

대류성 호우에 의한 돌발홍수의 이해

이은태 (경희대학교 토목건축공학부 교수)

허준 (경희대학교 토목건축공학부 석사과정)

김형수 (선문대학교 토목공학과 교수)

최근 전지구적인 기상이변으로 게릴라성 집중호우가 빈번해지고 있으며, 이에 따른 피해또한 증가하고 있다. 예를 들면, 우리 나라의 경우, 1998년 7월과 8월 지리산 일대에서 발생한 돌발홍수로 인해 27명의 사망자와 4백 14억원의 재산피해가 야기된 것을 들 수 있다. 다른 나라들도 돌발홍수에 의한 피해가 다른 자연재해에 비해 많은 인명과 재산 손실을 가져다 주는 것으로 알려지고 있다. 미국의 경우도 가장 많은 사상자를 발생하는 자연재해중에 돌발홍수가 포함되어 있다. 즉, 미국에서는 번개로 인한 사상자도 발생하지만 이는 한개의 사상에 의한 손실이고 돌발홍수는 기상과 수문학적인 특이한 조건들이 연계되어 발생한다.

대류성 폭우(heavy convective precipitation)와 관련한 물리적과정은 일반적으로 잘 알려져 있으나 그 발생조건에는 다소 심오한 기상과학이 필요할지도 모른다. 대류에 의한 대부분의 돌발홍수는 다중 대류세포(multiple convective cells)들이 형성 및 성숙되어 한 특정한 장소에서 에너지를 흠뻑리며 생성된 뇌우(thunderstorm)에 의해 발생하며, 이는 준정상성 대류호우시스템(quasi-stationary convective rain system)으로 선행강우와 수문학적 조건에 따라 2시간 또는 그 이내에 돌발홍수를 생산한다. 물론 때로는 이러한 폭우(heavy precipitation)가 몇시간 동안 지속되는 경우도 있다.

최근의 연구는 이전까지의 연구와는 달리 때때로 많은 강우를 발생시킬 수 있는 슈퍼세포들(supercells)에 대해 관심을 가지고 행해지고 있다. 슈퍼세포들의 강력하고 지속적인 상승기류(updraft)는 상대적으로 느리고 긴 생명력을 가지고 있고, 많은 양의 습한 공기(moist air)를 소유하고 있기 때문에 순간적으로 위협적인 폭우를 생성할 수 있다. Supercells은 구름모형의 수치해석을 하는 학자들의 상당한 관심을 불러 일으키고 있다. 이는 돌발홍수의 연구에 대류세포의 크기가 중요함을 의미하며, 준정상성 대류호우시스템의 중간규모(mesoscale) 과정들이 관심의 대상이 되고 있다. 그러나 아직 해결하지 못한 중요한 이슈(issue)는 대류를 명확하게 서술하는 것이 모델링에 있어 얼마나 중요한가 하는 것이다.

1. 서론

돌발홍수는 이제 전지구적인 문제이다. 이러한 돌발홍수는 수문 및 기상학적인 요소들에 영향을 받기 때문에 수문기상학적인 사상으로 정의 되어진다. 또한 여러날에 걸쳐 발생하고 홍수경감 대책이 가능한 보통의 홍수와 달리 돌발홍수는 순식간에 발생하여 모래주머니로 제방을 쌓는것(sandbagging)과 같은 준비를 하는 것이 어렵다. 다만 우리는 최악의 강우 사상으로 인한 돌발홍수에 대해 준비와 경보발령을

함으로써 생명을 보호할수 있도록 하는 것이다.

수문학은 돌발홍수의 발생에 중요한 역할을 하고, 특히, 돌발홍수 발생에 중요한 것은 (1)선행강우, (2) 지형, (3) 지표면 유출특성이다. 그러나 본 논고에서는 수문학적 관점은 논의되지 않을 진데, 이는 수문학적 측면이 중요하지 않은 것이 아니라 대류성 폭우에 의해 발생하는 돌발홍수에 대하여 논의 하고자 하기 때문이다.

중요성이 부각되고 있음에도 불구하고 토네이도나 뇌우와 비교해 아직 일관성 있는 기록이 없다. 따라서 돌발홍수를 이해할수 있는 기후학을 개발하는 것은 다소 어렵고, 돌발홍수를 정의하기 위해서 폭우 사상에 대한 기후학을 개발하는 것이 좀더 설득력이 있을지도 모른다. 그러나 이러한 사상에 대해서도 연구할만한 자료가 존재하지 않은 것으로 알려져 있어 현재의 단계에서는 우리의 지식을 이용하기에 한계가 존재한다.

2. 폭우의 지배과정 (Processes Governing Heavy Precipitation)

폭우에 대해 완벽한 이해를 하기 위해서는 응결핵에 의한 구름입자들의 형성, 구름입자들의 스펙트럼, 얼음 형성, Bergeron-Findeisen 기구 (mechanism), 응집을 통한 물입자들의 성장 등과 같은 복잡한 미시물리화학적 논제(microphysical topics)들을 알아야 한다. 물론 이러한 논제들이 중요하나 우리의 지식은 미시물리화학적 측면보다는 거시적인 측면에서 이해를 하는 것이 더 쉬울수 있다. 즉, 강수과정에 있어 미시물리학의 역할을 이해하기 위해 필요한 관측치들이 언제나 주기적으로 얻을수 있는 것이 아니라는 것이다. 따라서 이러한 미시적인 관측이 필요하다면 어떤 특별한 프로그램에 의하여 미시물리화학적 측면에 대한 관측이 이루어져야 할것이다. 좋은 예로, 편광레이더 (Polarimetric radars)나 원격탐사기법 등이 이용되어질수 있을 것이다.

우리는 현재 통상 기상관측에 의한 관측정보를 가

지고 기상예측을 수행하고 있다. 이러한 관측치들은 단순히 큰 강우강도와 장기간의 지속기간을 가진 폭우가 쏟아지고 있음을 예보해주는 것이다. 이러한 예보가 가치가 없는 것처럼 보일수도 있으나 세밀하지 않은 자료를 가지고 수행할수 있는 예보이며, 이는 우리가 이러한 예보에 집중함으로써 익숙해진다는 것이다.

2.1 강우강도

강우강도는 어떤 한 호우(a storm)가 수증기를 포함하고 있는 비율에 달려있다. 앞서서도 언급하였듯이 대류성 호우는 짧은시간동안 많은 양의 수증기를 포함하기 때문에 엄청난 돌발홍수와 관련되어진다. 간단한 예를 들면, 물의 밀도는 $1g/m^3$, 깊이는 18km 그리고 10km의 반경을 가진 대류세포가 약 $5.75 \times 10^{12} g$ 의 응결수를 내포하고 있다고 하자. 만약 이 물이 모두 강수로 전환되고 20분동안 대류세포로부터 벗어나 지상으로 떨어진다면 시간당 강수율은 약 $18 \times 10^6 m^3/h$ 가 된다. 또한 대류세포가 10m/sec의 속도로 움직이면서 전지역에 걸쳐 20분동안 균일하게 물을 뿌린다면 강우강도는 13mm/hr가 된다. 이는 큰 강우강도는 아니지만 엄청난 양의 응결수를 나타내고 있음을 보인다. 일반적으로 약 25mm/hr 정도의 강우강도는 약간 크다고 여겨지나 돌발홍수는 훨씬 더 큰 강우강도를 나타내며, 비대류성 강우는 그렇게 빨리 물을 만들어내지 못하므로, 비 대류성 강우 하에서는 이러한 강우강도에 도달하기 매우 어렵다.

대류성 호우의 물의 질량 플럭스(water mass flux)의 중요한 인자중 하나는 유입공기의 수분함수비 (moisture content)이다. 주어진 상승기류의 속도하에서 혼합비(mixing ratio)가 커질수록 수증기의 질량 플럭스(water vapor mass flux)는 커진다. 또한 강한 상승기류를 가진 대류성 호우는 수증기의 질량 플럭스가 약한 상승기류보다 더 큰 수증기의 질량 플럭스를 가진다. 대류성 호우의 이러한 두 가지 측면은 대류의 발달에 따른 주변의 조건들로부터 추론할 수 있다. 이것을 확장하면, 상승기류의 속도는 주변의 대류성 가용 잠재 에너지(Convective Available

Potential Energy, CAPE)와 상당히 연관되어 있다고 할 수 있다.

여기서,

$$CAPE = g \int_{LBC}^{EL} \frac{T'_v - \bar{T}_v}{T_v} dz \quad (1)$$

여기서, g 는 중력가속도이고, T_v 는 가상온도(virtual temperature) (in deg K)이며, T'_v 는 상승기류의 공기덩어리(updraft parcel)에 대한 속성을 나타내고, \bar{T}_v 는 주변의 속성을 나타낸다. LFC(Level of Free Convection)는 자유 대류성의 고도를 나타내고, EL(Equilibrium Level of updraft parcel)은 상승기류의 공기덩어리에 대한 평형고도를 나타낸다. 다른말로 CAPE는 상승기류의 공기덩어리에 대하여 적분한 총부력(the integrated net buoyancy)이라 할 수 있다.

CAPE와 유입공기의 혼합비는 상호 관계가 존재한다. 즉, 혼합비가 커질수록 대류성 호우의 CAPE는 큰 값을 갖는다. 이것은 낮은 고도에서 혼합비가 증가함에 따라 습윤(moist)과 건조 단열의 체감율(dry adiabatic lapse rate)에 대한 차이가 증가하기 때문이다. 공기덩어리(parcel)에 대한 이론은 상승기류의 최대속도(maximum updraft speed)와 CAPE의 관계를 다음과 같이 단순하게 보여준다.

위의 식에서 보통 10m/s의 상승기류 속도를 얻으려면 50J/kg의 CAPE가 필요함을 알 수 있다. 보통

$$W_{me} = \sqrt{2 \times CAPE} \quad (2)$$

CAPE가 1500J/kg이면 상승기류 속도는 50m/sec를 초과하는 것이 이론적으로 가능하므로 상승력이 강하면 많은 양의 수증기를 처리할 수 있음을 알 수 있다.

강수의 효율성(precipitation efficiency)은 호우속의 수증기와 강수로 내린 물의 비로 정의된다. 이 비율은 초기의 대류성 호우(convective storm)에 있어

서는 분모가 0이되어 그 값에 의미가 없고, 호우의 말기에는 상승기류의 에너지가 감쇄된 후에도 강수가 계속된다(그림 1). 따라서 강수의 효율성은 대류 시스템의 수명에 대하여 시간적분함으로써 의미를 갖는다(Fankhauser 1988). 그리고 대류성 호우를 떠난 수증기가 강수로 떨어지지 않았다면 이는 증발을 의미한다. 사실상 강수의 효율성에 영향을 주는 중요한 요소는 호우 주변의 상대습도이다. 주변이 거의 포화 상태라면 증발은 감소하고 건조하면 증발은 발생한다. 따라서 돌발홍수시에 강수의 효율성은 100%가 될 것이며, 단순히, 강우강도는 수증기의 질량 플럭스와 강수의 효율성을 곱함으로써 표현될 수 있다.

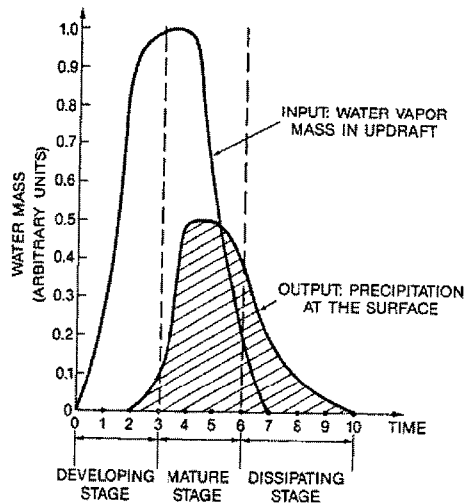


그림 1. 물분무설비 설치도

2.2 강우의 지속기간

대류의 토대는 대류세포인데 이는 보통 20분의 수명을 가지고 있고 만약 대류성 호우가 20분이상 지속된다면 이는 한 개 이상의 세포로 구성되어 있음을 의미한다. 즉, 돌발홍수의 잠재성을 가진 강우가 오랜 동안 지속된다면, 이 대류성 호우는 다중 세포의 특성을 지니고 있다는 것이다. 돌발홍수는 보통의 뇌우로부터 시작된다. 즉, 보통의 뇌우가 점차적으로 돌발

홍수의 잠재성을 띄게 되는 것인데, 이는 대류성 호우가 한 장소에서 계속해서 형성되어 최대의 강우강도를 소유하게 되는 것이다(즉, 준정상성(quasi-stationary)이 되는 것이다). 이러한 일련의 대류세포들은 '가차 효과'(train effect)라고 불리운다.

대류성 호우는 개체들(objects)이 아닌 과정(processes)으로써 이해하여야 한다. 어떤 개체라는 것은 만질수 있고 어떤 흐름속에서도 변하지 않으며 흐름에 따라 흘러가는 것이다. 즉, 이러한 흐름, 움직임을 우리는 이류(advection)라고 한다. 그러나 대류성 호우는 그 호우속에서 흐르는 일련의 공기 덩어리들(parcel)으로 이루어지는데 이것이 바로 과정을 의미한다. 즉, 새로운 세포들이 유입되고 오래된 세포들은 감쇄(dissipation or propagation effect)

또는 전파효과의 과정을 반복함으로써 대류성 호우가 형성되어지는 것이다. 즉, 대류성 호우의 움직임은 이류와 전파효과의 조합으로 발생하는 것이다.

총강우량에 대하여 언급하면, 총강우량은 평균강우강도 곱하기 강우지속기간이다. 그리고 폭우는 큰 강우강도 또는 긴 강우지속기간을 가질 때, 아니면 큰 강우강도와 긴 강우지속기간을 동시에 가질 때 발생한다.

3. 수퍼세포와 폭우

오랜 동안 수퍼세포들이 돌발홍수의 잠재성을 내포하고 있다고 생각하지 않았었다. 원래 수퍼세포들은 토네이도 발생시의 호우와 관련하여 연구되어졌었다. 즉, 수퍼세포들은 보통 상당한 증발로 특징지어질 수 있는데 이것이 토네이도 발생에 주요 역할을 하기 때문이었다. 그러나 수퍼세포를 상징하는 강한 상승기류(40~50 m/s를 초과하는)는 수증기 생산의 거대한 프로세서들이며, 수퍼세포들의 강우강도가 상당히 큼을 나타내고 있다.

토네이도 발생시의 수퍼세포들은 주변 바람의 속도가 크기 때문에 빨리 움직이는 반면, 평상시의 수퍼세포들은 보통의 호우시 보다도 더 느리게 움직인다고 알려져 왔으며 이는 전파의 결과라고 알려져 오고

있다. 이런 느린 움직임이 강우 발생에 중요한데 돌발홍수의 잠재성과 수퍼세포의 연계성을 생각하지 못하였었다. 수퍼세포와 돌발홍수가 중요한 연관이 있음을 인식하게 된 것은 수퍼세포들이 토네이도 발생시에만 생기는 것도 아니며, 모든 수퍼세포들이 토네이도를 생산하지도 않는다는 데서 비롯되었다. 이러한 인식과 더불어 수퍼세포와 돌발홍수의 발생에 대한 관심이 증가되고 있다.

4. 중간규모의 대류 시스템

대류가 중간규모 시스템속에 편성되어 있음은 과거에도 알려져 있었으나 이는 지구정지궤도에 있는 인공위성(geostationary satellite)에 의해 보다 더 명확히 이해하게 되었다. Maddox(1980)가 처음으로 중간규모 대류 집합체(Mesoscale Convective Complex, MCC)의 존재를 지적하였고 Houz 등(1989)은 MCCs는 MCCs와 연계되어 선형구조나 원형패턴으로 조직된 대류시스템들의 한 그룹인 중간규모 대류시스템들(Mesoscale Convective Systems, MCSs)의 스펙트럼중 가장 큰 것들을 의미한다고 하였다. 좀더 확장하면, 대류 조직의 기하학은 관측 시스템에 의해 영향을 받는다고 하였다. 즉, 높은 고도에 있어 차가운 구름막(cold cloud shield)은 거의 원형패턴인데도 레이더(radar)는 어떤 MCC내의 강수패턴을 선형으로 인식한다는 것이다. MCCs와 MCSs가 일반적인 대류 형태이고, 고립된 대류는 상대적으로 드물며 전형적으로 돌발홍수를 자주 발생시키지는 않는다. 많은 지역에서 온난한 계절에 오는 강우의 대부분은 MCSs과 연관이 있다.

북미에서 많은 돌발홍수 사상들이 일반인들이 생각한것과는 달리 밤에 발생하고 있으나 밤에 돌발홍수와 MCSs의 발생이 동시에 일어나지는 않는다. 오히려 이 둘은 최대 풍속이 발생하는 야간 경계층(nocturnal boundary layer wind maximum)에 의해 연결되어진다. 온난한 계절의 야간 대류는 수퍼세포를 포함하고 있는 고립된 대류성 호우들로 전형적으로 낮기간 동안 발전한다. 일몰과 주간에 더워진

열이 감소함에 따라 태양열로 혼합된 경계층은 감소하고 그 위의 표면층이 혼합된 경계층으로부터 분리되어진다. 이론과 관측치 모두 이러한 분리가 최대 풍속을 갖는 야간 경계층의 상승을 초래하는 관성 진동(inertial oscillation)의 발전이 촉진된다는 것을 제시하였다. MCSs는 강하고 지속적인 대류를 촉진 시킴으로써 밤에 발생하는 돌발홍수의 빈도에 영향을 끼치는 요소임이 확실하다.

5. 맺음말

본 논고에서 대류성 호우에 의한 돌발홍수를 이해

하기 위하여 간단히 내용을 서술하였다. 우리나라에서도 1998년의 돌발홍수를 계기로 관심과 연구가 진행되어지고 있다. 그러나 한번 발생하면 많은 재산과 인명피해를 줄수 있는 돌발홍수에 대하여 수문 및 기상학적 측면에서 보다 더 연구가 이루어졌으면 하는 바람이다. 좁은 국토에서 많은 사람들이 돌발홍수의 상습지역에 몰려 살수 있고 또는 레크레이션이나 위락시설등을 이런 상습지역에 건설할 수도 있어 사전에 준비하고 예방하기 위해서는 지속적인 관심이 중요하다 할 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

- [1] Flash Flood-Producing Convective Storms : Current Understanding and Research - Charles A. Doswell III
- [2] Journal of Hydrologic Engineering (1997)v.2 no.3 - Study of Potential Flash Floods by Kriging Method
- [3] Warning systems for flash floods (2001) Handmer.J,Henson R, Sneeringer P, Konieczny R, Madej P
- [4] Modernized areal flash flood guidance (1992) - NOAA Technical Memorandum NWS HYDRO 44. Sweency. T. L
- [5] 한국수자원학회지 : v.34 n.2(2001. 3) , 돌발홍수 예경보 시스템 전경수 p.48-56
- [6] 한국 건설 기술 연구원 자료 - 1998년 지리산 돌발홍수 분석 김승 · 이홍래 · 김남원 · 홍일표 · 김현준 · 윤광석 · 김창완 · 원유승 · 이종욱