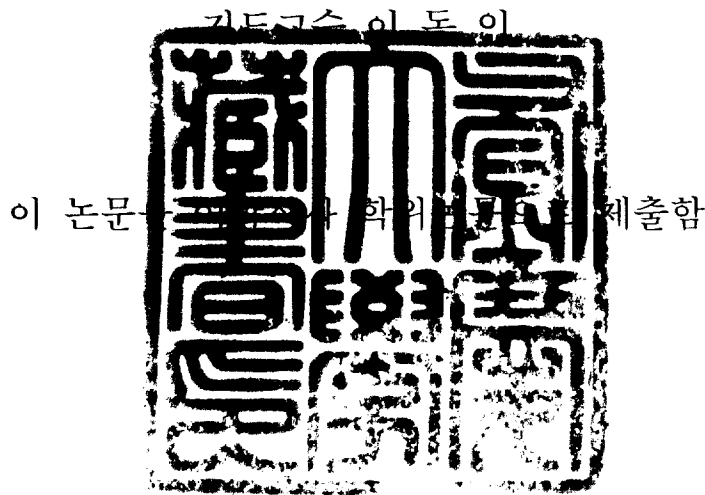


이학석사 학위논문

X-band 편파레이더를 이용한 강수 형태별 분류 알고리즘에 관한 연구



2005년 2월

부경대학교 대학원

환경대기과학과

구 지 영

구지영의 이학석사 학위논문을 인준함

2004년 12월

주 심 이학박사 권 병 혁



위 원 이학박사 이 동 인



위 원 이학박사 오 재 호



목 차

목 차	i
List of Figures	ii
List of Tables	iv
Abstract	1
1. 서론	3
2. 자료 및 분석방법	5
2.1 편파레이더의 특성	5
2.2 Radar 관측	9
2.3 Snow particle type sensor system 관측	13
2.4 고층기상 관측(sounding data)	15
3. 결과 및 고찰	16
3.1 강수형태별 특성	16
3.2 기상상태별 강수특성	24
3.3 강수형태별 반사도(Z_{HH}) 및 Z_{DR} 값의 정량적 구분	27
3.4 지상관측 자료와 Radar 관측 자료와의 비교	37
3.5 강수형태별 강수 특성의 정량화(알고리즘 구성)	41
4 결론 및 토의	43
참고문헌	46
감사의 글	49

List of Figure

Fig. 1	Electric field for (a) horizontal polarized transmissions and (b) polarization types.	8
Fig. 2	Observation view of X-band polarimetric radar(NIED) in Nagaoka, Niigata Prefecture, Japan.	9
Fig. 3	X-POL radar site, ground surface observation site and sounding observation site located at Nagaoka ($138^{\circ}53'E$, $37^{\circ}25'N$, 97m ASL), Niigata Prefecture in Japan.	10
Fig. 4	「Snow particle type sensor system」 developed by Dr. Tamura in Japan.	14
Fig. 5	(a) time series data of precipitation type collected by 「Snow particle type sensor system」, (b) vertical cross section of reflectivity and (c) constant altitude plan position indicator(CAPPI) of snow and graupel(S/G) case in 11 Feb. 2000.	18
Fig. 6	The same as Fig. 5 but for rain case in 14 Feb. 2000.	19
Fig. 7	The same as Fig. 5 but for sleet case in 15 Feb. 2000. ...	20
Fig. 8	The same as Fig. 5 but for graupel case in 16 Feb. 2000.	22
Fig. 9	The same as Fig. 5 but for in snow case, 18 Feb. 2000. ·	23
Fig. 10	Sounding data of (a) snow case, (b) rain case, (c) graupel	

case, (d) snow and graupel(S/G) case and (e) sleet case.	25
Fig. 11 Distribution of Z_{HH} and Z_{DR} for 5 types of precipitation.	27
Fig. 12 Distribution of Z_{HH} and Z_{DR} of (a) snow case, (b) rain case, (c) graupel case, (d) snow and graupel(S/G) case and (e) sleet case.	29
Fig. 13 Comparison of Z_{HH} and Z_{DR} distribution with rain case and (a) snow case, (b) graupel case, (c) snow and graupel(S/G) case and (d) sleet case.	32
Fig. 14 Vertical distribution of Z_{HH} (a) snow case, (b) rain case, (c) graupel case, (d) snow and graupel(S/G) case and (e) sleet case.	35
Fig. 15 Vertical distribution of Z_{DR} (a) snow case, (b) rain case, (c) graupel case, (d) snow and graupel(S/G) case and (e) sleet case.	36
Fig. 16 The relations between Z_{HH} and Z_{DR} at each temperature range by each precipitation type.	38
Fig. 17 The relations between Z_{HH} and Z_{DR} at (a) rain rate $R < 0.3$ mm/5min. and (b) rain rate $R > 0.3$ mm/5 min. for 5 types precipitation.	39
Fig. 18 Precipitation type discrimination algorithm using X-band polarimetric radar(X-POL), located at Nagaoka(138°53'E, 37°25'N, 97m ASL), Niigata Prefecture in Japan.	42

List of Table

Table 1 Specifications of X-band polarimetric radar(NIED), Japan	11
Table 2 Observation date and time of each type precipitation during 20 January to 18 February 2000	12
Table 3 The Z_{HH} and Z_{DR} values range by intensiveness above 80%	33

Discrimination algorithm of precipitation type using X-band polarimetric radar

Ji-Young Gu

Department of Environmental Atmospheric Sciences, Graduate School
Pukyong National University

Abstract

The purpose of this study is to develop an algorithm for the discrimination of several precipitation(snow, rain, snow and graupel-mixed, graupel, sleet) types from two simple variables ; horizontal reflectivity(Z_{HH}) and differential reflectivity(Z_{DR}) by polarimetric radar.

Polarimetric radar data were collected by the X-band polarimetric radar(X-POL), located at Nagaoka(138°53'E, 37°25'N, 97m ASL), Niigata Prefecture in Japan from 20 January to 18 February, 2000. The information of precipitation type at surface was obtained from instrument of [snow particle type sensor system] and sounding data

were obtained from aerological observation site located at Wajima(136°90'E, 37°38'N) in Japan.

As a result, snow and graupel(S/G) and graupel's show sporadically radar echo flow in RHI and CAPPI images, however, snow, rain and sleet's show steady radar echo flow. Horizontal reflectivity(Z_{HH}) values were 0.0~+16.0, -6.0~+22.0, -8.0~+16.0, +4.0~+20.0, 0.0~+18.0 in snow, rain, graupel, snow and graupel(S/G) and sleet case, respectively and differential reflectivity(Z_{DR}) values were -1.8~-0.8, -2.0~0.0, -2.2~-0.8, -1.8~-0.8, -2.0~-0.4 each other. The distribution of vertical values of Z_{HH} and Z_{DR} were varied according to each precipitation type.

Discrimination algorithm of precipitation type was developed using distribution of polarimetric values(Z_{HH} , Z_{DR}) and it may be useful to discriminate each precipitation type.

1. 서론

레이더는 'Radar detection and raging' 의 약자로서, 전자기파 신호를 보내어 목표물로부터 되돌아오는 반사강도 에코를 통하여 목표물에 관한 여러 가지 정보를 결정하는 전자기기이다(Ronald E. Rinehart, 1997). 레이더는 그 파장에 따라 크게 S-band, C-band, X-band 등으로 구분하며, 파장이 길수록 감쇄효과가 적은 특징이 있는 반면 단파장의 경우 미세물질의 반사도를 감지하는 특징이 있다. 기상레이더, 특히, Doppler 레이더는 그 목표물이 구름 및 강수량의 추정에서부터, 각종 바람장에 이르기까지 그 활용 범위가 넓다.

그러나 도플러 레이더는 목표물의 반사강도와 속도자료를 제공하는데는 하지만, 목표물의 성질이나 형태에 대한 자료는 제공하지 못한다.

Ryzhkov and Zrnice (1998)에 의하면, 기상현상 중에서 강수의 경우, 강도 이외에도 그것이 비나 눈이나 등에 따라 사회적, 경제적으로 미치는 영향이 다르게 나타나므로 강수 형태의 구분이 매우 중요하다고 한다. 목표물의 유전율에 따라 반사도 값의 변화가 크다. 눈의 경우 비와 비교하여 유전율이 작아 겨울철 적은 반사도 값으로 큰 폭설을 경험할 수도 있다.

따라서 강수 형태를 구분하는 것은 매우 중요하다. 편파레이더는 강수 입자의 크기, 모양, 열역학적 상태 등의 정보를 제공해 주며 수직편파와 수평편파의 비를 이용하여 기상학적 목표물의 형태 즉 rain, dry snow, ice crystals, aggregated snow, graupel, hail을 구분하여 강수형태를 판단 할 수 있다(Hall, M., et al., 1984).

편파레이더 자료들을 이용한 강수입자의 모양과 크기에 관한 연구들이

현재 많이 진행되어져 오고 있다. 대부분의 편파레이더들의 이용에 있어서 S-band나 C-band 레이더들이 사용되어 졌다(Zrnic and Ryzhkov, 1996; Chandrasekar et al. 1990; May et al. 1999; Gorgucci et al. 1998; Carey et al. 2000). S-band나 C-band 레이더들은 X-band 레이더에 비해 장파장으로 강한 강수에 대해서 감쇄효과가 적고, 관측반경이 X-band에 비해 넓은 장점이 있다.

그러나 X-band가 S-band나 C-band와는 달리 약한 강수에 민감하게 반응하며(Matrosov et al. 1999), 산란광의 세기가 파장의 4배에 반비례하는 레일리 산란의 측면에서 고려해 보면 반사도 산출이 더 용이하다. 이외에 X-band 레이더는 송신파워와 안테나 크기의 축소, 약한 강도의 목표물에 대한 민감도 증대 등의 장점이 있으며, 국지적 영역에 대해 분해능이 좋다.

X-band 레이더를 이용한 강수량 추정과 같은 연구들은 많이 있지만, 편파레이더 인자를 이용한 강수형태의 분류와 그 특성에 대한 연구는 거의 없는 실정이다.

본 연구에서는 X-band 편파레이더의 강수형태 구분 알고리즘을 개발하고, 편파인자들인 Horizontal Reflectivity(Z_{HH}), Differential Reflectivity(Z_{DR}), Specific Differential Phase(Φ_{dp}), Linear Depolarization Ratio(LDR_{vh}), Correlation Coefficient at Zero Lag(ρ_{vh})들 중에서 Z_{HH} 와 Z_{DR} 을 이용하여 강수 형태별 편파인자의 특성을 조사하였다.

2. 자료 및 분석방법

2.1 편파레이더의 특성

편파레이더는 전자기파의 편파 성질 즉 전자기파의 특성인 파의 편향을 이용하여 입자의 다양한 각도 및 모양을 관측할 수 있다.

Fig. 1에서와 같이 편파레이더는 수직·수평 편파를 교대로 방사와 수신하여, 수신 파들의 비나 크기를 산출해서 강수입자들의 모양을 결정한다. 편파레이더가 산출할 수 있는 편파인자들은 Horizontal Reflectivity(Z_{HH}), Differential Reflectivity(Z_{DR}), Specific Differential Phase (Φ_{dp}), Linear Depolarization Ratio(LDR_{vh}), Correlation Coefficient at Zero Lag(ρ_{vh}) 등 다양하나, 본 연구에서는 Horizontal Reflectivity(Z_{HH})와 Differential Reflectivity(Z_{DR}) 인자들을 이용하였다.

(1) Horizontal Reflectivity(Z_{HH})

Horizontal Reflectivity(Z_{HH})는 레이더 반사강도 인자를 말한다. 즉 수평파를 방사하여 목표물에 부딪혀 돌아오는 수평파의 수신율로서 식(1)과 같다.

$$\begin{aligned} Z_{HH} &= \frac{4\lambda^4}{\pi^4} |K|^2 < |s_{hh}|^2 > \\ &\propto \frac{|K|^2 D^6}{\lambda^2} \end{aligned} \quad (1)$$

λ 는 방사된 파장, K 는 유전인자, D 는 분해 영역내의 입자들의 평균 직경, 그리고 s_{hh} 는 Jones scattering matrix의 제1인자이다(Bringi and Chandrasekar, 2001).

Vertical Reflectivity(Z_{VV})도 Horizontal Reflectivity(Z_{HH}) 와 유사한 방법으로 식(2)과 같이 구한다.

$$Z_{VV} = \frac{4\lambda^4}{\pi^4} |K|^2 < |s_{vv}|^2 > \propto \frac{|K|^2 D^6}{\lambda^2} \quad (2)$$

(2) Differential Reflectivity(Z_{DR})

Differential Reflectivity(Z_{DR})는 수평과 수직파의 후방산란 비이며 아래 식(3)과 같이 나타난다.

$$Z_{DR} = 10 \log \left(\frac{Z_{HH}}{Z_{VV}} \right) \quad (3)$$

수평과 수직파의 후방산란의 비 값으로 일정한 목표물의 축비(axis ratio)를 나타낸다. 이는 분석장 내의 대기수상(hydrometeor)의 모양 및 크기 정보를 알 수 있다.

큰 수적과 같이 다소 수평적으로 퍼져 있는 모양의 수상의 경우 Differential Reflectivity(Z_{DR})는 양(+)의 값을 보이고, 이와는 반대로 거의 원형에 가까운 이슬비나, graupel, hail 과 같은 수상들에서는 0에 가깝거나, 음(-)의 값을 보인다.

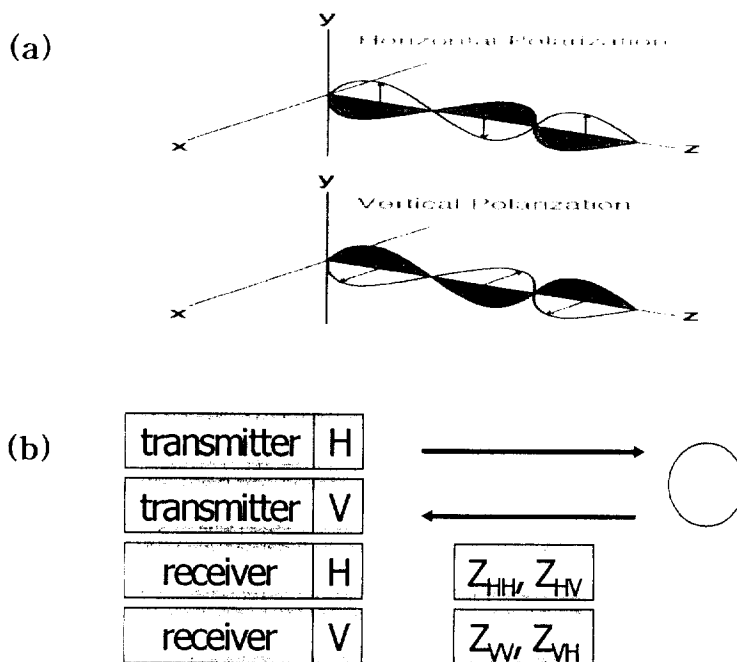


Fig. 1. Electric field for (a) horizontal polarized transmissions and (b) polarization types.

2.2 Radar 관측

2000년 1월 20일부터 2월 18일까지 일본 Niigata현의 Nagaoka (138°53'E, 37°25'N, 97m A.S.L)에서 National Institute for Earth Science and Disaster Prevention(NIED)의 X-band 편파레이더(X-POL)를 이용하여 강설관측을 실시하였다.

Fig. 2는 NIED의 X-band 편파레이더의 관측모습이며, Fig. 3은 레이더의 위치와 레이더 관측시 같이 실시되었던 지상관측 지점의 위치, 고층관측 자료를 얻은 지점의 위치를 나타내며, 레이더의 제원은 Table 1과 같다.

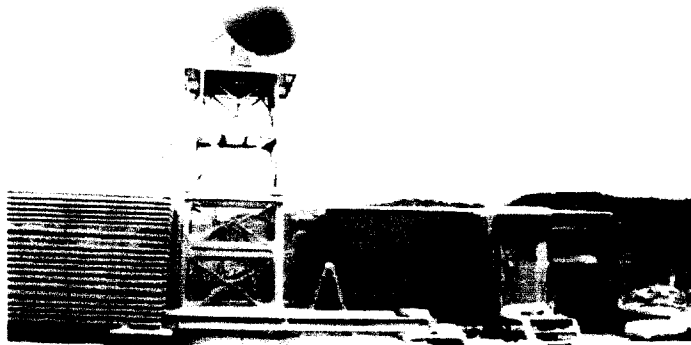


Fig. 2. Observation view of X-band polarimetric radar(NIED) in Nagaoka, Niigata Prefecture, Japan.

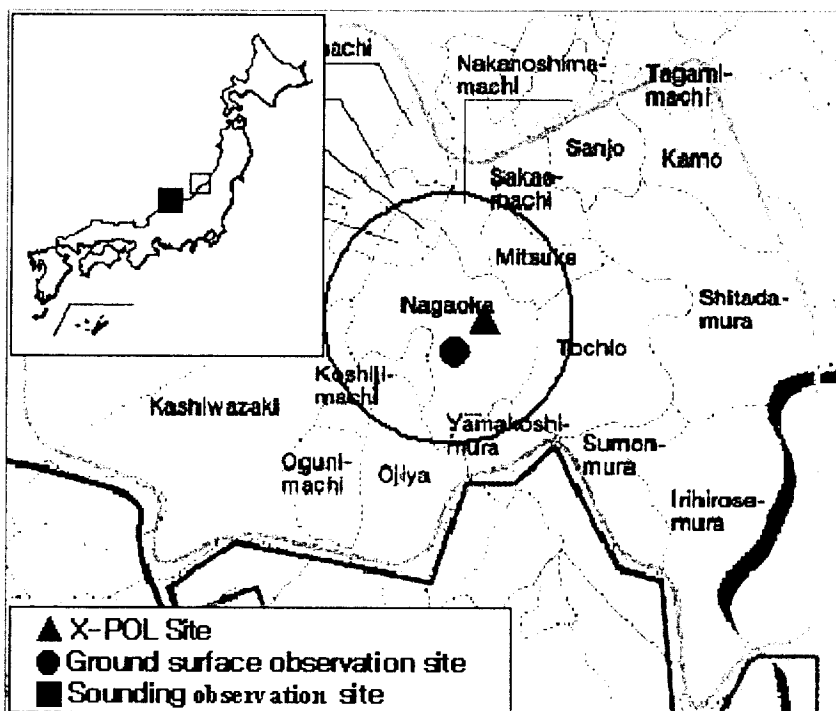


Fig. 3. X-POL radar site, ground surface observation site and sounding observation site located at Nagaoka ($138^{\circ}53'E$, $37^{\circ}25'N$, 97m ASL), Niigata Prefecture in Japan.

Table 1. Specifications of X-band polarimetric radar(NIED), Japan

Item	X-Polarimetric Radar
Frequency	9.45 GHz
Antenna Gain	44.6 dB
Beam Width	1.1° In Horizontal and Vertical
Peak Power	40 kW
PRF	1000 Hz (Polarimetric Mode)
Nyquist Velocity	16 m/s(47.6 m/s, max.)
Observation Range	64 km
Polarization	Horizontal and Vertical

레이더 자료는 2000년 1월 20일부터 2월 18일까지 기간 중에 실제 강수가 왔던 날 중에서 각각의 5가지 강수형태가 적어도 30분 이상 지속된 시간대의 자료를 선택하였으며, 강수 형태분류는 지상관측 지점에서 실시된 [Snow particle type sensor system] 결과를 이용하여 검정하였다. 사용된 레이더 자료의 날짜와 시간은 Table 2와 같다.

Table 2. Observation date and time of each type precipitation
during 20 January to 18 February 2000

	Snow	Snow and Graupel	Graupel	Sleet	Rain
Observation date and time	1 Feb.	4 Feb.	24 Jan.	8 Feb.	23 Jan.
	09:59	13:04	21:39	13:21	22:49
	10:09	13:24	31:49	13:32	22:59
			21:59		23:09
	15 Feb.	11 Feb.	25 Jan	12 Feb.	12 Feb.
	07:01	12:38	04:49	11:03	21:51
	07:11	12:48	04:59	11:13	22:02
	07:22	12:58		18:59	22:12
	18 Feb.	17 Feb.	16 Feb.	15 Feb.	14 Feb.
	00:23	09:21	17:57	00:03	22:12
	00:34	09:31	18:17	00:13	22:22
	00:44				23:02

레이더 자료의 범위는 수평반경 64 km, 수직 5 km 의 자료이며 이중
에서 사용된 자료는 지상관측 자료와의 비교를 위해서 지상관측 지점을 중
심으로 3 × 3 km 자료와 상공의 자료들을 사용하였다.

2.3 Snow particle type sensor system 관측

강수형태의 결정을 위하여 실제 지상에서의 각 강수 형태를 Tamura(1999)가 개발한 [Snow particle type sensor system]을 이용하여 관측 하였다.

이 시스템은 X-band 편파레이더가 위치한 지점에서 방위각 259° 방향으로 3.7 km 떨어진 곳에서 5분마다 총 3가지 센서 (온도, 강수량, 강수입자의 광학적 특성)를 이용하여, 강수 형태를 총 6가지 형태(Rain, Graupel, Snow, Wet snow, Mixed(Snow/Graupel), Mixed(Rain/Snow))로 구별하였으나, 본 연구에서는 5가지 형태(Rain, Graupel, Snow, Mixed(Snow/Graupel), Sleet(wet snow, rain/snow))로 구별하여 사용하였다. Fig. 4 는 [snow particle type sensor system] 의 외형과 센서들의 모식도를 나타낸다. 선단부의 광학센서를 이용해 강수형태별 특성을 파악하여 분류하고, 측면부의 강수량 센서를 이용해 실제 강수량을 관측하고, 후미부의 온도센서를 이용해 관측시 지상온도를 관측했다.

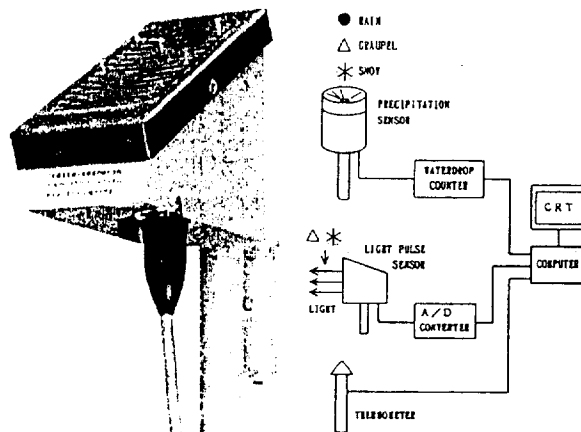


Fig. 4. 「Snow particle type sensor system」 developed by Dr. Tamura in Japan.

2.4 고층기상 관측(Sounding data)

관측 시점의 종관적인 특성을 알아보기 위해 레이더 관측지점으로부터 서쪽으로 140km에 위치한 일본 Wajima의 고층관측지점($136^{\circ}90'E$, $37^{\circ}38'N$)의 고층기상 자료를 사용하였으며, 관측지점의 위치는 Fig. 3과 같다. 실제 관측이 이루어진 Niigata현의 Nagaoka($138^{\circ}53'E$, $37^{\circ}25'N$, 97m ASL)에는 고층기상 관측 지점이 위치하지 않아 그중 가장 근접한 Wajima 지역의 고층기상 관측 자료를 사용하였다.

강수 형태별 종관기상학적 특성을 찾아보기 위해 레이더 자료가 사용된 시간에 가장 근접한 시간의 고층자료를 사용하였다. 고도별 온도 및 노점온도를 표현하여 관측 시기의 포화 영역과, 고도별로 기온과 노점온도의 구배를 살펴보았으며, 강수유형별 특징적 형태를 함께 조사하였다.

단시간에 끝나버린 case의 경우 12시간 간격으로 제공되는 고층기상 관측 자료가 다소 부적절 할 수 있지만, 전체적인 대기의 흐름을 파악 하는 데에는 유용하다고 생각되며, 실제 관측과의 비교에서도 특색 있는 특징들이 각 강수 형태별로 나타났다.

3. 결과 및 고찰

3.1 강수 형태별 특성

[Snow particle type sensor system] 관측에 의한 강수형태별로 각 강수 case마다 레이더 RHI, CAPPI 자료에 의한 레이더 에코들의 유입 유형과, 에코의 최대 높이, 그리고 각 에코들의 발생 특성 등을 알아보았다. Fig. 5에서 Fig. 9에 비교적 강수형태별 특성이 잘 나타난 시간대의 5가지 사례에 관한 (a) [Snow particle type sensor system]에 의해 관측된 강수 형태, 강수강도 및 온도 (b) X-band 편파레이더를 RHI 모드로 하여 관측한 관측 영역의 수직 단면도, (c) X-band 편파레이더를 PPI 모드로 관측한 뒤 일정한 과정을 거쳐 등고도에 대한 수평이미지 CAPPI(Constant Altitude PPI)의 반사도와 시선속도를 나타내었다.

Fig. 5 snow and graupel(S/G) case 의 경우, 에코 탑이 snow case 와 rain case 보다 높은 5 km 고도에서 나타나고, 강수 강도는 최대 0.8 mm/5min. 으로서 snow 와 rain 의 경우보다 상대적으로 높은 값으로 나타났다. 지상 기온은 평균 2.5 ℃ 정도였으나, snow and graupel(S/G) 이 관측된 12:30분에서 13:00 경에 0 ℃에 가깝게 조금씩 하강하는 경향을 나타내었다. RHI 이미지에서 지역별로 비교적 강한 에코들이 발달하면서 유입되고 있음을 알 수 있다. CAPPI 이미지에서는 이러한 에코들의 유입이 비교적 빠른 속도를 보여줌을 확인할 수 있다.

Fig. 6의 rain case의 경우, 레이더 반사도가 snow case 보다는 적은 0~25 dBZ 정도로 나타나나, 에코 탑은 snow case 보다는 다소 높은 3.5 km 고도에 위치하고 있다. 강수강도는 최대 0.45 mm/5min, 지상 온도는 최소 3 ℃ 이상으로 나타났으며, 북서풍에 의한 에코 진입을 볼 수 있었다. Snow case와는 달리 에코의 비교적 강한 영역이 하층 1 km 이하 영역에서 나타났다.

Fig. 7의 sleet case 의 경우, snow case 와 rain case의 경우와 비슷한 에코의 점진적 유입을 확인 할 수 있다. 에코 탑은 snow case 와 rain case 에 비해 상대적으로 높게 나타났다. 강수 강도는 0.5 mm/5min 정도로 나타났다. 지상온도는 영상의 기온으로 나타났다. 그러나 sleet의 경우는 관측시간이 비교적 짧았으며, 비와 눈 경계 지점에서 단시간에 나타나는 특징으로 인해 특색 있는 특징을 추출하기가 어려웠다.

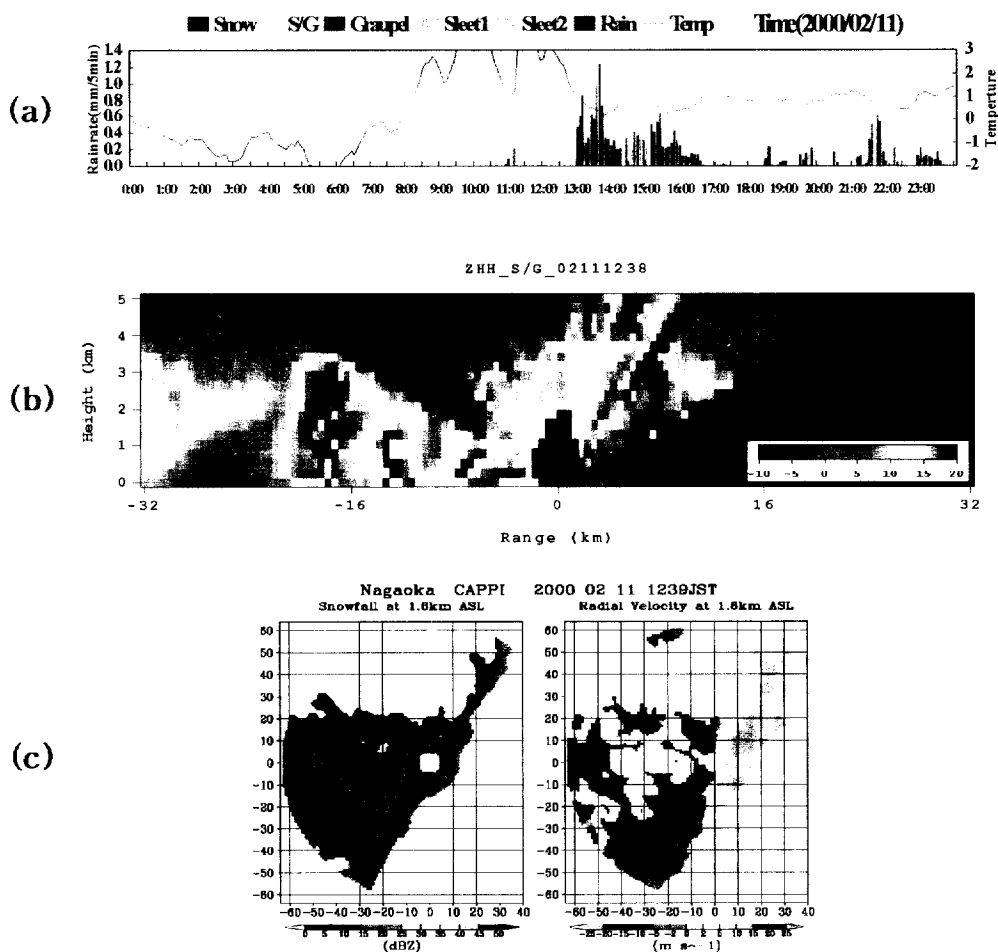


Fig. 5. (a) time series data of precipitation type collected by 『 Snow particle type sensor system 』 , (b)vertical cross section of reflectivity and (c) constant altitude plan position indicator (CAPPI) of snow and graupel(S/G) case in 11 Feb. 2000.

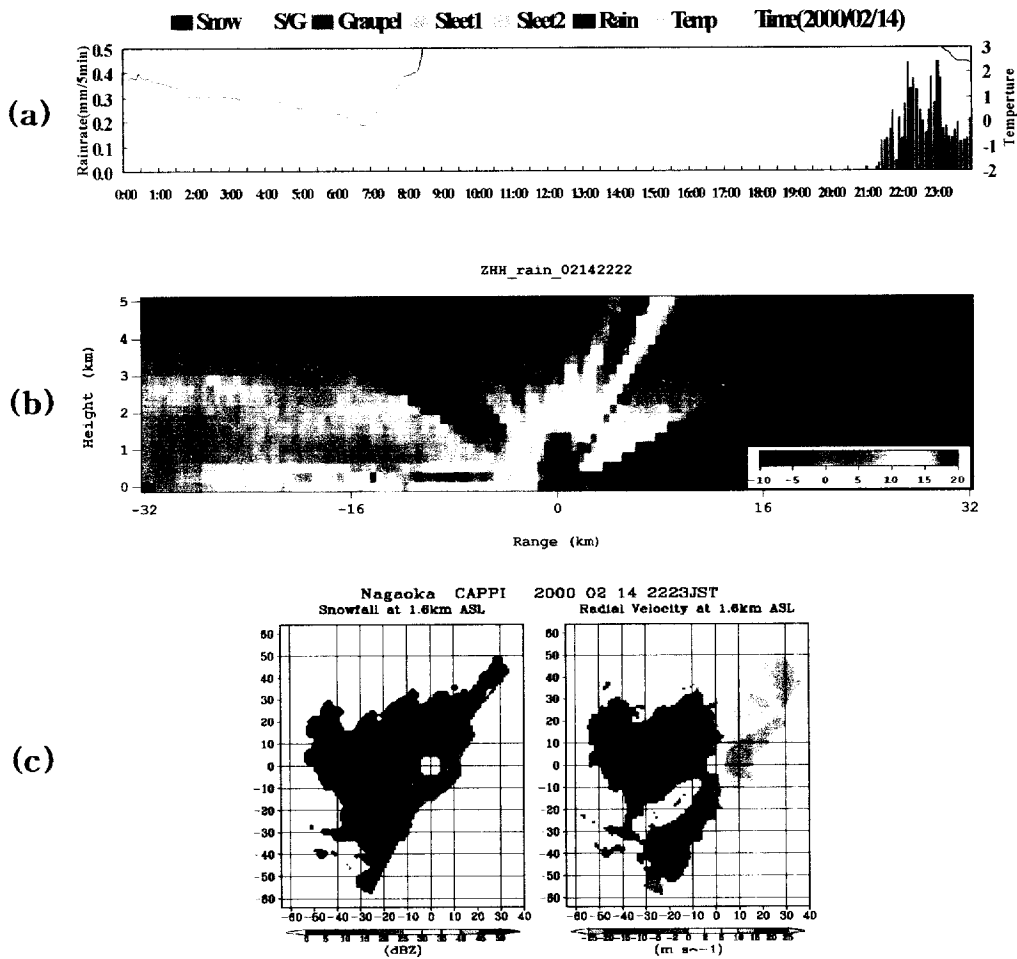


Fig. 6. The same as Fig. 5 but for rain case in 14 Feb. 2000.

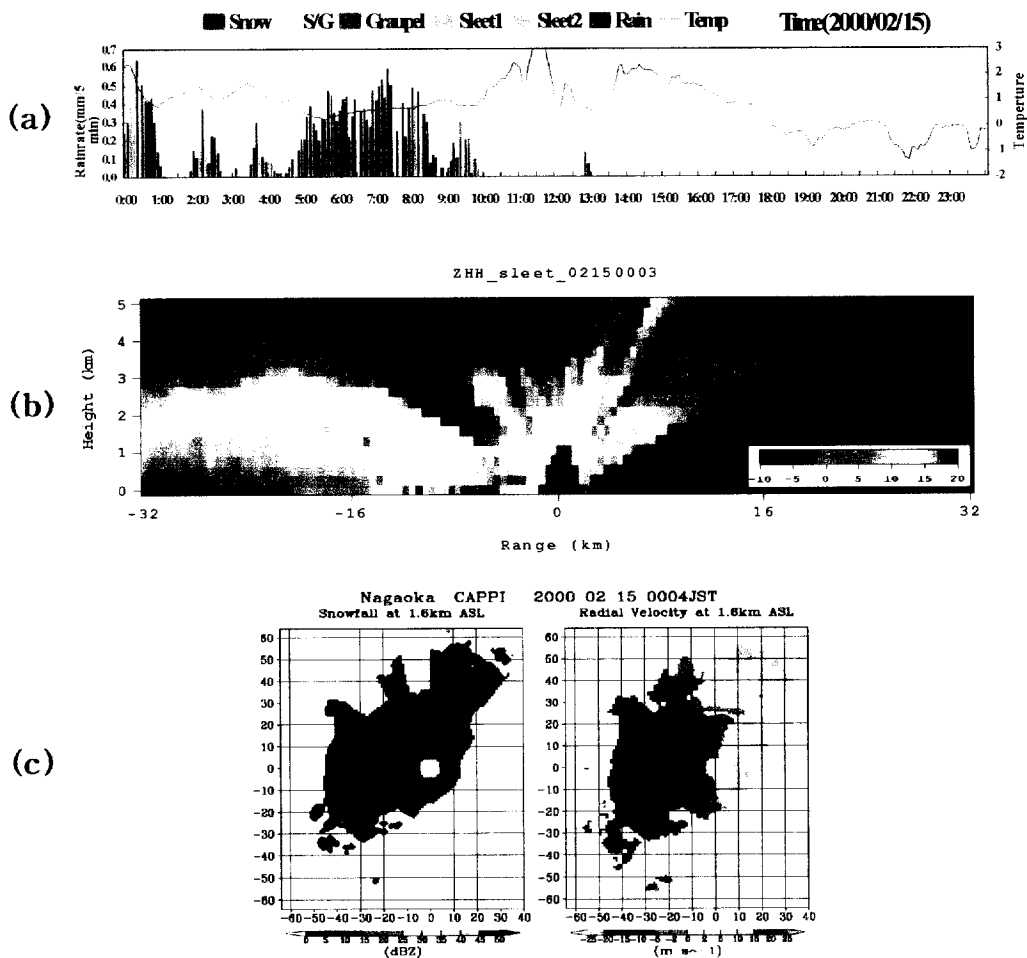


Fig. 7. The same as Fig. 5 but for sleet case in 15 Feb. 2000.

Fig. 8의 Graupel case의 경우 snow and graupel(S/G) case 와 비슷하게 비교적 높은 에코 탑과 지역별로 강한 에코들의 유입을 확인 할 수 있다. 그러나 강수 강도가 0.25 mm/5min. 로서 비교적 약한 강도를 보였으며, 온도는 $-1 \sim -2$ °C 분포로 다른 강수 형태들에 비해 상대적으로 낮은 값을 가졌다. CAPPI 이미지에서는 레이더 에코가 지역적이며, 속도도 비교적 빠르게 나타났다.

Fig. 9의 강설의 경우 지역별 고도별로 0~30 dBZ의 반사도와 2~15 m/sec의 시선속도를 가진 강설에코가 북서 방향에서 남동 방향으로 진입하고 있고, 이때, 에코 탑은 약 3 km 고도 부근에 위치하고 있다. 지상의 [Snow particle type sensor system] 관측 결과, 대략 2시간 동안 snow가 지속되었으며, 강설 강도는 최대 0.35 mm/5min 정도를 나타내었다.

이상에서 snow and graupel(S/G), graupel case들의 경우 snow, rain, sleet의 3가지 case와는 달리 높은 에코 탑과 지역적으로 발달되어 유입되는 레이더 에코를 확인 할 수 있었으며, 이는 graupel의 성장에 필요한 종관적 기상의 불안정성을 보여준다.

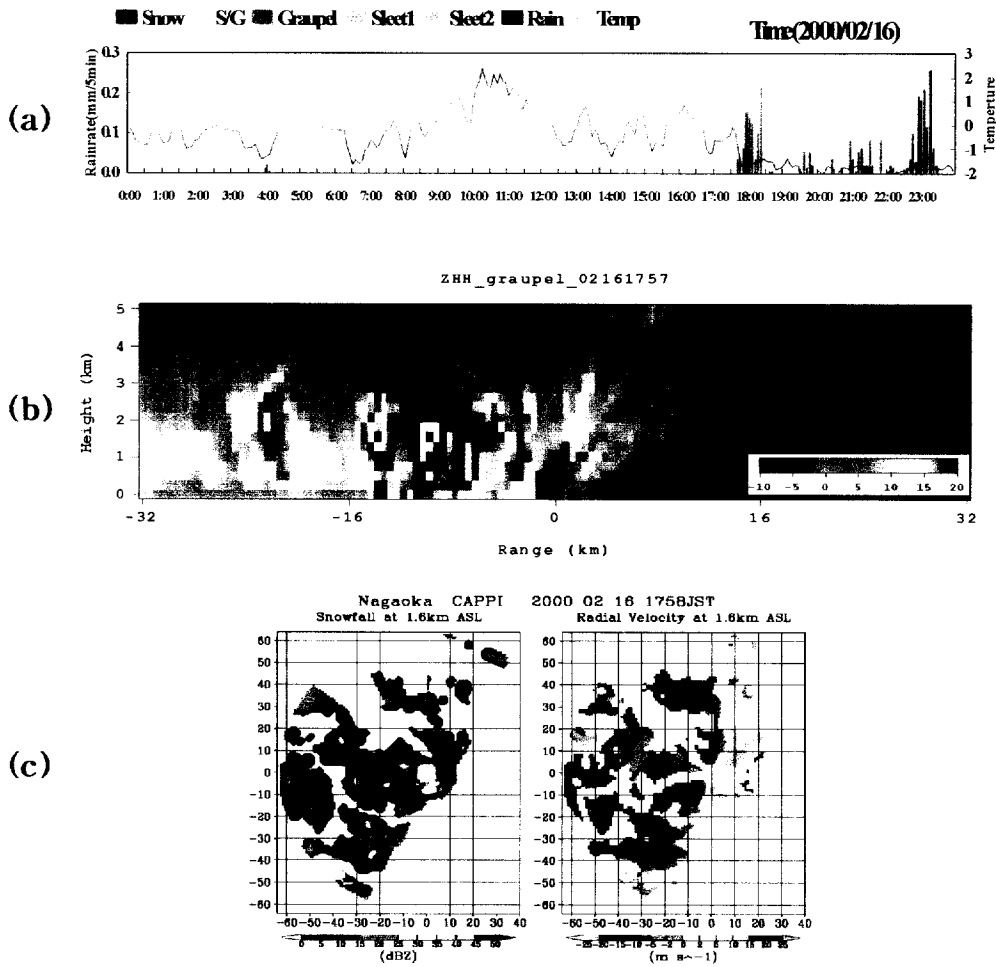


Fig. 8. The same as Fig. 5 but for graupel case in 16 Feb. 2000.

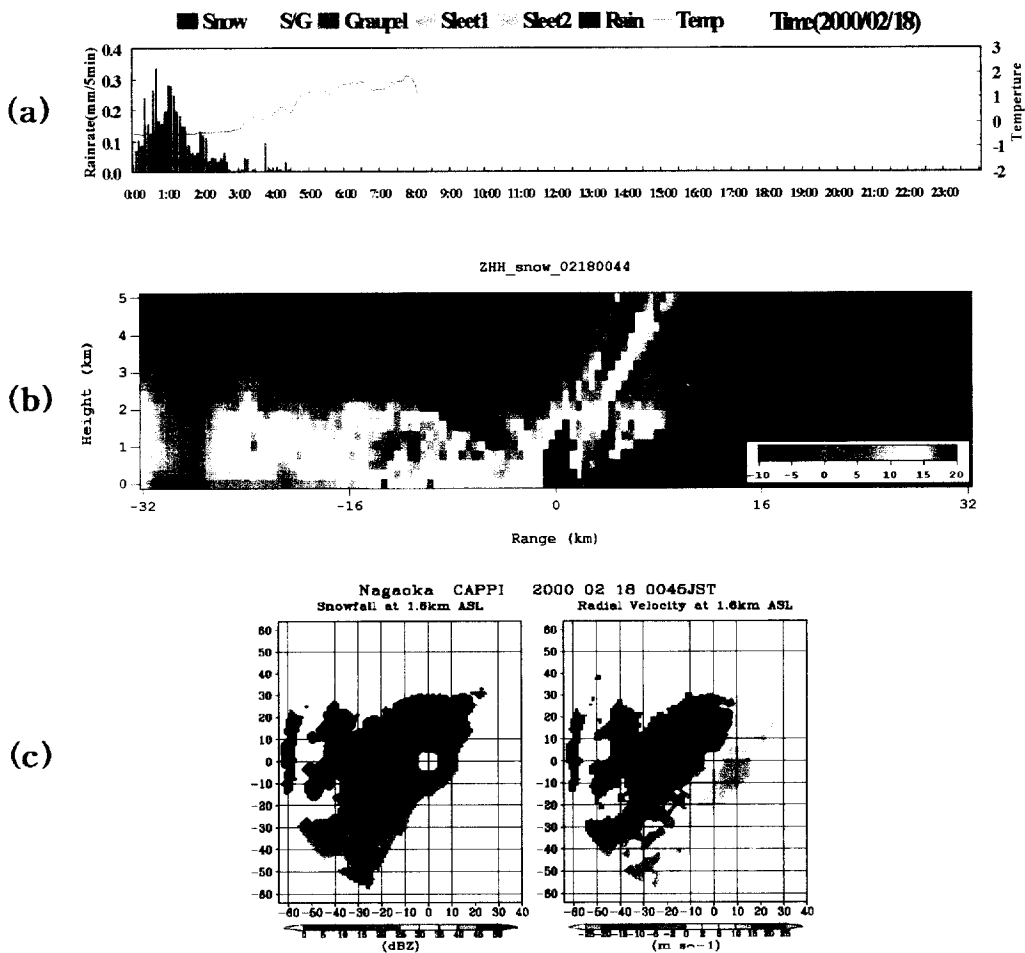


Fig. 9. The same as Fig. 5 but for in snow case, 18 Feb. 2000.

3.2 기상 상태별 강수 특성

고층기상 관측 자료를 이용하여 강수형태별 종관기상학적 특성을 살펴 보았다. Snow case의 경우 특징적으로 상층의 일정한 등온도 구배 현상이 나타났다. 그러나 graupel case의 경우 온도 및 노점온도의 고도에 따른 급격한 변화를 보였다. 이는 각각의 강수 형태가 발생하게 되는 특정의 기상학적 특성을 보여주는 것으로 graupel case의 경우 상하층간의 불안정과 활발한 상하 운동이 graupel의 성장을 나타냄을 알 수 있었다.

Snow, rain 그리고 sleet case들의 경우, 다소 상층의 불안정을 보인 sleet case를 제외하고, 비교적 고도에 따른 온도 및 노점온도 구배가 안정적 이었다.

Fig. 10은 강수 형태에 따른 고층관측 자료를 나타낸 것으로서 청색 선은 온도를, 적색 선은 노점온도를 나타낸다.

(a)는 snow case가 관측된 시각의 sounding 자료로서 포화 영역이 고도 1.5 km에서 2.2 km사이에 위치하며 온도가 2.2 km에서 4 km 정도까지 대략 -17°C 정도로 등온도 구배현상을 나타냈고, 노점온도는 상층에서 급격한 건조 영역이 존재하였다. (b)는 rain case로서 1 km에서 3 km 사이에 포화 영역이 나타났고, 온도와 노점온도가 고도에 따라서 상대적으로 일정하게 나타났다. (c)는 graupel case로, 지상에서 2 km에 이르는 영역에 포화 영역이 나타나고, 상층의 4 km에서 4.5 km 영역에 또다시 포화의 영역이 나타나, 다른 강수형태들과는 구별되는 특징을 보였다. 온도 역시 고도에 따라 그 구배 형태가 다른 강수형태들보다 상대적으로 큰 변화를 보였으며, 특히, 노점온도의 경우 고도에 따른 구배의 변화가 컸다.

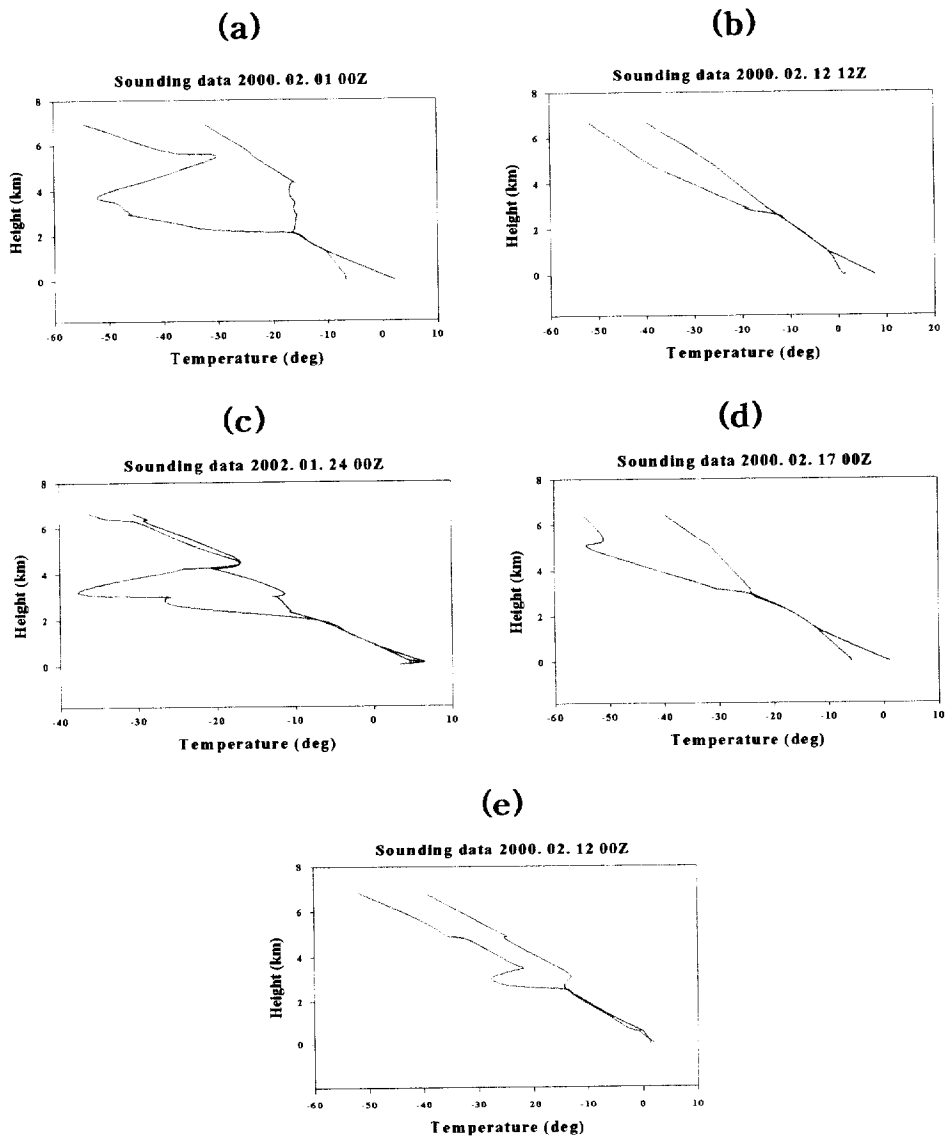


Fig. 10. Sounding data of (a) snow case, (b) rain case, (c) graupel case, (d) snow and graupel(S/G) case and (e) sleet case.

(d)는 snow and graupel(S/G) case로서 포화 영역이 1 km에서 3 km 사이에서 나타났고, 온도 및 노점온도의 고도에 따른 구배가 상대적으로 일정하게 나타났다. (e)는 sleet case로서 지상에서 2.5 km 까지 포화 영역이 나타났고, 상층 2.5 km에서 3.5 km 사이에 약한 역전층이 존재하였다.

이상에서, graupel과 snow and graupel(S/G) case의 경우 그 상하층간의 상당한 불안정과 활발한 상하 운동이 존재하고, snow, rain 그리고 sleet case의 경우는 sleet case에서 다소 상층의 불안정이 존재하지만 전반적으로 고도에 따른 온도 및 노점온도가 안정적 온도 구배로 나타났다.

3.3 강수 형태별 반사도(Z_{HH}) 및 Z_{DR} 값의 정량적 구분

편파레이더의 인자들 중에서 상대적으로 간단한 인자인 Z_{HH} 와 Z_{DR} 값을 보다 정량적으로 살펴보았다. Fig. 11는 강수 형태들의 Z_{HH} 와 Z_{DR} 값을 종합적으로 나타낸 것이다. Wet snow(snow and graupel(S/G), graupel, sleet)의 경우 비교적 높은 반사도(Z_{HH})값을 보였고, rain의 경우 Z_{DR} 값이 다른 강수형태들에 비해 상대적으로 높게 나타났다.

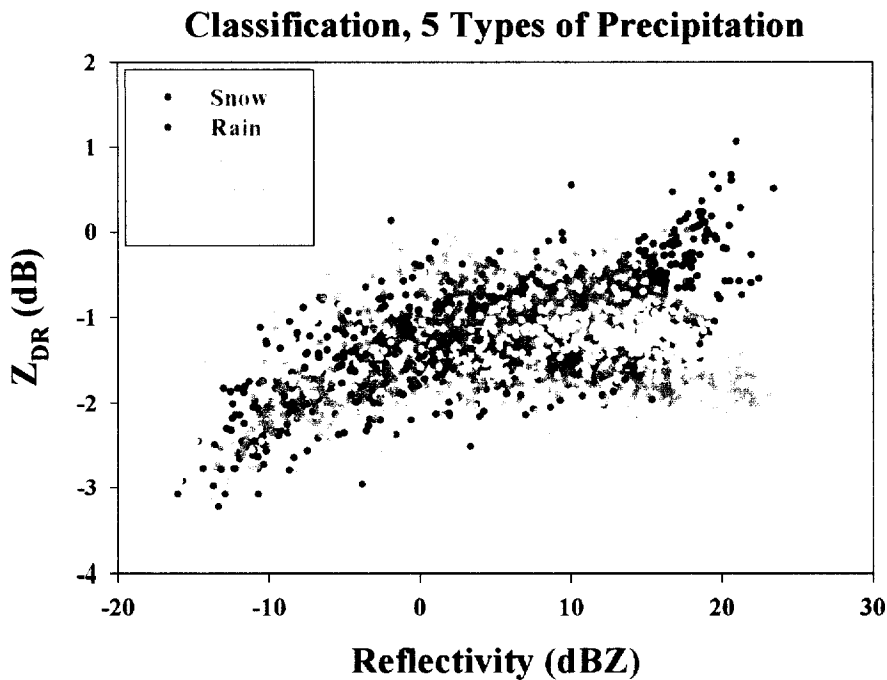


Fig. 11. Distribution of Z_{HH} and Z_{DR} for 5 types of precipitation.

편파레이더의 인자들을 이용한 강수형태의 구분에 대한 연구는 다양하며 특히, Z_{DR} 의 특성인 강수 입자의 형태들에 대한 선 연구들도 많이 있었다(Bringi, V. N et al. 1998; Chandrasekar, V. et al. 1986; Gorgucci, E. et al. 1999; Green, A. W 1975; Seliga, T. A., and V. N. Bringi, 1976).

Fig. 12 (a) snow case의 경우, Z_{HH} 값이 20 dBZ 이하에서, Z_{DR} 값은 대부분 0 dB 이하에서 분포하였다. Snow case의 경우 상대적으로 Z_{HH} 값과 Z_{DR} 값의 범위가 다른 강수 형태들에 비해 좁은 분포를 보였다. Z_{HH} 값 즉, 레이더의 반사강도는 유전율 $|K|^2$ ($|K|^2=0.93$: 물의 경우, $|K|^2= 0.197$:얼음의 경우)에 비례하는 값으로, snow의 경우 그 구성 물질이 빙정에 가까우므로 반사강도가 작게 나타난다(Doviak, R. J. and D. S. Zrnic, 1993).

(b) rain의 경우, snow case와 비교하여 Z_{HH} 값과 Z_{DR} 값이 높게 분포하였다. 높은 Z_{HH} 값 영역의 존재는 유전율의 차이로, Z_{DR} 값은 빗방울의 낙하시 수평으로 퍼진 형태의 모양변화가 빗방울의 축비를 양(+)의 값으로 만드는 특성과 부합되어 양(+)의 값이 나타났다.

(c) graupel의 경우 Z_{HH} 값과 Z_{DR} 범위는 rain의 경우 비슷하나 Z_{DR} 값이 rain의 경우와는 달리 Z_{HH} 값의 증가에 따라 감소하는 특징을 보였다. Graupel은 성장에 따라 겉모양이 원형에 가까워지고, 따라서 실제 반사도는 증가 하더라도 Z_{DR} 값은 오히려 감소하게 되는 특성을 나타냈다.

(d) snow and graupel(S/G)의 경우 snow와 거의 비슷한 분포를 보였지만 Z_{HH} 값이 보다 높은 쪽에 편중되어 나타났다. Snow의 경우 그 입자의 크기가 graupel에 비해 작은 것에 반해 snow and graupel(S/G)은 상대적으로 큰 입자인 graupel이 혼재하고 있어 절대적인 Z_{HH} 값이 snow에 비해 크게 나타나게 된다.

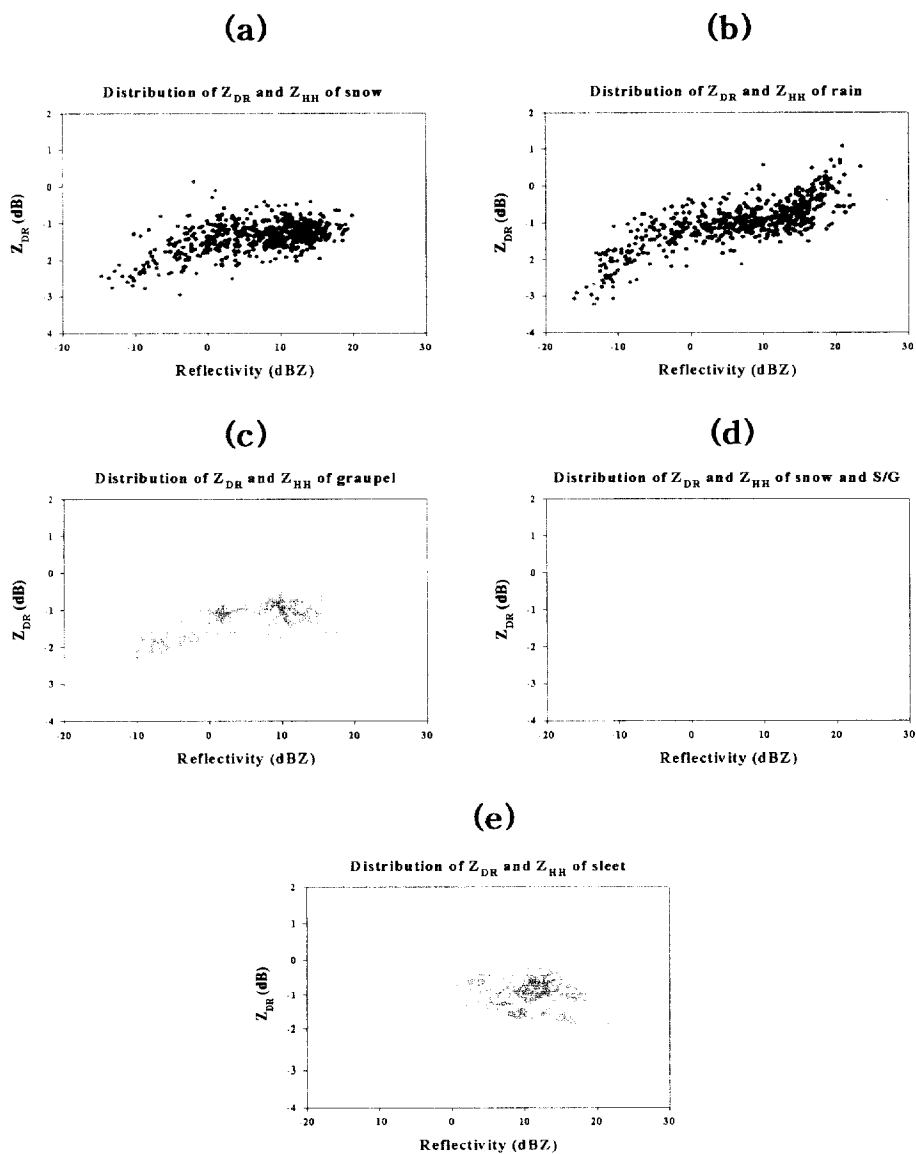


Fig. 12. Distribution of Z_{HH} and Z_{DR} of (a) snow case, (b) rain case, (c) graupel case, (d) snow and graupel(S/G) case and (e) sleet case.

(e) sleet의 경우 높은 Z_{HH} 값의 분포가 나타났지만 나머지 4가지 경우 보다는 일정치 못한 분포 형태를 나타내었다. Sleet case의 경우, 현상이 나타난 전 후 시간에 눈과 비가 존재하여, sleet만의 특색을 보기는 어려웠으며, snow와 rain의 특성이 혼재 되어 있음을 알 수 있었다.

편파레이더를 이용한 각 강수형태별 Z_{HH} 값과 Z_{DR} 값은 본 연구에서 얻은 결과가 문헌에 비해 낮은 값으로 나타났다. Z_{DR} 값의 경우 많은 문헌들의 여러 강수 case에서 양(+)의 값이 나타났으며(Bringi and Chandrasekar, 2001), 이는 미국의 대평원 등지에서 일어나는 대규모 강수현상에 관한 것이었다. 그러나 본 연구 결과는 문헌들과는 달리 일본 해안지역에서의 강수 특성을 잘 나타낸 것이다.

Z_{HH} 값과 Z_{DR} 값뿐만 아니라 다양한 편파인자들을 이용한 강수형태별 분석이 Zrnice et al., (2001), Jerry M. et al., (1999), Chandrasekar and Bringi, (2000), Ryzhkov, A. V., and D. S. Zrnice, (1996), Zrnice, D. S. et al. (1993)에 의해 수행되어 오고 있으나, 본 연구에서는 보다 간단한 인자들(Z_{HH} , Z_{DR})을 이용하여 강수형태 판별의 효율성을 높이려 했다.

Fig. 13은 강수 형태별 Z_{HH} 값과 Z_{DR} 값들을 rain case를 기준으로 비교하여 나타내었다. (a) snow와 rain과의 비교에서 snow case가 rain의 경우보다 Z_{DR} 값이 작게 나타났고, Z_{HH} 값은 비슷한 분포를 보였다. 그러나 20 dBZ 이상의 값은 snow에서는 보기 드문 특징으로 나타났다. (b) graupel과 rain과의 비교에서 Z_{HH} 값의 분포는 rain과 거의 비슷하지만 Z_{DR} 값과는 상관관계가 반대인 양상을 보였고, Z_{DR} 값이 rain에 비해 다소 작게 나타났다. (c) snow and graupel(S/G)과 rain과의 비교에서 rain이 Z_{HH} 값에서 고른 분포를 보인 반면에 snow and graupel(S/G)의 경우 3 dBZ~20 dBZ 영역에서 그 분포 양상이 우세하게 나타났다. (d) sleet와 rain과의 비교에서 rain에 비해 다소 높은 Z_{HH} 값 영역에 분포하는 특성이 보였지만, 차이가 크지는 않았다.

Rain의 경우, Z_{DR} 값에서 나머지 4가지 강수 형태의 값들보다 높게 나타났으나, 그 차이가 특별히 크지는 않았다. Table 3은 Z_{HH} 값과 Z_{DR} 값들 중에서 80% 이상의 집약도가 있는 범위의 값을 정량적으로 나타낸 것이다.

Snow의 경우 Z_{DR} 값은 -1.8 dB에서 -0.8 dB, Z_{HH} 값은 0 dBZ에서 16 dBZ 사이에 분포하여 Z_{DR} 값과 Z_{HH} 값의 분포가 좁게 나타났다. Rain의 경우 Z_{DR} 값이 -2 dB에서 0 dB, Z_{HH} 값이 -6 dBZ에서 22 dBZ 분포로 Z_{DR} 값은 양(+)의 값이 나타나, 나머지 4가지 형태와는 다른 특성을 보였으며, Z_{HH} 값도 다른 강수 형태들 보다 넓은 범위의 분포도 양상을 가지는 특성을 보였다. Graupel의 경우 Z_{DR} 값은 -2.2 dB에서 -0.8 dB, Z_{HH} 값은 -8 dBZ에서 16 dBZ의 분포로 Z_{DR} 값은 다른 강수 형태들 보다 넓은 분포 범위를 보인 반면, Z_{HH} 값의 최대치는 상대적으로 낮은 분포를 나타내었다. Snow and graupel(S/G)의 경우 Z_{DR} 값은 snow의 경우와 같이 -1.8 dB에서 -0.8 dB의 분포를 보인 반면에 Z_{HH} 값은 snow와는 달리 4 dBZ에서 20 dBZ 분포로 snow

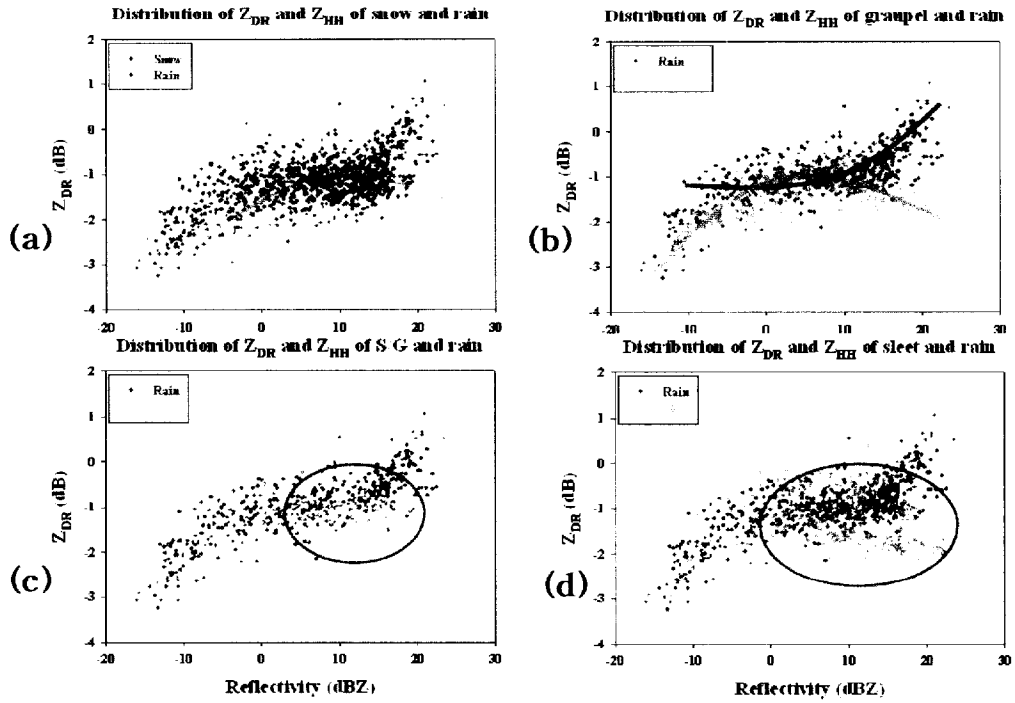


Fig. 13. Comparison of Z_{HH} and Z_{DR} distribution with rain case and (a) snow case, (b) graupel case, (c) snow and graupel(S/G) case and (d) sleet case.

의 경우 보다 높은 Z_{HH} 값을 보였다. Sleet 의 경우 Z_{DR} 값은 -2 dB에서 -0.4 dB, Z_{HH} 값은 0 dBZ에서 18 dBZ 분포를 보였다.

Table 3 The Z_{HH} and Z_{DR} values range by intensiveness above 80%.

	Z_{DR} (dB)	Z_{HH} (dBZ)
Snow	from -1.8 to -0.8	from 0.0 to +16.0
Rain	from -2.0 to 0.0	from -6.0 to +22.0
Graupel	from -2.2 to -0.8	from -8.0 to +16.0
Snow and Graupel(S/G)	from -1.8 to -0.8	from +4.0 to +20.0
Sleet	from -2.0 to -0.4	from 0.0 to +18.0

강수형태별 Z_{HH} 값의 고도에 따른 수직 분포를 Fig. 14에 나타내었다. 모든 강수형태별로 큰 차이는 볼 수 없었지만, snow case와 snow and graupel(S/G) case의 경우 3 km를 기준으로 그 이하의 고도에서 다른 case 들 보다 반사도 값의 변화폭이 작게 나타났다.

Fig 15는 강수형태별 Z_{DR} 값의 고도에 따른 수직 분포를 나타낸다. 특히, snow case, graupel case 그리고 snow and graupel(S/G) case의 경우, rain case와 sleet case 와 달리 Z_{DR} 값들이 고도에 따라 값의 변화 폭이 작게 나타났다.

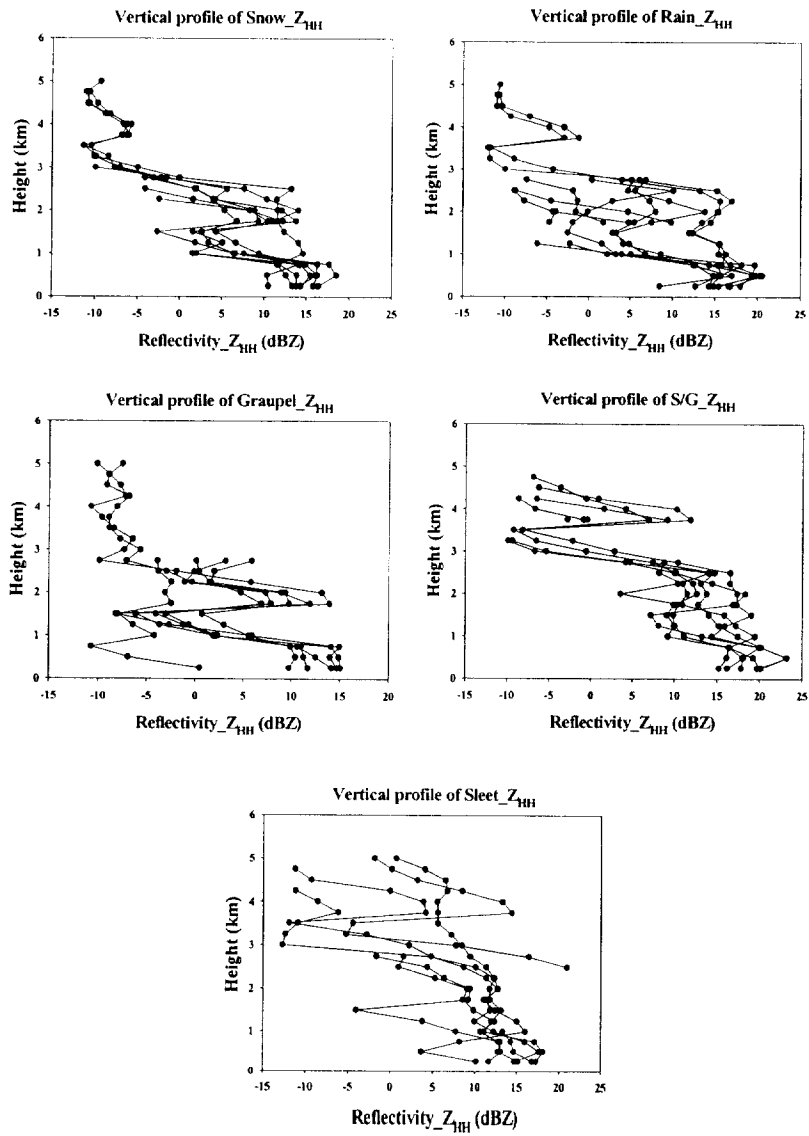


Fig. 14. Vertical distribution of Z_{HH} (a) snow case, (b) rain case, (c) graupel case, (d) snow and graupel(S/G) case and (e) sleet case.

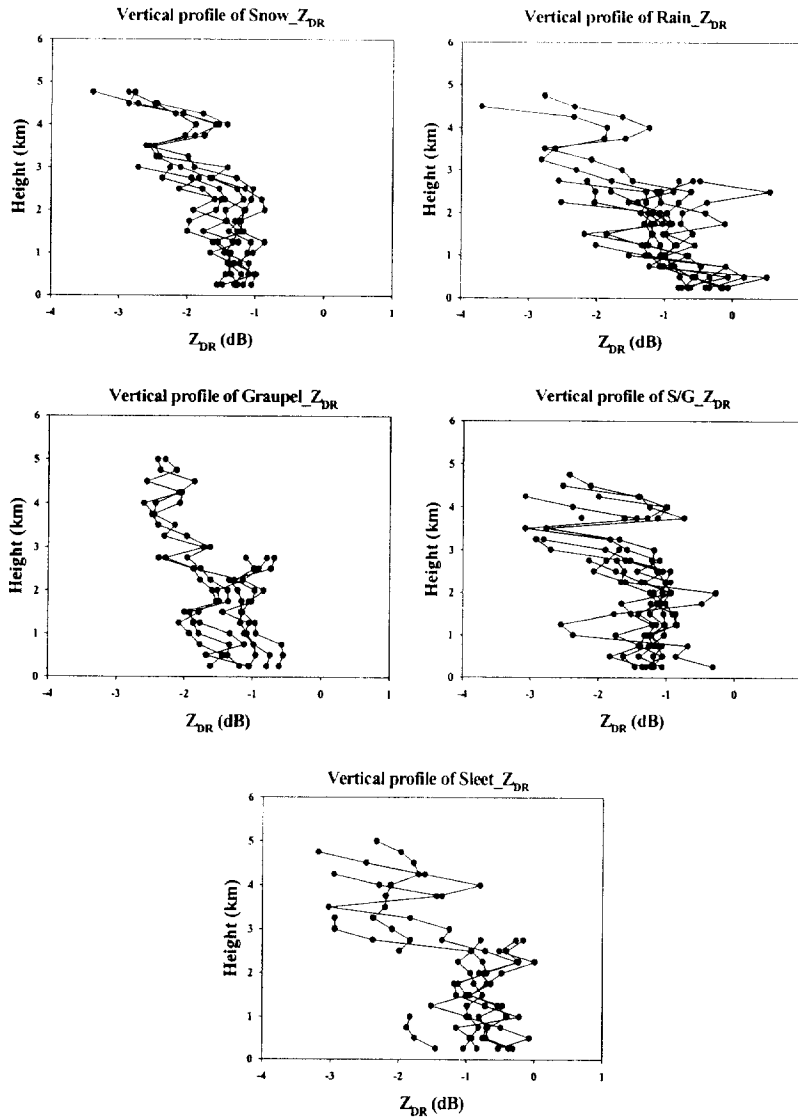


Fig. 15. Vertical distribution of Z_{DR} (a) snow case, (b) rain case, (c) graupel case, (d) snow and graupel(S/G) case and (e) sleet case.

3.4 지상관측 자료와 Radar 관측 자료와의 비교

관측 기간동안 레이더 자료와의 비교를 위해 [Snow particle type sensor system]에 장착된 온도 센서로 지상온도를, 광학센서로 지상 강수형태를, 강수량 센서를 통해 각 강수형태의 강수강도를 관측하였다.

Fig. 16은 (a) snow case, (b) graupel case, (c) snow and graupel(S/G) case의 각 온도 범위에 따른 Z_{HH} 값과 Z_{DR} 값들의 분포를 나타내었다. 온도가 감소할수록 Z_{DR} 값도 같이 감소하였고, (d) 1 °C 이상의 온도 범위에서는 각 강수형태들에 대한 특징이 나타나지 않았다. (e) snow와 graupel의 비교에서는 0 °C 이하에서는 graupel의 경우가 snow의 경우보다 Z_{DR} 값이 낮게 나타났고, 그 분포 양상도 낮은 Z_{HH} 값과 높은 Z_{HH} 값 범위로 양분되어 나타났다. (f) snow, graupel, snow and graupel(S/G)들의 비교에서는 온도가 0 °C에서 1 °C 사이에서 snow의 경우가 다소 큰 폭의 분포 범위를 보였고, -3 dB 이하의 Z_{DR} 값이 나타났으며, graupel의 경우 비교된 3가지 강수형태 중에서 가장 높은 범위에서 Z_{DR} 값이 분포되었다. Snow and graupel(S/G)의 경우 높은 Z_{HH} 값의 분포가 나타났고, 비교된 3가지 강수형태 중에서 가장 낮은 Z_{DR} 값의 분포를 보였다.

Fig. 17은 강수량 센서로 관측한 강우강도와 비교로서 rain의 경우, 0.3 mm/5min.을 기준으로 낮은 강우강도와 높은 반사도에서 높은 Z_{DR} 값을 보인 반면에, graupel의 경우는 낮은 강우강도에서는 낮은 Z_{DR} 값을, 높은 강우강도에서는 높은 Z_{DR} 값을 보였다. Sleet의 경우도 graupel과 비슷한 경향을 보였으나, 그 차이가 작았다. Snow의 경우, 높은 강우강도에서 다양한 Z_{DR} 값이 나타났고, snow and graupel(S/G)의 경우, 각 강우강도에서 비슷

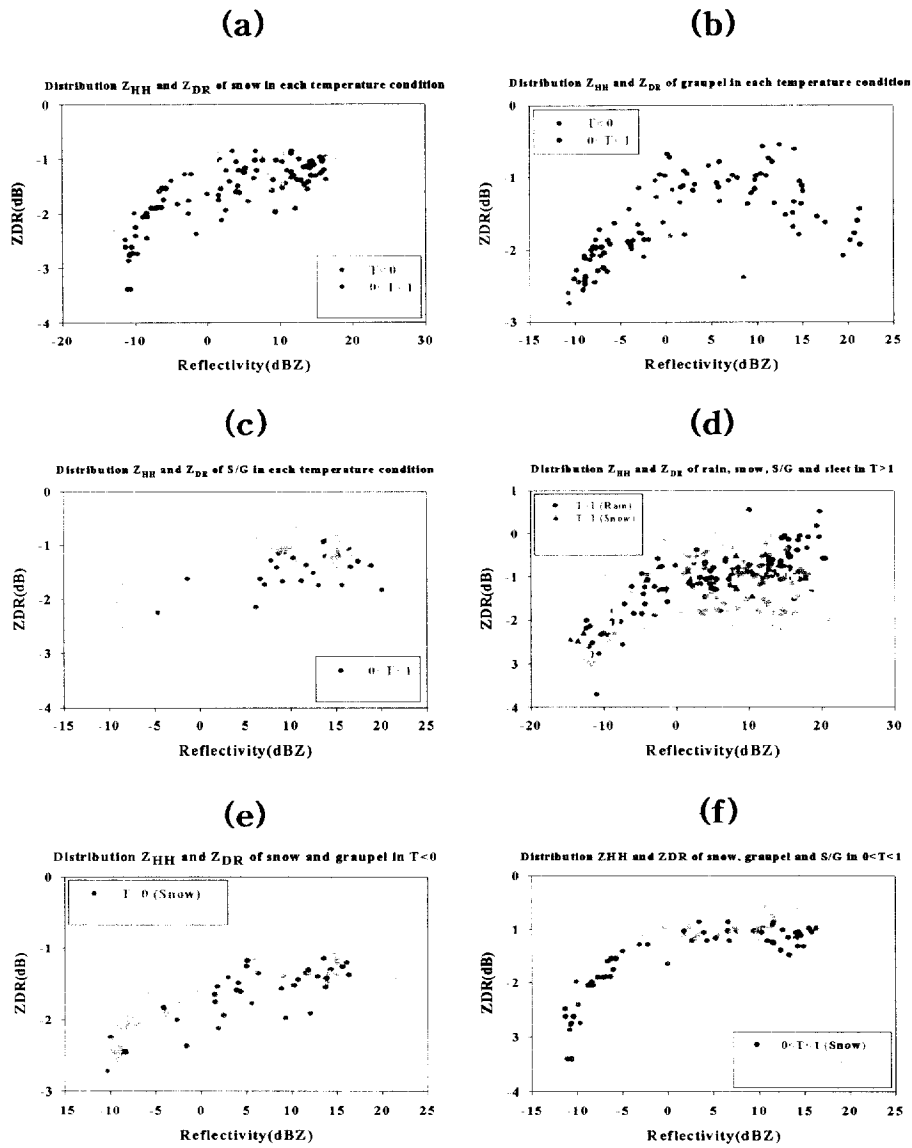
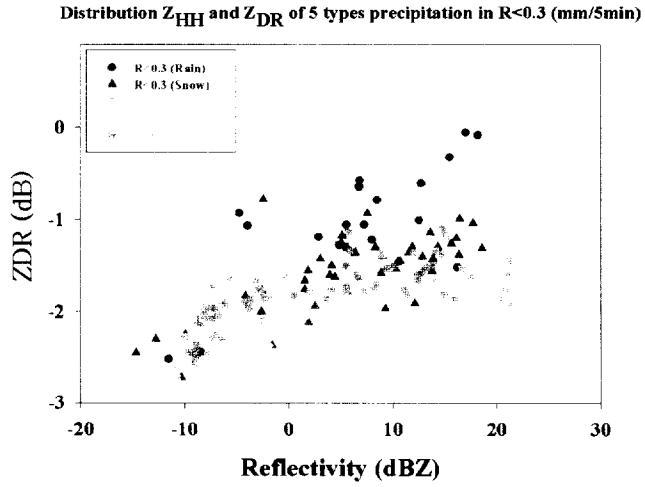


Fig. 16. The relations between Z_{HH} and Z_{DR} at each temperature range by each precipitation type.

(a)



(b)

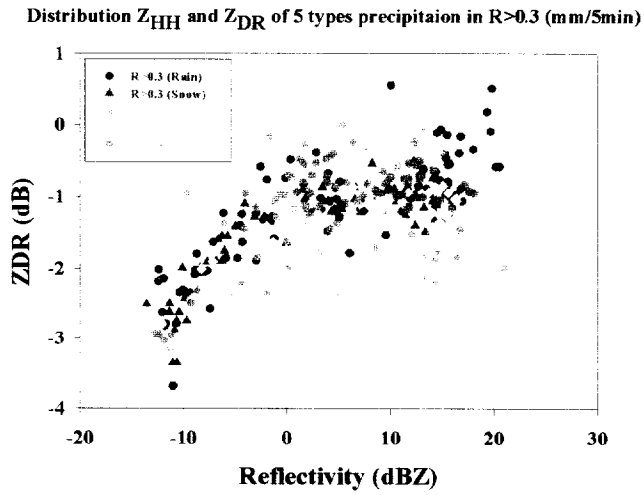


Fig. 17. The relations between Z_{HH} and Z_{DR} at (a) rain rate $R < 0.3$ mm/5min. and (b) rain rate $R > 0.3$ mm/5 min. for 5 types precipitation.

한 분포 양상을 보였다.

3.5 강수 형태별 강수 특성의 정량화

Fig. 18은 강수형태별 분류 알고리즘이다. 레이더 영상 이미지에서 각 강수의 에코 형태에 대한 개괄적인 분류를 1차로 에코유입 형태가 점진적 즉 안정적으로 유입되어져 오는가, 아니면, 지역적으로 발달되어 유입되는가에 대해 실시하고, Table. 3에서 구분했던 강수 형태별 편파 인자들의 분포 양상에 따라 2차 분류를 거쳤다. 2차에 걸친 분류를 통해 얻고자 했던 기본적인 강수 형태에 분류가 진행되었지만 snow와 sleet의 경우 2차 분류까지 거의 비슷한 양상을 보여, 편파인자들의 수직 분포를 이용하여 3차 분류를 하였다.

기상자료와의 비교에서 특징적인 값들이 나타났지만, 기본적으로 급격히 발달되어져 오는 강수에 대한 신속한 판단이 본 연구에 목적이므로 그 유용성이 미미하여, 본 알고리즘에는 그 필요성이 적어, 연구가 진행되는 과정에서의 고찰로 마무리 하고자 한다. 고층기상관측 자료는 본 알고리즘의 1차 분류인 RHI와 CAPPI 이미지에서와 같은 분류 결과가 도출되어 본 알고리즘의 구성에 확인자료로서의 고찰로만 사용되었다.

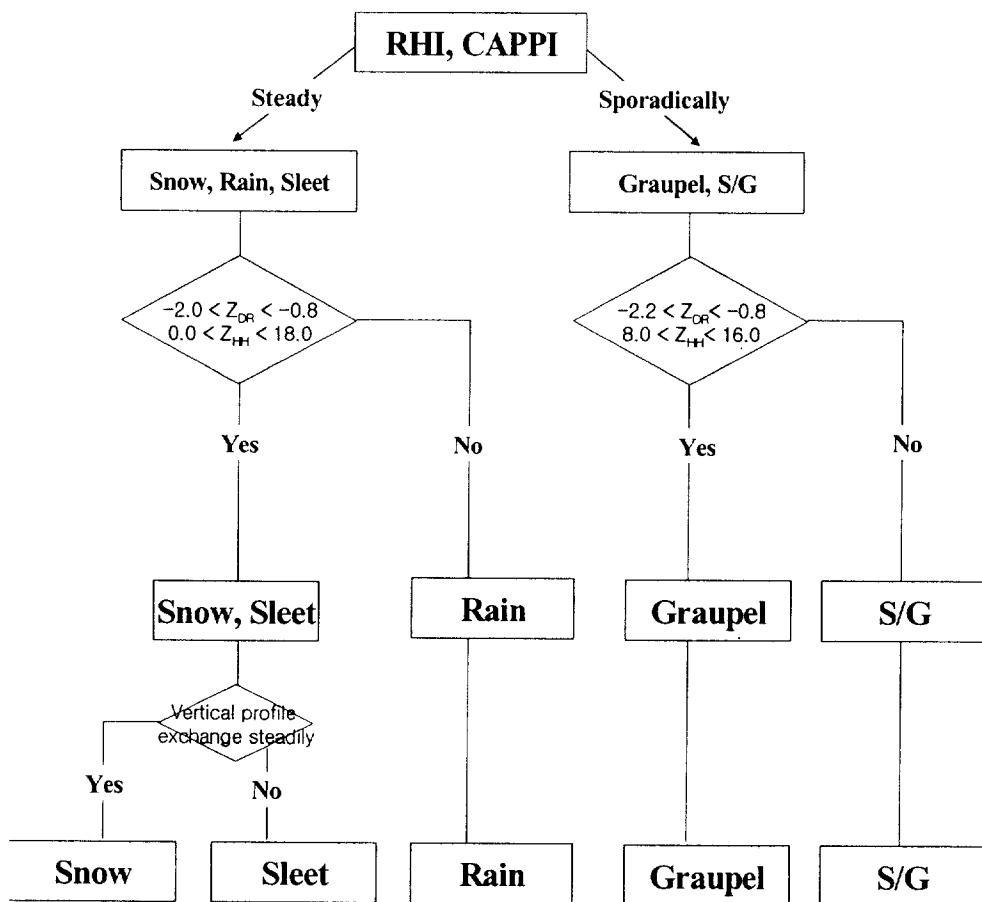


Fig. 18. Precipitation type discrimination algorithm using X-band polarimetric radar((X-POL), located at Nagaoka(138°53'E, 37°25'N, 97m ASL), Niigata Prefecture in Japan.

4. 결론 및 토의

2000년 1월 20일부터 2월 18일에 걸쳐 일본 북서 해안 지방의 겨울철 강수현상을 Niigata현의 Nagaoka에 위치한 NIED의 X-band 편파레이더를 이용하여 관측을 실시하였다. 강수의 경우 강수형태들에 따라 사회적, 경제적으로 미치는 영향이 다르게 나타나므로, 강수 형태 구분이 매우 중요하다(Ryzhkov and Zrnicek, 1998). 많은 선 연구들에도 이러한 점에 착안하여 편파인자들을 이용해 강수형태별 구분에 관한 연구가 진행되어져 오고 있다.

그러나 대부분의 연구들이 미국 대평원 등지의 대규모 기상현상에 관한 것이며, 따라서 지역적, 기후적 특성에 맞춘 연구들이 요구되는바 일본 북서 해안의 해안성 기후와 지역적 특성이 나타나는 강수현상에 관한 관측이 실시된 것이다. 특히, 다양한 편파인자들 중에서 상대적으로 산출이 간편한 Z_{HH} 값과 Z_{DR} 값들을 이용하였다.

Fig. 5에서 Fig. 9는 RHI 와 CAPPI 이미지들의 강수예코 유입을 표현한 것으로 snow, rain, sleet case들의 경우 강수예코가 점진적 흐름을 보였고, graupel, snow and graupel(S/G) case들의 경우 지역적으로 발달된 강수예코의 유입을 볼 수 있었다.

Table 3은 Snow, rain, graupel, snow and graupel(S/G), sleet case들에 대한 편파인자들의 값으로, horizontal reflectivity(Z_{HH}) 값들은 snow case : 0.0~+16.0, rain case: -6.0~+22.0, graupel case: -8.0~+16.0, snow and graupel(S/G) case: +4.0~+20.0, sleet case: 0.0~+18.0 이 나타났고, differential reflectivity(Z_{DR}) 값들은 snow case : -1.8~-0.8, rain case: -2.0~0.0, graupel case: -2.2~ -0.8, snow and graupel(S/G) case: -1.8~

-0.8, sleet case: -2.0~-0.4 로 나타났다.

Fig. 10에서 Fig. 13은 강수형태별 종관기상학적 특성과, 편파인자들의 특성을 보여주는데, snow, rain 의 경우 종관기상학적으로는 비교적 안정적인 형태의 에코 유입이 있었지만, 편파인자들의 분포에서는 snow의 경우 분포 범위가 좁았고, rain의 경우 그 분포 범위가 나머지 4가지 강수 형태들에 비해 넓게 나타났다. Snow에 비해 graupel과 snow and graupel(S/G)의 경우는 종관기상학적으로 비교적 불안정한 상태를 보였고, graupel의 경우는 rain의 경우와 비교해 그 편파인자들의 분포 범위는 넓게 나타났지만, 그 분포 양상이 다른 강수형태들 보다 특징적으로 나타났다. Sleet의 경우는 다른 강수형태들에 비해 그 특징이 미미하였다.

강수 형태별로 편파레이더인자 값들의 분포가 다르게 나타났으며, 이를 고층 기상관측 자료와, 지상관측 자료 등을 이용하여 비교 분석해 본 결과 유용성 있는 구분 방법을 도출하여, 강수 형태별 분류 알고리즘을 구성했다. 하지만, 강수형태는 지역 및 기상 특징에 따라 그 변화성이 크며, 특히 본 연구가 진행된 일본의 북서부 지방은 해양성 기후와 그곳의 지리적 특징에 의해 일반적인 강우와 강설 패턴이 특징적이었다.

레이더의 유용성이 현재 증대되고 있고, 특히 편파레이더의 민감성과 그 유용성이 널리 알려지고 있다. 그러나 우리나라에는 편파레이더가 무안레이더 관측소의 연구용으로 한 대 보유하고 있으며, 그 또한 수신기의 부족으로 편파인자 생성이 어려운 현실이다. 강수의 추정에 있어서 일반적인 반사강도 만으로는 강수 형태의 구분이 어렵고, 급속히 발달해 오는 서해안 대설 같은 경우 편파레이더를 이용한 이러한 강수 추정이 매우 효율적일

수 있다.

선 연구들에서도 강수 형태들의 구분이 매우 중요함이 보고되어져 오고 있고, 언젠가 우리나라도 편파레이더를 보유하여 이를 통해 여러 가지 강수 형태의 구분과, 보다 정량적인 강수 추정을 실시 할 것이다. 본 연구가 우리나라 지형과 기후에 맞는 적절한 강수 추정 알고리즘 도출에 대한 실험 및 연구에 크게 기여될 것으로 사료된다.

참고문헌

- Bringi, V. N., V. Chandrasekar, and R. Xiao, 1998: Raindrop axis ratio and size distributions in Florida rainshafts: An assessment of multiparameter radar algorithms. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, **36**, 703-715.
- Bringi, V. N., and V. Chandrasekar, 2001: Polarimetric Doppler Weather Radar; *Hydrometeor classification*, Cambridge University Press, 517 PP.
- Carey, L. D., S. A. Rutledge, D. A. Ahijevich, and T. D. Keenan, 2000: Correcting propagation effects in C-band polarimetric radar observations of tropical convection using differential propagation phase. *J. Appl. Meteor.*, **39**, 1405-1433.
- Chandrasekar, V., V. N. Bringi, and P. J. Grockwell, 1986: Statistical properties of dual polarized radar signals. Preprints, 23rd *Conf. on Radar Meteorology*, Snowmass, CO, Amer. Meteor. Soc., 154-157.
- Chandrasekar, V., V. N. Bringi, N. Balakrishnan, and D. S. Zrnich, 1990: Error structure of multiparameter radar and surface measurements of rainfall. Part III: Specific differential phase. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **17**, 621-629.
- Doviak, R. J. and D. S. Zrnich, 1993: Doppler Radar and Weather Observation. 2nd edition
- Eugenio Gorgucci, Gianfranco Scarchilli, V. Chandrasekar and V. N.

- Bringi, 2000: Measurement of Mean Raindrop Shape from Polarimetric Radar Observation, *J. Atmos. Sci.* **57**, 3406-3413.
- Green, A. W., 1975: An approximation for the shapes of large rain drop. *J. Appl. Meteor.*, **14**, 1578-1583.
- Gorgucci. E., G. Scarchilli, and V. Chandrasekar, P. F. Meischner, and M. Hagen, 1998: Intercomparison of techniques to correct for attenuation of C-band weather radar signals. *J. Appl. Meteor.*, **37**, 845-853.
- Gorgucci. E., G. Scarchilli, and V. Chandrasekar, 1999: Estimation of mean raindrop shape from polarimetric radar measurements. Preprints, *29th Int. Conf. on Radar Meteorology*, Montreal, PQ, Canada, Amer. Meteor. Soc., 168-171.
- Hall, M., J. Goddard and S. Cherry, 1984: Identification of hydrometeors and other targets by dual-polarization radar. *Radio Sci.*, **19**, 132-140
- Jerry M. Straka, D. S. Zrnica and A. V. Ryzhkov, 1999: Bulk Hydrometeor Classification and Quantification Using Polarimetric Radar Data: Synthesis of Relations. *J. Appl. Meteor.*, **39**, 1341-1372.
- Matrosov, S. Y., R. A. Kropfli, R. F. Reinking, and B. E. Martner, 1999: Prospects for measuring rainfall using propagation differential phase in X-band and Ka-radar bands. *J. Appl. Meteor.*, **38**, 766-776.
- May, P. T., T. D. Keenan, D. S. Zrnica, L. D. Carey, and S. A. Rutledge, 1999: Polarimetric radar measurements of tropical rain at a 5-cm

- wavelength. *J. Appl. Meteor.*, **38**, 750-765.
- Ronald E. Rinehart, 1997: Radar for Meteorologists. 3rd edition
- Ryzhkov, A. V., and D. S. Zrnich, 1996: Assessment of rainfall measurement that uses specific differential phase. *J. Appl. Meteor.*, **35**, 2080-2090.
- Ryzhkov, A. V., and D. S. Zrnich, 1998: Discrimination between rain and snow with a polarimetric radar. *J. Appl. Meteor.*, **37**, 1228-1240.
- Seliga, T. A., and V. N. Bringi, 1976: Potential use of the radar reflectivity at orthogonal polarizations for measuring precipitation. *J. Appl. Meteor.*, **15**, 69-76.
- Tamura, M. 1992: "Continuous Measurement of Snowfall Intensity per Short Time Interval". U. S. A. CRREL, Special Report 92-27, 33-43.
- Zrnich, D. S., N. Balakrishnan, C. Ziegler, V. Bringi, K. Aydin, and T. Matejka, 1993: Polarimetric signatures in the stratiform region of a mesoscale convective system. *J. Appl. meteor.*, **32**, 678-693.
- Zrnich, D. S., and A. Ryzhkov, 1996: Advantages of rain measurements using specific differential phase. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **13**, 454-464.
- Zrnich, D. S., A. Ryzhkov, J. Straka, Y. Liu, and J. Vivekanandan, 2001: Testing a Procedure for Automatic Classification of Hydrometeor Types, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **18**, 892-913.
- 田村盛郎, 1999: "降水種判別型降水強度計測 システム". 日本雪氷學會全國大會講演豫告集, 176

감사의 글

벌써 대학이란 곳에 들어온 지 7년째에 접어들었습니다. 남들보다 그다지 여유롭지도 그다지 뛰어나지도 못해서 항상 열심히 뛰어야 한다고 생각했습니다. 1998년 교문을 바라 볼 때 너무나도 벅차오르는 가슴을 느낄 수 있었습니다. 하지만, 시간이 흐르고 너무 익숙해지면서 조금씩 지쳐갔습니다. 그때 저를 잡아주신 이동인 교수님과의 만남이 지금의 저를 있게 했습니다. 항상 부족한 저를 격려해 주시고 꾸짖어 주신 교수님께 감사의 말씀을 올립니다. 항상 열심히 해야지 하면서도 교수님 뜻에 부응하지 못해 항상 죄송스럽게 생각합니다. 하지만, 이것이 교수님과의 인연의 끝이 아니기에 앞으로 더 열심히 생활 하도록 노력하겠습니다.

한평생 교육현장에 몸담으시면서 환경대기과학과를 위해 부단히 애쓰셨던 한영호 교수님, 끊임없는 학문의 중요성을 일깨워 주신 옥곤, 변희룡, 정형빈, 오재호, 권병혁 교수님께도 다시 한번 감사의 인사를 드립니다.

4년 넘게 힘든 일 기쁜 일 함께 느끼며 지내온 우리 GEAR식구들, 지금 미국 땅에서 신혼의 단꿈에 젖어 있을 철환선배, 미영언니, 기상청 레이더 분야의 핵심 파워로 우뚝 서 계신 정희언니, 효경언니, 항상 그윽한 목소리로 후배들을 다독여 주던 민이선배, 익살스런 눈웃음이 매력 있는 길종선배, 여수에서 신혼임에도 불구하고 신랑과 떨어져 힘들게 일하고 있는 경옥언니, 대구기상대에서 바쁜 업무에도 항상 웃음을 잃지 않고 곳곳이 지내고 있는 하나, 부산청에서 열심히 일하고 있을 해미, 지금은 기상인의 꿈을 접

긴 했지만 영원한 우리의 막내 시원이, 취업의 문턱에서 열심히 공부하고 있을 윤정이, 성화, 현재 실험실에서 굶은 일 도맡아 하고 있을 석희, 수정, 상민, 영섭, 민지, 미혜에게도 다시 한번 고맙다는 말을 전합니다.

4호관 3층에서 같은 한숨을 내쉬던 우리 이쁜 동기들 영미, 옥연, 정희, 보영언니, 종민선배, 유원이, 민아언니, 같이 논문 쓰느라 고생하신 임병문 소령님, 이상훈씨에게도 수고 많이 하셨다는 말을 전하고 싶습니다.

지금 은 퇴직하셨지만, 제가 기상청에 입사하여 처음 모셨던 홍사선 청장님, 현재 광주청 청장님으로서 불철주야 고생하시는 이성재 청장님, 매일 밤늦도록 사무실 불을 밝히셨던 김식영 과장님, 인자한 웃음으로 저의 인사에 답해 주시는 박경우 예보과장님, 김성진 기후정보과장님, 곽동수 서무과장님께 감사의 말씀을 올리며, 같이 근무하면서 너무나 많은 가르침을 주시고 계신 이강휴 예보관님, 이재병 예보관님, 이종수 예보관님, 우준호 계장님, 유근기 계장님, 황영하 계장님, 김병춘 계장님, 매일 예보 퀴즈로 저를 긴장시키는 이현규 주임님, 미소가 너무 순박하신 김태진 주임님, 꼼꼼함으로 푹푹 뭉친 김형국 주임님, 만년필 마니아가 있다는 사실을 가르쳐 주신 김종찬 주임님, 남들은 말이 없다고 하지만 따님들 얘기만 나오면 눈이 반짝이시는 이재용 주임님, 만년소녀 김경하 주임님, 우리청 얼짱! 효실언니, 얼른 짝지 만들어 줘야하는 유미언니, 413대 1이라는 어마어마한 경쟁률을 뚫은 형욱씨, 제주도 푸른 바다가 연상되는 대준씨, 같이 있으면 너무나 즐거워지는 효성씨, 웃음소리가 매력? 적인 용은씨 그리고 우리 이쁜 인화, 또 순이 혜림, 정스런 정원에게도 고마움을 전합니다.

세상을 살면서 꼭 필요한 것을 손꼽으라면 저는 친구라고 말하고 싶습니다. 5년 넘게 나에게 너무나 큰 울타리가 되어준 인혁오빠, 작은 투정도 받아주고 감싸 안아주는 곧 선생님이 될 유나, 언제나 밝은 목소리가 매력적인 혜영, 때론 너무 엉뚱해서 날 웃게 만드는 용득, 만년 미소년 같은 소연이, 미래의 고래박사를 꿈꾸는 현우, 너무나 감성적이어서 가끔씩 날 당황하게 만드는 한균이에게도 항상 내 옆에 있어줘서 고맙다는 말을 하고 싶습니다.

수산과학원에서 학업과 일을 동시에 할 수 있도록 배려해 주셔서 지금의 결실에 도움을 주신 서영상 박사님, 항상 따뜻하게 대해주신 오현주 박사님, 허승 박사님, 황재동 선배님, 장이현 선배님, 나경언니에게도 감사의 뜻을 전합니다.

하지만 그 어떤 분들보다도 이 세상에 제가 있게끔 해 주시고 자식위해 지금도 밤늦도록 일하시는 우리 아빠, 엄마 그리고 장녀로서 힘든 시기 견뎌준 상희언니, 항상 어릴 것만 같았는데 서울에서 의젓하게 사회인으로 일하고 있는 대견한 자운이에게 이 작은 결실을 바칩니다.