 홍수 피해를 주기도 하였다.

근래 1998년에는 7월 31일부터 8월 18일 까지 대기층의 불안정 및 양쯔강 유역으로부터의 습한 기류에 의하여 전국적으로 집중호우가 발생하였다. 표 1 (기상청, 1998)을 통하여 볼 때, 당시 발생한 집중호우의 특성은 지역적으로는 국지적으로, 그리고 짧은 지속시간과 높은 강우 강도를 가지고 있었다고 축약하여 정의할 수 있다.

표 1. 1998년 집중 호우 발생 현황 요약 (기상청, 1998)

날짜	지역	강우량(mm)	특이사항
7.31~8.1	지리산일원	70~316	최고 시강우량 기록 145mm (종전 118.6mm. 서울, 42.8.5)
8.3~8.4	서울·경기	30~258	서울 일강우량 211.4mm (4위) 시강우량 62.8mm(3위)
8.5~8.6	경기북부	30~620	강화지방 619.5mm
8.6~8.7	포천·일동	100~253	포천 253.5mm
8.7~8.8	서울·경기	100~212	동대문 212mm
8.8~8.9	충청북부	23~288	당진 288.5mm
8.11~8.12	속리산 보은	50~447	보은 일최다강우량 기록 447.5mm (종전 302.6mm)
8.14~8.15	서울·경기	90~214	동대문 241mm
8.15~8.17	충청남부·남부	40~227	군위 227.5mm
8.17~8.18	전라남북도	60~119	영광 119mm

였으나, 어느 때와 마찬가지로 단기간의 탁상공론으로서 그다지 특이할 만한 연구 성과 및 실효성 있고 체계적인 대책의 수립은 아직 소원하다고 볼 수 있다. 이어, 1999에 경기 북부 및 경북 지역은 또다시 극심한 집중호우로 인한 막대한 홍수 피해를 다시 경험하였다. 특히 임진강 유역에서 연천 862 mm, 포천 796 mm, 동두천 792 mm, 김포 746 mm 등의 기록적인 누가 강우량 및 집중호우에 의하여 13명의 인명 피해와 약 3천억 원의 재산피해를 경험하였다. (김 승, 1998; 이 종태, 1999)

* 부산 대학교 토목공학과 조교수 ** 부산 대학교 토목공학과 박사과정

*** 한서대학교 토목공학과 조교수

수문학적으로 홍수는 시공간적으로 호우의 지속시간 및 지역적 특성에 따라 [그림 1.]에서와 같이 **하천홍수(river flood)**, **도시 홍수(urban flood)**, **돌발 홍수(flash flood)**, 및 **해안 홍수(coastal flood)**로 크게 분류할 수 있다. 실제로 위의 홍수 유형들은 지역에 따라 복합적으로 발생하는 경우가 많으며 이러한 경우 홍수에 의한 피해는 한층 더 커지게 된다. 앞에서 살펴보았듯이, 최근 우리나라에서 96년, 98년, 및 99년에 발생한 홍수의 피해의 유형을 살펴 볼 때, 비록 복합적이기는 하였으나 지역적으로 소유역 소하천 유역에 강한 호우 강도 및 지속시간으로 인한 상류 유량의 급격한 증가 및 토사류의 증가에 기인하였음을 여러 보고서들을 통하여 알 수 있다 (이종태, 1998: 안상진, 1998: 국립방재연 1998: 이종태, 1999). 특히 96년의 연천댐 상류 지역의 집중호우로 인한 댐의 붕괴 및 98년 지리산 유역의 돌발 홍수로 인한 인명 피해, 경기도 중랑천 상류 지역의 침수, 송추 및 장흥 지역의 토사류 및 산사태로 인한 피해, 낙동강 상류 상주 지역 지천의 홍수, 보청천 지류들의 범람 등은 전형적인 돌발 홍수의 양상을 보여 새로운 패러다임을 가지는 홍수 예경보 시스템 구축의 필요성을 말하고 있다.

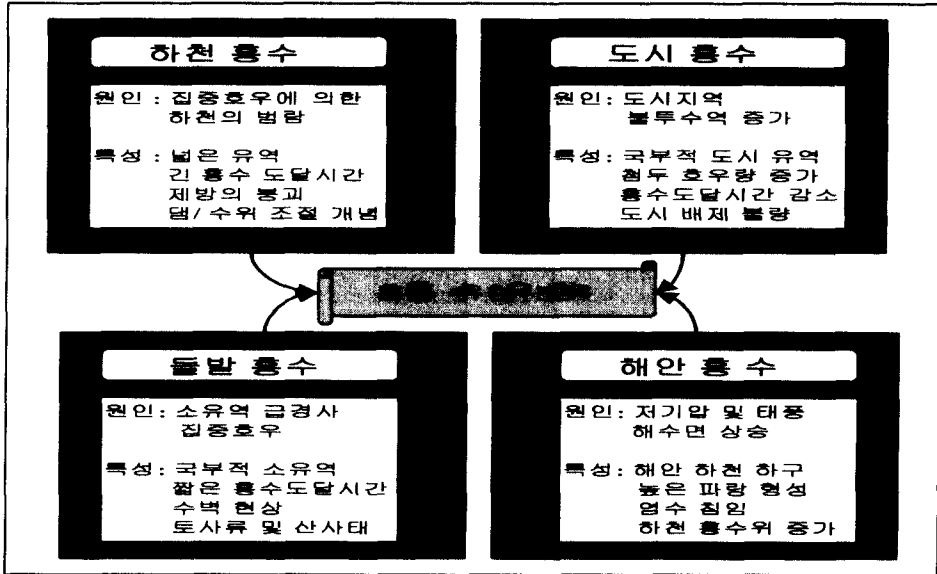
홍수의 방어를 위한 대책으로는 전통적으로 하천의 정비 및 댐/제방 등의 설치 등을 통한 구조적인 방어 대책 및 기상 예측정도의 개선, 댐운영 체계의 개선, 홍수 보험 및 적절한 홍수 예경보 시스템의 개발 등의 비구조적 대책으로 나눌 수 있다. 이 중 홍수를 미연에 방지하고 대비할 수 있는 유역 및 호우 특성에 적합하고 과학적인 홍수의 예보 및 경보 시스템의 구축은 경제적, 효율적인 측면에서 가장 중요한 요소 중의 하나이다. 우리나라 홍수 예경보 시스템의 구축은 74년 한강 홍수 예경보 시스템의 구축을 시작으로, 86년의 낙동강, 90년대 초반의 섬진강, 금강, 영산강, 그리고 90년대 후반의 안성천 및 형산강에 구축이 되어 성공적으로 운영되어 왔다고 본다. 이는 지금까지는 홍수 방어에 관한 정부 정책의 기초가 느린 홍수위 상승으로 인한 대하천 침수지역의 보호에 있었음을 알 수 있다. 그러나 앞에서 살펴보았듯이 최근 경제력의 향상 및 인간 활동 영역의 확대에 의하여 생활 및 레크리에이션을 위한 소하천 및 산악지역의 이용도가 높아지고 있어, 비록 경제적으로는 하천 홍수의 피해가 복잡적이고 클 수 있으나, 이들 지역에서의 돌발 홍수의 특성이 짧은 시간에 특히 많은 인명을 앗아갈 수 있다는 점에서 하천 홍수 예경보 시스템과는 별도의 또는 연계될 수 있는 적합한 돌발 홍수 예경보 시스템의 구축을 위한 연구나 대책의 필요성이 대두되고 있다.

본 연구에서는 소하천 및 산악지역 돌발 홍수의 과학적인 대비의 필요성이라는 기본적인 철학을 바탕으로, 돌발 홍수를 정의하고, 그리고 돌발 홍수 예경보 시스템의 구축을 위한 기본 절차 및 필수 조건을 선진국의 연구 결과를 토대로 제시하며, 그리고 돌발 홍수에 대한 지역적, 국가적인 의사 결정 시스템의 구축을 위한 기본적인 제언을 하고자 한다.

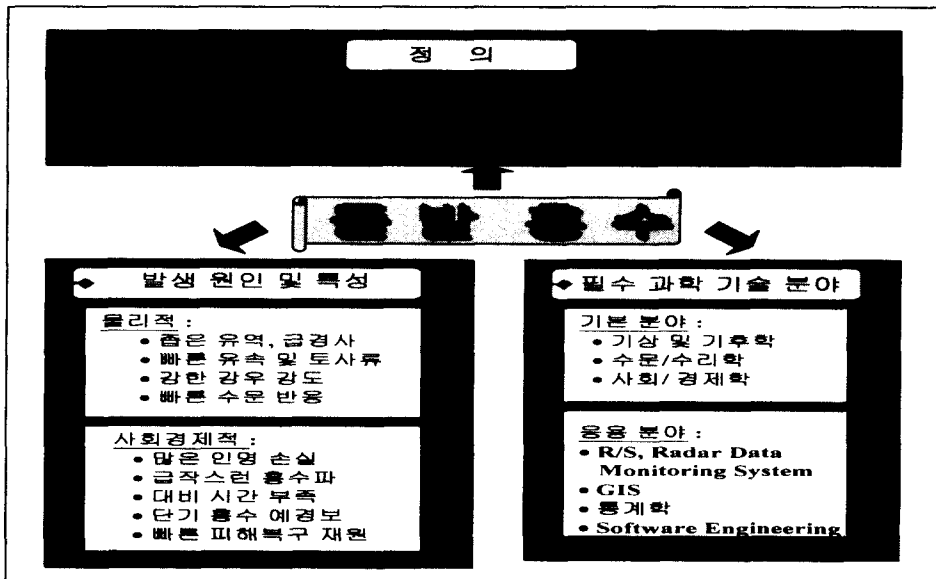
2. 돌발 홍수란 무엇인가 ?

돌발 홍수(Flash Flood)란 지역적으로 좁고 (약 100 km² 이내) 경사가 급한 유역에서 느리게 유역을 통과하거나 (slow-moving), 동일한 국지 지역 내에서 빠르게 움직이는 집중호우 (2시간 동안 100mm이상)나 태풍으로 인하여 짧은 시간 내에 (few minutes or hours) 상류하천 수위의 급격한 상승 및 상류 댐의 파괴를 유발하는 홍수로 정의할 수 있다. 일반적으로 급격한 유속의 증가로 인하여 하천의 지형이 파괴되고, 소하천 상의 교량 및 도로 붕괴 및 유실이 발생할 수 있으며, 또한 심각한 토사류(mud flow)를 유발하여 인명 및 재산의 피해 강도가 높아지게 된다. 따라서, 급작스런 홍수파로 인하여 대비할 시간적인 여유가 상당히 짧아 적게는 몇십분에서 3시간 이내인 경우가 대부분으로, 그에 따른 인명 및 경제적 손실을 증가되

게 된다. 그러므로 하천 홍수 예정보와는 다른 단기의 신속한 대응을 위한 예정보 시스템을 필요로 하게 된다. 돌발 홍수의 정의 및 특성을 구체적으로 정리하여 보면 [그림 2.]와 같다.



[그림 1.] 홍수 유형의 분류 (SHIN)



[그림 2.] 돌발 홍수의 정의 및 특성 (SHIN)

- 이러한 돌발홍수의 연구를 위해서는 그림에서와 같이 기본적으로
- 국지 소유역 강우의 예측 시스템의 개발을 위한 기상학 분야
 - 돌발 홍수 예보 및 경보 시스템의 구축을 위한 수문학 분야, 그리고
 - 돌발 홍수에 의한 사회 및 경제적 영향을 분석하고 대비 및 복구

시스템의 구축을 위한 사회/경제 분야

의 전문가들의 공동의 연구가 필수적이다. 실제로 미국의 예를 보면, 돌발홍수 예경보 자료는 미국기상청(NWS) 산하의 각 지역의 RFC (River Forecasting Center)에서 생성하며, 이를 WFO (Weather Forecasting Office)에서 취합하여 자동 강우계, Radar, 또는 인공위성 자료로부터 분석 및 예측된 공간 강우 자료를 이용하여 예보(Watches) 및 경보(Warning) 기능을 수행하게 된다. 만약 예보 및 경보가 발령되었을 때는 정부의 FEMA(Federal Emergency Management Agency)나 민간 적십자(Red Cross) 단체에서 지역별로 신속하고 효율적인 대비 및 복구 지원을 수행한다.

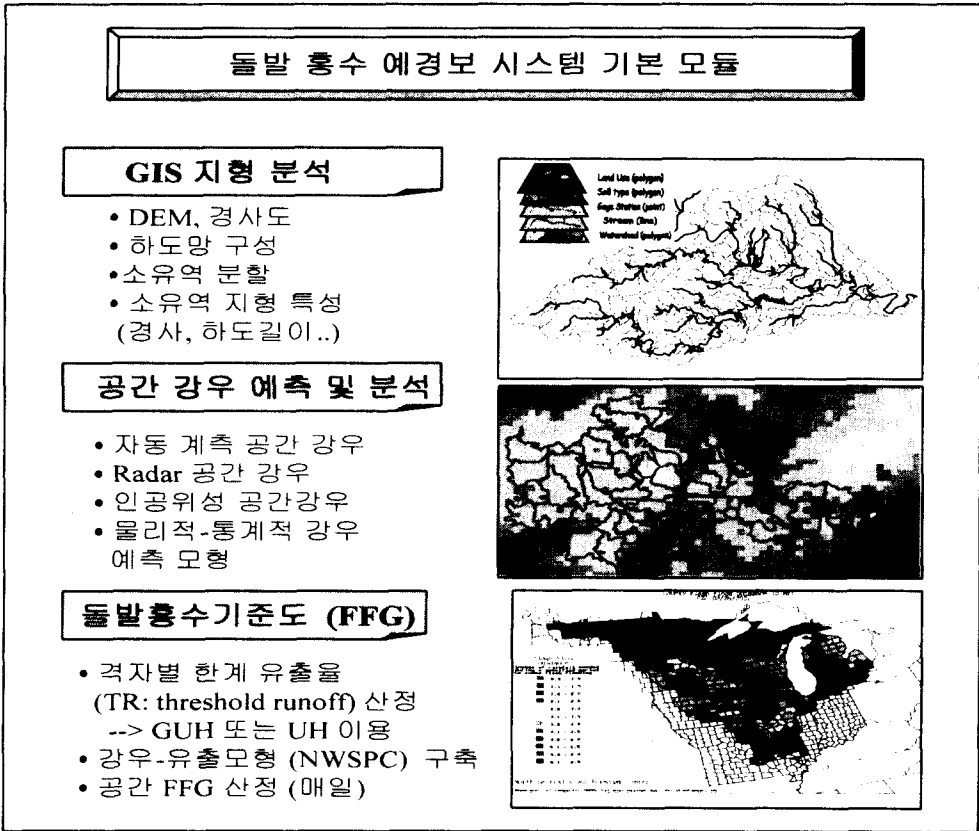
돌발 홍수는 1969년 미국 기상청(NWS)에서 “돌발홍수 주의 및 경고 프로그램(Flash Flood Watch and Warning Program)”의 개발로 인하여 그 연구 및 중요성이 인식되었으며, 전체 홍수 피해중 약 50% 이상을 차지하는 것으로 알려져 왔다. 최근의 미국에서 발생한 돌발홍수 상황을 정리하여 보면, 1976년 7월 31일 Colorado 주 Big Thompson Canyon에서 305 mm의 집중호우에 의해 140명의 인명피해와 막대한 재산피해를 기록하였으며 이때 기록된 홍수는 당시 500 - 1000년의 재현기간을 갖았던 것으로 분석되었다. 또한 1985년 8월 1일 Wyoming의 Cheyenne 시에는 3시간동안 152 mm의 집중호우가 발생하여 12명이 사망하고 6천 100만 달러의 재산피해를, 1990년 6월 14일에는 Ohio의 Shadyside시에는 1시간 30분의 101.6 mm의 집중호우로 인하여 12명이 사망하고 약 800만 달러의 재산피해를 기록하였다. 또한 1997년 7월 27 - 28일의 Colorado 주 Spring Creek의 돌발홍수는 10시간에 254 mm의 폭우를 산악 지역에 퍼부어 Poudre River 하류부 Ft. Collins 일대 및 Colorado 주립대학 일대에 큰 경제적 피해를 주었다. 1998년 여름 우리나라에서도 지리산 일원에 7월 31일부터 8월 1일까지의 집중호우는 최고 시강수량 기록 145 mm (순천)를 기록하여 우리나라 사상 최대치를 기록하였으며, 그로 인하여 대성동 계곡, 뱀사골, 피아골 등 지리산 일대의 막대한 인적, 경제적 손실을 초래하였다.

근래 들어 인간의 경제활동 영역의 확대 및 자연지역의 훼손을 통한 도시화, 그리고 지구 기후변화 및 엘니뇨/라니냐와 같은 기상 이변으로 인하여 대하천 유역에서의 홍수에 의해서 보다, 소유역에 국지적으로 발생하는 집중호우로 인한 돌발홍수에 의한 피해가 급증하고 있는 추세이다. 또한, 돌발 홍수의 피해는 돌발홍수에 대한 예방 및 대비가 되어있는 선진국일수록 인명 피해의 정도가 후진국의 경우 보다 현저하게 적은 데, 이는 소유역 돌발 홍수 예방 시스템의 구축 및 적절한 운영의 중요성을 말하여 준다고 볼 수 있다.

우리나라에서는 이러한 돌발홍수의 특성 및 대책에 관한 연구는 아직 미흡한 실정이다. 그 원인을 정리하여 보면 (1) 단기 공간 호우 예측을 위한 Hardware 및 Software 시스템의 부족, (2) 주로 경사가 급한 산악 지역의 국지적인 집중호우에 의해 발생하기 때문에, 인간의 접근성 및 이용도가 높지 않았던 과거의 돌발 홍수의 인간 생활에 미치는 피해의 심각성이 크지 않았으며, (3) 시공간적 돌발홍수와 관련된 소하천 유역에서의 지형/기상/유량 자료가 거의 전무한 실정이고, (4) 기존의 홍수 연구 및 대책이 주로 하천 홍수 중심으로 이루어져 소유역 산악지역의 홍수의 예측 및 예경보 시스템의 구축은 아직 미흡하기 때문이다. 우리나라에서는 한강 및 낙동강 유역등의 대하천 유역에 대하여 70년 이후부터 홍수 조절용 다목적댐의 건설, 하천의 정비 및 홍수예경보시스템 등을 통한 하천 홍수의 대책이 마련되어 그 실효를 상당히 거두고 있다고 볼 수 있다. 그러나 앞에서 언급하였듯이 연천, 지리산 및 임진강 유역의 홍수에서와 같이 홍수 피해가 제방의 범람 및 저지대 침수 등의 하천 홍수 보다 산악지역이나 경사지 또는 도회지에서의 돌발 호우에 의한 피해의 비중이 가중되고 있으며, 지속적인 연구 및 정부 차원의 돌발 홍수 대책 마련이 시급하다고 볼 수 있다.

3. 돌발 홍수 예측 시스템 구축 기법

앞에서 정의하였듯이 돌발 홍수의 물리적인 특성을 강한 강우 강도와 짧은 수문 반응으로 요약할 수 있으며, [그림 3]에서와 같이 돌발 홍수 예경보 시스템의 구축을 위해서는 (1) 공간 지형 자료 구축, (2) 공간 강우 분석 및 예측 모듈, (3) 돌발 홍수 기준도 (Flash Flood Guidance) 모듈, 그리고 (4) 교육 및 대책 시스템 모듈의 의 네 부분의 연구 및 개발이 필수적이다.



[그림 3.] 돌발 홍수 예경보 구축을 위한 기본적인 모듈 설명 (SHIN)

(1) 공간 지형 자료의 구축

기본적으로 돌발 홍수의 공간적인 특성이 소유역, 국지적인 수문 현상이라는 점에서 격자 유역 개념 (Gridded Watershed)을 가지고 대상 유역을 2 - 10 km²의 작은 소유역으로의 분할 및 홍수 특성 분석을 위한 자동 하도망의 해석이 필수적이며, 또한 지역의 지질도 및 토지 이용도, 그리고 식생도 등이 격자 유역에 적합하게 구축되어야 한다. 최근 GIS (Geographical Information System) 기법의 발달로 인하여 수문 분석을 위한 공간 지형 분석을 위한 다양한 프로그램 (예: ARC/INFO, MA, GRASS, IDRISI, INTERGRAPH MGE, MAPINFO 등)을 이용할 수 있다.

(2) 공간 강우 분석 및 예측

다음은 공간 강우의 분석 및 예측 기법의 연구 및 개발로 가장 중요한 요소 중의 하나이다. 공간 강우의 측정은 크게

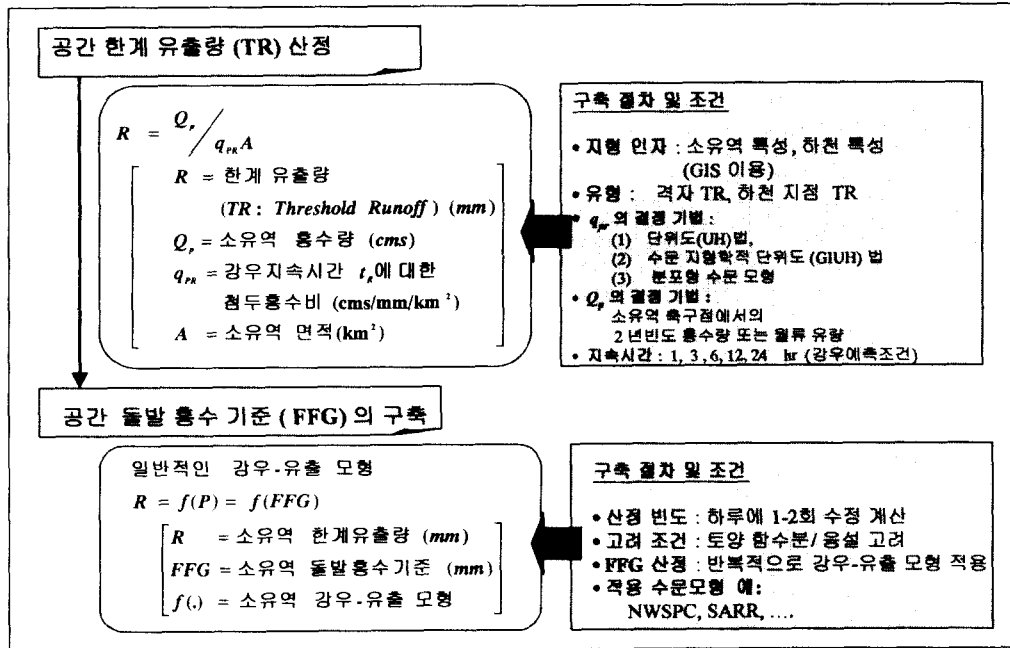
- 지상 자동 관측망,
- Satellite(인공 위성)에 의한 강우 관측, 및
- Radar에 의한 강우 관측망

의 크게 세가지 방법에 의존하고 있다. 이들 세가지 방법은 강우 관측 오차의 보정 및 보완을 위하여 서로 상호 보완적으로 운영되어야 한다.

지상 자동 관측망에 의한 관측은 그 정확도가 가정 높다고 할 수 있으나 관심 지역인 산악 지역과 같은 지역에 설치가 곤란하며 대상 유역에 고른 분포를 가지는 측정망을 구축하기 힘들다는 단점이 있다. 이는 인공위성 및 Radar 관측 자료의 보정을 위하여 필수적이다. 관측 지점 강우는 돌발 홍수 예경보를 위하여 격자 소유역을 위해 Thiessen, RDS, 및 Kriging 등의 기법을 통하여 내삽(Interpolation)되고 평균화하여 MAP(Mean Areal Precipitation)를 생성하게 된다. 인공위성 자료를 이용한 원격탐사 (Remote Sensing) 기법에 의한 강우 자료의 측정은 넓은 지역의 공간적인 실시간 강우 자료 및 토양 수분 자료도 제공할 수 있다는 장점이 있으나, 결과 자료의 정확도 및 원격탐사 자료의 해석을 위한 알고리즘의 미비 등의 단점이 있을 수 있다(이규성, 1999). Radar에 의해서는 직접적으로 HPME(High-Power Microwave Energy)를 강우 및 강설에 발사하여 얻어지는 반사파의 강도에 의하여 실시간 강우 강도를 측정할 수 있다. Radar에 의한 강우 관측 자료는 현재 약 10% 이내까지 오차를 줄일 수 있어 공간 강우의 관측에 가장 유용한 자료가 될 수 있다. 돌발 홍수 예경보를 위해서는 이상에서 관측된 실시간 강우를 이용하여 단기간(1 hr, 3 hr, 6hr, 12 hr) 공간 강우 예측을 수행하여야 한다. 이를 위해서는 중소 규모의 수치 기후 모형이나 통계적인 모형, 또는 최근의 신경망 모형 (Neural Networks)의 구축을 통하여 수행될 수 있다. 우리나라에서는 현재 6시간 예보를 수행하고 있으며 단기간 예보 정확도 및 기법 개선을 위한 활발한 연구가 수행 중에 있다. 미국에서는 Radar 및 위성 자료를 이용하여 미국 20개 WFO에서 단기간의 호우 예측을 수행하고 있다. 실제로 국지지역의 집중호우 분석 및 예측은 상당히 복잡한 자연현상이며 돌발 홍수 대책을 위해 가장 불확실성을 많이 포함하고 있는 분야로서 우리나라 실정으로는 우선 돌발 홍수의 발생에 의한 피해가 심한 지역들(예를 들면 지리산 등의 국립 공원 및 산악형 도시 지역 등)을 대상으로 하여 국지성 집중호우의 특성 분석 및 강우 관측망의 확충, 그리고 효율적인 돌발 홍수 예경보 시스템의 구축을 수행하여 나가야 할 것이다.

(3) 지역 돌발 홍수 기준도 작성

돌발 홍수 기준도 (Flash Flood Guidance Map)란 대상 소유역에서 돌발 홍수를 유발시킬 수 있는 특정 지속시간 간격에 해당하는 유역 평균 강우량 (ABR, Average Basin Rainfall)으로 정의할 수 있다 (Sweedney, 1992). 일반적으로 예측 강우 지속시간 1, 3, 6, 12, 24 시간 간격에 대하여 각 소유역 별로 1일 1 - 2회 정도 (오전, 저녁) 새로 Updating하여 구축할 수 있다. 최근에는 GIS 기법 및 공간 강우 예측 기법의 발달로 인하여 격자(Grid) 단위의 FFG가 작성되어 사용될 수 있어 국지 지역의 집중호우로 인한 신속한 돌발 홍수 예경보를 수행할 수 있을 것이다. 이러한 FFG는 산악 자연 지역을 위한 자연지역 FFG (Country FFG)와 도시 경사 지역을 위한 도시지역 FFG로 구분하여 작성할 수 있다.



[그림 4.] 돌발 홍수 기준도 (Flash Flood Guidance Map)의 구축 절차 (SHIN)

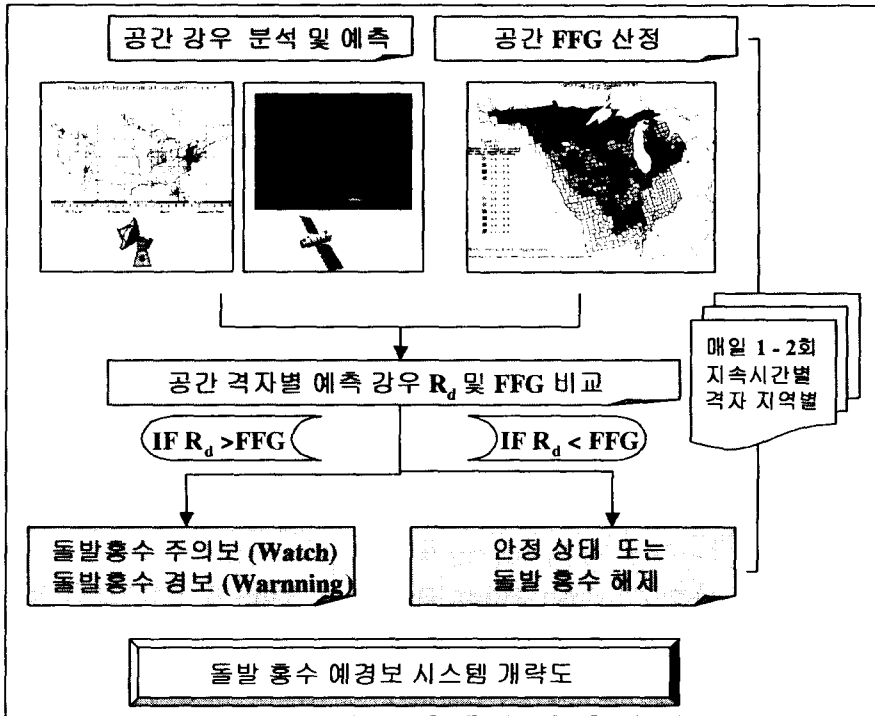
공간 분포형의 돌발 홍수 기준도는 대상유역의 각 소유역에 대하여 [그림 4.]의 절차를 이용하여 구축할 수 있다 (Carpenter 등, 1993). 먼저 지속시간별로 소하천의 독을 약간 월류시키거나 약 2년 빈도의 홍수량을 유발시킬 수 있는 유효강수량 (effective rainfall)이라고 정의할 수 있는 **한계 유출량 또는 유출심 (Threshold Runoff)**을 그림의 절차에 의하여 대상 유역의 각 소유역별로 구축할 수 있다. 이때 소유역들은 대부분 미세측 유역이므로 Snyder, SCS 법 등의 전통적인 단위도법을 사용할 수 있는 데, 이 경우는 하류단의 계측 지점의 자료를 통한 통계적으로 수문 모형의 계수들을 산정하여야 한다. 또는 계수를 필요로 하지 않고 GIS 지형 자료로 부터의 유역 및 지형 특성이나 Horton의 하천 계수들을 사용하는 수문지형학적인 기법인 GIUH (Geomorphologic Instantaneous Unit Hydrograph, Rodrigues)를 사용할 수도 있다 (Rodrigues 등, 1979, 1982). 이 기법은 모형 변수가 모두 지형 분석을 통하여 얻어지며 소하천 및 경사 하천의 동역학적인 강우-유출 관계를 모의할 수 있는 장점이 있다 (신현석, 1998, 1999).

다음은 공간 돌발홍수 기준도의 구축으로 이는 과거의 강우 및 현재의 침투에 의한 토양함수 분을 고려하기 위하여 기존의 결정론적인 (deterministic) 수문 ahud들을 사용하여 매일 1 - 2회 지속시간별로 각 소유역에 대하여 산정한다. 이 때, 산정은 그림의 개념화된 식에서와 같이 반복적으로 FFG값을 얻기 위해 수행한다.

(4) 돌발 홍수 시스템의 구축 및 운영

일반적으로 돌발홍수기준도(FFG)는 지속시간별로 매일 1-2회 정도씩 지역의 홍수 통제 및 하천 관리 기관에서 작성될 수 있는 것이다. 이 자료는 실시간으로 기상 예측 및 악기상 예경보를 담당하는 기관으로 보내어져, 이미 지점 강우/Radar/Satellite 등을 통하여 구축된 지속시간별 격자형 공간 강우 예측 자료와 비교를 통하여 돌발 홍수의 예보 및 경고를 그림 아래와 같은 요령으로 발령할 수 있

다. [그림 5.]에서는 돌발 홍수 예경보 시스템을 운영하기 위한 개념적인 절차를 도시하고 있다.



[그림 5.] 돌발 홍수 예경보 시스템 및 운영 개념도

참고 문헌

- 김 승, "98 대홍수 기간의 강우 특성 분석", 수자원 학회지, Vol. 31, No. 5, 1998.9
- 박 무중, "지리산 일원 호우 피해조사 및 분석", 행자부, 국립방재연구소,
- 오 재호, "'99년 집중호우의 강우 및 기상 특성", 수자원 학회지, Vol. 32, No.5, 1999.9
- 신 현석, "GIS 및 수문지형학적 기법을 이용한 소유역 유출 특성 분석 - 지리산/양산천 중심 -", 수자원 학회 발표회, 1999.5.
- 이 규성, "홍수 재해관리를 위한 위성 영상 자료의 현황과 전망", 한국수자원학회지, Vol.32, No. 3, 1999.5
- 이 명섭, "수문레이더를 이용한 임진강 유역 홍수 예경보 시스템 구축", 한국 수자원 학회지, Vol 33. No. 1, 2000.1
- 이 종태, "'99년 경기 북부의 홍수", 수자원 학회지, Vol. 32, No.5, 1999.9
- 이 종태, "'98년 홍수 재해 원인과 하천 관리의 문제점", 수자원 학회지, Vol. 31, No. 5, 1998.9 NIDP-98-01, 1998.10.
- Carpenter, T.M. and K.P. Georgakakos, " GIS-Based Procedure In Support of Flash Flood Guidance", NOAA/NWS/IIHR, Report No. 366.
- Rodriguez-Iturbe etc., "A Geomorphoclimatic theory of the Instantaneous Unit Hydrograph", WRR, 18(4), 877-886, 1982.8
- Rodriguez-Iturbe and J.B. Valdes, " The Geomorphologic Structure of Hydrologic Response", WRR, 15(6), 1409-1419, 1979.12.
- Sweedney, T.L. , "Mordernized Areal Flash Flood Guidance", NOAA Technical Report NWS HYDRO 44, 1992.10.