

21°
13°



미래에 대한 예측과학으로서의 일기예보, 그리고 기후예측

최 근 우리나라의 날씨 변화와 전국적인 분포 양상의 특징은 시간과 공간적으로 변동의 폭이 상당히 크고 급격하게 변화한다는 것으로 요약할 수 있다. 마치 롤러코스터를 타듯이 견잡을 수 없을 정도로 아찔한 곡예를 하는 기분이 들 정도다. 지난 2010년 봄철에 나타났던 기록적인 이상저온에 대한 기억이 채 가시기도 전에 지난 봄에도 이상저온으로 인해 과수와 발작물이 동상해의 피해를 보았고, 개화기의 과수와 맥류 등에도 상당한 정도의 동상해 피해가 발생한 것으로 보고되었다. 또한 봄꽃의 개화시기가 늦어지면서 전국 각지에서는 당초 예정되었던 봄꽃 축제를 진행하는데 차질을 빚기도 하였다.

이와 같은 봄철의 이상저온 현상은 최근 몇 년 사이에 자주 나타나는 경향을 보이고 있다. 봄철의 이상저온에 따른 영향이 나타난 이후에는 기온의 변화 양상에 급격한 반전이 연이어 나타났다. 5월 하순부터 전국적으로 한여름을 연상케 하

는 때 이른 무더위가 나타나기 시작한 것이다. 이러한 무더위는 6월 상순에도 계속되면서 동해안 일부지역을 제외한 전국이 연일 30도를 웃도는 최고기온을 기록하였고, 이에 따라 냉방을 위한 전력수요가 크게 증가하면서 전력공급에 있어 적신호가 켜지기도 하였다.

불규칙한 날씨가 예측 불확실성 높여

과거 사례를 살펴 볼 때 장마가 본격적으로 시작되기 전인 5월 하순이나 6월에 일시적인 고온현상이 나타난 사례가 적지 않다. 보통 우리나라를 지나가는 이동성 고기압이 일시적으로 한반도 주변에 머무는 경우 이러한 현상이 나타나곤 했다. 이동성 고기압이 마치 땅콩 모양으로 동서 방향으로 폭넓게 위치하는 형태의 기압배치가 나타날 때 봄철의 일시적인 고온 현상이 발생하곤 했던 것이다. 그러나 올해 나타난 이상고온 양상은 이전과는 사뭇 다른 형태로 전개되었다. 북태평양 고기압 세력이 일시적으로 확장하면서



글 김지영

기상청 관측기반국
국가태풍센터 기상연구관
aceasia@korea.kr

글쓴이는 경북대학교 지구과학
교육과 졸업 후 천문기상학과
에서 석사학위를, 서울대학교
지구환경과학부에서 박사학위
를 받았다.



마치 한여름을 방불케 하는 기압배치가 일시적으로 나타났기 때문이다. 앞으로 올여름 장마가 어떤 모습으로 전개되느냐의 여부에 따라 여름철 날씨와 기후에 연관된 전력수급, 물 관리, 보건, 농작물 관리 등 여러 분야에서의 대응 전략도 크게 달라질 수밖에 없다.

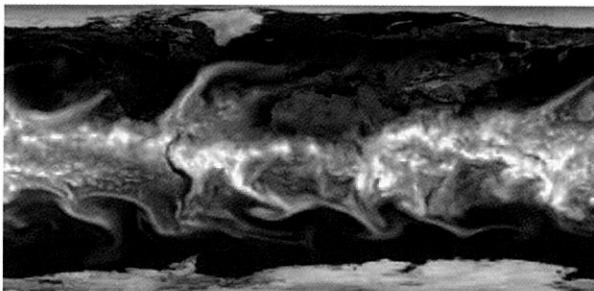
매일매일의 날씨, 그리고 이와 더불어 날씨의 장·단기적인 통계로 요약되는 기후. 이들의 갑작스런 변화에 따른 사회적 영향에 대해 요즘 그 체감도가 더욱 높아지고 있음을 실감할 수 있다. 근년에 나타난 여름철 폭염과 겨울철 한파 발생과 연관되어 나타난 여러 가지의 사회적 파급효과를 일례를 보더라도 앞으로 시간이 지날수록 우리의 일상생활이나 사회적 측면에서 날씨나 기후의 변화에 따른 영향과 그 파급효과는 더욱 커질 수밖에 없을 것 같다.

TV나 라디오, 그리고 신문 지면을 통해 연일 보도되는 각종 뉴스나 외신 보도를 보면 기상이변이나 이상 기후, 그리고 그와 직간접적으로 연관된 각종 소식들이 비단 우리나라만의 문제나 현상이 아닌 전 지구적으로도 공통된 사안으로 대두되고 있음을 알 수 있다. 따라서 이에 대응하기 위한 지역 국가 간의 긴밀한 협력도 더욱 중요해 지고 있다.

예년에 볼 수 없었던 유형의 매우 불규칙하고 극단적인 날씨와 기후 패턴의 변화는 한편으로 그 예측의 불확실성을 더욱 높이고 있다. 이와 동시에 정확한 예측 정보를 원하는 사용자 측면의 사회적 수요와 그에 따른 기상기후정보의 가치는 더욱 크게 부상하고 있다.

관측자료, 교차 점검후 상호 비교과정 거쳐

과학적 측면에서 보면 날씨와 기후 예측의 기본적인 방법론은 그 접근 방법에 있어 약간의 차이가 있다고



▶ 수치예측모델을 통해 계산된 예측결과. 대기의 비선형적 난류 특성을 잘 보여주고 있다.

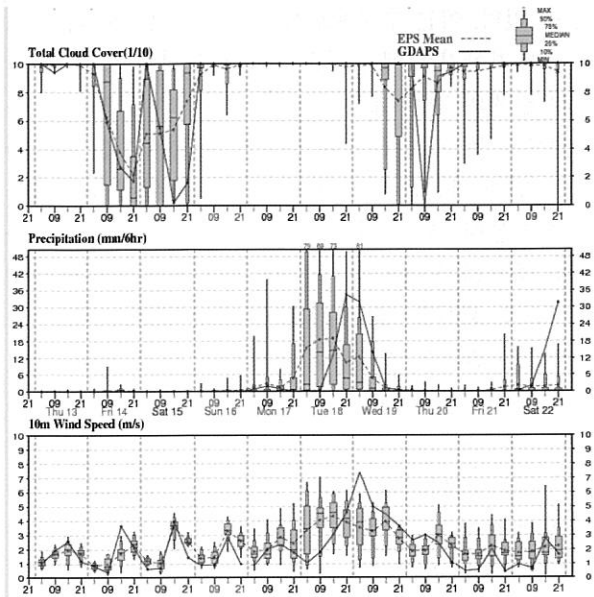
할 수 있다. 이는 수치예보시스템을 근간으로 하는 오늘날의 기상기후 예측 기술을 통해 설명할 수 있다. 미래의 날씨와 기후 예측 정보를 생산하기 위해서는 우선적으로 몇 가지 필요한 요소와 중요한 생산 절차가 있다. 먼저 가까운 미래의 날씨 예측을 위해서는 현재의 대기상태, 즉 전 지구를 입체적으로 관측한 자료가 매우 중요하다. 커다란 풍선에 헬륨가스를 주입하여 기상관측 센서를 매달아 대기중으로 날려 보내는 라디오존데 관측을 비롯하여 지상이나 선박, 부이, 그리고 인공위성을 통해 관측된 자료는 통합된 형태의 입력자료로 가공되어 만들어진다.

이러한 자료는 유체 역학 및 열역학 방정식을 컴퓨터 계산용으로 코드화한 수치예보 모델이라고 불리는 매우 방대한 규모의 연산식 처리에 필요한 입력 자료로 사용된다. 그리고 이러한 수치예보 모델에 입력된 데이터를 계산하는 역할을 하는 것이 슈퍼컴퓨터다. 슈퍼컴퓨터를 통해 초고속의 연산속도로 수치예보 모델을 수치적으로 적분하게 되면 미래의 대기상태를 표현하는 각종 변수에 대한 데이터가 격자점의 형태로 생산된다. 이러한 결과는 그래픽 처리를 통해 기상청 예보관이 분석할 수 있는 그림의 형태로 가공된다.

따라서 최종적인 일기예보 생산을 위해 이루어지는 이와 같은 일련의 매우 복잡한 과정에서 발생할 수 있는 작은 오차 하나라도 줄이기 위한 노력이 계속되고 있다. 수치모델에 입력되는 각종 관측 자료는 일종의 교차 점검 과정을 통해 자료가 상호 비교되는 과정을 거치게 된다. 자료의 시공간적인 연속성과 더불어 관측 자료 상호 간의 비교를 통해 객관성이 떨어지는 자료들은 자료의 품질관리 과정에서 제외되도록 하는 방법이 사용되고 있다.

세계 여러국가에서 앙상블 예측기법 사용

또한 수치예보모델을 통해 며칠 앞의 날씨를 예측하더라도 단 한 가지의 모델 운영 결과만을 사용하는 것이 아니라 소위 앙상블 예보라고 불리는 첨단 예보 기법이 사용되고 있다. 앙상블 예보란 일종의 수치예측 방법으로 볼 수 있는데, 역학시스템에서의 여러 종류의 가능한 미래 상태들에 대해 대표적인 샘플을 만들기 위한 목적으로 사용된다. 앙상블 예보는 모델의 초기조



▶ 기상청에서 사용하고 있는 앙상블 수치예보 결과의 예, 운량, 강수량, 풍속 등의 예측 불확실성을 파악할 수 있다.

건을 조금씩 달리하면서 보통 수십 번의 수치예측을 수행하는 과정으로 만들어지게 된다(이는 몬테카를로 분석의 한 형태이다). 여기서 초기조건이란 단기간의 날씨예보에서 가장 중요한 입력 자료로서 현재 또는 최근의 관측 자료를 바탕으로 얻어진 가장 타당하다고 볼 수 있는 현재 상태의 자료 세트를 의미한다.

때로는 앙상블예보시 멤버수가 다른 여러 예측 모델의 결과를 사용하기도 하고 예보모델의 계산식을 달리하여 생산된 예측 결과를 사용하기도 한다. 이와 같이 앙상블예보 기법을 통해 다중의 시뮬레이션을 하는 이유는 다음과 같은 예측 모델의 두 가지 중요한 불확실성을 설명하기 위해서다. 첫째로는 불완전한 초기조건의 사용에 따른 오차 발생에 관한 것으로, 이러한 경우 역학시스템의 방정식계에 내재된 카오스적인 성질에 의해 시간이 지남에 따라 오차가 증폭되기 때문이다. 이를 보통 초기조건에 대한 민감한 의존이라고 한다. 둘째로는 모델 공식의 불완전때문에 발생하는 오차인데, 이는 수치모델을 구성하는 방정식의 해를 구하는데 사용되는 수학적 근사방법을 적용하는 과정 등에서 발생한다. 이와 같은 이유로 인해 앙상블 기법을 통해 얻어진 수치모델의 결과는 여러가지 형태의 퍼진(spread) 형태로 결과가 나타나게 되며, 이

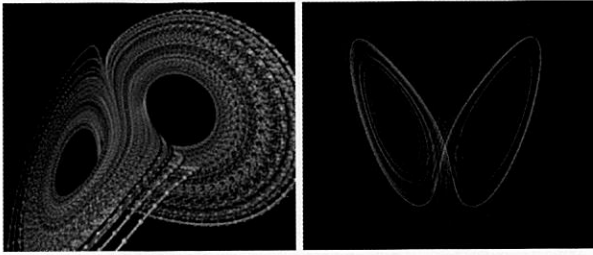
때 퍼짐의 정도가 크면 클수록 예측의 불확실성이 크다는 것을 의미하게 된다.

우리나라 기상청을 비롯해 미국의 국립환경예측센터(NCEP), 유럽중기예보센터(ECMWF), 영국기상청(UK Met Office), 프랑스 기상청, 캐나다 기상청, 일본 기상청, 중국 기상청 등 세계의 여러 국가에서 현업용 일기예보에 앙상블 예측기법을 사용하고 있다. 기상청에서는 현재 전국의 주요 지점에 대한 예보 요소로서 전운량, 6시간 강수량(mm/6hr), 지상 10m 높이에서의 풍속, 지상 2m 높이에서의 기온 등에 대한 모델 앙상블 결과를 날씨예보에 많이 활용하고 있다. 특히 태풍의 진로예보 결정과정에서는 단일 모델 및 다중 모델 앙상블 기법을 적용한 예측 결과가 중요하게 사용되고 있다. 이와 같은 첨단 기술의 선진예보 기법은 일기예보와 같이 자연현상 속에 내재된 예측의 불확실성을 평가하고 이를 예보에 적극적으로 반영하기 위한 중요한 기술적 진전 중 하나로 손꼽힌다. 그리고 이러한 것들은 과거에 비해 더 나은 날씨예보 서비스를 제공하기 위해 이루어진 부단한 노력의 산물이라고 할 수 있다.

날씨정보 속 오차와 불확실성 이해해야

역사적으로 볼 때 날씨예보의 한계에 대한 이론적 기반은 '카오스 이론의 아버지'로 불리는 에드워드 로렌츠(Edward Lorenz)가 처음으로 제안하였다. 그의 연구 결과에 따르면 2주보다 더 긴 미래에 대한 장기간의 날씨예보, 즉 어느 정도의 숙련도를 가지고 미래의 대기상태를 예측하는 것은 유체역학 방정식 내에 포함된 카오스적 성질 때문에 불가능한 것으로 밝혀졌다. 더군다나 현존하는 대기나 해양의 관측망은 공간과 시간적인 해상도에 있어 분명한 한계를 가지고 있는 것이 사실이다. 지구 상에서 가장 드넓은 바다인 태평양과 같은 거대한 해양을 일례로 보더라도 이 광대한 해역을 아주 조밀하게 자주 관측할 수 있는 방법은 현실적으로 거의 불가능하다.

따라서 이러한 한계로 인해 참값에 거의 가까울 정도로 대기의 초기상태를 파악할 수 없기 때문에 기상 예측의 불확실성은 필연적으로 존재할 수밖에 없다. 앞에서 언급한 내용을 종합해 보면 날씨예보를 하기



▶▶ 로렌츠의 Strange Attractor 그림. 복잡계의 비선형적 성질을 대표하는 그림으로서 카오스 이론의 개척자인 에드워드 로렌츠(전 MIT 교수)의 대표적 연구성과로 손꼽힌다.

위해 사용되는 유체역학 방정식계 내에 포함된 카오스적 성질뿐 아니라 대기의 초기상태는 관측적 한계로 인해 발생하는 오차 때문에 일기예보가 100% 정확하게 맞기란 근본적으로 불가능한 일이다. 따라서 각종의 사회경제적 의사결정과정에서 날씨예보 정보를 효과적으로 사용하기 위해서는 날씨정보 속에 내재된 오차와 불확실성을 충분히 이해하면서 사용하는 것이 매우 중요하다.

그렇다면 몇 주 또는 몇 달 후의 기후를 예측하는 경우에는 어떻게 될까? 기후를 예측하는 과정은 수치예보모델시스템의 운영 측면에서 기본적으로는 날씨예측과 크게 다르지 않다. 그러나 앞서 언급한 날씨예측의 초기조건 의존성과는 달리 기후예측은 경계조건에 크게 의존하는 특성을 지닌다. 경계조건의 대표적인 예가 해양과 빙하(또는 적설)이다. 해양의 경우, 해수면 온도 분포나 수온약층 형성과 같이 깊이에 따른 해수의 열적 성층 구조가 어떻게 형성되어 있는가, 엘니뇨와 남방진동(ENSO)이 현재 어떤 상태에 있고 앞으로 어떻게 전개될 것인가? 등의 여부는 기후예측에 있어 해양이 미치는 영향을 고려하는데 중요한 요소다.

극지방을 중심으로 분포된 빙하나 고위도나 해발고도가 높은 지역에 쌓여있는 눈의 면적이나 두께 또한 중요한 경계조건으로 고려된다.

리스크경감 프로세스 지속적 개선 필요

이와 같은 경계조건의 공통적인 특징은 이들이 적어도 수주일 이상의 장기간에 걸쳐 대기의 대규모 순환에 지속적인 강제력으로 작용한다는 것이다. 우리나라의 경우 계절별로 기후예측에 고려해야 할 정성적 측면에서 경계조건이 다양하지만 ENSO 사이클, 서태평

양이나 동인도양의 해수면 온도, 극지방이나 유라시아 대륙의 적설, 티벳 고원의 적설, 성층권의 대기 순환 등이 대체적으로 중요한 요소로 꼽힌다.

우리나라의 기후예측에 영향을 주는 다양한 경계조건의 상태에 따른 실제 기후 양상에 대해 그동안 학계를 중심으로 심도있는 연구가 수행돼 왔으며, 많은 연구결과들이 국내외의 학술지를 통해 발표된 바 있다. 그러나 지구과학 분야 유체현상의 공통적인 특징처럼 기후와 같은 자연현상은 과거와 동일한 조건으로 결코 반복되지 않고 여러 가지 경계조건들이 경쟁적으로 상호작용하면서 실제 현상이 나타나기 때문에 과거에 나타났던 양상의 특징과 경험만으로 미래의 기후상태를 단정적으로 예측할 수는 없다. 실제로 기후예측은 단기간의 날씨예측만큼이나 비선형적인 특성이 매우 강하기 때문에 예측의 불확실성이 높은 것이 사실이다.

최근 들어 우리나라는 겨울철 한파, 여름철 폭염, 봄철 이상기온 등 극단적인 기온변화가 나타나면서 전력수급에 적신호가 켜지는 등 사회 곳곳에서 그에 따른 영향들이 나타나고 있다. 날씨나 기후의 비정상적인 양상으로 인한 사회경제적 리스크가 점점 커지고 있는 만큼 리스크 경감 프로세스의 지속적인 개발과 개선이 필요하다. 특히 다양한 의사결정 프로세스에서 날씨와 기상의 변화가 어떻게 전개될 것인가는 매우 중요하다.

그러나 미래의 날씨를 예측하는 기상예보나 기후예측 정보는 수치예보모델 내에 코드화된 유체역학 방정식계의 카오스적 성질뿐 아니라 대기의 초기조건이나 경계조건을 생산하는 과정에서의 관측적 한계 때문에 100% 정확할 수가 없다. 그리고 예측 오차의 크기도 시간이 지남에 따라 증가할 수밖에 없다. 따라서 날씨나 기후 변수에 민감한 각종 의사결정과정에서 기상정보를 효과적으로 사용하기 위해서는 수치나 그래픽 형태로 주어지는 기상정보 자체뿐 아니라 그 정보 속에 포함된 통계적 불확실성과 예측성의 한계를 함께 고려하는 것이 중요하다. 그리고 기상기후정보의 생산자와 소비자 사이의 다양한 형태의 쌍방향 소통과 적극적인 피드백이 이루어진다면 기상정보의 사회경제적 가치가 더욱 증대될 수 있을 것이다. 