

# Freezing Rain

우리에 많은 피해를  
입히고 있는 대기현상

언비

---

김한결  
서호종 손근배



---

# Atmospheric Thermodynamics class

---

목차.	언 비란 무엇인가?	2
	언 비가 나타나는 조건.	
	3	
	왜 언 비인가?	4
	언 비의 생성과정	5
	The melting model	6
	The freezing model	7
	Supercooling	8
	결론	9

---

우리에 많은 피해를  
입히고 있는 대기현상

언비

# Freezing rain introduce

Freezing rain  
이란 무엇인가

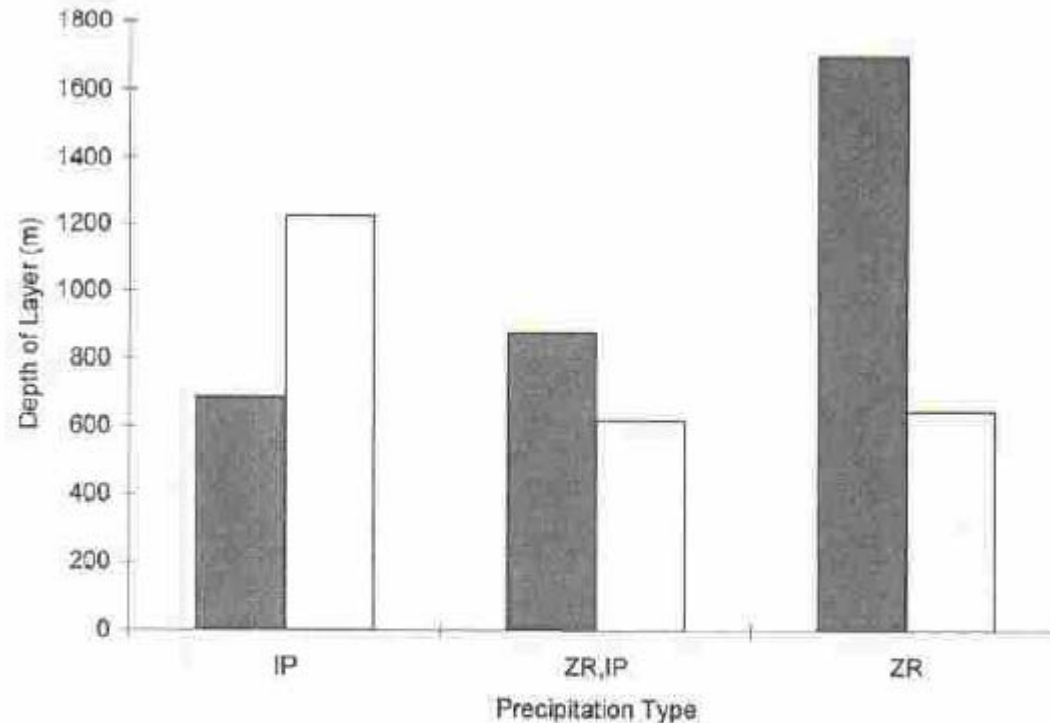
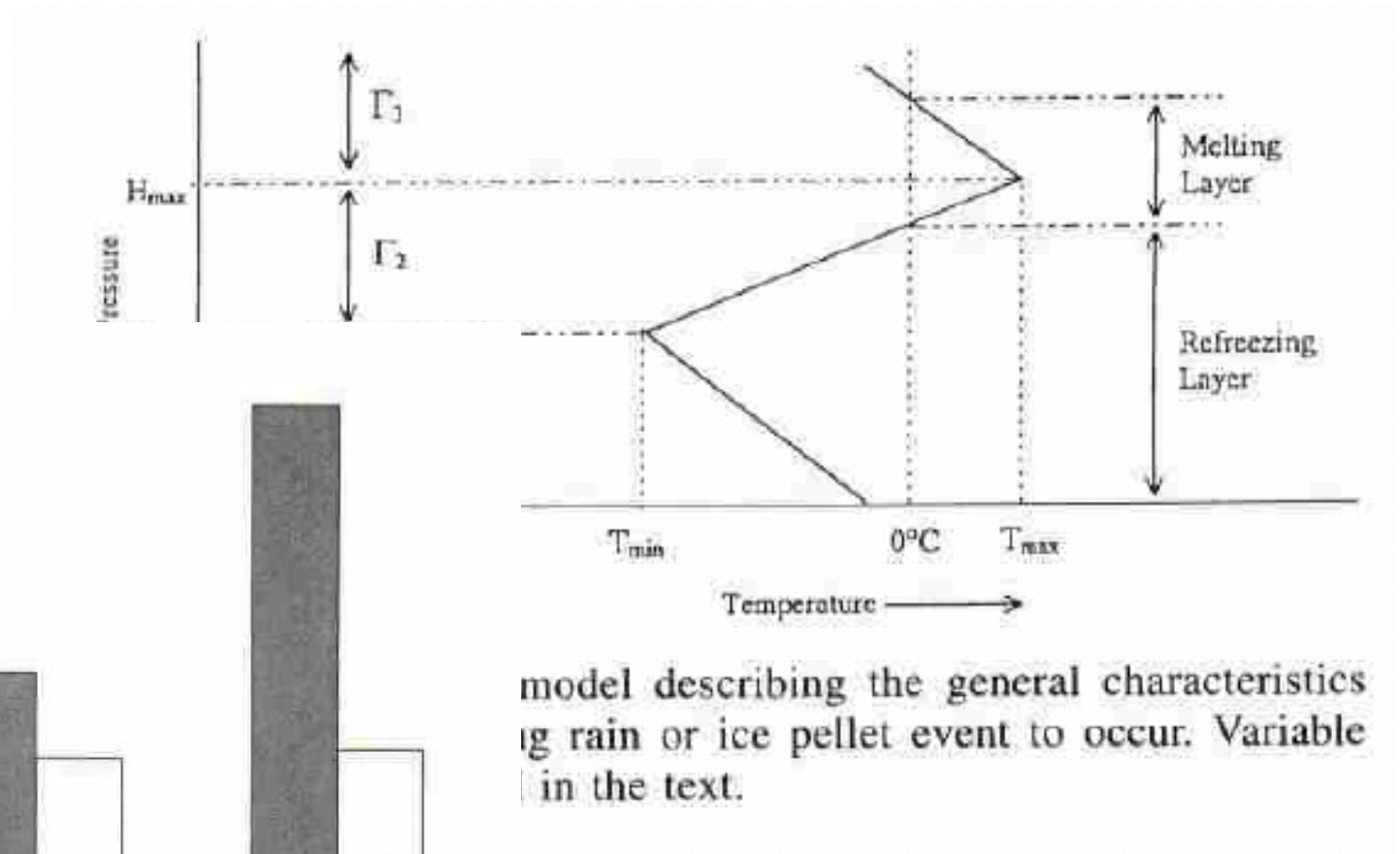


FIG. 8. The average depth of the melting and refreezing layers for each category of the precipitation event. Shaded bars represent the melting layer and unshaded bars represent the refreezing layer.



model describing the general characteristics of rain or ice pellet event to occur. Variable in the text.

Freezing Rain이 될지 결정된다

2

# The conditions of freezing rain

Freezing rain이  
나타나는 조건

Freezing Rain

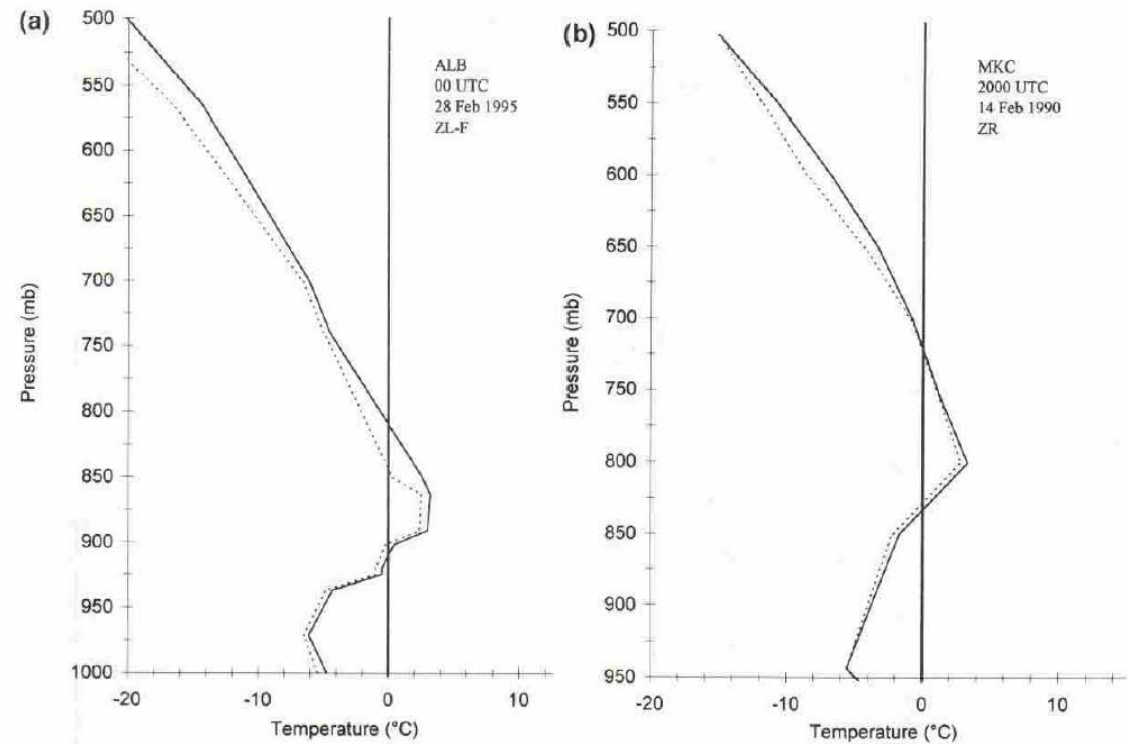
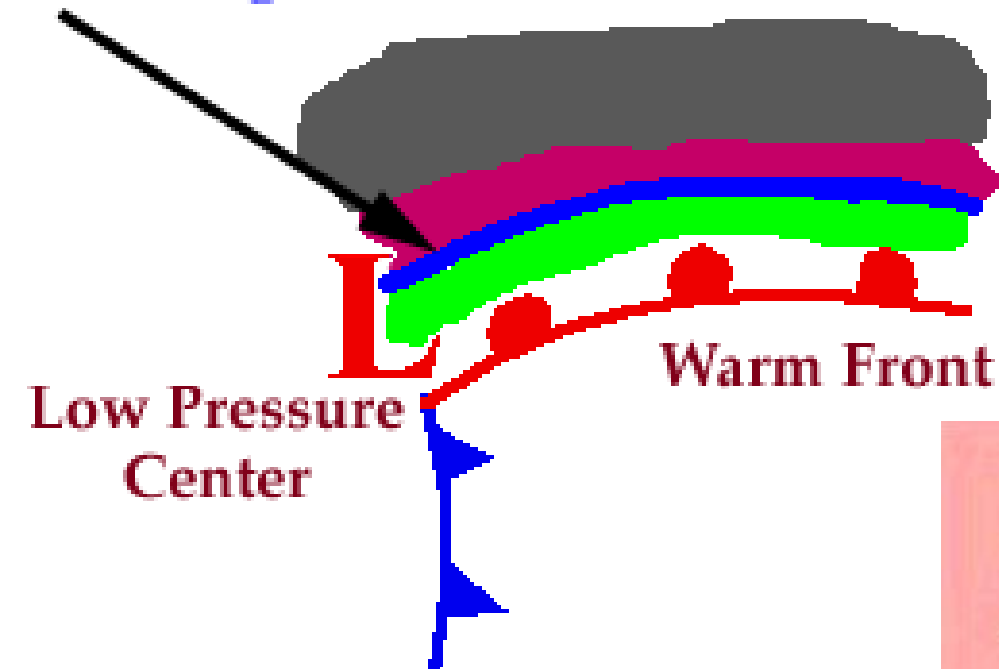
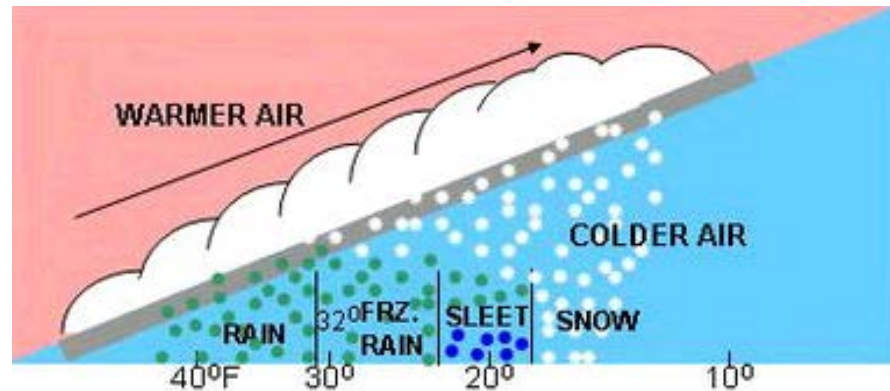


FIG. 4. Typical soundings used in the dataset: (a) 0000 UTC 28 February 1995, Albany, NY; and (b) 2000 UTC 14 February 1990, Kansas City, MO. Solid lines are temperature and dashed lines are dewpoint. The Albany sounding was obtained by an NWS rawinsonde and the Kansas City sounding was obtained by the UND Citation.



3



## 왜 언비를 연구하는가?

이 현상은 빙판길 운전과 다른점이 있다. 빙판길은 운전자가 노면의 미끄러움을 인지하고 과속하지 않도록 사전예방이 가능하다. 반면 어는비는 비가 내리는 순간 아스팔트 위에 그대로 얼어버리는 현상이므로 운전자가 인지할 수 없는 상황에서 과속 시 사고의 위험을 초래한다는 것이 다르다.

또한 어는비 현상은 비행장에서도 항공기의 이착륙을 불가능하게 만들며 전선에 얼어붙으면 무게를 지탱하지 못한채 전선이 절단돼 정전이나 전화 불통 등의 피해를 일으킨다. 또한 낙상에 의한 사고와 나뭇가지가 부러지는 등의 피해도 있을 수 있다.

국토해양부 도로운영 관계자는 “현재 어는비 현상에 대해서는 명확한 지침이 없으며 염화칼슘 또는 모래를 살포하는 정도의 조치를 지자체별로 실시하는 것으로 알고 있다”라고 밝혔다.

## 다른 나라의 피해

미국의 경우 어는비는 매년 발생하는 심각한 자연재해 중 하나이며 총 피해액은 163억달러로 추산되고 있다(Changnon, 2003). 하지만 미국 기상청(NWS)도 어는비의 정확한 양은 예보하기 어려워 발생 확률로 예보하고 있으며 아직 우리나라는 예보하지 않고 있는 실정이다.

supercooling

$$\left. \frac{\partial T_L}{\partial x} \right|_{x=0} > \frac{\partial T}{\partial x}$$

$$m \left. \frac{\partial C_L}{\partial x} \right|_{x=0} > \frac{\partial T}{\partial x}$$

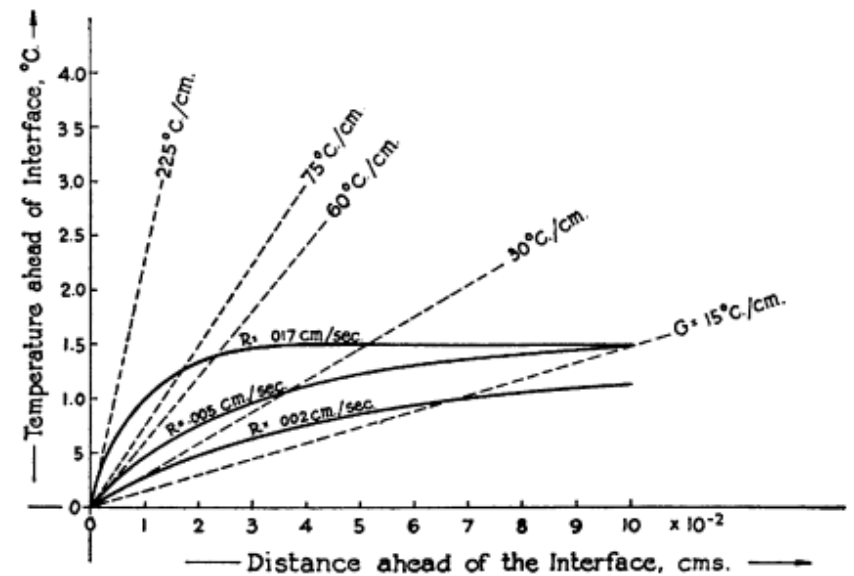


Fig. 6. The original illustration of constitutional supercooling.

$$\left. \frac{\partial C_L}{\partial x} \right|_{x=0} = - \frac{C^{LS} - C^{SL}}{D/v}$$

$$D \frac{d^2 C}{dz^2} + v \frac{dC}{dz} = 0$$

$$\frac{\partial T}{\partial x} < \frac{m C_0 (1 - k) v}{k D}$$

The melting model

$$\vec{j}_v = -D_v \nabla \rho_v + \rho_v \vec{u}.$$

$$\frac{\partial \rho_v}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla \rho_v = D_v \nabla^2 \rho_v$$

$$D_v = 0.211 \left( \frac{T}{T_0} \right)^{1.94} \left( \frac{p_0}{p} \right)$$

---

## Freezing rain

---

### The melting model

$$(j_{v,r})_{r=a} = -D_v \left( \frac{\partial \rho_v}{\partial r} \right)_{r=a} = \frac{D_v(\rho_{v,a} - \rho_{v,\infty})}{a}$$

$$\nabla^2 \rho_v = \frac{1}{r} \frac{d^2}{dr^2} (r \rho_v) = \frac{d^2 \rho_v}{dr^2} + \frac{2}{r} \frac{d\rho_v}{dr} = 0$$

$$\left( \frac{dm}{dt} \right)_0 = -J_{v,a} = - \int_S (j_{v,r})_{r=a} dS = 4\pi a D_v (\rho_{v,\infty} - \rho_{v,a})$$

$$\left( \frac{dm}{dt} \right)_0 = \frac{4\pi a D_v M_w}{\mathcal{R}} \left( \frac{e_\infty}{T_\infty} - \frac{e_a}{T_a} \right)$$



## The melting model

$$\frac{dq}{dt} = -L_m \frac{dm_i}{dt} - L_e \frac{dm_w}{dt}$$

$$-\frac{dm_i}{dt} = \frac{4\pi\bar{f}C_i}{L_m} \left( k_a [T_\infty(t) - T_0] + \frac{D_v M_w L_e}{R} \right. \\ \left. \times \left[ \frac{(\text{RH}/100)e_{\text{sat},w}(T_\infty(t))}{T_\infty(t)} - \frac{e_{\text{sat},w}(T_0)}{T_0} \right] \right)$$

## The melting model

$$-\frac{dm_i}{dT} = \frac{4\pi\bar{f}C_i}{v_T L_m \gamma} \left\{ k_a(T - T_0) + \frac{D_v M_w L_e}{R} \right. \\ \left. \times \left[ \frac{e_{\text{sat},w}(T)}{T} - \frac{e_{\text{sat},w}(T_0)}{T_0} \right] \right\}$$

$$v_T(m_i) \equiv -\frac{dz}{dt}$$

$$\gamma(z) \equiv -\frac{dT}{dz}$$

# Freezing rain

## The melting layer

Ice가 99%  
녹기 위한  
melting layer의 깊이

5mg일 경우  
→ 650 ~ 1100m

10mg일 경우  
→ 750 ~ 1300m

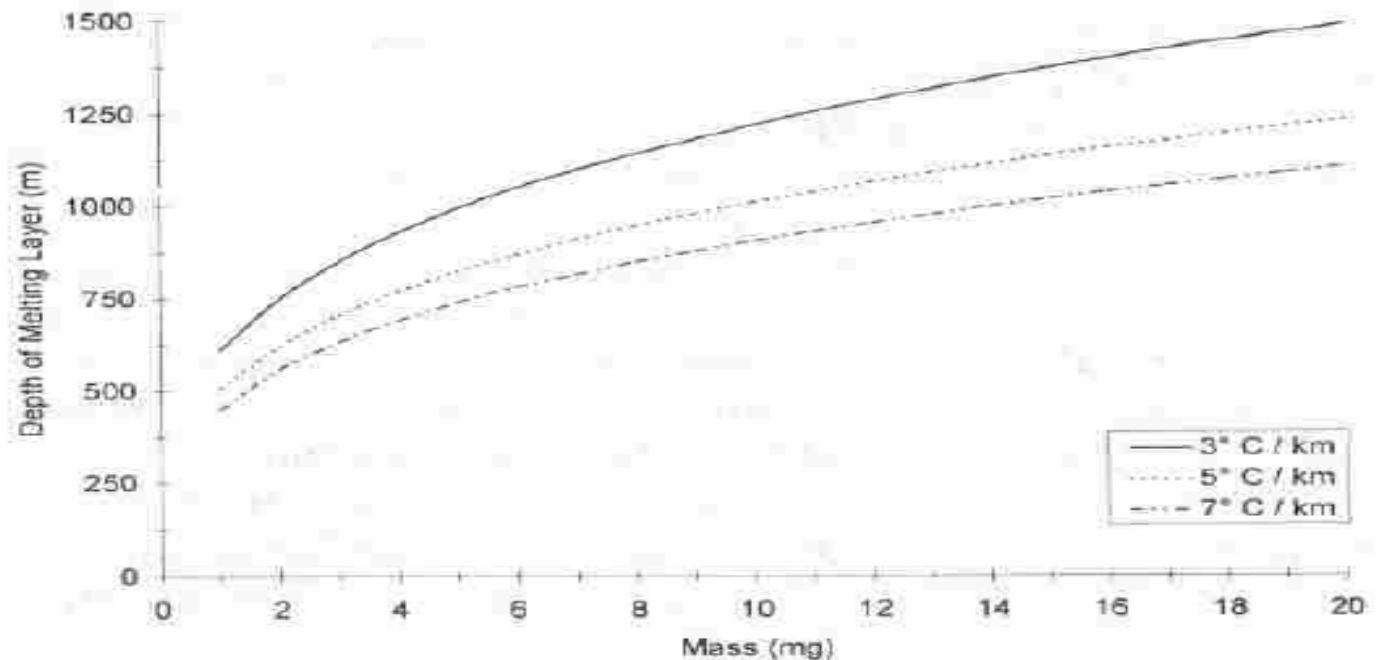


FIG. 13. Mass of a hydrometeor vs the depth of the melting layer needed to melt 99% of this mass. Each of the three curves in the figure represents a different value for  $\Gamma_3$  with  $\Gamma_2 = 10^\circ\text{C km}^{-1}$ . Variables are defined in Fig. 1.

기온 감률이 일정할 때, 입자의 질량에 따라  
melting layer의 깊이가 달라지게 된다.

## The refreezing layer

핵심 : 찬 공기층에 진입한 물방울이 완전히 Freezing하지 않는 동시에 Supercooling하여 지면에 도달해야함

→ 물방울이 완전히 Freezing하는데 필요한 찬 공기층의 두께계산 필요.

$$\frac{dy}{dT} = -\frac{1}{3v_y y^2 t_0 \gamma}, \quad t_0 = \frac{\rho_w L_f a^2}{3m K_i \Delta T} \left(1 - \frac{\Delta T c_w}{L_f}\right), \quad y = \frac{r}{a}$$

$v_y$  : fall velocity

$\gamma$  : lapse rate

$\Delta T$  :  $T$  주변  $-T$  포화

$F_i$  : fraction of ice

$t_0$  : the time from the instant of nucleation until the drop is completely solidified

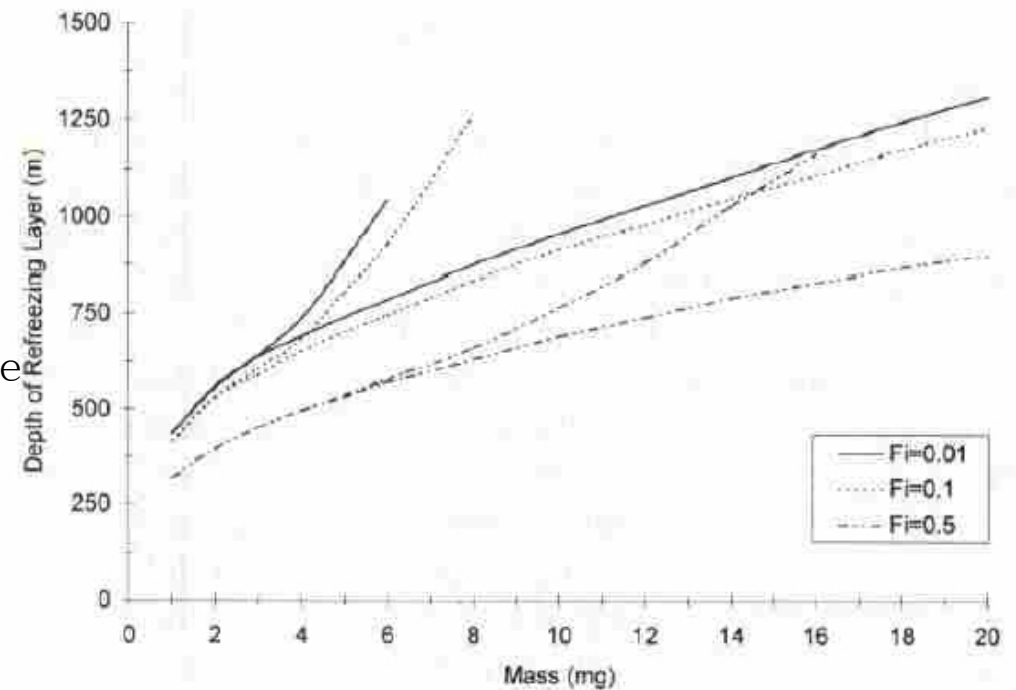
위 식에서  $y=1$  ( $r=a$ )이 되면 물방울이 완전히 Freezing하게 되고,

If above equation solved by numerically

lapse rate가 클수록, 공기층의 온도가 낮을수록, 질량이 작을수록  
필요한 공기층의 두께가 얇아짐

## Freezing Layer

Mass of droplet vs  
layer depth needed to completely refreeze



Lapse rate :  $-5^{\circ}\text{C} / -10^{\circ}\text{C}$   
Layer temperature :  $-5^{\circ}\text{C} / -10^{\circ}\text{C}$   
Initial fraction of ice : 0.01 / 0.1 / 0.5

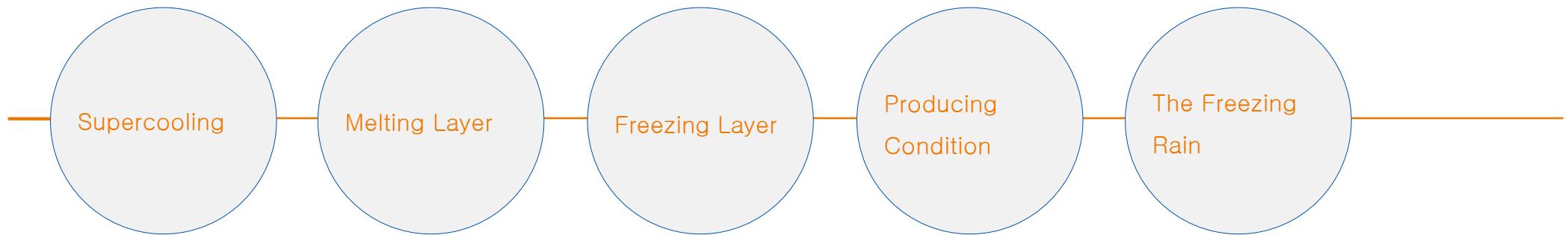


## Conclusion

Supercooling은 기온기울기가 작을수록 잘일어난다.

Melting Layer는 drop의 질량이 클수록, 주위의 기온 감률이 작을수록 더 두꺼운 두께를 요구하는것을 알 수 있고, Refreezing Layer는 초기 얼음 비율이 클수록, drop의 질량이 클수록 더 두꺼워야 함을 알 수 있었다.

큰 피해를 입힐 수 있는 언비. 이들에 대한 예보와 연구가 필요할 것이다.



우리에 많은 피해를  
입히고 있는 대기현상

언비

13

# Reference

- 1) 환경일보, 어는비가 뭐야? 교통사고 속출, 2013년 1월 23일자 기사
- 2) Kenneth A. Jackson, Constitutional supercooling surface roughening, 50 years Progress in Crystal Growth, 2004, 99-100p.
- 3) Ryan J. Zerr, Freezing Rain: An observational and Theoretical Study, American Meteorological Society, 1997, 1647-1661p.
- 4) Johnson. D. A., and J. Hallett. 1968: Freezing and shattering of supercooled water drops. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 94, 468-482.
- 5) Pruppacher. H. R., and J. B. Kleet, 1978: Microphysics of Clouds, Reidel, 714p.
- 6) Emily B. Moore and Valeria Molinero, Structural transformation in supercooled water controls the crystallization rate of ice,.
- 7) HUNTER COLEMAN AND JOHN MARWITZ, Thermodynamic and Kinematic Structure of a Snowband and Freezing Rain 8) Event during STORM-FEST, American Meteorological Society, 2002, 27p

감사합니다.