

목성과 지구 태풍의 최대풍속 비교

고지혜, 김하연, 신지영

목차

- I 태풍의 구조와 Carnot cycle
- II 목성 태풍의 열효율과 V_{max}
- III 연구정리 및 고찰

01



태풍의 구조와 Carnot cycle

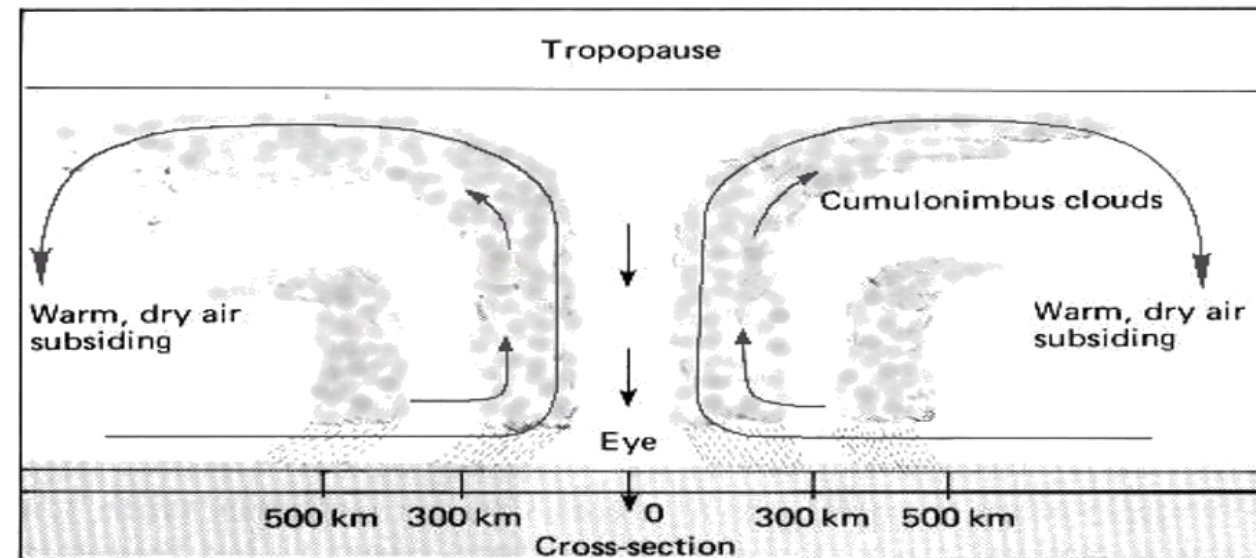
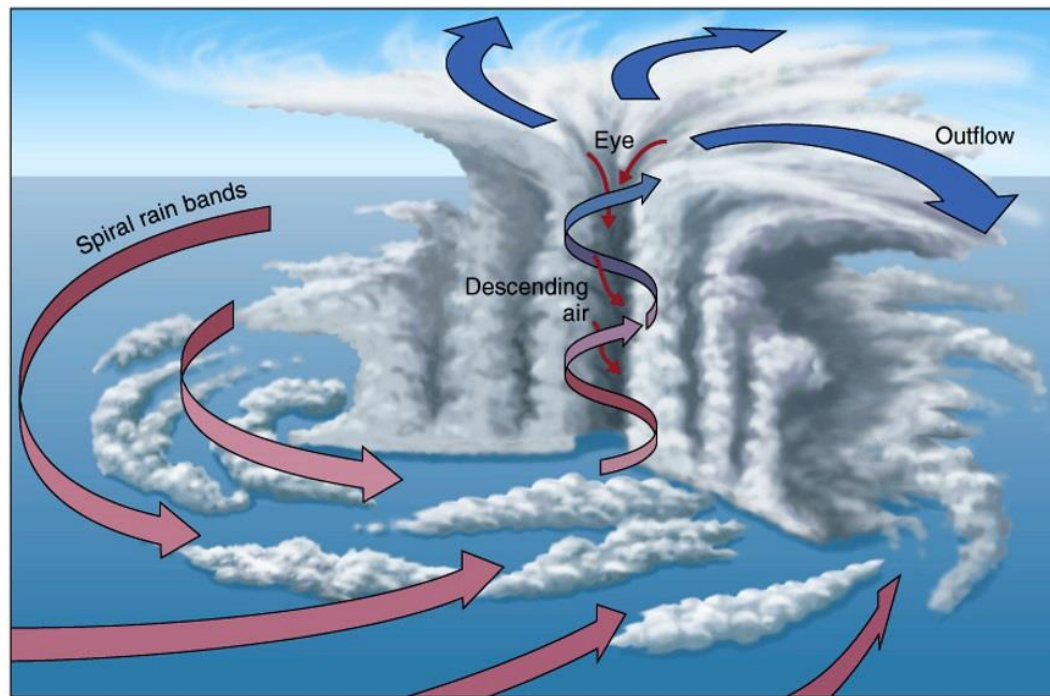
- Carnot cycle의 적용
- Efficiency and V_{max} 유도

태풍

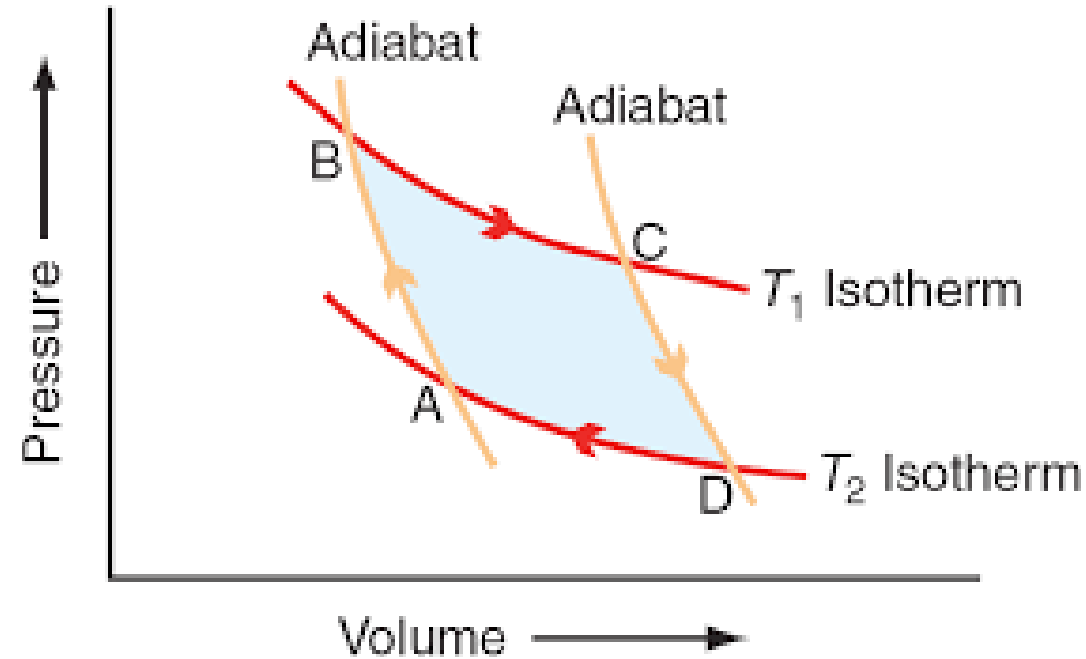
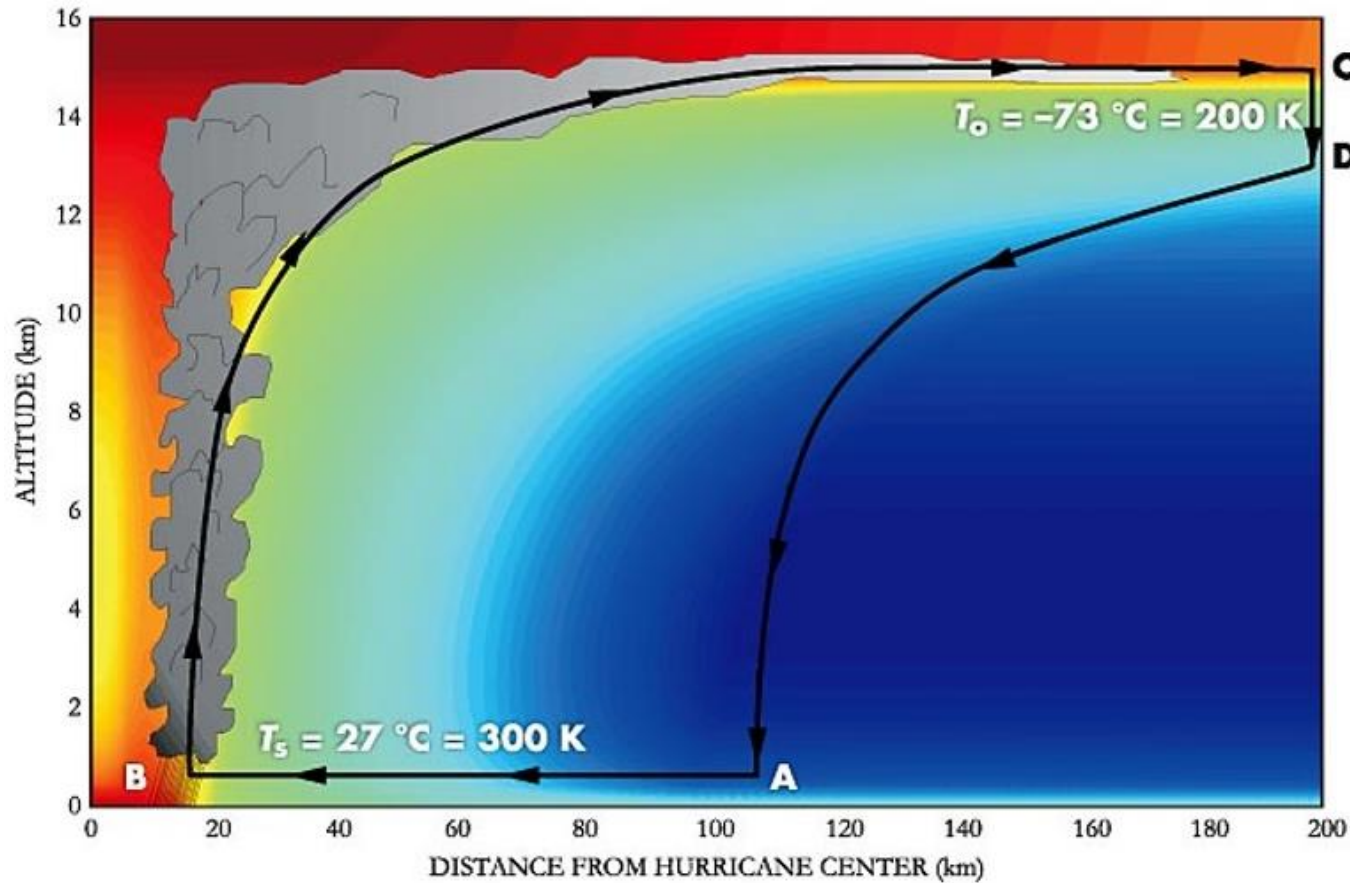


rare [South Atlantic tropical cyclone](#) viewed from the [International Space Station](#) on March 26, 2004.

태풍의 구조



태풍의 구조와 Carnot cycle



태풍의 구조와 Carnot cycle

- Entropy influx
– source : ocean

$$\dot{s}_{inflow} = \frac{2\pi}{T_a} \int_{r_e}^{r_o} [C_k |V_a| (k_0^* - k_a)] \rho_a r dr$$

$$dS = \frac{\delta Q}{T}$$

- Entropy outflux

$$\dot{s}_{outflow} = \frac{2\pi}{T_o} \int_{r_a}^{r_o} [C_k |V_a| (k_0^* - k_a)] \rho_a r dr$$

태풍의 구조와 Carnot cycle

$$|V|_{\max}^2 = \frac{C_k}{C_D} \frac{T_a - T_o}{T_o} (k_0^* - k_a)$$

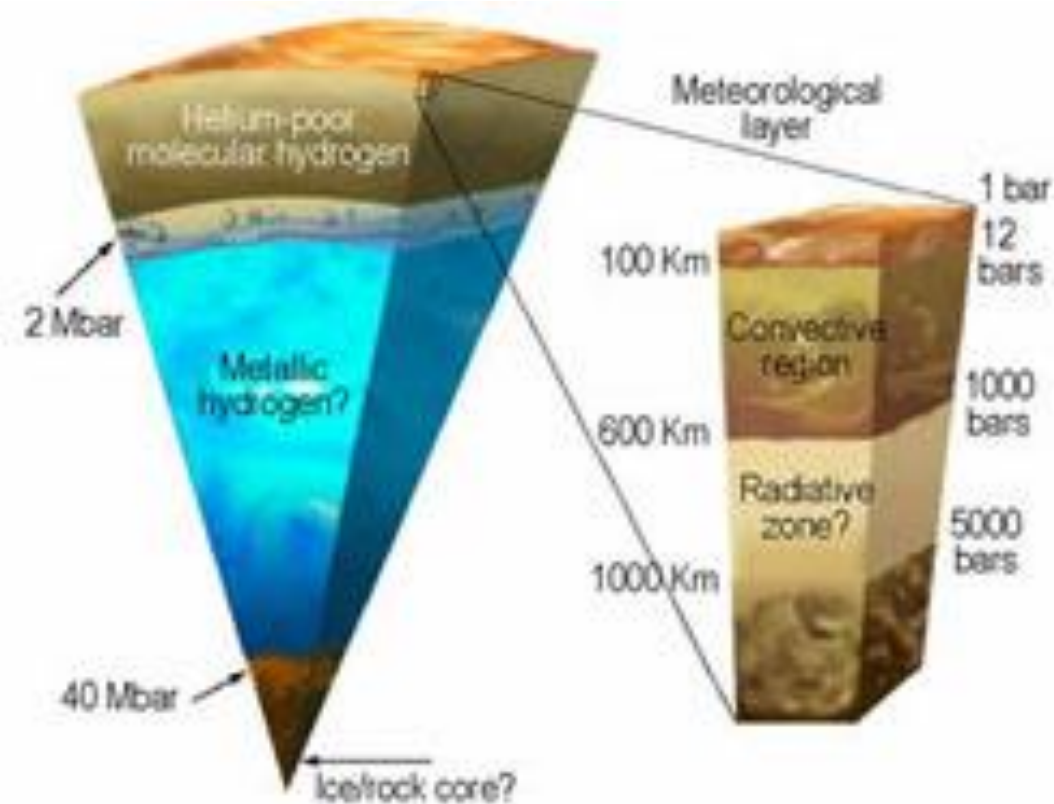
02



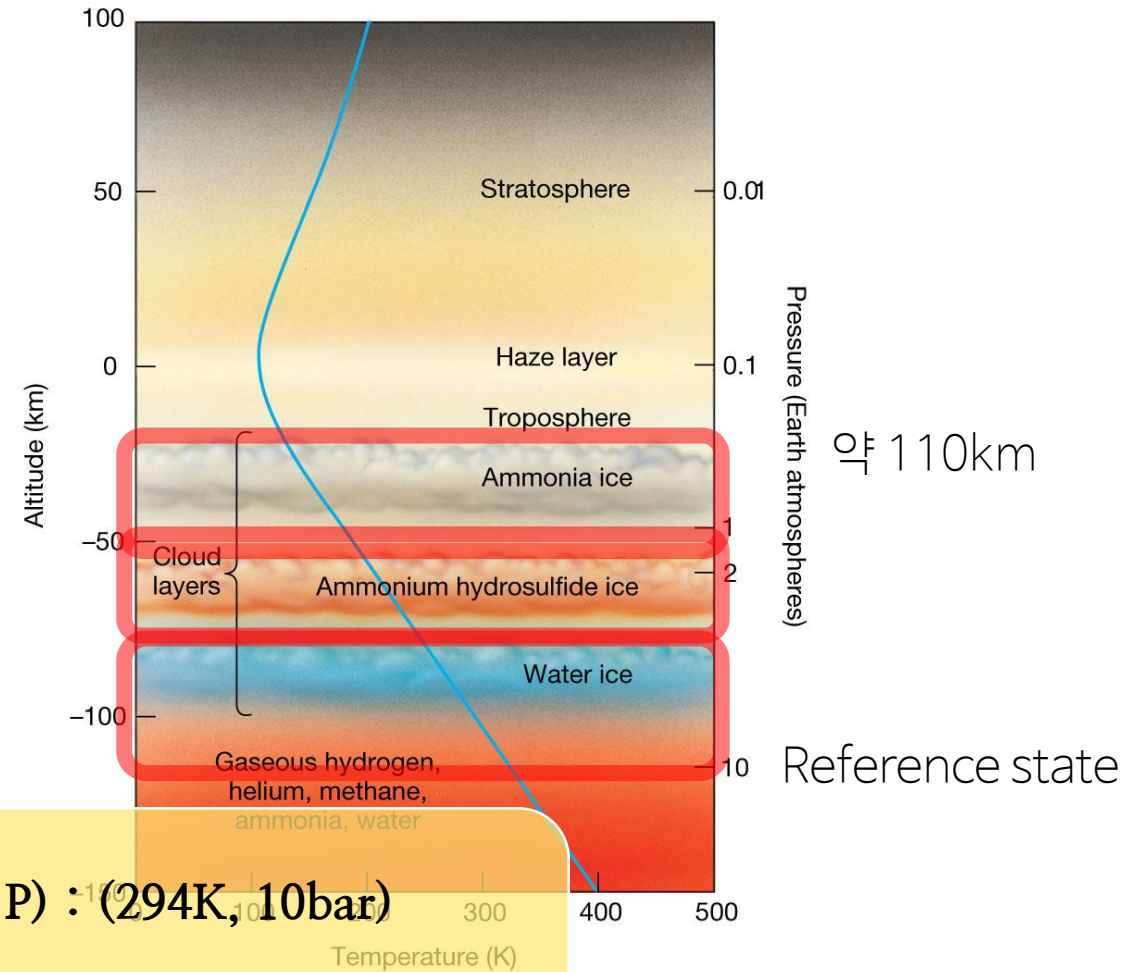
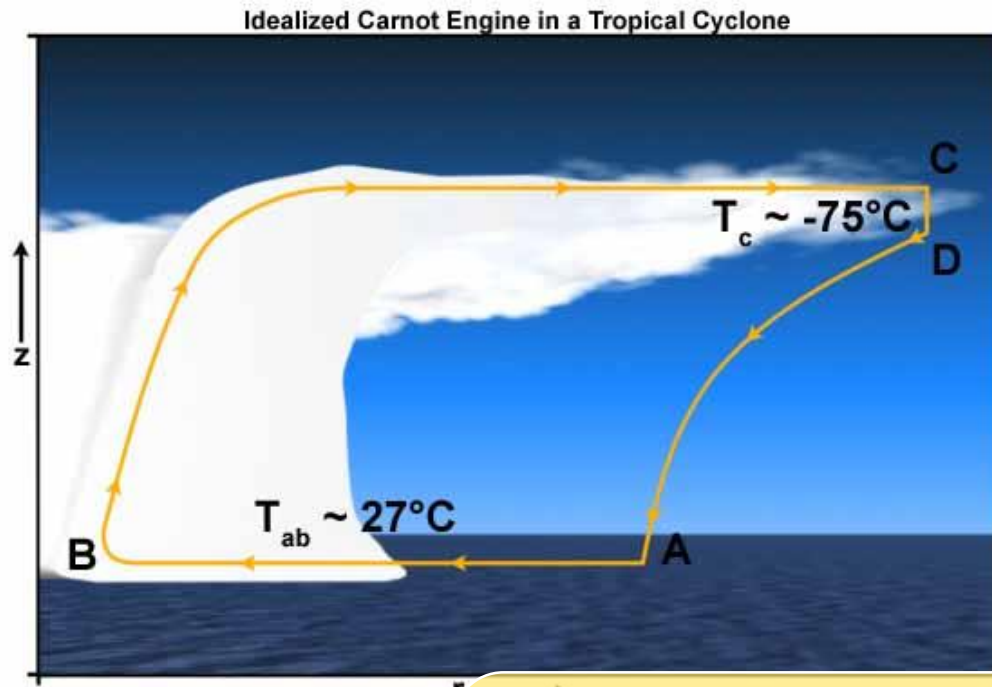
목성 태풍의 열효율과 V_{\max}

- 목성의 대기
- 목성의 열역학적 변수 유도
- 열역학적 효율성 도출
- 목성의 V_{\max}

목성 대기의 연직구조



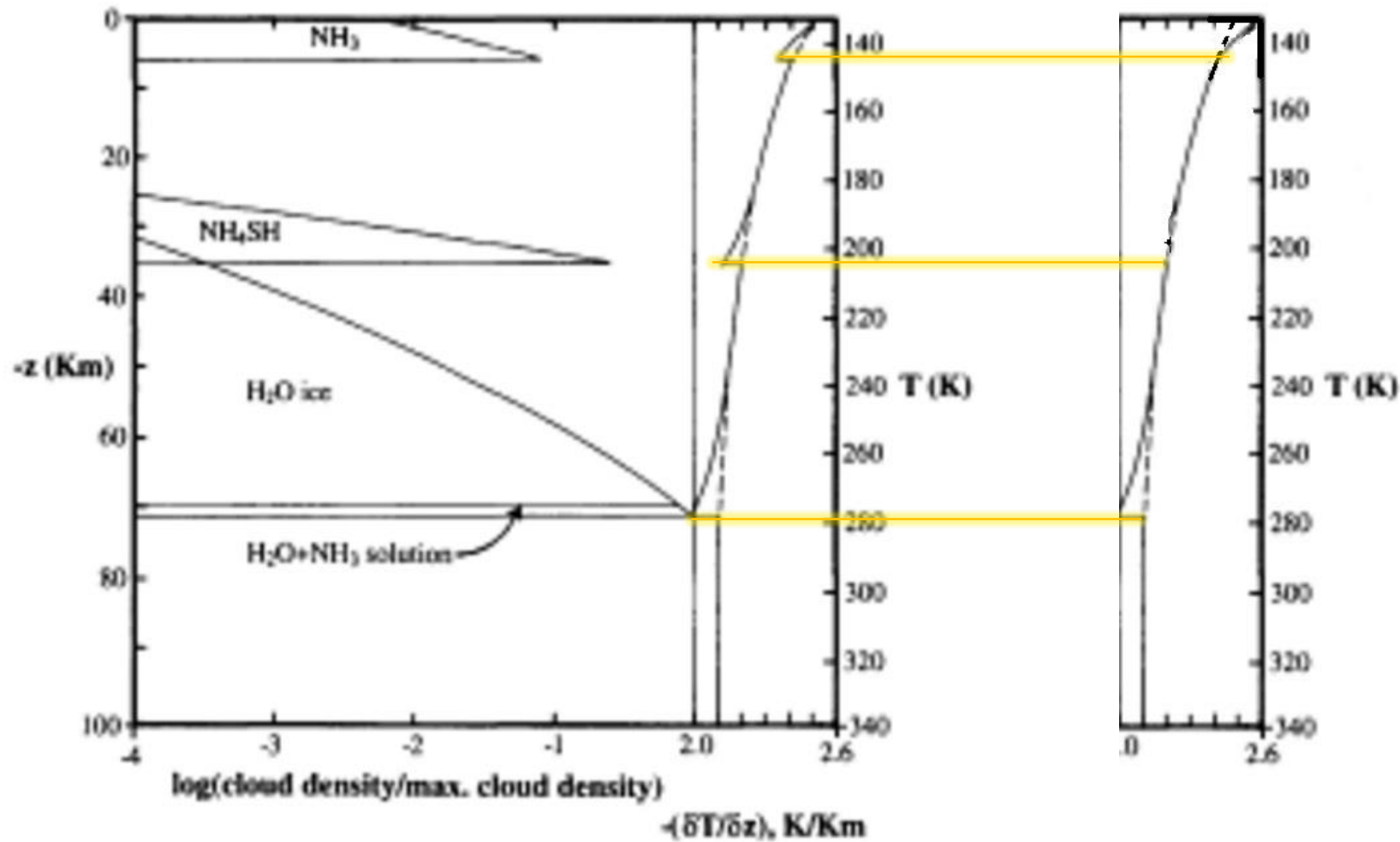
목성 대기의 연직구조



목성 대기의 접면 (T_a) = (T, P) : (294K, 10bar)

목성 대류권계면(T_0) = (T, P) : (? K, 0.5bar)

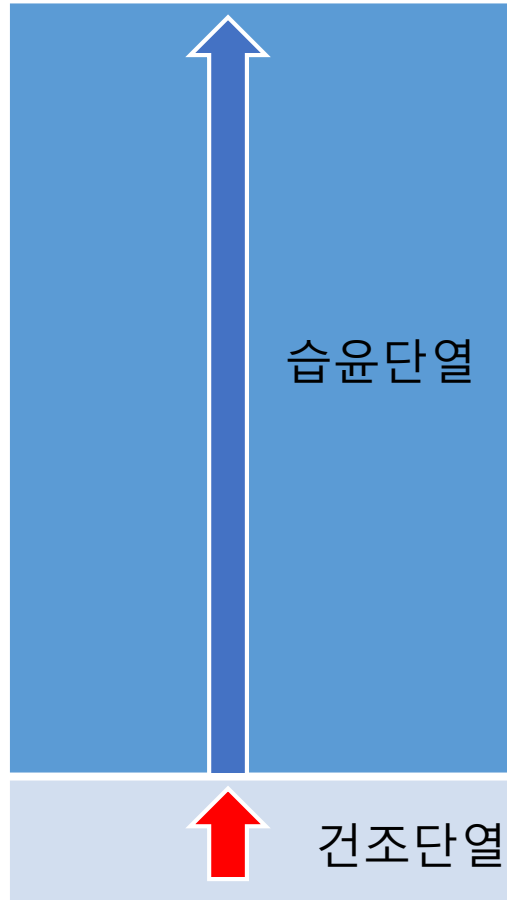
목성 대기의 연직구조



$$\frac{T_a - T_o}{T_a}$$

- 목표 : T_o 구하기!
- 대기에서의 가정
: 3개의 cloud layer
: 물로 근사

지구에서 권계면의 온도



15km 220.25K

1km 290.25K

0km 300K

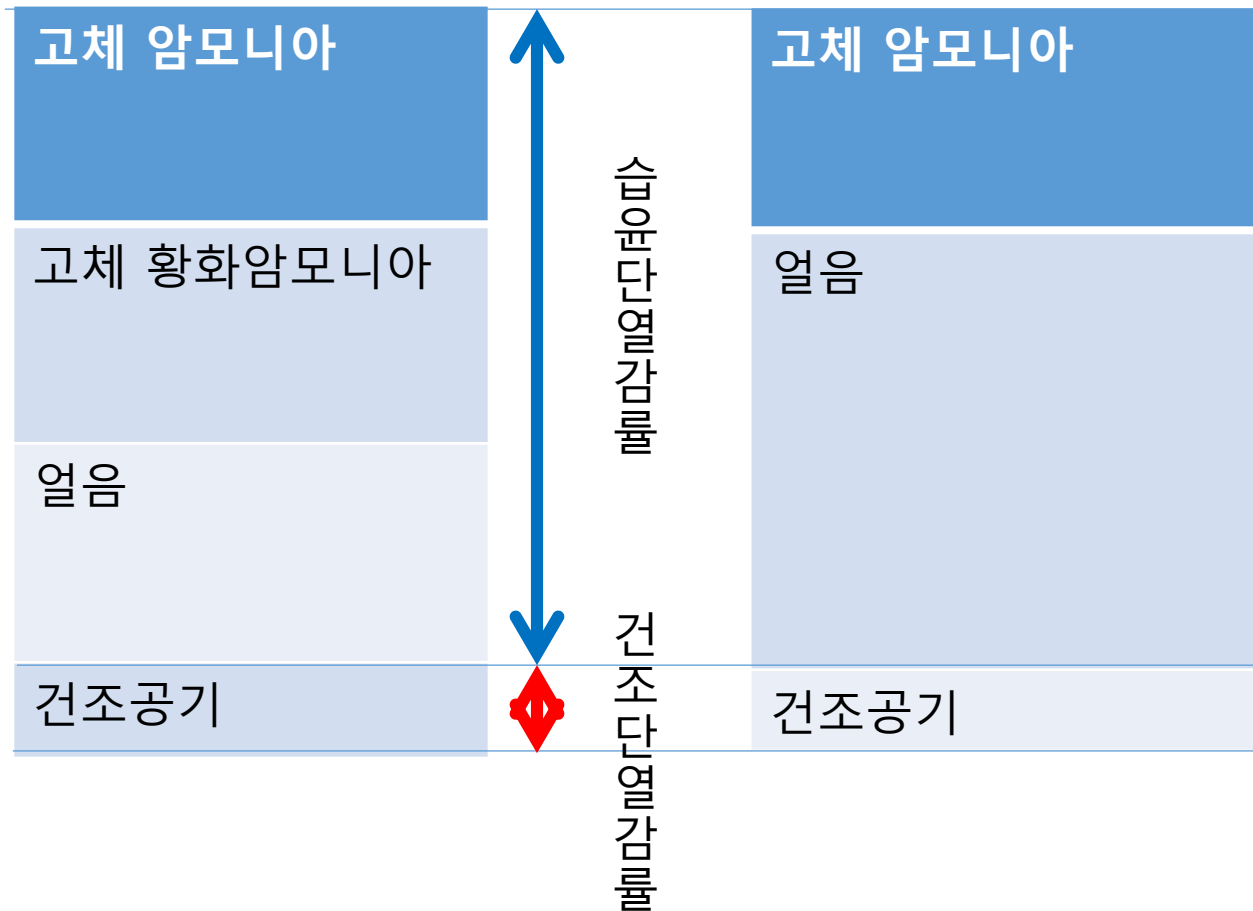
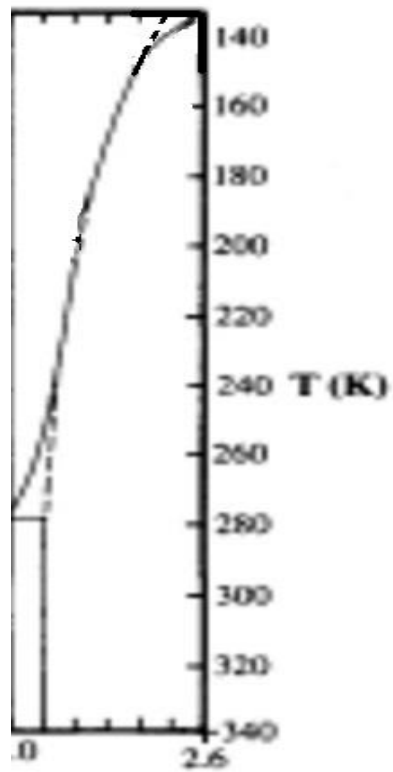
$$\Gamma_s = -\frac{dT}{dz} = \frac{g}{c_p} \frac{1 + \frac{l_v w_{sw}}{R}}{1 + \frac{l_v^2 w_{sw}}{c_p R_v T^2}}$$

5°C/km

$$\Gamma_d = -\frac{dT}{dz} = \frac{g}{c_{pd}}$$

9.75°C/km

목성에서의 권계면의 온도



건조단열감률

$$\Gamma_d = - \frac{dT}{dz} = \frac{g}{c_{pd}}$$

| 행성 | 중력 |
|----|---------|
| 지구 | 9.8m/s |
| 목성 | 26.2m/s |

| 행성 | 건조공기의 정압비열 |
|----|------------|
| 지구 | 1005J/kgK |
| 목성 | ? J/kgK |

| 행성 | 건조단열감률 |
|----|-----------|
| 지구 | 9.75°C/km |
| 목성 | ? °C/km |

정적비열, 정압비열

| 대기 성분 | 구성비(%) |
|---------------------|--------|
| 수소(H ₂) | 89.8 |
| 헬륨(He) | 10.2 |

For a monatomic gas

$$c_v = \frac{3}{2}R$$

$$c_p = \frac{5}{2}R$$



헬륨(He)

For a diatomic gas

$$c_v = \frac{5}{2}R$$

$$c_p = \frac{7}{2}R$$



수소(H₂)

기체상수

$$R = \frac{R^*}{M}$$

| 대기 성분 | 분자량(M) |
|---------------------|--------|
| 수소(H ₂) | 2 |
| 헬륨(He) | 4 |

| | 기체상수 |
|----|---------|
| 수소 | 4157.24 |
| 헬륨 | 2078.62 |

| | 정적비열 | 정압비열 |
|----|----------|----------|
| 수소 | 10393.09 | 14550.32 |
| 헬륨 | 3117.93 | 5196.54 |

목성의 건조공기에 대해

| 정적비열 | 정압비열 |
|---------|----------|
| 9651.02 | 13596.24 |

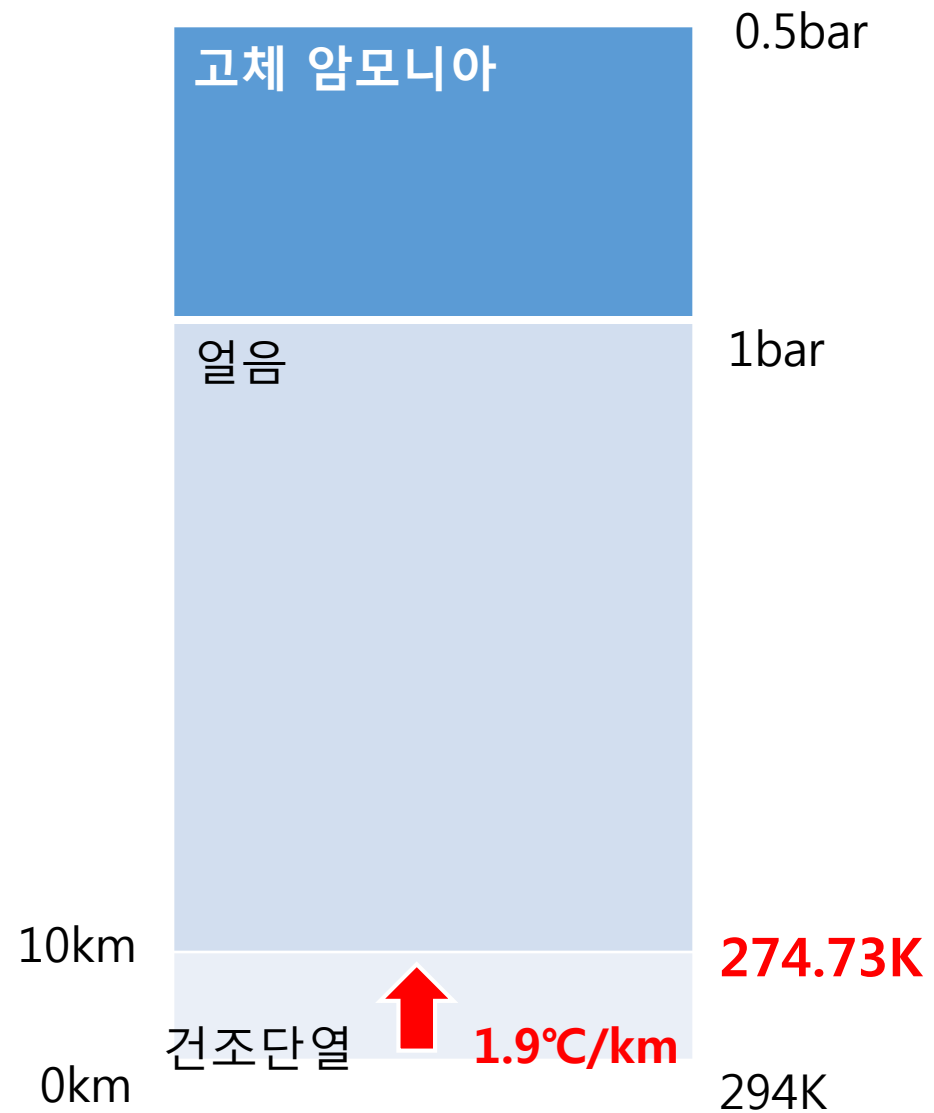
건조단열감률

$$\Gamma_d = - \frac{dT}{dz} = \frac{g}{c_{pd}}$$

| 행성 | 중력 |
|----|---------|
| 지구 | 9.8m/s |
| 목성 | 26.2m/s |

| 행성 | 건조공기의 정압비열 |
|----|----------------------|
| 지구 | 1005J/kgK |
| 목성 | 13596.24J/kgK |

| 행성 | 건조단열감률 |
|----|-----------------|
| 지구 | 9.75°C/km |
| 목성 | 1.9°C/km |



습윤단열감률



$$\Gamma_s = -\frac{dT}{dz} = \frac{g}{c_p} \frac{1 + \frac{l_v w_{sw}}{R}}{1 + \frac{l_v^2 w_{sw}}{c_p R_v T^2}}$$

$$c_p \times \Delta T + l_{vaporization} + l_{fusion}$$



$$\Gamma_s = -\frac{dT}{dz} = \frac{g}{c_p} \frac{1 + \frac{l_s w_{si}}{R}}{1 + \frac{l_s^2 w_{si}}{c_p R_v T^2}}$$

$$c_p = c_{pd} + w_t c_w$$

$$R_v = \frac{R^*}{M_v}$$

$$R = \frac{R^*}{M}$$

$$w_{si} = \frac{\epsilon e_{si}}{p}$$

$$\epsilon = \frac{M_v}{M_d}$$

$$e_{si} = 60.76 \exp\left(17.8931 - \frac{3496.93}{T}\right)$$

습윤단열감률의 열역학적 변수 구하기 (1)

$$\Gamma_s = -\frac{dT}{dz} = \frac{g}{c_p} \frac{1 + \frac{l_s w_{si}}{R}}{1 + \frac{l_s^2 w_{si}}{c_p R_v T^2}}$$

목성의 얼음구름층

목성의 암모니아 고체구름층

13596.24
J/kgK



$$c_p = c_{pd} + w_t c_w$$

$$c_p \approx c_{pd}$$



13596.24
J/kgK

461.92
J/kgK



$$R_v = \frac{R^*}{M_v}$$



489.09
J/kgK

3945.22
J/kgK



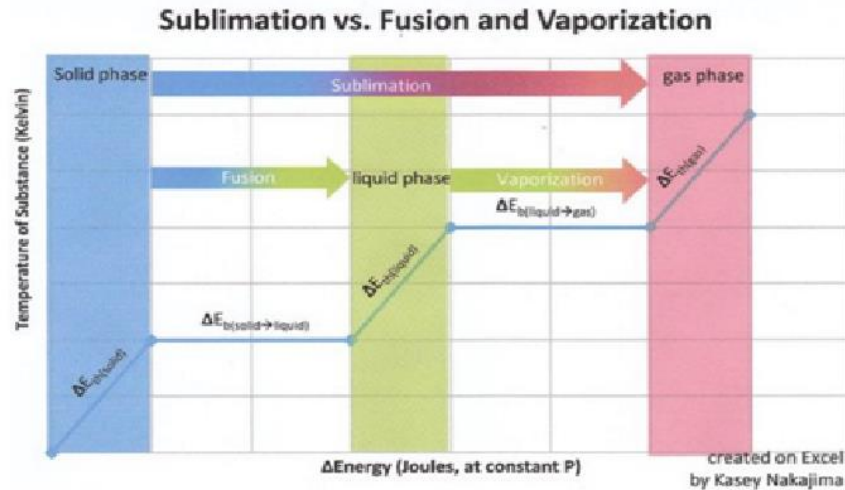
$$R = \frac{R^*}{M}$$



3945.22
J/kgK

습윤단열감률의 열역학적 변수 구하기 (2)

$$\Gamma_s = -\frac{dT}{dz} = \frac{g}{c_p} \frac{1 + \frac{l_s w_{si}}{R}}{1 + \frac{l_s^2 w_{si}}{c_p R_v T^2}}$$



$$l_s = C_p \Delta T + l_v + l_f$$

목성의 얼음구름층

목성의 암모니아 고체구름층

| | | | | | | | | | |
|---------------------------|--------------|---------------------------|-------------|-------|------|------|--------------|---------------------------|--------------|
| $l_v(\text{H}_2\text{O})$ | 2264.76kJ/kg | $l_f(\text{H}_2\text{O})$ | 334kJ/kg | Tv-Tf | 100K | Cpw | 4.186kJ/kg.K | $l_s(\text{H}_2\text{O})$ | 3017.76kJ/kg |
| $l_v(\text{NH}_3)$ | 1369kJ/kg | $l_f(\text{NH}_3)$ | 332.17kJ/kg | Tv-Tf | 44K | Cpam | 2.18kJ/kg.K | $l_s(\text{NH}_3)$ | 1797kJ/kg |

3018kJ/kg ←

| 성분 | 승화잠열(l_s) |
|---------|---------------|
| Water | 3018kJ/kg |
| ammonia | 1797kJ/kg |



1797kJ/kg

습윤단열감률의 열역학적 변수 구하기 (3)

$$\epsilon = \frac{M_v}{M_d} \quad w_{si} = \frac{\epsilon e_{si}}{p}$$

| | Epsilon |
|-----------|---------|
| Water 층 | 8.54 |
| Ammonia 층 | 8.07 |

water

$$e_{si} = 6.11 \exp\left(22.49 - \frac{6142}{T}\right)$$

ammonia

$$e_{si} = 60.76 \exp\left(17.8931 - \frac{3496.93}{T}\right)$$

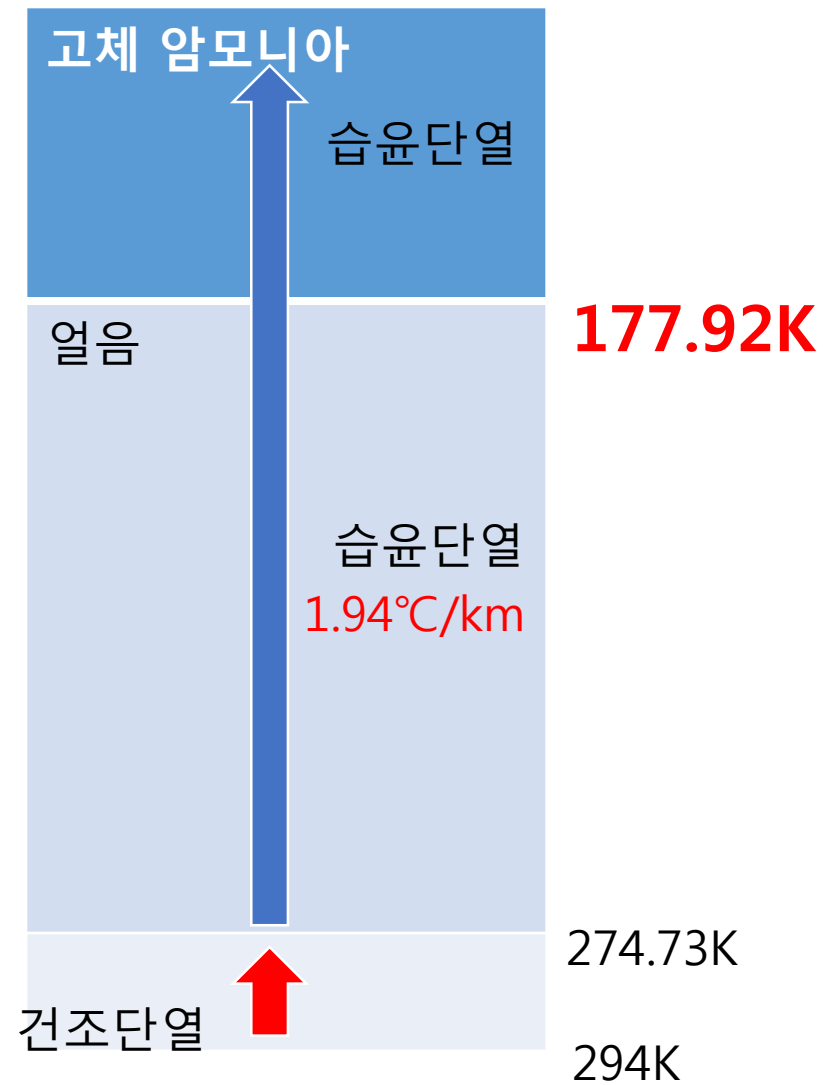
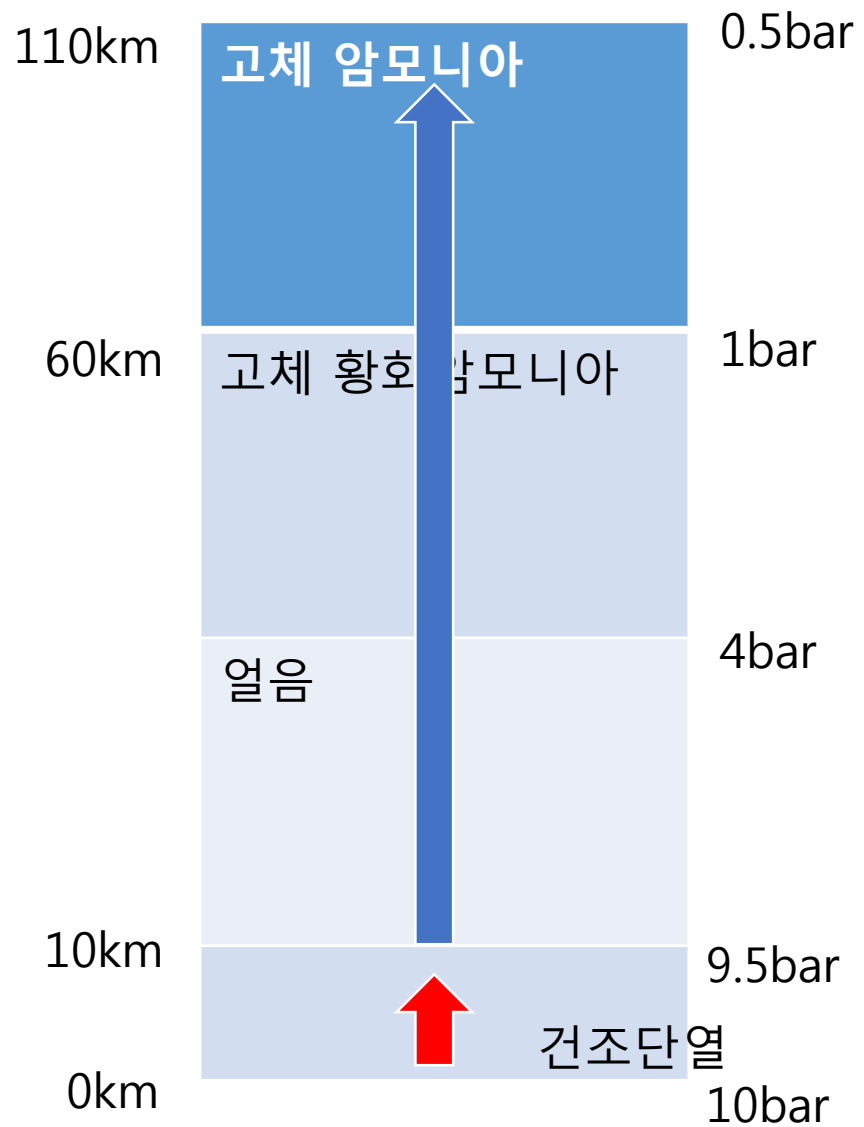
274.73K

P = 9.5bar

| | e_ si |
|---------|-------|
| Water 층 | 6.98 |

| | w_si |
|---------|----------|
| Water 층 | 0.006278 |

$$\Gamma_s = 1.94^{\circ}\text{C/km}$$



습윤단열감률의 열역학적 변수 구하기 (3)

$$\epsilon = \frac{M_v}{M_d} \quad w_{si} = \frac{\epsilon e_{si}}{p}$$

| | Epsilon |
|-----------|---------|
| Water 층 | 8.54 |
| Ammonia 층 | 8.07 |

water

$$e_{si} = 6.11 \exp\left(22.49 - \frac{6142}{T}\right)$$

ammonia

$$e_{si} = 60.76 \exp\left(17.8931 - \frac{3496.93}{T}\right)$$

| | e_si |
|---------|------|
| Water 층 | 6.98 |

274.73K

P = 9.5bar

| | w_si |
|---------|----------|
| Water 층 | 0.006278 |

177.92K

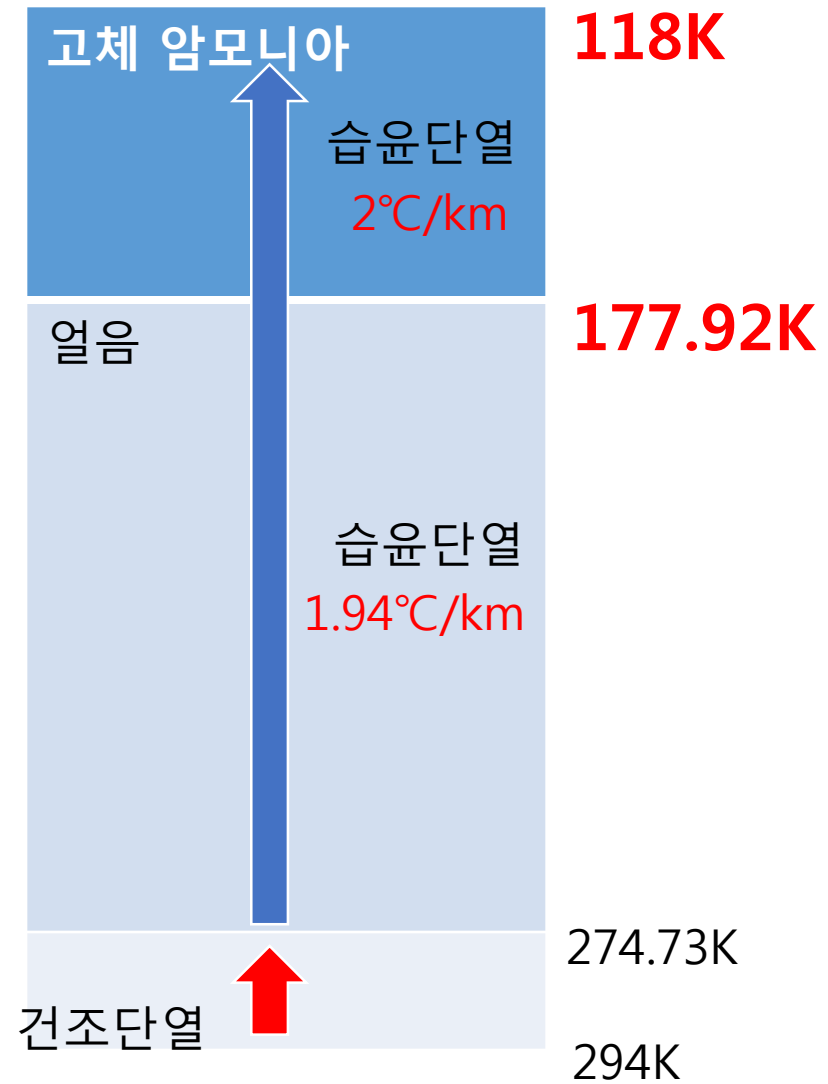
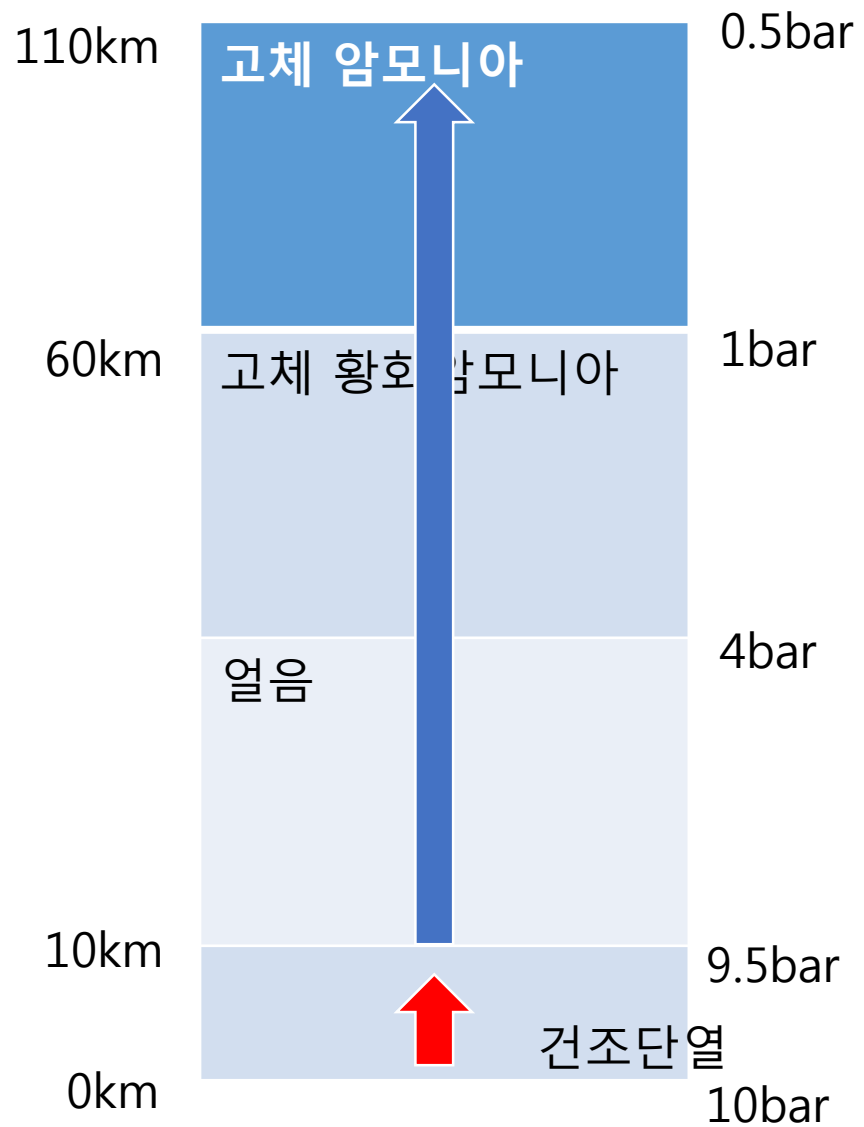
P=1bar

열역학적 변수를 이용해 습윤단열감률 구하기

$$\Gamma_s = -\frac{dT}{dz} = \frac{g}{c_p} \frac{1 + \frac{l_s w_{si}}{R}}{1 + \frac{l_s^2 w_{si}}{c_p R_v T^2}}$$

물의 습윤단열감률 $\Gamma_s = 1.94^\circ\text{C/km}$

암모니아의 습윤단열감률 $\Gamma_s = 2^\circ\text{C/km}$



Carnot efficiency 비교

| | T _a | T _o |
|----|----------------|----------------|
| 지구 | 300 | 220.25 |
| 목성 | 294 | 118 |

Classical
Carnot
efficiency

$$\frac{T_a - T_o}{T_o}$$

=

0.60



0.27

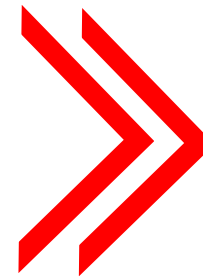


Thermodynamic
efficiency

$$\frac{T_a - T_o}{T_a}$$

=

1.49



0.36

태풍에서의 최대속력을 구해보자

$$|V|_{\max}^2 = \frac{C_k}{C_D} \frac{T_a - T_o}{T_o} (k_0^* - k_a)$$

태풍에서의 최대속력을 구해보자

$$k_0^* - k_a \approx L_v(q_0^* - q_a)$$

$$k_0^* - k_a \approx \frac{\epsilon L_v}{p}(e^* - e_a)$$

$$k_0^* - k_a \approx \frac{\epsilon L_v e^*}{p}(1 - H_a)$$

지구 : 22.39 kJ/kgK
목성 : 31.11 kJ/kgK

0.6이라 하자

$$\ln \frac{e_{sw}}{e_{s0}} = \frac{l_v}{R_v T_0} - \frac{l_v}{R_v T}$$

지구 $e^* = 6.11 \exp(19.83 - \frac{5417}{T}) \longrightarrow 35.99 \text{mb}$

목성 $e^* = 6.11 \exp(22.49 - \frac{6142}{T}) \longrightarrow 30.23 \text{mb}$

태풍에서의 최대속력을 구해보자

$$|V|_{\max}^2 = \frac{C_k}{C_D} \frac{T_a - T_o}{T_o} (k_0^* - k_a)$$

지구 : 22.39
목성 : 31.11

지구 : 0.27
목성 : 0.60

V^2 는 목성이 46.4, 지구는 8.11에 비례하고
 V 는 목성이 6.81, 지구가 2.85에 비례한다.

03



연구 정리 및 고찰

- 연구 결과 및 의의
- 본 연구의 한계
- 이후 연구 진행에서의 제언
- 참고문헌

연구 결과

1. 목성에서의 태풍이 오래가는 이유(보통 100배 정도)

2. 목성의 태풍에서의 Vmax의 크기

$$\dot{S}_{dissipation} = \frac{2\pi}{T_a} \int_{r_e}^{r_o} [C_D |V_a|^3] \rho_a r dr$$

바람이 불면서 마찰력으로 인한 일이 생김
→ 처음의 에너지 소진

Classical
Carnot
efficiency

$$\frac{T_a - T_o}{T_o}$$

= 0.60



0.27



Thermodynamic
efficiency

$$\frac{T_a - T_o}{T_a}$$

= 1.49



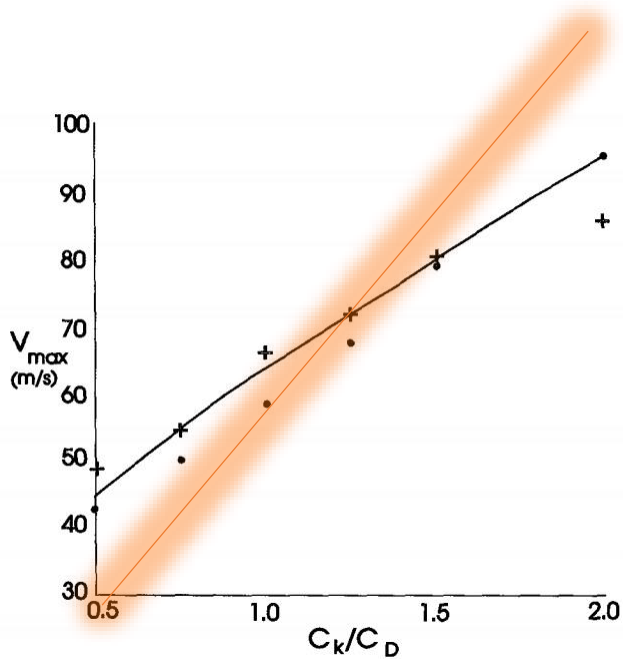
0.36

연구 결과

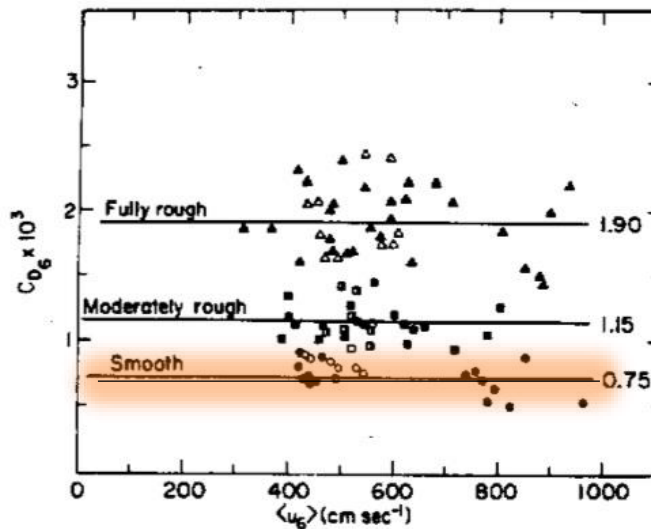
C_k = exchange coefficient of heat and water

=> 목성에서 상수값이 달라진다.

C_D = surface drag coefficient



C_D 가 일정하다고
가정할 때의 $\frac{C_k}{C_D}$
→ V_{max} 가 클수록
커진다.
→ 목성에서 $\frac{C_k}{C_D}$ 이
더 크다.

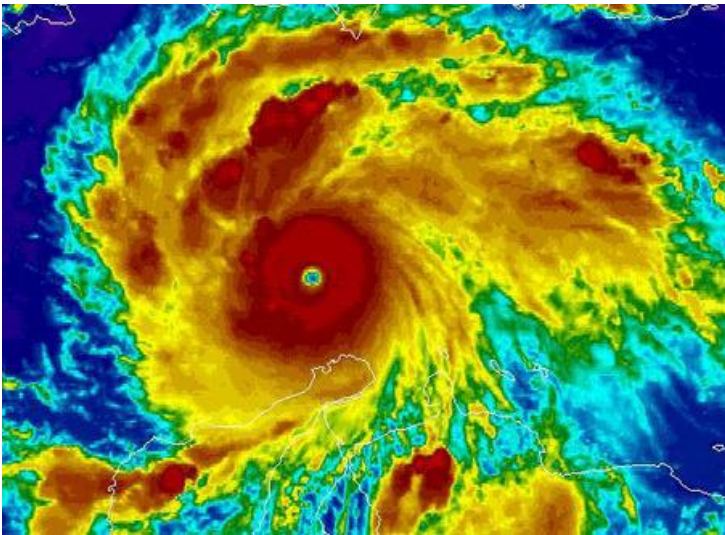


바람과 닿는
바다 표면이
Rough할수록
 C_D 값이 커진다.

→ 목성에서는 직접
바다와 닿지 않기에
 C_D 가 작아진다.

연구 결과

1. 목성에서의 태풍이 오래가는 이유(보통 100배 정도)
2. 목성의 태풍에서의 V_{max} 의 크기



$V_{max} : 89.4\text{m/s}$

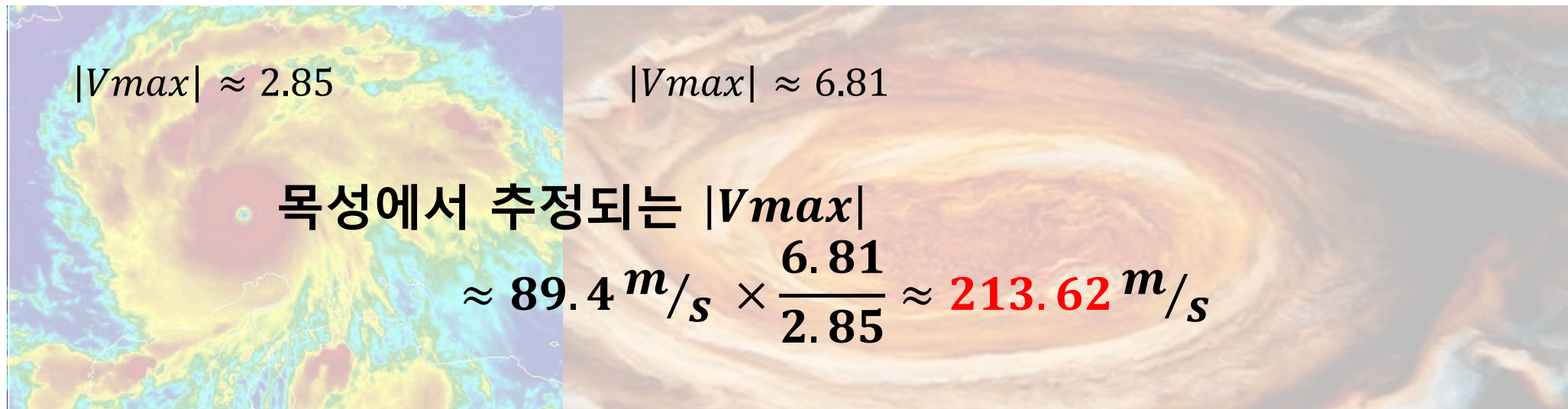


$V_{max} : ?\text{m/s}$

연구 결과

1. 목성에서의 태풍이 오래가는 이유(보통 100배 정도)

2. 목성의 태풍에서의 V_{max} 의 크기



V max : 89.4m/s

V max : 213.62m/s

본 연구의 한계

1. 목성에서의 정확한 연직 구조를 반영하지 않고 근사치를 이용했다.
→ **암모니아 황화수소**의 정확한 열역학적 변수를 구할 필요가 있다.
2. 정확한 C_d/C_k 비율은 모르고 상대적인 크기만을 이용했다.
→ 정확한 V_{max} 의 크기를 구할 수 없었다.
3. 태풍의 규모에 대한 고려 없이 V_{max} 만을 추정했다.
→ 태풍의 규모에는 속도뿐만 아니라 **중심 기압**이 포함된다.
4. 대기의 연직 규모가 불연속적으로 끊어져 있다는 것을 전제하고 계산을 진행했다.
→ 실제로는 혼합이 된 **연속적인 구조**일 가능성이 높다.



이후 연구 진행에서의 제언

1. 암모니아 황화수소의 정확한 열역학적 변수를 구할 필요가 있다.
→ 응결시의 잠열에 대한 정보가 더 필요하다.
2. 정확한 Cd/Ck 비율은 모르고 상대적인 크기만을 이용했다.
→ 정확한 V_{max} 의 크기를 구하기 위해 Cd/Ck 의 정보가 필요하다.
3. 태풍의 규모에 대한 고려 없이 V_{max} 만을 추정했다.
→ 중심 기압에 대한 논의를 포함해서 **태풍 규모**에 대한 측정을 해야 한다.
4. 대기의 연직 규모가 불연속적으로 끊어져 있다는 것을 전제하고 계산을 진행했다.
→ 목성 대기에 대한 연구를 더 진행하여 정확한 연직구조를 추정해야 한다..



참고문헌

- <http://www.gfdl.noaa.gov/blog/isaac-held/2014/06/26/47-relative-humidity-over-the-oceans/>(검색일 : 2015.11.27)
- http://wind.mit.edu/~emanuel/Lorenz/Lorenz_Workshop_Talks/Soden.pdf
- <ftp://18.83.0.193/ftp/ftp/pub/emanuel/PAPERS/sens95.pdf>
- <http://climate.ncsu.edu/sraman/publications/J6.pdf>
- <http://wind.mit.edu/~emanuel/geosys/node4.html>
- Annu. Rev. Earth Planet. Sci. 2003. 31:75–104
- doi: 10.1146/annurev.earth.31.100901.141259
Copyright©c 2003 by Annual Reviews. All rights reserved
First published online as a Review in Advance on February 10, 2003
- Kerry Emanuel, TROPICAL CYCLONES-Program in Atmospheres, Oceans, and Climate, Massachusetts Institute of Technology
- John Lewis, Physics and chemistry of the solar system, 2012, p. 157

Thank You! Q & A
