

# 돌발홍수 예경보 시스템

전 경 수 (성균관대학교 공과대학 토목환경공학과 부교수)

김 병 익 (성균관대학교 공과대학 토목환경공학과 대학원)

## 1. 머리말

최근 들어 기상 이변에 따라 단시간 동안에 특정 지역에 집중하는 국지적 호우에 의한 돌발홍수가 빈번히 발생하고 있으며, 이에 따른 위험과 손실이 증가하고 있다. 이러한 경향은 전 세계적인 것으로서 (표 1. 참조) 우리나라도 예외는 아니어서 최근에 이상 기상으로 인한 계절라성 집중 호우가 빈번해 지고 있으며, 이에 따른 피해가 커짐에 따라 돌발홍수에 대한 각별한 대책이 요구되고 있다. 돌발홍수는 국지적으로 발생하기 때문에 보통 그 피해 지역이 넓지는 않다. 그러나, 산사태와 물, 흙, 나무, 바위 등이 함께 흐르는 토석류를 동반하며 갑작스럽게 발생하기 때문에 위험의 잠재성이 매우 크며, 그 위험을 인지할 수 있는 시간 또한 매우 제한되어 있으므로 대부분의 홍수 사망자는 돌발홍수에서 생긴다는 점에서 문제의 심각성이 있다.

돌발홍수의 발생과 관련된 가장 중요한 두 가지 요소로서 강우강도와 지속시간을 들 수 있다. 또한 지형, 토양 및 지표면 조건도 중요한 역할을 한다. 넓은 의미의 돌발홍수는 댐 또는 제방의 붕괴, 또는 ice jam에 의한 물의 갑작스런 방출로 인한 것까지도 포함하나, 통상 몇 분 또는 몇 시간(대개 6시간 이내)에 걸쳐 발생하는 극단적인 호우에 의한 것을 의미한다.

돌발홍수로 인한 위험을 증가시키는 데에는 수많은 요인들이 있겠지만 다양해지는 인간의 활동과 지구물리학적 환경의 변화가 이에 큰 영향을 미치고

있다. 온실 효과로 인해 대기의 온도가 점차 상승하고 있으며 강수량의 증가가 예상되고 있다. 기후 변화에 못지 않게 인간의 활동도 돌발홍수 문제를 더욱 심각하게 악화시킨다. 인구의 증가로 인해 도시지역과 기반시설은 점진적으로 팽창하고 있으며, 산업발전과 오락 및 여가 활동을 위한 자연의 개발로 인해 인간의 활동은 필연적으로 홍수에 대해 더욱 취약한 지역으로까지 확장되고 있다.

돌발홍수에 따른 증소하천의 범람으로 인한 피해 경감 대책은 크게 구조적인 방법과 비구조적인 방법으로 나눌 수 있다. 전자는 발생 가능한 돌발호우에 대하여 그에 따른 하천유량의 시간적, 공간적 변화를 예측하고, 피해 위험이 큰 지역을 판별하여 제방 축조 등의 대책을 강구하는 것으로서 사전 예방적인 방어대책이라 할 수 있다. 후자는 돌발홍수 발생 상황에서의 실시간 피해 경감대책으로서 돌발홍수 예경보 등을 들 수 있다.

돌발홍수는 일반적으로 생명을 앗아갈 수 있는 강력한 파괴력을 내포하고 있기 때문에, 돌발홍수가 일어날 가능성이 있는 지역에서는 홍수에 대비해 가장 취약한 점이 무엇인지를 판단하는 노력, 즉 철저한 위험 분석이 필요하다. 돌발홍수 가능지역이 도시화의 결과로써 계속해서 생겨나고 있으며, 부적절한 우수 배수 시스템으로 인해 비교적 작은 강도의 도시호우가 매우 위험한 돌발홍수를 야기할 수도 있다. 여러 위험 요소들을 확인하고 이것을 개선하기 위해 노력할 지라도 종종 미처 인지하지 못한 위험요소가 남아 있을 수 있으며, 이러한 위험에 대처하기 위해

**표 1. 돌발홍수 발생사례**

발생지역	발생시기	피해규모	비고
한국, 지리산	1998년 7월, 8월	27명 사망 4백 14억원의 재산피해	지리산 계곡 야영객 큰 피해
베트남 & 태국	1999년 7월, 8월	베트남 40명 사망, 태국 6명 사망 베트남 22,000명, 태국 30,000명 대피	돌발홍수와 진흙사태
일본, 도쿄 남서부	1999년 8월	2명 사망	공휴일 밤 야영지 집중호우
베네주엘라, 카리브 연안	1999년 12월	약 50,000명 사망 가옥 90,000채 파손	몇몇 도시 진흙과 바위에 매몰
멕시코, 걸프해안	1999년 10월	약 600명 사망 약 200,000명 대피	해안지역의 큰 홍수, 돌발홍수, 진흙사태
프랑스, 돌루즈 등	1999년 11월	27명 사망	상수도등 기반시설 파괴
미국, 포트 콜린스	1997년 7월	5명 사망 1억 7백만불의 재산피해	4시간 30분간 8.41인치의 호우

적절한 예경보 시스템이 필요하다. 본고에서는 방어 대책인 돌발홍수 예경보 시스템에 대하여 미국 기상청(National Weather Service, NWS)의 사례를 중심으로 소개하고자 한다.

## 2. 돌발홍수 예경보

### 2.1 돌발홍수 예경보 시스템

종합적인 돌발홍수 예경보 시스템은 호우를 감시하기 위한 강우감지 장치들로부터 시작된다. 이러한 강우감지 장치들로부터 얻어진 데이터에 근거하여 예보관은 경보가 필요한지 여부를 결정한다. 다음으로, 한 개 이상의 통신수단을 통하여 경보를 발령하게 되는데, 이러한 통신수단 역시 예경보 시스템의 한 부분을 차지하는 중요한 요소이다. 마지막으로, 예경보를 듣는 사람들과, 그에 따른 그들의 반응이 예경보 시스템의 말단 요소를 이루게 된다.

강우감지 장치로는 우량계, 레이더, 인공위성 등이 포함되는데, 우량계 몇 개만으로 구성되는 소규모의 것으로부터 지역 사회 또는 국가 전체를 대상으로 하는 시스템에 이르기까지 그 규모가 다양하다. 많은 국가의 관계기관들이 자동감지 장치들을 설치해 두

고 있는데, 이러한 자동감지 장치들은 돌발홍수에 의한 피해 위험이 큰 상류수 지역에 설치된 우량계들과 인구밀집 지역 또는 위험지역 상류 하천에 설치된 수위계들로 구성된다. 기상 레이다는 호우가 발생하는 공간적인 범위를 측정하기 위해 또는 위험지역에 강우가 발생하고 있는지 여부를 알기 위해 사용된다. 인공위성에 의한 추정 또한 점차 경보 과정의 일부가 되어가고 있다. 자동감지 장치가 없을 경우에는 상류수(headwater) 지역 거주민 또는 담당 공무원의 전화보고를 이용하여 경보를 발령할 수 있다.

호우 사상이 감지되면 예보관은 이 호우사상이 돌발홍수 경보를 발표할 만큼 심각한 것인지 여부를 결정해야 한다. 그러나 여타 기상 경보와 비교해 볼 때, 돌발홍수 경보는 지나치게 남발되는 경향이 있다. 미국 NWS의 경우에는 행정구역 단위인 카운티별로 4시간까지 돌발홍수 경보를 발령하는 것을 표준으로 하고 있다. 침수를 일으키는 기상 시스템이 카운티의 일부 지역에 국한될 경우에도 카운티 전역을 대상으로 경보를 발령한다.

다양한 통신 시스템이 돌발홍수 예경보 시스템에 사용된다. 두 개의 별개의 통신 경로가 있는데, 하나는 강우 감지를 위한 것이고 다른 하나는 경보를 발

송하기 위하여 사용된다. 감지 시스템은 대개 전화, 라디오, 또는 위성 원격 측정에 의존하여 데이터를 기지국(base station)에 보낸다. 예보관은 기지국에 모뎀 또는 인터넷 연결을 통해 접근할 수 있다. 돌발홍수 사상이 감지되면, 예보관은 영향 지역에 경보를 보내줄 수 있는 경로를 갖고 있어야 한다. 미국에서는 NOAA(National Oceanic and Atmosphere Administration)의 기상 라디오가 돌발홍수 예보관으로부터 일반 시민들에게 직접 연결되는 통로로서, 30년이 넘게 사용되어 오고 있다. 호출기와 휴대전화 또한 비상사태 관리자에 대한 통신 연결의 중요한 부분이 되었다. 통신 시스템이 전세계적으로 팽창함에 따라 돌발홍수 예경보에서 사용할 수 있는 선택의 폭이 넓어질 것이다.

새로운 감지 시스템 또는 경보전송 시스템을 설계함에 있어서, 기존의 통신 시스템을 이용함으로써 초기비용을 줄일 수 있다. 경보 수신 대상인 일반 대중은 기존의 통신 시스템에 익숙해 있기 때문에 통신 시스템에 대하여 별도로 교육을 할 필요성도 줄어들게 된다. 돌발홍수 경보 자체가 생명과 재산을 구할 수는 없으나 개개인이 그 경보에 기초하여 대응함으로써 피해예방이 가능하게 된다. 작은 규모의 돌발홍수 시에는 운전중인 사람들이 돌발홍수 경보 발령 중임을 알고 있다는 사실만으로도 잘못된 판단을 하는 것을 예방하여 안전도를 향상시킨다. 대규모의 돌발홍수 시에는 마을에서 피난하거나 또는 깊은 강가나 협곡에 있을 때 높은 지대로 대피하는 것과 같은 보다 극적인 대응을 필요로 할 수도 있다. 돌발홍수의 위험성 및 적절한 안전수칙에 대한 교육 또한 전체 돌발홍수 예경보 시스템의 일부로서 널리 홍보되어야 한다.

## 2.2 돌발홍수 경보의 종류

미국 기상청(NWS, National Weather Service)의 돌발홍수 예경보 시스템에서 사용되는 각종 경보의 정의는 다음과 같다.

### (1) 돌발홍수 주의보(Flash Flood Watch)

어떤 지역에 돌발홍수 주의보가 발령되면 해당 지

역 또는 그 인접한 지역에 돌발홍수에 의한 침수가 발생할 가능성이 있다. 돌발홍수가 실제로 발령될 경우 또는 돌발홍수 경보가 발생될 경우에 대비하여 조치를 취할 준비태세를 갖추어야 한다. 호우가 끝난 후 6시간 이내에 침수 발생이 예상되는 지역에 발령된다.

### (2) 돌발홍수 경보(Flash Flood Warning)

돌발홍수 경보는 6시간 이내에 침수가 발생하여 생명과 재산을 위협할 위험이 예상될 경우에 발령한다. 주요 하천 주변지역뿐만 아니라 도시 및 농촌지역을 대상으로 발령될 수 있다.

### (3) 돌발홍수 공고(Flash Flood Statement)

돌발홍수 공고는 현재의 돌발홍수 상태를 알려주기 위해 내려진다. 주요 하천이나 강이 관련되어 있다면 대개 하천수위 정보를 포함한다.

(4) 도시/소규모 하천 홍수 상황보고(Urban/Small Stream Flood Advisory) - 저지대의 일부 가옥이나 도시지역 도로의 침수 등과 같이 경미한 침수피해로 인하여 일상적인 생활의 불편(생명을 위협하지 않는)이 야기될 수 있는 경우에 발령된다.

## 2.3 효과적인 예경보 시스템 설계를 위한 권장 사항(Handmer 등, 2001)

### (1) 예경보 메시지

- 시간적으로 적절하고 신뢰할 수 있어야 한다.
- 국지적이고 개별적인 의미를 가져야 한다.
- 앞을 내다보아야 한다.
- 적절한 대응책을 제시해야 한다.
- 국지적으로 믿을 만한 출처로부터 나와야 한다.
- 사회적으로 강화되어야 한다(개인 연락망을 통해).
- 위험에 처한(고립되어 있는) 사람들에게 전해져야 한다.

### (2) 예경보 시스템

- 적절한 범위를 가진 예경보 메시지 발령 방법을 사용해야 한다.
- 경보의 유효를 위해 여러 경로를 이용해야 한다.
- 계속적으로 개선되고 갱신되어야 한다.

- 결정과정과 통신의 복잡성을 피해야 한다.
- 국지적 현실에 둔감하고 너무 느린 중앙집중적 운영 체계를 지양해야 한다.
- 각 통신 단계에서 걸리는 시간을 고려해야 한다.
- 지나치게 신중한 특정인에 대한 의존성을 피해야 한다.
- 방송매체가 경보를 넓은 지역으로 전파할 것이라는 가정을 하지 말아야 한다.
- 위험에 처한 사람들이 모두 같은 것을 필요로 하는 동일 집단일 것이라는 가정은
- 사람들은 명령을 따르기보다는 결정을 내린다는 것을 염두에 두어야 한다.
- 경험에 의한 제한된 사고방식에 얽매이지 않아야 한다.

### 3. 미국의 돌발홍수 가이드선스

미국에서는 돌발홍수 예경보를 위한 지표로서 돌발홍수 가이드선스(Flash Flood Guidance, FFG)를 1970년대 중반 NWS에서 처음 적용한 이래로 계속적으로 사용해오고 있다. 돌발홍수 가이드선스는 강우의 관측과 예측과 더불어 기상 예측실(Weather Service Forecast Offices, WSFO)의 예보관들이 돌발홍수 주의보와 돌발홍수 경보를 발표하는 시기를 결정하는데 사용되어져 왔다. 돌발홍수 가이드선스는 중소 하천에 홍수를 일으키기 위해 일정시간 동안 유역에 요구되는 평균 강우량에 관한 일반적인 용어이다. 그림 1은 3시간 돌발홍수 가이드선스를 예시한 것으로서, 그림 상의 값들은 3시간 내에 돌발홍수를 일으키기 위해 필요한 강우량을 나타낸다. 돌발홍수 가이드선스의 값이 작은 지역일수록 호우 사상 중에 돌발홍수가 일어날 가능성이 크다.

#### 3.1 돌발홍수 가이드선스 관련 용어의 정의

- (1) Flash Flood: 일반적으로 6시간 이내의 극단적인 호우에 의해 일어나는 홍수
- (2) Flash Flood Guidance: 중소 하천에 홍수를 일으키기 위해 일정시간 동안 유역에 요구되는 평균

강우량에 관한 일반적인 용어이다. 이 용어는 특정한 시간 동안 특정한 지역의 인접 하천에서 홍수가 시작되는데 필요한 평균 강우를 의미하기도 한다.

(3) Areal Flash Flood Guidance: 중소 하천에 범람을 일으키기 위해 일정시간 동안 유역에 요구되는 평균 강우량. 일반적으로 공공예보지역(public forecast zone), 카운티, 또는 도시지역과 장차 고급 기상처리시스템 (Advanced Weather Interactive Processing System, AWIPS)에서 사용될 격자점을 대상으로 한다.

(4) Zone Guidance or Zone Flash Flood Guidance: 공공예보지역으로 정의되는 지역의 중소 하천에 홍수를 일으키기 위해 일정시간 동안 유역에 요구되는 평균 강우량.

(5) County Guidance or County Flash Flood Guidance: 행정구역으로서의 특정 카운티 내의 중소 하천에 홍수를 일으키기 위해 일정시간 동안 유역에 요구되는 평균 강우량.

(6) Urban Guidance or Urban Flash Flood Guidance: 도시지역으로 정의되는 지역의 소하천에 홍수를 일으키기 위해 일정시간 동안 유역에 요구되는 평균 강우량.

(7) 한계유출고(Threshold Runoff): 중소 하천의 제방이 범람할 수 있는 특정 기간동안의 호우로 인한 유출고.

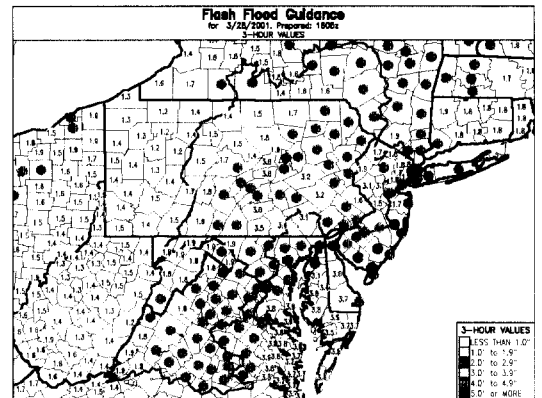


그림 1. 돌발홍수 가이드선스

예(<http://marfcws1.met.psu.edu>)

### 3.2 돌발홍수 가이던스의 구성

가이던스의 유형에 관계없이 원하는 지역에 대한 돌발홍수 가이던스를 계산하기 위해서는 돌발홍수를 일으키기 위해 필요한 유출고 및 현재의 토양 수분 상태 등 두 가지 값이 요구된다.

#### (1) 한계유출고

범람을 일으키기 위해 어떤 지역 전체에 걸쳐 요구되는 유출량을 뜻한다. 한계유출고는 유역과 하천 수로의 제반 특성들에 따라 좌우된다. 유역의 크기(면적)는 하류에 유출되는 물의 총 체적을 좌우한다. 하상 경사와 조도는 하류로 흐르는 유속을 결정한다. 급경사에서는 유속이 크고, 매끄러운 하상은 흐름에 미치는 저항이 작다. 큰 바위와 수목들을 포함하는 거친 하상은 물의 흐름에 저항하여 유속을 느리게 한다. 수로 단면의 크기와 형상은 하천 상의 각 지점에서의 통수능을 결정한다.

한계유출고의 결정방법에는, 그로부터 구하려는 가이던스의 유형(격자상 가이던스 또는 상류수 가이던스)에 따라 두 가지 종류가 있다.

#### 1) 격자 한계 유출고(Gridded Threshold Runoff)

유역의 최상류부에는 실제로 다 예측하기에는 너무 많은 상류수, 즉 소유역들이 있는 경우가 많다. 대개의 경우 이런 소유역들은 그 자체로는 거의 홍수문제를 야기하지 않는다. 그러나 하류에서는 이러한 소유역들로부터의 유출이 더해져서 홍수문제가 야기된다. 이런 소유역에 관한 한계유출고의 계산은 그 소유역의 특성을 규정하는 홍수수위, 수위-유량곡선, 그리고 단위 유량도를 구할 수 없기 때문에 매우 복잡하다. 한계유출고와 배수 유역간의 물리적 관계는 수문학적으로 중요하다. 이런 이유로 한계유출고는 실제 수문지역의 유출을 격자 상의 값으로 보간할 수 있도록 명시적으로 나타내야 한다.

유역들의 물리적 특성들(수위-유량 관계, 경사, 단위도 등)은 한계유출고를 유도하는데 있어서의 주관적인 요소를 최소화하도록 도출되어야 한다. 지리 정

보 체계(GIS)와 DEM의 사용 증가로 인해, 한계유출고는 하천예보센터의 예보 유역보다 작은 단위의 지역에 대해서 정의될 수 있게 되었다. 이런 소유역은 유역의 크기, 배수망, 그리고 수로 용량에 기초한 알고리즘에 의해 결정될 것이다. 한계유출고 계산 소프트웨어는 하천에서의 각 소유역의 지리적 위치를 결정하고, 이들 소유역에 대한 한계유출을 계산할 것이다. 상류에서 시작하여, GIS는 16-33 km<sup>2</sup>에 달하는 소유역을 단위로 모든 하천의 합류점을 지정한다. 다음에 한계유출고를 각 소유역들에 대해 계산한다. 소유역에 대한 한계유출고가 계산된 후에 수문 강우 해석 프로젝트(Hydrologic Rainfall Analysis Project, HRAP) 격자가 소유역에 썬워지고, 각 격자에 대한 한계유출고의 값이 계산될 수 있다.

#### 2) 상류수 한계유출고(Headwater Threshold Runoff)

하천예보센터 계산모형들은 예보 유역에 관한 배수 계통에 기초하고 있다. 과거에 홍수문제가 있었던 유역들은 대부분의 예측되고 있고, 특히 이들 중 상류수 유역들은 항상 예측되고 있다. 상류수에 대한 한계유출고의 계산은 관련 변수들이 잘 정의되므로 매우 간단하다. 홍수위에서의 유량은 수위-유량곡선으로부터 구해진다. 하상의 경사와 조도, 그리고 유역면적은 단위유량도 개념과 혼합된다. 단위유량도는 특정 지속 시간을 갖는 호우에 의하여 유역 전역에 걸쳐 균일한 분포를 갖는 단위 유출(고)에 해당되는 유출량의 시간변화를 나타낸 것으로서 하천유량과 관련지을 수 있다. 단위 유량도의 침투값이 사용되는데, 결국 상류수에 대한 한계유출고는 홍수위 유량을 특정 지속시간에 대한 단위 유량도의 침투치로 나눈 값이 된다. 홍수위, 수위-유량곡선, 또는 단위 유량도 침투값이 바뀔 때에만 한계유출고가 다시 계산될 필요가 있다.

GIS와 DEM이 미계측 하천에서의 상류수를 추가적으로 지정하기 위해 사용될 수 있다. 상류에서 시작하여 GIS는 모든 하천 합류점을 최소 면적 5km<sup>2</sup>의 단위로 소유역이 구분되도록 지정한다. 다음으로 각 합류점 상류의 총유역면적을 계산한다. 만약 각

합류점 상류의 총 면적이 대략 2000 km<sup>2</sup>보다 작다면, 그 지역에 대해 한계유출고가 계산된다. 한계유출고는 2000km<sup>2</sup>보다 큰 지역에서는 계산되지 않는데, 이는 강우가 공간적으로 균일한 분포를 갖는다고 보기가 어렵고, 또한 넓은 지역에 대해서는 돌발홍수 특성을 찾아보기 어렵기 때문이다. 상류수 한계유출고를 계산하기 위해서는, 만제(bankfull) 홍수 유량과 단위유량도 침투 유량이 필요하다. 유도과정에 대해서는 뒤에서 설명하기로 한다.

## (2) 토양의 수분 조건

대부분의 하천예보센터들은 토양 수분 조건을 모의하기 위해 NWS의 하천예측시스템(National Weather Service River Forecast System)을 사용한다. 이 예측 시스템(Operational Forecast System, OFS)은 관측 강우량과 기온을 이용하여 예측대상 유역에 대한 평균 면적우량과 용설량을 결정한다. 모델에서의 토양 함수 관련 매개변수에 따라 강우와 용설에 따른 유출이 구해지고, 계산된 유출량은 관측된 하천 수위에 의해 검증된다. 현재의 토양 수분 관련 매개변수들은 돌발홍수 가이던스 계산을 위해 필요하다.

현재의 토양 수분 매개변수를 불러오기 위하여 돌발홍수 가이던스 운영이 NWSRFS에 첨가될 것이다. 돌발홍수 가이던스 운영은 현재의 RFC 예보 절차의 어떠한 강우-유출 모델에서도 사용되곤 한다. 돌발홍수 가이던스 운영은 개개의 RFC 절차에 비해 몇가지 장점이 있다. 첫째, 지역 돌발홍수 가이던스는 하루에 한번이상 산출할 수 있으며, RFC가 다음날 예보 모델을 실행하기 위해 토양 함수 조건들을 저장할 필요가 없다. 둘째, 지역 돌발홍수 가이던스 계산에 용설이 포함될 수 있다. 셋째, 각각 RFC들에 의해 사용되는 강우-유출 모델(Antecedent Precipitation Index 모델(API), Sacramento Soil Moisture Accounting 모델(SACMSMA) 등)들이 상이하더라도 FFG의 적용절차는 대동소이하다. 강우-유출 모델들 간의 차이는 여러 예보 유역의 토양 종류와 토지이용의 차이에 근거한다. 게다가 RFC안에는

하나의 모델이 몇 가지 토양 종류와 토양 사용을 모의해야 한다. 넷째, 기온이 높은 하에서 적설 위로 강우가 내리는 동안에는 용설이 유출에 상당히 기여하며, 따라서 지역 돌발홍수 가이던스 값을 현저하게 감소시키는데, 특히 6시간 시간 간격에 대해 그 감소폭이 크다. 현재, 용설은 그것이 토양 함수 조건에 영향을 줄 때를 제외하고는 지역 돌발홍수 가이던스 값을 계산하는데 있어서 고려되지 않는다. 다섯 번째, 만약, 동토 또는 다른 새로운 특징이 RFC 절차에 첨가된다면, 이들은 지역 돌발홍수 가이던스를 만드는데 있어 즉시 이용될 수 있을 것이다.

## 3.3 기상 예보실에서의 가이던스 사용법

기상예보실(Weather Forecast Offices, WFO)은 돌발홍수 주의보와 경보, 그리고 그들의 책임 구역에서의 하천에 대한 특정 수위 예보를 책임지고 있다. 주의보와 경보의 발표는 하천 예보 센터에서 발표되는 격자상(카운티) 돌발홍수 가이던스 정보에 근거하고 있다. 상류 돌발홍수 가이던스 정보는 빠른 반응 하천에 대한 수위 예보를 제공하는 WFO의 수문 예보 모델에서 사용된다.

### (1) 격자상 가이던스

WFO는 수문기상학적 조건 근거에 근거하여 돌발홍수 주의보와 경보를 발령한다. WFO 예보자는 돌발홍수 가이던스 값을 관측 및 예측 강우량과 비교하여 주의보 또는 경보를 발표할지 여부를 결정한다.

AWIPS의 조작테이블을 이용하면, 격자 돌발홍수 가이던스가 WSR-88D에 기초한 강우와 같은 다른 매개변수와 함께 시각적으로 보여진다. RFC는 지역 돌발홍수 가이던스 값을 격자 상의 값으로서(격자에 걸친 평균) WFO에 보낸다. WFO에서는 돌발홍수 잠재 알고리즘은 격자 상의 돌발홍수 가이던스 값을 역시 격자 상의 값(격자에 걸친 평균)으로 주어진 관측 및 예측 강우와 비교한다. 격자상의 값으로 주어진 예측강우는 WSR-88D 격자로부터의 1시간 예측 강우가 될 것이고, WFO로부터의 격자화된 정량적 강우 예측치(Quantitative Precipitation

Forecasts, QPF)가 될 것이다.

(2) 상류수 가이던스

WFOs는 수문기상학적 조건의 근거로서 상류수에 대한 경고를 포함하는 특정지역 예보를 또한 발표한다. 특정지역 수문 예보 시스템(SSHPS: Site-Specific Hydrologic Predictor System)은 현장의 WFO 수문 예보 모델인데 이것은 관측 및 예측 강우 값을 현재의 토양 함수 조건과 일치시키는데 이것은 하천 수위 예보를 제공하기 위해서이다. SSHPS는 RFC에 의해 발표되는 모델 상태 변수 또는 상류 가이던스로부터의 현재 토양 함수 조건을 포함한다. 관측되고 예보된 강우는 WFO의 WSR-88D 레이더로부터 얻어진다. 관측된 하천 수위는 WFO에서 사용할 수 있다.

3.3 돌발홍수 가이던스 산정에 관한 기술적 고찰

(1) 한계유출고

표준 단위유량도에서 유역지체시간(basin lag)은 유역크기, 형태, 그리고 경사의 함수이다. 즉,

$$t_b = C_t \left( \frac{LLc}{\sqrt{S}} \right)^b \quad (1)$$

여기서  $t_b$ 는 유역지체시간(hour)이고, 강우의 중심으로부터 단위유량도의 첨두유량 발생시점까지의 시간으로 정의된다.  $C_t$ 는 동일 지역의 계측 유역들로부터 유도되는 계수이다.  $L$ 은 유역출구로부터 상류 유역경계까지의 주하천 길이(mile),  $L_c$ 는 유역출구로부터 유역 중심과 가장 가까운 하천 지점까지의 거리(mile)이며,  $S$ 는 유역평균 하천 경사(feet/mile)이다.  $b$ 는 상수로서 0.38로 가정하기로 한다 (Linsley 등, 1982).

지속시간  $t_r$  시간( $t_r=0.18t_b$ ) 동안 1인치의 강우가 단위 배수유역에 내릴 때의 단위유량도의 첨두유량  $q_p$ (cfs/mile<sup>2</sup>)는 다음과 같다(Linsley 등, 1982).

$$q_p = \frac{640C_p}{t_p} \quad (2)$$

여기서  $C_p$ 는 약 0.4~0.8의 값을 가지며, 계측유역으로부터 얻어지는 매개변수이다.

미계측 하천에 대한 매개변수  $C_p$ 와  $C_t$ 를 유도하는 적당한 방법은 공식 (1)과 (2)를 부근의 계측된 하천에 적용하는 것이다. 식 (1)과 (2)는 지속시간  $t_r$ 시간의 표준 단위유량도에 적용된다. 다른 지속시간( $t_R$ )을 갖는 단위유량도에서 필요한 매개변수는,  $t_R$  시간 동안 유출을 일으키는 초과강우, 지체시간  $t_{pR}$ , 그리고  $t_p$ 에  $t_{pR}$ 을 사용한 계측된 유역에서 유도된 단위도의 첨두유량  $q_{pR}$ 이다.

$q_{pR}$ 이 지속시간  $t_R$  동안의 유출(초과강우)의 단위 용적에 대한 단위면적당 단위유량도의 유출량이므로, 지속시간  $t_R$  동안의 유출 용적  $R$ 에 대한 유역 출구에서의 첨두 유량은 :

$$Q_p = q_{pR} R A \quad (3)$$

여기서  $A$ 는 유역면적(mile<sup>2</sup>)이고;  $R$ 은 유출고(inch);  $Q_p$ 는 유역 출구에서의 첨두유량(cfs)이다.

Manning의 공식을 사용하여 만제 흐름에서의  $Q_p$ 를 하천 지형특성 및 조도계수와 연관시켜 다음과 같이 나타낼 수 있다(Linsley 등, 1982). 즉,

$$Q_p = \frac{1.486 A_b R_b^{2/3} S_c^{0.5}}{n} \quad (4)$$

여기서  $A_b$ 와  $R_b$  및  $n$ 은 각각 만제 수위에서의 통수 단면적(ft<sup>2</sup>)과 동수반경(ft) 및 Manning의 조도계수를 나타내며,  $S_c$ 는 수로 바닥 경사이다.

수로 단면 폭( $B$ )과 수심( $y$ )과의 관계를 멱함수( $B = Ky^m$ )의 형태로 근사시키면, 식 (4)의  $A_b R_b^{2/3}$ 을 다음과 같이 나타낼 수 있다:

$$A_b R_b^{2/3} = B_b \left( \frac{y_b}{m+1} \right)^{5/3} \quad (5)$$

식 (1)과 (2)에서 0.18 $t_p$ 로 가정하는 표준지속시

간(standard duration)  $t_p$ 과 다른 어떤 지속시간  $t_R$ 에 대해서, 식 (2)에서의  $t_p$ 를 대신하는 조정된 지체시간  $t_{pR}$ (지속시간이  $t_R$ 인 경우에 대한 지체시간)은 다음 표현으로 주어진다.

$$t_{pR} = t_p + \frac{t_R - t_p}{4} \quad (6)$$

식 (4.5.3)을 R에 대해 풀고 위의 식 (2), (4), (5), (6)을 대입하면 다음과 같다.

$$R = \frac{0.00232 B_b S_c^{0.5}}{n A C_p} \left( \frac{y_b}{m+1} \right)^{5.3} \left[ 0.955 C_i \left( \frac{L L_c}{S^{0.5}} \right)^{0.38} + 0.25 t_r \right] \quad (7)$$

여기서 R은 만제흐름을 일으키는 한계유출고 (inch)이고,  $B_b$ 는 만제하천 폭(ft)이며,  $y_b$ 는 만제수심(ft)이다.

#### (2) 돌발홍수 가이드스 산정 알고리즘

유출고를 계산하기 위한 강우-유출 모형식을 일반적으로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$R_t = R_i + R_p \quad (8)$$

여기서  $R_t$ 는 총유출고,  $R_i$ 는 불투수지역에서의 유출고이며, 그리고  $R_p$ 는 투수지역에서의 유출고이다.

식 (8)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$R_t = P * I + f(P) * (1 - I) \quad (9)$$

여기서 P는 강우량, I는 불투수 지역의 비율이며,  $f(P)$ 는 투수지역의 강우-유출 모형으로부터 계산되는 유출고이다.

강우량 P를 돌발홍수 가이드스(FFG)로 놓으면, 식 (9)는 다시 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$R_t = FFG * I + f(FFG) * (1 - I) \quad (10)$$

총 유출고  $R_t$ 는 평시의 하천유량이 홍수시 유량에 비해 매우 작다는 가정 하에 계산된다. 유량이 상당히 큰 상류수 또는 수로상의 여타 지점에 대하여 수로단면을 홍수위까지 채우는 데 추가적으로 필요한 유출고를 한계유출고  $R_h$ 라 하며, 다음 식에 의해 계산된다.

$$R_h = \frac{Q_f - Q_i}{q_{pR}} \quad (11)$$

여기서  $Q_f$ 는 홍수량,  $Q_i$ 는 기저유량에 해당하며,  $q_{pR}$ 은 단위유량도의 첨두유량이다.

결국 상류수와 소하천에 대하여 식 (10)을 FFG에 대하여 반복계산법에 의하여 풀어서, 한계유출고  $R_h$ 를 발생시키는 강우량을 구하게 된다. 기저유량이 큰 경우에는 식 (10)에서  $R_t$ 가  $R_h$ 로 대체된다.

## 4. 맺음말

이상과 같이 돌발홍수 예경보 시스템에 대하여 미국 기상청의 사례를 중심으로 살펴보았다. 돌발홍수는 짧은 시간 동안의 집중적인 호우로 인해 발생되므로 일반적인 홍수예경보와는 달리 실측 강우에 의존한 예측에 의존하기에는 요구되는 예보 선행시간이 매우 짧다. 따라서 각 중소하천에 대하여 각 강우지속 시간별로 홍수피해가 발생할 수 있는 한계유출고를 사전에 산정하고, 강우예측에 의하여 경보를 발령하는 예경보 시스템이 미국 기상청 하천예보센터에 의하여 사용되고 있다. 단 이와 같이 신속한 예경보 시스템이 정확성을 갖기 위해서는 산정된 한계유출고의 적정성과 함께 강우예측의 정확성이 뒷받침되어야 한다. 우리나라의 경우에도 최근 들어 돌발홍수의 발생빈도가 증가하고 있는 점을 감안할 때, 이와 같은 예경보 시스템의 구축이 필요할 것으로 사료된다. ●



〈참고 문헌〉

- Carpenter, T.M., and Georgakakos, K.P. (1993). "GIS-based procedures on support of flash flood guidance." IIHR Report No. 366, Iowa Institute of Hydraulic Research.
- Handmer, J., Henson, R., Sneeringer, P., Konieczny, R., and Madej, P. (2001). "Warning systems for flash floods: Research needs, opportunities and trends." Coping with flash floods. Grunfest, E., and Handmer, J., eds., Kluwer.
- Linsley, R.K., Kohler, M.A., and Paulhus, J.L.H.. (1982). Hydrology for Engineers. 3rd Ed., McGraw-Hill.
- Sweeney, T.L. (1992). "Modernized areal flash flood guidance." NOAA Technical Memorandum NWS HYDRO 44.