

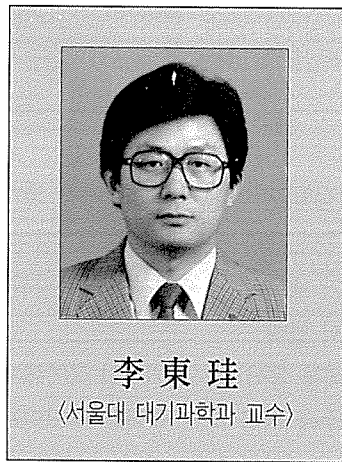
계절(90일)전망 정확도 75% 목표 經濟性에 치중, 數値예보와 무관

수치예보 1950년대부터

일기예보가 이미 일상 생활과 산업 활동에 중요한 요소로 자리잡고 있다. 내일 또는 일주일 후의 날씨를 미리 안다는 것은 우리의 생활에 생동감이 넘치는 일이다. 금년 여름 비가 계속 되고 온도가 예년보다 낮을 것이라면 여름 휴가를 계획하는데, 여름 상품의 수요를 계획하는데 대단히 유용할 것이다.

일기예보가 이렇게 유용함에도 과학과 기술이 발달한 지금도 기상 예보는 '부정확한 예측'의 대명사로 인용되고 일기 예보자들에게 명예까지 지운다. 우리 모두는 매일 매일 예측의 엇갈림에 웃고 울고 하면서도 날씨의 오보에 대해서는 여전히 불만스럽다. 아마도 기대가 너무 큰 탓일 것이다.

최근 1~3일간의 일기예보는 정확도가 상당히 향상되었다. 이것은 관측기술 및 컴퓨터의 발달과 정량적 및 객관적 수치예보(Numerical weather prediction)의 향상 덕분이다. 인류 최초의 컴퓨터 애니악(ENIAC = Electronic Numerical Integrator and Calculator)에서 1950년 줄 샤니(Jule Charney), 폰 뉴만(Von Neumann) 등에 의해 세계 최초의 24시간 수치 일기 예보가 성공하였다.



1900년대 초 스웨덴 기상학자 빌헬름 제크너(Vilhelm Vjerknes)가 대기를 지배하는 보존 방정식계를 풀어서 결정론적(deterministic) 예측이 가능함을 시사하고, 영국의 레비스 리처드슨(Lewis Richardson)이 1922년 연 6천명이 동원하여 3개월 걸려 계산해 낸 24시간 수치 일기 예보를 시도한 후 약 30년 후의 일이다. 그 당시의 ENIAC 컴퓨터는 1만8천개의 진공관, 7만개의 레지스터, 1만개의 콘덴서, 6천개의 스위치 그리고 140kw의 전기를 소모하는 기계였다.

ENIAC에서 기상 예보의 시험 성공은 예측성의 문제에 도전하는데 두 가지 중요한 사실을 시사하고 있다. 하나는 해석해를 구하기 어려운 비선형 초기치 문제의 수치해를 얻을 수 있게

되었다는 것이고, 다른 하나는 일기예보의 문제가 결정론적 예측의 수단에 의하여 일기예보의 방향을 잡는 것이다. 이러한 방법에 의한 예보법을 수치예보라 부른다.

가장 쉬운 일기예보는 소위 지속성 예보라는 것이다. 이 예보법은 미래의 날씨는 현재의 날씨와 같다고 생각하여 내일의 날씨가 오늘의 날씨와 같다고 예보하는 것이다. 오늘 비가 오고 있으면 지속성 예보는 내일도 비가 올 것이라고 예보한다.

이러한 예보법은 이미 모든 사람의 마음 속에서 무의식적으로 예보하는데 이용되며, 마음만 먹으면 누구나 할 수 있는 예보이다. 이 방법은 처음 얼마 동안은 상당히 정확하나 시간이 지남에 따라 정확도가 급격히 낮아진다. 이는 날씨의 변화성이 크기 때문이다. 기상학자들은 지속성 예보가 과학적 원리에 근거하지 않다고 생각하고 있다. 그러나, 다른 예보법에 의하여 예보된 결과를 비교하고 검증하는 기준이 될 수 있다.

또 다른 예보법은 과거에 발생한 일기 형태 중에서 현재의 일기 상황과 유사한 과거의 일기 형태를 뽑아 그것에 반영하여 예보를 수행하는 것이다. 이는 경험에 의한 예측과 같다. 과거의 일기 상황이 현재 일기의 가이드가

장기예보 가능한가

될 수 있다는 것은 대기의 운동에는 반복성이 있음을 의미한다. 중위도 지방에서는 네 계절이 있으며 지구의 자전으로 일변화가 뚜렷한 점으로 미루어 대기 운동에 반복성이 있음을 이용하는 것이다. 유사예보법은 지금도 일기 예보자들이 참고로 사용하는 중요한 예보법의 한 종류이지만, 아주 제한적이며 변화무쌍한 일기계에 항상 적용되지 못한다.

왜냐하면 대기에서 똑같은 일기 상황은 거의 일어나지 않으며, 비록 꽤 비슷한 두 상황이 맞아 떨어져도 하루 내지 이틀 후에는 그들의 상황이 아주 달리 전개될 수 있기 때문이다. 이 유사법의 하나로 과거의 일기계들을 통계 처리하여 확률로 표현하는 통계예보가 있다. 이 확률예보법은 유사 예보를 좀 더 객관화한 것이다. 예측이 어려운 강수의 유무 예측 및 장기적인 기후의 예측은 통계예보법을 많이 이용한다.

장기예보는 한달에서 1년 단위

일기예보는 초기치 문제이기 때문에 예측할 수 있는 시간에 한계가 있다. 이는 일기계를 지배하는 대기의 시간 및 공간 규모, 그리고 기상 현상에 관계된다.

예를 들어, 1~10km의 공간 규모를 가진 뇌우 현상은 불과 수 시간 전의 일생을 가지고, 중국, 한국, 일본에 걸치는 몇 천 km의 저기압계는 1~3일의 일생을 가지고, 여름철 우리나라를 지배하는 장마는 아시아와 서태평양 또는 북반구 전체의 공간에서 적어도 1개월 이상의 일생을 가진다.

기상 현상은 시공간적으로 넓게 분포한 스펙트럼이므로 일기예보에서는

1~5일 사이의 단기예보(short range forecast), 5~10일 간의 중기예보(Medium range forecast), 1개월 이상 1년 이내의 예보를 장기예보(long range forecast)로 분류한다. 일년 이상의 장기기간은 기후예보에 속한다.

금세기에 단기예보는 수치예보에 의하여 괄목할 만한 향상을 이루었다. 향상된 수치예보를 성취하는 데에는 수 많은 과학 지식의 발전과 기술적 기여가 있었다. 좀 더 정확한 초기 조건을 만족시키기 위하여 정확도가 높은 관측기기에 의하여 밀집된 관측망으로 관측된 자료를 신속한 통신 시설로 송수신하고, 대기에서 일어나는 복잡한 물리 과정과 역학 과정의 지식을 모델링하였다.

수치예보의 분야에서는 발달하는 뇌우 구름의 열 및 에너지 수송 메커니즘, 또는 구름의 형성 과정과 같은 물리 과정의 표현을 인식하도록 하는 일을 매우 어려운 기술로 인식하고 있다. 또, 막대한 계산량은 슈퍼컴퓨터의 컴퓨터 용량을 필요로 하게 된다. 최대 용량과 최대 속도를 가진 컴퓨터가 제작되면 가장 먼저 수치예보에 이용되는 사실만 보아도 수치예보에서 소요되는 계산과 저장량을 이해할 수 있을 것이다. 이 모든 환경이 바로 첨단 과학과 기술의 집합에 의한 것임은 두 말할 것이 없다.

중기예보는 단기예보의 연장선

중기예보도 단기예보의 연장인 초기치 문제이다. 초기치 문제를 이론화한 에드워드 로렌츠(Edward Lorenz)는 서로 미소한 차이의 초기 상태에서 출발하는 두 개의 대기 상태는 언젠가는 서로 아주 다르게 전개됨을 보였다.

즉, 대기에는 꼭 닮은 쌍둥이 현상은 존재하지 않는다. 초기에 비록 두 개가 비슷한 상태를 보일지라도 시간이 지남에 따라 대기의 비선형성때문에 불규칙 또는 비주기적 형태의 성분이 존재 또는 출현하게 된다.

기상학자들은 실제의 대기에서 두개의 서로 다른 초기상태에서 출발하여 진행되는 대기의 두 형태가 의미가 없게 되는 시간이 10일 내지 2주일임을 밝히고, 대기를 지배하는 보존방정식에 의하여 초기조건으로 예측되는 일기예보는 이 한계를 넘어서는 의미가 없음을 보였다. 따라서, 초기시간으로부터 연장된 시간 적분을 하게 되면 그 정확도가 차츰 감소하게 마련인 것이다.

최근 수치예보법에 의한 중기예보 또는 연장예보(extended medium range forecast)의 정확도 향상에 대한 연구가 활발하다. 단기예보에서 이룩한 예측 기술의 발전이 중기예보에서도 가능하리라는 기대를 가지게 된 것이다. 이론적인 예측성의 한계때문에 단기예보에서와 같이 정확도를 향상시킬 수 없을 것이나, 현재의 예보 속련도를 향상시킬 것으로 기대하는 것이다. 중기예보는 지구 규모의 대기 운동을 대상으로 한다.

현재의 중기예보 여건을 생각해 보자. 거대한 해양과 사막, 티벳고원 및 록키산맥과 같은 지역의 관측 자료는 예보 향상을 저해하지는 않는가? 열대지역에서 하루 수만 내지 수십만 개의 뇌우 구름의 발생과 발달과정이 만족스럽게 표현되는가?

더 긴 시간이 소요되는 계산때문에 수반되는 수치 오차의 크기는 만족스러운가? 이와 같은 문제를 생각하면 이론적 예측 한계 내에서도 정확도의

장기예보 가능한가

항상에는 많은 여지가 남아 있다.

나아가서 대기의 현상과 과정에 대한 지식의 증대와 기술의 발전은 가까운 장래에 중기예보의 향상을 가져올 것이다.

한편, 연장예보에서도 추정 통계법(stochastic method)을 도입함으로써 1개월까지 초기치 문제의 수치예보가 연장 가능성을 제시하고 있다. 결정론적 예보들의 앙상블(Ensemble)은 천천히 변하는 대기 운동의 형태를 어느 정도 표현할 수 있다고 생각하는 것이다. 이 예보 방법에서도 각 개의 결정론적 예보는 예측성이 좋아야 하는 조건이 요구되고 있으며, 외부 강제력, 즉, 빙설분포 및 해면온도의 변화, 토양의 수분함량 등과 같은 지면 조건, 그리고 대기와 해양의 상호작용이 좀더 상세히 도입되어야 한다.

유럽의 중기예보센터(European Center for Mediumrange Weather Forecasts)나 미국의 국립기상센터(National Meteorological Center)가 생산하는 중기예보의 자료는 낮은 예보 숙련도에도 불구하고 점점 이용률이 증가하고 있다.

장기예보는 초기치 문제가 아니라 경계치 문제로 접근된다. 따라서, 현재의 장기예보는 수치예보법에 의하여 예측되지 않는다. 수명이 수개월되는 대규모 운동계에서는 외부 강제력이 제공하는 열 및 운동량의 불균형이 지구의 자전운동에 의하여 지균 평형으로 귀결된다.

매일 매일 되풀이되는 일기 현상, 소위, 중관 규모 운동계는 긴 시간 규모 내에서 해석되지 않는다. 즉, 긴 시간 동안 대기는 그 기간 내의 평균적 요소인 물순환, 대기와 해양의 상호작

용, 빙설의 분포 등의 경계조건에 의하여 결정된다. 따라서, 지구 전체의 역학과 물리과정 법칙에 따르는 대기 대순환 모델(general circulation model)을 사용하여 외부 강제력의 변화 하에서 대기의 내부 역학계가 평형된 상태로 접근하는 상태를 발견하고, 그 결과를 장기예보에 이용하는 방법이 연구되고 있다. 이러한 접근 역시 넓은 의미의 수치예보법에 해당된다고 볼 수 있다.

기압상태로 1~2주 예측가능

예측성의 연구 결과들에 의하면, 어떤 특정한 일기계, 예를 들어, 저기압계가 그 패턴과 사건이 대략적으로 1~2주일의 예측성을 가지는 것과 마찬가지로 그 이상의 기간에서는 대기의 온도나 강수량이 평균적인 예측성을 가진다고 생각하고 평균보다 높은가 또는 낮은가 하는 경향 예측이 가능하다는 것이다.

각 나라에서는 30일 전망(30-day outlook) 또는 30일 예보를 발표하고 있다. 이 전망에서는, 예를 들어, 아시아 대륙 또는 동아시아 지역에서 온도와 강수량이 평년보다 높은지, 낮은지, 비슷한지를 분류하여 제시하고 있다. 30일 전망과 유사하게 90일간의 계절 전망(seasonal outlook)도 발표하고 있으나 현재로서는 강수량의 예보 숙련도는 분명치 않다.

농업, 에너지 및 물 관리의 경제적 측면에서 계절 전망은 그 예보 숙련도와 관계없이 수요가 상당히 많다. 왜냐하면, 기상 변화에서 계절 변화는 분명하기 때문이다. 선진국의 현업 예보의 목표중에는 3개월 이상 9개월의 전망을 예보 숙련도 75%까지 증가하

려는 노력이 있다.

통계·역학방법접근 연구활발

장기예보는 현재 그리고 가까운 미래에서는 유사예보와 같이 실용적인 방법이 그대로 이용될 것이나 통계-역학 방법(stochastic-dynamical method)에 의하여 대기-해양 모델을 사용하는 접근이 곧 각광받을 것이다.

우리나라에서 관심있는 장기예보의 대표적인 기상현상은 아마 여름철의 온도와 강수량, 겨울철의 온도, 봄철의 강수량일 것이다. 여름철에는 장마가, 겨울철에는 한파가, 봄철에는 가뭄이 주로 예측의 대상이 된다.

이들은 계절의 변동성과 관련되어 기후예측의 측면일 수도 있고 장마와 한파의 시작 및 기간은 오히려 중기예보의 기술로서 예측성을 높일 수 있을 것이다.

또 장마기간에 발생하면서 이 기간의 강수량을 좌우할 수 있는 집중호우는 단기 또는 초단기(very short range) 예보의 영역이다. 이 모두는 서로 다른 예측 기간에 영향을 주고 받으므로 예측성의 측면에서 보면 하나의 문제로 접근될 수 있을지도 모른다.

대기의 행태(behavior)에 영향을 끼치는 물리적 요소와 과정은 대단히 복잡하다. 이러한 행태는 분자 운동에서부터 지구규모 운동에 이르기까지, 몇 초의 시간에서 몇년의 기후에 이르기까지 함께 얽혀 있다. 규모가 작고 짧은 일생의 대기 행태는 짧은 기간동안 대체로 예측이 가능하다.

반면에, 예측성이 있다고 가정하고 시간과 공간 규모가 더 큰 행태를 더 긴 시간동안 연장하면 그 예측이 가능할 것이다. 중요한 문제는 대기의 예

장기예보 가능한가

측에는 본질적인 한계가 존재하는가에 있다. 에드워드 로렌즈의 이론은 예측의 한계가 존재한다고 밝히고 있다.

대기를 지배하는 법칙이 근사적인 것이며, 대기의 지배방정식이 엄밀히 말하면 결정론적 해를 가지지 못하며, 초기조건을 결코 완벽하게 제시할 수 없기 때문에 대기의 완전한 예측은 가능하지 않다. 즉, 초기상태에는 오차가 항상 있게 마련이고, 대기의 불안정성과 대기를 지배하는 법칙이 비선형적이기 때문에 근원적인 예측의 한계가 있을 수 밖에 없다.

최근 카오스(Chaos)이론을 대기의 운동이나 경제활동의 예측에 적용하려 시도함으로써 비선형의 문제가 가닥이 잡히는 듯 하다. 지금까지 기상학자들은 대기의 규칙성을 예측하는 데는 큰 성공을 거두었으나 불규칙의 변화에는 손을 쓰지 못했다. 카오스의 이론을 재조명함으로써 불규칙의 대기운동계에서 규칙성을 발견해낼 수 있을 것을 기대해 본다.

장기예보를 가능하게 하고 예보 숙련도를 향상시킬 수 있는 근거는 어디에 있는가? <그림1>은 그동안 이룩한 대기의 예측성 이론과 모델링 기술에 근거하여 예측성의 향상을 제시하는 도식적인 그림이다.

관측자료(observation)의 해석과 분석을 통하여 얻는 예보 기술과 모델을 이용한 예보 기술을 합한다면 이론적인 한계 내에서 예보 숙련도를 향상시킬 수 있다는 것이다. 그림에서 이론적 한계(theoretical limit)는 서로 다른 두 초기상태에서 출발한 예보 오차들의 크기를 추정하여 작성한 것이고 예보 숙련도(accuracy)는 100%가 완벽한 예측, 0%가 완전한 오류, 그 사이

가 상대적인 숙련도를 의미하며, 시간(time)은 임의의 대기 현상에 적용될 수 있도록 크기를 설정하지 않았다.

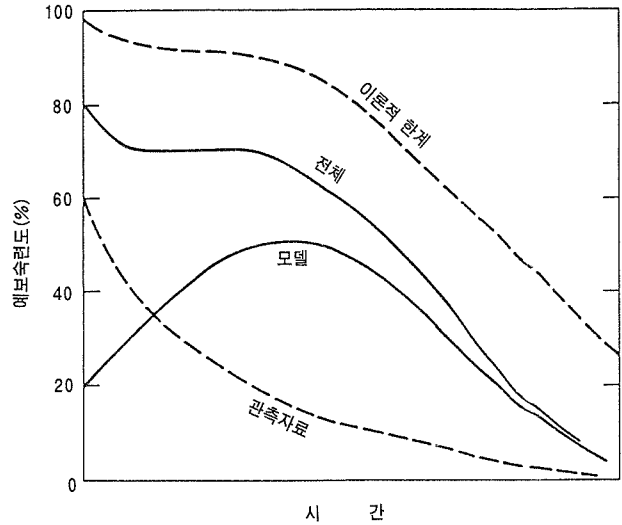
예를 들어, 단기예보의 경우 모델 곡선의 정점 부근은 대략 24시간 내지 36시간에 해당된다.

각 곡선이 가지는 숙련도는 상대적

이지 절대적인 값을 가지지 않는다. 앞서도 지적했듯이 단기예보이든, 장기예보이든 예보의 향상은 현재로서는 모델링 기술의 향상에 있으며, 모델링 향상은 많은 문제와 도전을 내포하고 있다.

장기예보를 향상시키기 위하여 해결해야 할 중요한 문제들을 열거하면 다음과 같다. 정확도가 높은 기상 관측 장비, 레이더 및 인공위성 등의 첨단 관측장비를 이용하여 거대한 해양, 사막, 산악 지역에서 관측자료를 증가시켜 초기자료의 오차를 줄이는 것이 필요하다.

강수 과정, 대기 및 지표면의 복사 과정, 대기와 해양의 상호작용 등의 물리 현상을 더 적절히 표현하는 지식과 기술이 필요하다. 대기운동의 간격을 더 조밀하게 해석하기 위하여 모델의 분해능을 높이는 것이 필요하다. 이와 같은 문제들을 해결하는 데는 기하급수적으로 증가하는 컴퓨터의 계산 속도와 저장 능력이 필연적으로 요구된다. 과학과 기술의 발전은 모델링



<그림1> 관측과 모델의 시간에 대한 상대적인 예보 숙련도

기술 향상의 조건을 만족할 수 있을 것이다.

장기예보의 숙련도가 향상되어도 단기예보에서와 같이 어느 특정지점의 기상예측이 가능하지는 못할 것이다. 더 긴 시간의 예측에는 더 큰 공간규모의 운동계 특성이 관계되기 때문에 그 운동계가 지배하는 지역의 대표성만이 예측된다. 예를 들면, 3개월 전망에서는 동아시아 지역이 하나의 대표적 예측값을 가지게 되는 것이다.

장기예보의 숙련도를 높이는 것은 시간 문제일 것이다. 왜냐하면 기상학자들은 현재의 낮은 예보 숙련도의 문제점을 이해하고 있으며, 이것을 해결하는 접근 방식도 부분적으로 알고 있기 때문이다.

그렇다면 장기예보도 현재의 단기예보의 숙련도 만큼 가능할 것인가? 장기예보의 숙련도를 어느 정도 향상시킬 수 있을 것인지는 다음 세기에 남겨진 문제이다. ⑤7