

호우 예측 기술의 현황과 전망

오 재 호*

1. 머릿말

여러 대기현상 중에서 우리의 일상생활과 가장 밀접한 관계를 갖고 있는 것은 강수현상이다. 그러나 강수현상에 관련된 수증기, 구름입자와 빗방울 간의 복잡한 유체역학적 및 열역학적 상호관계는 그 예측을 어렵게 하고 있다. 특히 삼면이 바다로 둘러 쌓여있고 복잡한 지형구조를 가지고 있는 우리나라에서 강수예측은 더욱 어려운 실정이다. 국지적으로 발생하는 집중호우는 적란운과 같은 소규모 대기요란에서부터 중관규모의 저기압과 태풍, 또 장마전선과 같은 대규모 기상현상과 관련되어 발생하는 만큼 시, 공간적으로 다양한 규모의 강수 메커니즘에 의하여 생성, 유지, 소멸된다. 또 갑자기 발생하는 집중호우 현상은 흔히 국지적으로 짧은 시간내에 막대한 유출량이 발생하여 인명과 재산의 피해를 유발하는 경우가 많은 만큼 국가 관련 기관들과 사회의 지대한 관심의 초점이 되고 있다. 따라서 국가와 사회에서는 지역적으로 정확한 예측을 요구하고 있으나 시기적으로나 지역적으로 정확하게 예측하는 것은 현재 매우 어려운 실정이다. 본고에서는 현재 호우예측기술의 현황과 앞으로 사회요구에 부응하는 호우예측기술의 발전 전망에 관하여 재고하고자 한다.

2. 단기기상예보-대규모장 예보

우선 호우의 예보는 뒤로 미루고, 더 일반적인 기상예보에 대해서 간단히 설명하고자 한다. 1개월, 3개월 등 장기간에 대한 기후예보를 장기예보 또는 계절예보라고 부르고, 이것에 대해 하루에서 수일정도의 장래에 대한 예보를 단기예보라 한다. 이들 두 예보는 방법론적으로도, 또 그 개념에서도 상당히 이질적인 것이다. 장기예보에서는 기상현상의 구체적인 발생과 종료에 대한 예측보다는 예보기간에 대한 종관적인 특성을 예보하기에 통계적인 방법과 GCM(General Circulation Model) 등을 이용한 앙상블 예보(ensemble forecast)방법을 사용한다. 이에 반하여 단기예보에서는 특정 기상현상의 발생과 종료시기, 강도, 또 발생지역 등에 대한 구체적인 정보를 생산하여야 한다. 호우현상과 관계가 깊은 것은 단기예보이기 때문에 이하에서는 단기예보에 국한해서 설명하겠다.

단기예보에서 가장 관심을 갖게 되는 것은 상층의 장파, 고·저기압이나 전선계의 움직임 등의 대규모 기상요란이다. 한 마디로 말하면 오늘날의 단기예보는 대규모 기상요란에 관한 정보를 바탕으로 하는 기상예측인 것이다. 우리들은 오늘날, 이런 요란의 행동을 지배하고 있는 유체역학적, 열역학적 또는 대기복사학적 물리법칙을 어느 정도 자세하게 알고 있고, 그것을 수학적으로 표현할 수 있다. 이러한 법칙에서 이제부터의 변화를 알기 위해서는 그것들이 현재(즉, 어느 시점에서), 어떤 상태에 있는가를 관측에 의해 먼저 알아야만 할 것이다.

* 기상연구소 예보연구실장

오늘날, 세계적(지구적) 규모로 실시되고 있는 일상적 기상관측의 주요한 기본목적은 위와 같은 대규모적 기상현상의 실태파악에 있다. 이 목적을 달성하기 위해 세계각국의 기상기관은 WMO(세계 기상기구)에 참가하여 세계적으로 지상, 해상, 고층 등의 관측을 동시에 실시해서, 공통적인 형식으로 그 기상자료를 서로 교환하고 있다. 이 기상자료의 양은 굉장히 방대한 것이어서 현재 모든 자료 처리는 주로 대형 컴퓨터에 맡겨지고 있다.

다음 단계는 기상자료의 해석과 예보생산이다. 이 해석·예보에 대해서는 대별해서 두 가지 방법이 있다. 그 하나는 주관해석·주관예보로 불리는 것으로 먼저 전산처리에 의해서 선별된 자료를 일기도상에 표기하여 예보자가 일기도해석과 실태분석을 한 뒤에, 그 시간적 변화를 예측하고 일기예보를 하는 방법이다. 이 경우, 여러 가지 기상학적인 물리법칙은 기초지식으로서 다른 경험적 지식과 함께 예보자의 머리 속에 기억되어 있어야 하는 것이 전제된다.

다른 하나는 객관해석·수치예보라고 부르는 방법이다. 우선 지구상을 에워싸고 있는 300~100km 간격의 격자점을 상상해 주기 바란다. 더욱이 이 격자점은 1층이 아니고 10층, 20층 또는 그 이상으로 세분되어 있다. 객관해석은 관측 자료로부터, 이 격자점상의 여러 가지 요소(기압, 온도, 바람 등)를 올바르게 추정하는 것에서부터 시작된다. 이 작업에는 물론 대형 컴퓨터가 활용된다. 격자점상의 수치가 모두 결정되면 여러 가지 물리량-예를 들어, 와도(vorticity)나 상승류(up-drift)가 계산되고 필요한 일기도가 계산기에 연결된 프린터에 의해 출력된다. 동시에 이 수치를 초기치로 해서 6 또는 7개의 예단변수(prognostic variables)의 시간에 대한 미분방정식과 수많은 진단 변수(diagnostic variables)에 대한 선형(linear) 또는 비선형(non-linear) 방정식으로 표현되고 있는 관련 물리법칙이 이 모든 격자점상에서 만족하는 조건하에서 그것에 대응하는 몇 초 후의 변화를 산출하게 된다. 이 시간변화를 반복, 또 반복 계산해서, 예를 들어 12, 24, 36, 48시간 후의 여러 가지 물리량

예보치가 산출되어 그 분포도(즉, 일기도)를 생산하게 된다. 이것이 객관해석·수치예보의 원리와 개념이다(기상청, 1995). 현재로서는 이 객관해석 수치예보에서 얻어진 정보를 주체로 해서, 여기에 숙달된 예보자의 기상학적인 판단과 경험적 지식이 가미되어 매일의 단기예보가 시행되고 있다.

이상이 현재 이루어지는 단기예보방법의 골격이다. 다시 말하여, 단기예보의 기본적인 학문적 배경은 『대규모 기상요란』에 대한 역학적 법칙이다. 한편, 호우는 본질적으로 중규모(meso-scale) 현상이며 직접적으로 대규모 기상요란과 결부되어 있는 것은 아니다. 따라서 보통 단기예보에서는 호우의 발생지점이나 호우의 발생유무를 직접 예보할 수 있는 것이 아니다. 중규모 기상현상으로의 호우는 대규모 기상요란에 의해 간접적으로 조정되고 있기 때문에 단기예보는 호우가 발생하기 쉬운 조건이 일어나느냐 아니냐, 또는 호우발생을 위한 잠재적 가능성에 대해서 예보하는 것이다. 즉, 단기예보로 호우예보는 할 수 없지만 호우의 가능성(potential) 예보는 할 수 있다.

이용자 쪽에서 본다면 잠재적 예보(potential 예보)이든 무슨 예보이든 간에 정확하고 상세하기만 하면 되겠지만 현재로서는(원리적으로도) 그토록 자세한 예보를 할 수 있는 것은 아니다. 『내일 ××시에 △△mm의 집중호우가 발생할 것이다』라는 식으로 될 수는 없고, 『내일, 어느 지방에 △△mm 이상의 호우발생에 적합한 기상상태가 이루어질 것이다』라고 표현하는 것이 호우의 잠재적 예보 본래의 표현일 것이다. 잠재적 예보에서 예상 강수량이 몇 mm라는 표현을 하는 일도 있으나 이는 일종의 지표이지, 엄밀한 의미에서의 실제 강수량을 가리키는 것은 아니다. 이와 같은 예측의 실효성에 의문을 가질지 모르겠으나, 실은 이 정도의 정보도 매우 유익한 것이다. 예를 들어, 기상관서를 비롯한 국가 방재관련 부서에서도 이상 악기상에 대비한 업무체제를 갖출 수 있을 것이고, 일반 시민들도 호우의 급습을 피할 수 있는 정보를 얻게 될 것이다. 물론, 호우의 잠재적 예보도 기상청 관계자의 노력에 의해 그 내용이 점차 구체적으로 진

특집 : 홍수재해

보되고 있고, 앞으로는 더욱 정량적 내용을 지닌 잠재적 예보가 생산될 것으로 기대되고 있다.

3. 호우예보의 현황

앞에서 설명한 단기예보에 비하여 더욱 단시간(1시간~수 시간)의 예보가 있는데, 이것을 단시간예보라고 한다. 그 극단적인 것이 『실황예보(nowcast)』라고 불리고 있는 것이다. 이 전형적인 실황예보로는 항공로실황, 항공로예보, 비행장실황, 비행장예보 등의 항공기상업무에서 볼 수 있다. 고속으로 비행하고 이착륙하는 항공기에서 가장 중요한 것은 정확하고 신속한 실황파악과 극히 단시간적인 예보이다.

단기예보가 호우에 대하여 잠재적 예보인 것에 비해서 단시간예보는 실황예보적 성격이 강하다. 먼저 잠재적 예보나 고층관측의 실황해석(습설(濕舌), 하층제트, 저기압 중간규모요란의 동향 등에 대한 분석)을 바탕으로 전체의 기상상황이 이해된 다음에는 지상일기도, 강수량분포, 기상 레이더 관측에 의거한 실황예보가 호우 예측에 중요하게 되는 것이다. 실황예보라고 해도 단지 순수한 실황통보만으로 그친다면 그 이용가치가 반드시 높다고 할 수는 없을 것이다. 크고 작은 하천의 유량예상이나, 산사태 등을 비롯한 여러 종류의 강수량의 누적효과가 시간적으로 지체되면서 작용할 경우에는 단순한 실황통보도 의의가 있겠지만 현재 내리고 있는 비가 더 계속하느냐, 쇠약해 지느냐, 또는 더욱 강해지느냐 등의 문제에 답하려면, 실황예보에 무엇인가의 예보를 덧붙이지 않으면 안 될 것이다.

실제적으로 호우예보의 어려움이 여기에 있는 것이다. 대규모현상에 대해서는 물리적인 이해가 진보되어 있기 때문에 역학적, 이론적인 수치예보가 가능(물론 개선해야 할 점이 많으나)한데 비해 호우에 관한 우리들의 지식은 아직도 충분하지 못하고, 따라서 실황예보에 가해야 할 단시간예보는 레이더 예보의 특징이나 강수량분포의 특징 등을 경험적으로 해서 머리 속에 담겨져 있는 예보자의 주

관적 판단에 의지하고 있는 실정이다.

4. 호우예보 개선 노력의 방향

호우예보의 정확도를 개선하기 위해서는 첫 번째로 대규모 장의 예측을 바탕으로 하는 호우의 잠재적 예보기술을 향상시켜야 하며, 두 번째로 실황에 대한 정확한 관측이 필요하며, 마지막으로 첫 번째의 잠재적 예측과 두 번째의 정확하고 정밀한 관측을 바탕으로 하는 단시간예보 모델을 마련하는 것이다.

이를 위해 기상청의 계획과 노력은 다음과 같이 요약될 수 있다. 첫째 잠재적 예보기술향상을 위해 보다 개선된 대기와 하천을 종합화하는 수치모델의 개발이 필요하다. 호우는 종종 국지적 홍수를 유발하는 경우가 있는데, 국지적 강수는 습기의 유입 및 종관규모 전선의 이동 같은 대규모 강제력, 산악과 해륙의 대비 같은 중간규모의 지형모양, 토양 수분 함유량, 식물상 등과의 복잡한 상호작용에 의하여 결정된다. 여러 가지 요소간의 복잡한 상호작용을 계산하려면 역학적, 물리학적, 수문학적 과정의 정확한 공식화가 필요하다. 그래서 역학적, 물리적 과정을 포함한 물리학적 기반의 수치 모델 시스템은 일기와 하천류의 예보에 효율적이고 경제적인 도구가 된다. 더불어 결합 대기-하천류 모델은 산악 지역에 대하여 특히 중요하다. 왜냐하면(특히 토양이 포화되어 있을 때에는) 가파른 산악 때문에 하천류가 강수에 빠르게 반응을 하기 때문이다. 한국에는 대부분의 주요 저수지가 산악 지역에 자리 잡고 있기 때문에 강수와 지표 유출의 정확하고 때맞은 예보가 댐 운영에 있어 물의 저장 및 홍수 조절의 효율을 증대시키는데 결정적으로 기여할 것이다.

둘째의 노력으로 정밀한 공간적인 기상상태의 파악이다. 이를 위한 첨단 정밀 기상관측장비들은 다음과 같다. 호우감시를 위해서는 우리 나라 기존의 관측망으로는 자료 획득은 턱없이 부족하다. 따라서 이 사업을 위해서는 기존의 관측장비 외에 위성 관측(정지기상위성 GMS-5, 열대강우 관측위성

TRMM, 환경관측기술 위성 ADEOS-I)과 기상 레이더, 연직 바람 정밀 관측 장비(Wind profiler), 자동기상관측 장비(AWS) 등의 정밀 관측장비들이 필요하다. 여기서 호우감시를 위하여 기존의 기상관서에서 보유하고 있는 주요 관측장비들에 추가하여 필요한 정밀기상관측장비에 대하여 간략한 소개를 하고자 한다.

○자동기상관측시스템(Automatic Weather System: AWS)

수년 전부터 기상청의 기상장비 현대화 계획의 일환으로 우리 나라 자동기상관측망(Korean AWS Network)이 현재 격자 간격 20 km로 하여 총 400대를 설치 운용중이다. 자동기상관측 장비는 풍향, 풍속, 기온, 강수량, 강우 감지 등의 관측 요소가 실시간으로 관측되고 극값 및 누적값 역시 자동적으로 산출된다. 현재의 AWS 관측 요소에서는 지하수면, 토양수분량, 지온, 일조 시간, 눈의 두께, 유출량 등 물과 에너지 순환의 분석에 필요한 요소가 누락되어 있다. 앞으로는 지하수면, 토양수분량, 지표 복사, 에너지속, 그리고 지표상태를 추가로 측정할 수 있는 AWS의 개선이 요구된다. 특히 집중호우에 의하여 재해발생 가능 지역에서는 상대적으로 훨씬 더 조밀한 소규모 관측망으로 구축되어야 할 것이다.

○상층관측장비

기상 현상을 규명하기 위해서는 입체적인 관측 자료가 필요하다. 이를 위해서 상층 관측(여기서 상층관측은 지면 10m 이상 높이의 대기 상태를 관측하는 것을 말한다)이 수행된다. 상층 관측에 주로 쓰이는 장비인 라디오존데는 풍선에 매달려 매분 약 300~400m의 속도로 대기중을 상승하면서 30km 이상까지 측정된 기압, 기온, 습도, 바람에 대한 값을 지상으로 송신한다. 기상청은 라디오존데 관측을 포함과 제주에서 매일 2회씩 관측하고 있으나 호우감시를 위해서 매일 4회 이상의 관측이 필요하다. 최근에 호주에서 개발된 항공존데(Airosonde)는 모형비행기의 형식을 갖추고 입력

된 프로그램에 따라 수평으로는 700km, 지상에서부터 최고 16km까지 3일에서 5일 동안 비행하면서 바람, 기온, 고도, 온도, 습도, 강우, 복사, 대기 중 화학반응 등 다양한 정보를 관측하게 되며, 관측된 자료는 위성을 통해 지상으로 송신된다. 라디오존데는 기류에 따라 움직이면서 자료를 관측하므로 관측하고자 하는 곳을 지정할 수 없지만 항공존데는 입력된 프로그램에 의해 비행하게 되므로 적란운 및 주변 대기와 같이 관측 대상을 지정하여 집중적으로 관측할 수 있는 장점이 있다. 또한 음파를 쏘아 지표 상공 10km 아래의 대기 흐름을 탐지하는 연직 정밀 바람 측정기(Wind Profiler)가 쓰인다. 특히 사진의 연직 정밀 바람 측정기는 지상 500m와 16km 고도 사이의 바람을 원격으로 감지하는 도플러 방식의 레이더 시스템으로서 3차원 바람벡터를 연속측정할 수 있어서 짧은 간격의 상층 기류에 대한 정보를 얻을 수 있다.

○위성관측

현재 지구밖에는 통신, 군사 정보 수집, 관측 자료 수집 등 다양한 목적을 가지고 지구를 돌고 있는 위성들이 있는데, 세계 각국에서 지구상의 기상 변화를 감시하기 위하여 정지 기상위성과 극궤도 기상위성을 운영하고 있다. 현재 기상청은 정지기상위성(GMS)과 극궤도 기상위성(NOAA)로부터 기상자료를 수신하고 분석하여 여러 분야에 활용하고 있다. 위의 위성 관측자료와 더불어 장마집중감시 사업에서는 1996년부터 미국과 일본에 위해서 특수 목적으로 운영될 새로운 위성(ADEOS, TRMM)들의 자료를 이용하여 3차원 구름 및 수증기 분포 자료 생산과 육상 및 해양의 대기 변화 추이 감시에 활용할 것이다.

○레이더 관측

레이더는 마이크로파를 발사하여 목표 물체로부터 반사 또는 산란된 전파를 수신함으로써 목표물의 방위와 거리를 측정하는 기기로 비나 눈 등과 같은 강수 알갱이의 탐지에 사용된다. 현재 기상청에서는 서울 관악산, 군산, 동해, 부산, 제주 등 5

곳에 레이더를 설치하여 운용중이며, 호우, 우박, 낙뢰 등 돌발적인 기상 현상과 남쪽에서 접근하는 태풍을 추적하여 단기간 예보에 주로 사용되고 있다. 그러나 호우감시에 절대적으로 필요한 3차원 바람관측을 위해서는 차세대 레이더로 불리는 WSR-88D와 값비싼 송신 장치를 갖추지 않고도, 고도각을 달리한 수신기를 여러 지역에 설치 값싸게 3차원 수증기 및 바람측정이 가능한 Bi-static 레이더 활용이 요구된다.

위와 같은 첨단 관측 장비를 사용하여 집중호우를 감시할 수 있는 체계를 확립하고 홍수와 집중호우의 정확한 예보 기반을 조성하여야 할 것이다 (한국 몬순 위원단, 1996).

마지막으로 앞에서 열거된 첨단 관측장비를 운용하여 확보된 기상정보를 짧은 시간 내에 발생하여 소멸되는 호우현상을 정확하게 예측하기 위해서는 이를 최근 기상정보를 충분히 활용하여 앞으로 수 시간내의 일기변화를 예측할 수 있는 단시간 수치모델의 개발이 필요하다. 현재에 기상청과 일부 대학에서 미국 오클라호마 대학의 storm model 인 ARPS(Droegemeier et al., 1994)를 도입하여 시험 중에 있다.

5. 맺음말

호우재해를 방지, 경감하기 위해서는 어떻게 해야 할까?

최소한도로 인명손실만이라도 막기 위해서는 먼저 정확한 호우예보가 필요할 것이다. 현재 아직도 그것이 충분하지 못한 것은 태만이나 부주의에 의한 것이 아니고, 호우의 기상학적 지식이 부족하기 때문인 것이다. 충분한 학문적 이해를 얻기 위해서는 확실한 연구를 계속해야 한다. 또 조금이라도 유효하다고 생각되는 시도는 실행하지 않으면 안된다. 이는 기상학자나 기상기술자의 임무이고, 기상

기관의 의무이기도 할 것이다. 과학이나 기술은 미술이나 둔갑술이 아니기 때문에 가능한 부분부터 개량을 도모하는 동시에, 호우의 기초적 연구를 쌓아 올려 가는 것이 가장 가까운 지름길일 것이라고 생각한다.

대부분 자연재해의 근원이 되는 악기상의 예측이 기상학자나 기상기술자의 노력에만 의하여 완수되는 것은 아니다. 기상업무의 위치를 어떻게 부여하느냐 하는 것은 사회의 정책이고 사회를 구성하고 있는 각자의 의지에 따라서 결정될 문제인 것이다. 사회의 모든 사물이 그러하듯이 사회를 구성하는 사람들의 능동적 의지가 없으면 『정확한 악기상 예측』이 결코 이루어지지 않는다는 것을 새삼 인식해 주기 바란다. 군대가 외적으로부터 국가와 국민을 보호하는 국방의 임무를 수행하고 있다면 기상업무는 자연재해로부터 국가와 국민을 보호하는 임무를 수행하고 있는 것이다. 기상청을 비롯한 국가 방재부서는 이런 점을 충분히 인식하여 『방재』에 대한 기상업무의 위치를 재고함과 동시에 국가와 국민을 보호하는 임무 수행에 차질이 없도록 하여야 할 것이다.

참 고 문 헌

기상청, 1995: 기상청의 수치예보, 기상청 수치예보과 기술보고서, 95-2, pp164.
한국 몬순 위원단, 1996: 장마 집중 감시 사업계획, 기상연구소 예보연구실, PP136.
Droegemeier, K.K., Bassett G., and Xue M., 1994: Very high-resolution, uniform-grid simulations of deep convection on a massively parallel processor: Implications for small-scale predictability. Preprint, 10th Conference on Numerical Weather Prediction, American Meteorological Society, Portland, 376-379. ☼