기후변화 예측의 과학기술적 방법

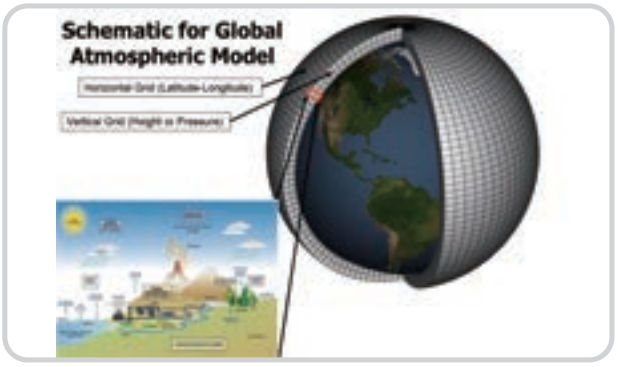
부산대학교 대기환경학과 교수 · 하경자

우리는 요즘 미디어 등에서 기후 위기(Climate Crisis)라는 말을 자주 듣는다. 사실 기후 위기는 비교적 최근에 나온 용어로 지구온난화나 기후변화에 의한 영향 중에서도 특히 생태계가 받은 영향을 고려하여 나온 말이다. 지구온난화(Global Warming)라는 용어는 20세기 중반 기후학자들이 관측을 통해 지구의 평균 기온이 점점 올라가고 있으며 그 영향으로 나타나는 현상들의 심각성을 인지하고, 결국 이러한 기후변화가 인위적 요인인 인간 활동에 의한 것임을 알게 되면서 더욱 중요하게 다루게 되었다. 2021년 노벨 물리학상을 받은 슈쿠로 마나베 박사의 주요 업적이 된 1960년대의 2배 이산화탄소 실험 등의 결과는 지금까지도 유사한 실험을 하고 있을 만큼 기후과학에서 중요하게 다루어지고 있는 내용이다. 기후모델링이란 기후의 예측이나 기후변화의 예측을 위하여 사용되는 기후의 시뮬레이션을 위한 모형을 구축하여 모형의 적분으로 기후의 시간 발전을 알아내는 과정을 일컫는 과학 기술적 방법을 말한다. 즉, 지구의 기후 요소들을 변수로 시간적인 발전을 정량화하는 방법이다. 기후변화의 예측에 사용된 기후모델링의 기법을 가장 잘 설명하였던 과학자는 바로 슈쿠로 마나베이며, 프린스턴대 GFDL(지구물리유체역학연구소)에서 기후모델링으로 기후 연구를 주도한 분이기도 하다. 그는 지난 60년간 지구온난화가 진행되는 것을 모형의 시뮬레이션으로 실험하고, 기후의 변동성 및 변동량을 정량화하였으며 기후변화의 원인을 파악하는 연구를 수행하였다.

마나베 박사는 1967년에 이산화탄소량이 2배 증가시(Doubling CO_2) 지구의 평균온도가 얼마나 상승하는가를 최초로 정량화시킨 과학자이다. 그는 1975년에 2배의 이산화탄소량을 기후모형의 효시가 된 초기 대기대순환 모형(Atmospheric General Circulation Model, AGCM)을 통해 실험한 지구온난화 시뮬레이션에 대한 논문을 발표하게 된다). 마나베 박사가 1975년에 발표한 이 논문은 JAS(미국기상학회의 대기과학 저널)에 발표되어 인용이 매우 많이 된 논문이다. 대기의 기온이 전체 권역의 영향을 받아 결정되듯이 대기권과 해양권(수권)을 어떻게 접합하여 모형의 시간 발전을 이룰 것인가가 중요하다. 즉 대기-해양 접합 기후모형의 개발이다. 1965년부터 약 10년간의 대기과학에서 가장 중요한 혁신적인 과학적 발견은 접합모형의 개발과 분광학적 변환기법의 개발이다. 높은 열용량을 가진 해양은 기후시스템의 가장 주요한 성분이다. GFDL의 해양 모형 개발자였던 브라이언 박사의 초기논문과 마나베 박사는 기후의 시간적 발전에서 가장 중요한 해양의 영향을 대기 모형 안에다 넣게 되는데, 그들의 논문 Manabe and Bryan(1969)은 처음으로 접합이라는 과정을 보이게 된다. 지금은 지구 시스템 모델링(Earth System Modeling) 이라고 하여 대기-해양 접합을 넘어 지권, 빙권도 접합 과정을 통해 상세히 기후를 시뮬레이션하게 된다. 이 접합 해양대기대순환 모형(Coupled Ocean-Atmospheric General Circulation Model, OAGCM)이 실질적으로 기후모형의 시작이라고 보며, 이어 모형이 지금의 고분해능으로의 수평 및 연직 방향으로 매우 많은 층을 가지게 되었다. 이후에 많은 기후학자들에 의하여 개발 및 개선되어 지금의 IPCC6보고서에서 사용되는 40개가 넘는 모형을 이용하는 연구로 발전되었으며, 이제는 모형들을 서로 비교하여 불확실성을 많이 줄여 그 평균 결과를 지구온난화 과정으로 산출하고 있다.

기후모형으로 가장 간단한 형태는 에너지균형 모형 등의 지표 기온만을 예측하는 모형도 있으나, 기본적으로 지구대기의 유체역학적 운동을 모두 나타내고 대기권 이외에 외기권으로부터 태양이 지구에 입사하여 수권, 암석권, 생물권 등 지면 모형, 빙권과의 상호작용을 겪으며 시간 발전을 하게 되는 GCM이 가장 대표적이다. 이 때 수증기, 물, 눈의 모의를 위해 중요한 습윤 복사 물리 과정을 다루고 있다. 지구온난화가

진행되는 것을 모형의 시뮬레이션으로 실험하는 데에는 그 변동성이나 변동량을 정량화하고 기후변화의 원인을 정확하게 파악하는 것이 매우 중요하다. 초기에는 1차원 복사-대류 모형으로 입사하는 복사와 방출되는 복사의 복사평형으로 기온의 연직 프로파일이 결정되는 과정에서 연직으로 발생하는 대류불안정 과정을 통하여 온도를 전달하는 과정을 넣어야 한다는 것을 강조하였다. 즉, 처음으로 복사-대류 과정을 통해 기온의 연직 프로파일이 결정될 수 있음을 설명한 것이다.



〈그림 1〉 climate model의 개념도

간단하게 1차원 복사-대류 모형을 도입하여 개념적으로 지구 평균 온도를 결정하는 인자들을 고려할 때, 지구 평균 기온을 좌우하는 다양한 조건 들을 대류(R), 수평적 열 수송(H), 연직 열 수송(V), 기타 요인 (O), CO_2와 같은 온실기체로 간주하는 것이 아레니우스 이후의 물리적 관점이라면, 마나베 박사는 이를 복사와 대기의 연직수송이 매우 중요함을 고려하여 간단화시키고, 특히 CO_2농도를 2배로 가정한 다음 수치 기후모형을 제안하고자 하였다.

$$T_{sfc} = f(R,H,V,O,C) \rightarrow T_{sfc} = f(R,V,C{=}2)$$

오늘날 현업에 사용되는 기후모델링에는 지구 시스템모형을 활용하며 가장 첨단의 슈퍼컴퓨터가 사용되고 있다. 대표적으로 미국의 CESM(Community Earth System Model)이 모든 연구자에게 사용할 수 있도록 되어 있어서 기후학자들에게 친숙하다. 자연계 내 복잡계의 시간 발전을 알기 위하여 운동량, 열, 질량, 수분 등 다양한 보존량을 나타내는 수치 방정식들을 세우고 이들을 시뮬레이션하기 위하여 슈퍼컴퓨터를 이용한다.

〈그림 2〉는 지구 시스템 모델링의 각 권역 모형들의 접합 과정에서 다루는 변수들을 상세히 보인다. 즉, 지구의 기온 변화는 해양의 변화뿐만 아니라 지권과 빙권과의 상호작용으로 결정되는 방법을 사용하여 산출된다.

〈그림 2〉 지구시스템모형의 성분요소들

전 세계적으로 기후 위기에 대처하기 위하여 '탄소중립' 정책을 공언하고 있어서 우리 기후과학자들은 지구 시스템 모형의 정확성을 높이기 위하여 모형개선에 노력을 다하고 있다. 그러나 기후 물리계로 되돌아보면 기후변화연구에서 아직 완전하게 풀리지 않은 핵심 질문들이 있다. 지구상의 주요 빙상(Ice Sheet)에 해수면 고도가 지구온난화가 계속될 때 어떻게 반응할지 우리는 아직 잘 모른다고 본다. 해수면 상승에 적지 않는 영향력을 가지는 것으로 알려진 극 지역의 빙상에 대한 이해가 부족하며, 온난화로 인한 기후 스트레스를 어떻게 정량화할 것인가는 여전히 남겨진 숙제이다.

필자소개

(현) 부산대학교 대기환경과학과 교수 및 IBS 기후물리연구단 교수
(현) (사)한국기상학회장
(현) 한국과학기술한림원 이학부 정회원
(전) 국가과학기술자문회의 자문위원
(전) 국립부산과학관 이사