

2021 노벨물리학상 수상자 마나베 슈쿠로 박사의 업적에 대한 소고

DOI: 10.3938/PhiT.30.038

하 경 자

A Brief Study on the Achievement of Syukuro Manabe, Awardee of 2021 Nobel Prize in Physics

Kyung-Ja HA

Manabe Syukuro is well known as a father of climate modeling. He and his colleagues have achieved several important milestones in the research on global warming. In this article, two highly advanced subjects are described. In the early 1960s, he developed a radiative-convective model of the atmosphere and explored the role of greenhouse gases, such as water vapor, carbon dioxide, and ozone in maintaining and changing the thermal structure of the atmosphere. His study was the beginning of long-term research on global warming. In 1969, Manabe and Bryan published the first results from a coupled ocean-atmosphere general circulation model (OAGCM). However, this model used a highly idealized continent-ocean configuration. Results from the first coupled OAGCM with more realistic configurations were published in 1975, which eventually became a very powerful tool for the simulation of global warming.

들어가며

지난 10월 5일에 발표된 노벨물리학상에 평소 존경하던 학

저자약력

하경자 교수는 현재 부산대 대기환경과학과 교수이며 기후과학연구소장을 역임하면서 기초과학연구원(IBS) 기후물리연구단 교수로서 기후물리 연구를 하고 있다. 연세대에서 1992년에 대기과학전공으로 이학박사학위를 취득한 후 일본기상연구소 기후연구부에서 박사후연구원을 보내고 미국오레곤대학에서 객원조교수로 지내면서 기후역학과 대기경계층 연구를 하게 되었다. 현재 부산대에서 기후시스템 협동과정 주임교수를 역임하면서 융합과목으로 기후변동론과 기후변화에 관련된 강의를 하고 있다. (kjha@pusan.ac.kr)

자가 수상자로 선정되어 지금도 그 감동이 남아있다. 프린스턴대 GFDL(지구물리유체역학연구소)에 계시는 슈쿠로 마나베 박사님이다. 그는 지구온난화가 진행되는 것을 모형의 시뮬레이션으로 실험을 하고 기후의 변동성 및 변동량의 정량화, 그리고 기후변화의 원인을 파악하는 연구 등을 지난 60년간 수행하였다. 나는 매년 기후변동론이나 기후변화론, 또는 대기대순환론의 첫 강의를 지구온난화 역사이야기로 시작한다. 당연히 마나베 박사님의 업적을 수차례 언급한다(표 1 참조). 나의 지도교수인 김정우 교수님^[1]은 기후모형의 개발자 중의 한 분이고 그의 스승은 기후모형의 가장 기분이 되는 역학적 조직을 만든 모형연구자 중에 가장 많이 알려져 있는 아키오 아라카와 교수님^[2,3]이다. 올해 초에 돌아가셔서 애도의 시간을 보낸 적이 있는데, 아라카와 교수님의 강의에서도, 나의 지도교수의 강의에서도 1960-1970년대에 초기 모형 개발자들의 다양한 에피소드를 들었다. 이번 마나베 박사의 노벨수상자 인터뷰에서 가장 어려운 부분을 담당할 연구자가 아라카와 박사라고 소개하는 것을 듣고 매우 감명을 받았다.

서론

마나베 박사님은 동경대를 졸업한 후 미국해양기상청에 취업하여 프린스턴대에 지구물리유체역학연구소(GFDL)에서 본격적인 기후연구를 시작하였다. 그는 1967년에 이산화탄소량의 2배 증가 시(doubling CO₂) 지구의 평균온도가 얼마나 올라가는가를 최초로 정량화시킨 과학자이다.^[4-7] 뿐만 아니라 1975년에

REFERENCES

- [1] J. W. Kim and W. L. Gates, Rep. No 11, Climate Research Institute, Oregon State University, 60p (1980).
- [2] A. Arakawa, Proc. Symp. on Numerical Weather Prediction, WMO/IUGG, 1-6 (1969).
- [3] A. Arakawa and W. H. Shubert, J. Atmos. Sci. **31**, 674 (1974).
- [4] S. Manabe and F. Möller, Mon. Weather Rev. **89**, 503 (1961).
- [5] S. Manabe and R. F. Strickler, J. Atmos. Sci. **21**, 361 (1964).
- [6] S. Manabe and R. Wetherald, J. Atmos. Sci. **24**, 241 (1967).
- [7] S. Manabe and R. T. Wetherald, J. Atmos. Sci. **32**, 3 (1975).

Table 1. The milestones on the discovery of global warming. (https://history.aip.org/climate/timeline.htm에서 부분 발췌)

Year	Contents
1896	Arrhenius publishes first calculation of global warming from human emissions of CO ₂ . => Simple models
1965	Boulder, Colorado meeting on causes of climate change: Lorenz and others point out the chaotic nature of the climate system and the possibility of sudden shifts. => Chaos theory
1967	Manabe and Wetherald make a convincing calculation that doubling CO ₂ would raise world temperatures a couple of degrees. => Radiation math
1975	Warnings about environmental effects of airplanes lead to investigations of trace gases in the stratosphere and discovery of danger to ozone layer. => Other gases Manabe and collaborators produce complex but plausible computer models which show the temperature rise of a few degrees for doubled CO ₂ . => Models (GCMs)
1985	Ramanathan and collaborators announce that global warming may come twice as fast as expected, from rise of methane and other trace greenhouse gases. => Other gases
2015	Paris Agreement: nearly all nations pledge to set their own targets for greenhouse gas cuts and to report their progress. => International
2018	IPCC report explains that to avoid disastrous warming, the world's greenhouse gas emissions must be in sharp decline by 2030. => International

2배의 이산화탄소량을 기후모형의 효시가 된 초기 대기대순환 모형을 통한 지구온난화 시뮬레이션에 대한 논문을 발표하게 된다.^[8-10] 2배 이산화탄소 실험을 처음으로 시도를 한 것이다. 실제로 1970년대에는 지구 기후변화 연구 역사에 또 하나의 기록이 더 있는데, 바로 성층권에 미량기체들이 오존층을 분해할 수 있다는 연구가 발표된 때이다.^[11] 이 연구는 인공위성관측에 의하여 오존층 파괴가 증명이 되면서 1995년에 노벨화학상을 받게 되고 폴 크루첸 박사님 등 세 분이 수상하게 되었다.

2021년에 마나베 박사가 노벨물리학상을 받게 된 중요한 이유는 최근에 지구온난화가 인간활동에 의한 것임이 입증되고^[12] 기후변화에 따른 다양한 자연재해의 급증이 현실화되면서 그의 지구온난화에 대한 선각자적 연구가 인정된 것으로 보인다. 표 2는 마나베 박사의 초기 논문 리스트이다. 마나베 박사가 1975년에 발표한 논문^[7]은 JAS(미국기상학회의 대기과학저널)에 발표되어 인용이 매우 많이 된 논문이다. 입사하는 복사와 방출되는 복사의 복사평형으로 기온의 연직 프로파일이 결정되는 과정에서 연직으로 발생하는 대류불안정과정을 통하여 온도를 전달하는 과정을 넣어야 한다는 것을 강조한 것이다. 즉 복사-대류 과정으로 기온의 연직 프로파일이 결정이 된다고 설명을 처음으로 시작한 것이다. 이후에 이 새로운 발견들은 많은 기후학자들에 의하여 지금의 IPCC6보고서^[12]에서 사용되는 40개가 넘는 모형을 이용하는 연구로 발전되어 이제는 서로 비교하여 불확실성을 많이 줄여서 그 평균 결과를 지구온난화 과정으로 산출하고 있다. 마침 마나베 박사가 2배 이산화탄소 실험을 발표하던 즈음에 또 하나의 JAS에 발표된 로렌츠 교수의 카오스 이론^[13]에 근거하여 여러 모형의 예측값들을 평균값으로 취하여 예측이나 전망자료를 만들게 된 것이다. 이제 더 위진 지구에 우리는 살고 있다. 그래서 지구의 대기는 기후과

학의 실험실이 되어 우리 모두가 온난화를 증명하게 된 셈이며, 초기 마나베 박사가 제시한 하나의 이론에서 실제 인류에 공헌한 중요 물리학의 업적이 된 것이다.

그의 업적은 크게 두 가지로 나누어 살펴볼 수 있다.

마나베 박사는 1960년 초에 가장 중요한 발견을 한 사람으로 알려져 있다. 첫째는 1차원 복사-대류 모형의 개발이다. 대기의 수분 함량이 대기 온도에 따라 달라지는 경우, 방출되는 장파 복사 공급원의 유효 높이 또한 대기 온도에 의존한다는 사실을 처음으로 밝힌 것이다. 상대 습도의 연직 분포를 고려할 때, 대기 온도가 따뜻할수록 방출되는 복사의 유효 공급원이 더 높아진다. 따라서, 방출되는 장파 복사의 의존성은 Stefan-Boltzman의 온도의 4제곱 법칙에서 예상되는 것보다 적다. 이러한 이유로, 상대 습도가 고정된 대기의 평형 온도는 복사 대류 평형 조건을 만족시키기 위해, 절대 습도가 고정된 것보다 태양 상수 또는 CO₂ 및 O₃와 같은 흡수체에 더 의존한다.

지구온난화가 진행되는 것을 이후 모형의 시뮬레이션으로 실험을 하는 데에는 그 변동성이나 변동량을 정량화하고 기후변화의 원인을 정확하게 파악하는 것이 매우 중요하다. 그림 1은 노벨상위원회에서 발표한 그의 업적을 나타낸 도식화인데, 그

REFERENCES

[8] S. Manabe and K. Bryan, J. Atmos. Sci. **26**, 786 (1969).
 [9] S. Manabe, Mon. Weather Rev. **97**, 775 (1969).
 [10] S. Manabe, K. Bryan and M. J. Spelman, J. Phys. Oceanogr. **5**, 3 (1975).
 [11] P. J. Crutzen, Q. J. R. Meteorol. Soc. **96**, 320 (1970).
 [12] IPCC, Sixth Assessment Report (ipcc.ch) (2021).
 [13] E. N. Lorenz and N. Edward, J. Atmos. Sci. **20**, 130 (1963).

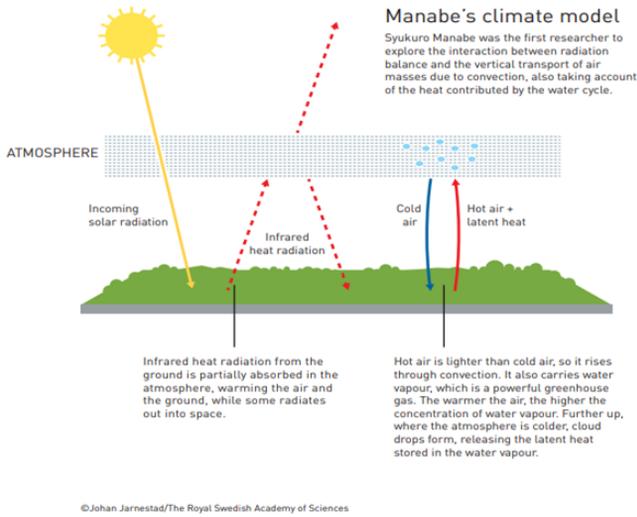


Fig. 1. A schematic of Manabe's climate model from Nobel Prize in 2021.^[14]

는 더운 공기는 상승하고 찬 공기는 하강하는 대류과정을 매우 중요하게 생각하고 수증기 또한 중요한 인자임을 강조하였다. 여기서 매우 중요한 물리적 과정은 두 배의 CO₂의 개념을 만들어 낸 것이다. 즉, 지구 평균 기온을 좌우하는 다양한 조건들을 대류(*R*), 수평적 열수송(*H*), 연직 열수송(*V*), 기타 요인(*O*), CO₂와 같은 온실기체(*C*)로 간주하는 것이 아레니우스 이후의 물리적 관점이라면 마나베 박사는 이를 복사과 연직 수송이 매우 중요하다고 간단화시키고, 특히 CO₂를 2배로 가정한 기후모형을 제안하고자 하였다.

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

복사-대류 모형

그의 가장 큰 업적으로 취급되는 JAS에 출판된 Manabe and Wetherald^[6]의 논문은 온도 프로파일을 결정하는 복사 이외에 대류현상이 얼마나 중요한가를 보인 연구이다. 이 논문의 그림 5를 여기 그림 2로 보였다. 대류 과정은 수증기의 함량이 중요하며 그의 노력으로 지구온난화 연구의 주요 물리과정이 설명이 되었다. 대류 평형 연구의 결과를 논의하기 전에, 상대 습도 분포가 지정된 대기의 순수 복사 평형(대류=0) 문제를 간단히 설명해야 한다. 이 문제는 Hergesell^[15]에 의하여 처음 조사되었는데, 회색체 복사를 가정하여 상대 습도의 중요성과 함께 대기의 순수 복사 평형 상태를 수치적으로 정량화 하였다. 순수 복사 평형 상태의 대기는 거의 등온 상태이고, 수증기가 대기 평형 온도에 미치는 자기 증폭 효과로 인해 온도가 매우 낮다. 대기의 복사-대류 평형의 계산을 반복하고, Manabe and Strickler^[5]에서 수행된 것처럼 고정 절대 습도

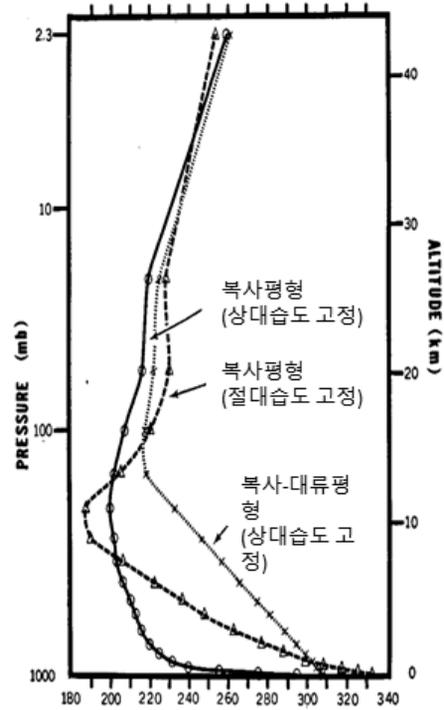


Fig. 2. An one-dimensional radiative-convective model in terms of air temperature profile from Manabe and Wetherald (1967)'s Fig. 5. Solid line (dashed line) indicates radiative equilibrium of the atmosphere with the given distribution of relative humidity (absolute humidity) and dotted line indicates radiative convective equilibrium of the atmosphere with the given relative humidity.

분포를 갖는 대기 대신에 고정 상대 습도 분포를 갖는 대기에 대한 온도 프로파일 차이를 처음으로 보였다.

평형 상태로의 접근

상대 습도 분포가 고정된 대기는 절대 습도(절대적 습기량을 고정한 경우가 고정된 대기보다 열평형 상태에 도달하는 데 더 오랜 시간이 걸릴 것이다. 이러한 차이가 발생하는 두 가지 이유는 다음과 같다. ① 상대 습도 분포가 고정된 대기에서 방출하는 복사는 절대 습도 분포가 고정된 대기보다 대기 온도에 덜 의존한다. 따라서, 평형 상태를 향한 접근 속도는 현저히 떨어진다. ② 상대 습도의 연직 분포는 시간 적분 내내 일정하므로, 절대 습도는 대기 온도에 따라 달라지고, 절대 습도 변화는 공기의 잠재 에너지의 변화를 포함한다. 그러므로 상대

REFERENCES

- [14] NobelPrize.org, Nobel Prize Outreach AB 2021. Thu. 2 Dec 2021. <<https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2021/popular-information/>>
- [15] M. Hergesell, Die Arbeiten des Preusslichen Aeronautischen Observatoriums bei Lindenberg 13, 1 (1919).

Table 2. A list of Manabe's early major papers.

Year	Authors	Title	Journal
1961	S Manabe, F Möller	On the radiative equilibrium and heat balance of the atmosphere	Monthly Weather Review
1962	J Smagorinsky, S Manabe	Numerical model for study of global general circulation	Bulletin of the American Meteorological Society
1964	S Manabe, Robert F Strickler	Thermal equilibrium of the atmosphere with a convective adjustment	Journal of the Atmospheric Sciences
1965	S Manabe, J Smagorinsky, Robert F Strickler	Simulated climatology of a general circulation model with a hydrologic cycle	Monthly Weather Review
1965	J Smagorinsky, S Manabe, J Leith Holloway Jr	Numerical results from a nine-level general circulation model of the atmosphere	Monthly weather review
1967	J Smagorinsky, RF Strickler, WE Sangster, S Manabe, JL Holloway Jr, GD Hembree	Prediction experiments with a general circulation model	Proc. Int. Symp. on Dynamics of Large Scale Atmospheric Processes, Moscow, USSR
1967	Syukuro Manabe, Joseph Smagorinsky	Simulated climatology of a general circulation model with a hydrologic cycle II. Analysis of the tropical atmosphere	Monthly Weather Review
1967	Syukuro Manabe, Richard T. Wetherald	Thermal equilibrium of the atmosphere with a given distribution of relative humidity	Journal of the Atmospheric Sciences
1969	Syukuro Manabe	Climate and the ocean circulation I. The atmospheric circulation and the hydrology of the Earth's surface	Monthly Weather Review
1975	Syukyro Manabe, Richard T. Wetherald	The effects of doubling the CO ₂ concentration on the climate of a general circulation model	Journal of the Atmospheric Sciences

습도 분포가 고정된 공기의 유효 열용량은 건조 공기의 열용량보다 크다. 따라서, 접근 속도는 더 느리다. 또한 계산된 결과를 보면, 대기 중 CO₂ 양이 두 배로 증가하면 대기 온도(상대 습도가 고정되어 있는 곳)를 약 2°C 상승시키는 효과가 있다는 것을 보였다.

둘째는 대기-해양 접합 기후모형의 개발이다. 1965년에서 약 10년간의 대기과학에서 가장 중요한 혁신적인 과학적 발견은 접합모형의 개발과 분광학적 변환기법의 개발이다. 해양은 높은 열용량으로 인하여 기후시스템의 가장 주요한 성분인데, GFDL에서 해양모형 개발자였던 브라이언의 초기논문^[16]과 마나베 박사는 기후의 시간적 발전에서 가장 중요한 해양의 영향을 모형 안에다 넣게 되는데 그들의 논문 Manabe and Bryan은 처음으로 접합이라는 과정을 보이게 된다.^[8,16] 이때 해양을 단순화 시켜서 접합의 개념을 도입하게 된다. 처음에는 해양을 한 층의 습지층(swamp model)으로 도입하고 그 다음으로 해양을 두 층으로 해양혼합층의 개념으로 확장시킨다. 그래서 마나베를 기후 모델의 아버지라 부르게 된 이유인 것 같다. 이것은 접합 해양 대기대순환(coupled ocean-atmosphere general circulation model, OAGCM)^[10] 모형의 이름으로 출판이 되고 이어 모형이 지금의 고분해능으로 매우 복잡하게 다루어지는데 수평으로 그리고 연직 방향으로 매우 많은 층을 가지게 되었다. 이번 노벨 물리학상의 수상자인 독일 막스플랑크에서 연구한 클라우스 하

셀만 박사님도 해양의 중요성을 발견하여 이를 모형 내에서 대기와 해양의 접합이라는 과정으로 시뮬레이션을 한 분이다.

마나베 박사의 기후 모형 물리방정식

1. 운동 방정식과 열역학 방정식

정역학 평형 근사와 지표 기압에 의해 표준화된 기압을 연직 좌표계로 사용하여 Mercator 도법에서의 운동 방정식을 사용하였다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(P_* U) = -D_3(U) + \left(2\Omega + \frac{mU}{a}\right) \cdot P_* V \cdot \sin\theta - mP_* \frac{\partial \phi}{\partial x} - mRT \frac{\partial P_*}{\partial x} + F_x \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(P_* V) = -D_3(V) + \left(2\Omega + \frac{mU}{a}\right) \cdot P_* U \cdot \sin\theta - mP_* \frac{\partial \phi}{\partial y} - mRT \frac{\partial P_*}{\partial y} + F_y \quad (2)$$

REFERENCES

[16] K. Bryan and M. Cox, Tellus 19, 54 (1967).

연속방정식은

$$\frac{\partial P^*}{\partial t} = -D_3(1) \quad (3)$$

정역학 방정식은

$$\frac{\partial \varnothing}{\partial Q} = -\frac{RT}{Q} \quad (4)$$

열역학 방정식은

$$\frac{\partial}{\partial t}(P^*T) = -D_3(T) + \frac{R}{C_p} \frac{T_\omega}{Q} + F_T + \frac{P^* \dot{q}}{C_p} \quad (5)$$

연직 Q-velocity와 P-velocity는 다음과 같은 관계에서 얻을 수 있다.

$$\dot{Q} = \frac{1}{P^*} \left[Q \int_0^1 D_2(1) dQ - \int_0^Q D_2(1) dQ \right] \quad (6)$$

$$\omega = P^* \dot{Q} + Q \dot{P}^* \quad (7)$$

$$D_3(A) = D_2(A) + P^* \frac{\partial(Q\dot{A})}{\partial Q} \quad (8)$$

$$D_2(A) = m^2 \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{P^*UA}{m} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{P^*VA}{m} \right) \right] \quad (9)$$

격자보다 작은 규모의 현상을 아격자 규모로 하여 운동량 혼합항, F_x , F_y , 그리고 열혼합 항, F_T 으로 표현하여 단순화시켜 계산되었다.

2. 수증기 예단 방정식

이류와 아격자 규모의 확산에 의한 수증기 혼합비의 변화는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(P^*r)_{ADV} = D_3(r) + F_r \quad (10)$$

F_r/P^* 는 아격자 규모의 확산에 의한 혼합비의 변화를 나타낸다. 이류와 아격자 규모의 확산으로 인한 수증기의 혼합비가 혼합비의 포화량을 초과하는 경향이 있는 경우, 대류 또는 비 대류 응결이 발생하는 것으로 간주된다.

3. 복사 전달

복사 전달에 의한 온도 변화는 대기의 흡수원과 온도의 연직적 분포에 의한 함수로 계산된다. 대기의 흡수원으로는 수증기, 이산화탄소, 오존, 구름이 있다. 세부적인 계산 방안은 Manabe의 초기연구들^[5,6]과 같이 계산하였다. 대기 상단에서의

일사량은 연간 일정한 분포를 가진다고 가정한다. 일사량의 주간 변화와 일변화는 effective mean 천정각을 도입함으로써 제거된다.^[4] 수증기, 구름, 이산화탄소, 오존의 연평균 분포는 복사 전달을 계산하기 위해 특정된다. 대류권의 수증기와 구름의 분포는 S, M 연구에서 사용된 것과 동일하다. 성층권의 수증기 혼합비는 Mastenbrook 연구^[17]에서 제시된 것과 같이 상수로 가정하였다. 또한, 대기에서의 수분 순환과 복사 간의 상호작용은 제거된다. 이산화탄소의 혼합비도 상수로 0.456×10^{-3} gm/gm으로 가정하였다. 알베도와 구름의 흡수력은 초기연구들에서 사용된 것과 동일한 양이 사용되었다.

4. 지구 표면에서의 경계조건

지표면의 응력은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$(\tau)^* = -\rho(h) \cdot C_D(h) \cdot |V_h| \cdot V_h \quad (11)$$

$C_D(h)$ 는 고도 h 에서의 drag coefficient이다.

$$C_D(h) = \left(\frac{k_0}{\log_e \left(\frac{h}{z_0} \right)} \right)^2 \quad (12)$$

ρ 는 밀도, V_h 는 고도 h 에서의 속도, k_0 는 Karman 상수, z_0 는 지표거칠기 길이, h 는 가장 하위 고도와 동일하게 설정되었다.

열 플럭스는 다음과 같이 표현하였다.

$$(vH)^* = C_p \cdot \rho(h) \cdot C_D(h) \cdot |V_h| \cdot \left[T^* - \frac{T(h)}{Q(h)^\kappa} \right] \quad (13)$$

$$(vLH)^* = L \cdot E \quad (14)$$

$$E = \rho(h) \cdot C_D(h) \cdot |V_h| \cdot (r_{ws} - r(h)) \quad (15)$$

여기서 L 은 증발 잠열 또는 승화 잠열, E 는 증발 속도, r_{ws} 는 T^* 에 따라 달라지는 수증기의 포화 혼합비이다.

지표면으로부터의 열 및 수분 플럭스의 계산에 사용되는 지표면의 온도 T^* 는 지표면에서 열 평형의 조건을 만족하도록 결정한다. T^* 를 계산하기 위하여 육지 표면뿐만 아니라 바다 표면에도 적용되었다. 그는 바다로의 열의 하향 전도는 무시되고, 이 가정은 해수의 열 저장에 시간이 따라 변하거나 해류에 의한 열의 이류가 중요한 경우에는 적용되지 않는다. 초기에는

REFERENCES

- [17] H. J. Mastenbrook, *Humidity and Moisture 2* (1963), pp. 480-485.

일사량의 계절적 변화를 무시하여 해양 열저장의 시간적 변화는 무시할 수 있지만 열의 이류의 영향은 무시할 수 없다고 하였다. 이후 해양 모형은 여러 층으로 발달하고 당연히 시간적 발전이 모두 고려되는 형식으로 발전하게 된다.

5. 육지 표면에서의 수문학

$$E = \rho(h) \cdot C_D(h) \cdot |V_h| \cdot (r_{IS} - r(h)) \quad (16)$$

r_{IS} 는 얼음 포화상태에서의 혼합비, $C_D(h)$ 는 drag coefficient이다.

토양 수분 W 이 어떤 특정 값인 W_k 보다 크다면 총 증발량은 대기 요인에 의해 결정되고 E_0 와 동일하다고 가정한다. 토양수분이 W_k 보다 작은 경우, 증발은 작아지고, 증발 비율은 토양 수분량과 비례하게 된다.

$$\begin{aligned} \text{If } W \geq W_k, E &= E_0 \\ \text{If } W < W_k, E &= E_0 \frac{W}{W_k} \end{aligned} \quad (17)$$

$$E_0 = \rho(h) \cdot C_D(h) \cdot |V_h| \cdot (r_{WS} - r(h)) \quad (18)$$

W 는 토양층에 포함된 토양 수분이며, 단순화하여

$$W_k = 0.75 \times W_{FC} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \text{If } W = W_{FC} \text{ and } R_A > E_0, \frac{\partial W}{\partial t} &= 0 \text{ and } r_f = R_A - E_0 \\ \text{And } W < W_{FC}, \frac{\partial W}{\partial t} &= R_A - E \end{aligned} \quad (20)$$

여기서 R 은 강수율이고 r 은 유출율이며, 이 모형은 초기 수문학의 기초를 이루게 되었다.

적설 깊이에 대한 물의 상당 깊이 예측 방정식은

$$\frac{\partial S}{\partial t} = S_F - E - M_e \quad (21)$$

$$M_e = \frac{E_x}{L_f} \text{ if } E_x > 0, \quad M_e = 0 \text{ if } E_x \leq 0 \quad (22)$$

$$E_x = [S_* + (DLR)_* - \sigma T_*^4 - (vH)_* - (vLH)_*]_{T_* = T_{fr}} \quad (23)$$

여기서 T_{fr} 은 동결 온도이고 273.2 K와 동일하다고 가정하였다.

$$\text{If } W < W_{FC}, \frac{\partial W}{\partial T} = M_e + R_A,$$

$$\text{If } W = W_{FC}, \frac{\partial W}{\partial T} = 0 \text{ and } r_f = M_e + R_A \quad (24)$$

이 초기 수문학의 방법은 학계에서 Bucket 방법(양동이 모형)

으로 알려져 있으며, 이후 토양의 수분의 변화는 토양층의 다층화와 식생의 역할이 중요해지면서 더욱 발전하게 되었다.

맺음말

마나베 박사의 업적을 한 줄로 요약하자면 그는 온실기체에 대응하는 지구 평균 기온을 정량적으로 구하기 위하여 대류 과정의 열의 연직 수송과 수증기의 상변화와 잠열방출을 통합한 기후 물리 모델을 최초로 제시하였다. 태양열이 지구에 방사된 후 지표에서 발생한 열 일부는 대기 중으로 흡수되고, 일부는 우주로 빠져나간다. 지면에 가까운 공기는 따뜻해지고, 따뜻한 공기는 상대적으로 가볍기 때문에 수증기를 머금고 상승한다.

최초의 연구를 누구나 할 수 있는 일은 아니다. 특히, 자연계 내의 복잡계를 설명하기 위한 그의 노력은 어디에서부터 왔을까? 이러한 질문에 대하여 그는 끊임없는 열정과 호기심을 가지는 것이라고 하였다. 그는 지구의 기온을 조절해주는 연직 대류운동과 수증기의 중요성을 처음으로 제기한 것처럼, 과감하게 단순화시켜 물리과정으로 설명을 가능하게 하였다. 복잡계를 단순화시켜서 어떤 현상을 해석해내는 능력은 많은 시행과 실험의 결과에서 온다고 본다. 그는 1958년에 박사학위를 동경대학에서 마치고 취업을 미국에서 하지만 초기 5년 정도에는 뚜렷한 결과를 가진 논문을 출판하지 못하였다. 다만 많은 시행착오와 끊임없는 지적 호기심으로 문제해결에 매달렸다고 한다. 또 한 가지 염두에 두어야 할 것은 지적 관대함이다. 그의 동료들로부터 지속적으로 공동연구를 만들어낸 점을 볼 때 동료들의 설명과 과학적 논쟁을 매우 즐겁게 끌어간 점을 여러 사람들에게서 들을 수 있었다.

기후물리계로 되돌아보면 기후변화연구에서 아직 풀리지 않은 핵심 질문들이 있다. 지구상의 주요 빙상(ice sheet)에 해수면 고도가 지구온난화가 계속될 때 어떻게 반응할지 우리는 아직 모른다고 본다. 해수면 상승에 적지 않는 영향력을 가지는 것으로 알려진 극지역의 빙상에 대한 이해가 부족하며 온난화로 인한 기후 스트레스를 어떻게 정량화할 것인가는 여전히 남겨진 숙제이다.

2021년에는 기후 물리학의 두 선구자인 마나베 박사와 하셀만 박사에게 노벨상을 수여하며, 노벨상위원회는 분명한 메시지를 전하고 있다. 기후 연구는 물리학의 한 부분이며, 다른 세부 분야들과 같이 단단한 기초를 가지고 있다는 것이다. 결국 지구온난화는 이산화탄소 분자의 양자역학적 특성으로 공기 중의 적외선 흡수가 변화하면서 발생하는 지구의 복사 균형 변화에 의해 유발된다. 지구온난화 연구에 몰입하였던 두 과학자가 선구적인 발견을 한 지 60여 년이 지났지만, 기후 연구의 핵심 질문들에 대한 의문점은 풀리지 않고 있다.