

이 학 석 사 학 위 논 문

강우강도에 따른
*S-band*와 *C-band* 레이더의
강수량 추정 비교



2007년 2월

부 경 대 학 교 대 학 원

환 경 대 기 과 학 과

노 해 미

이 학 석 사 학 위 논 문

강우강도에 따른

*S-band*와 *C-band* 레이더의 강수량 추정 비교

지도교수 이 동 인

이 논문을 이학석사 학위논문으로 제출함



2007년 2월

부 경 대 학 교 대 학 원

환 경 대 기 과 학 과

노 해 미

노해미의 이학석사 학위논문을 인준함

2006년 12월 22일



주 심 이학박사 변 희 룡 (인)

부 심 이학박사 이 동 인 (인)

부 심 이학박사 권 병 혁 (인)

목 차

<u>CHAPTER</u>	<u>PAGE</u>
List of Tables	ii
List of Figures	iii
Abstract	1
1. 서론	3
2. 자료 및 분석방법	6
2.1 Radar 관측	11
2.2 강우강도 산출	13
2.3 분석방법	18
3. 분석결과	21
3.1 반사도 비교	21
3.2 강수량 비교	27
3.2.1 평균 강우강도 비교	29
3.2.2 순간 강우강도 비교	33
4. 결론	47
참고문헌	50
감사의 글	53

List of Tables

Table 1. The characteristics of JinDo radar and KunSan radar	8
Table 2. Range from JinDo radar and KunSan radar, and range difference between both radars at each AWS station	8
Table 3. Date used in data analysis	10
Table 4. Conversion of reflectivity to rain rate using $z=200R^{1.6}$	14
Table 5. The percentage of estimated radar precipitation to one hour accumulated rain by rain gauge according to rain rate categories	29
Table 6. RMSE (Root Mean Square Error) of rain rate categories ..	31
Table 7. RMSE (Root Mean Square Error) by each rain rate in light rain	32
Table 8. Bias and scatter of rain rate categories	35

List of Figures

Fig. 1.	The photograph of JinDo radar	7
Fig. 2.	The photograph of KunSan radar	7
Fig. 3.	The observation sites of C-band radar, S-band radar and AWS	9
Fig. 4.	A principle of CAPPI (Constant Altitude Plan Position Indicator)	12
Fig. 5.	The radar reflectivity averaged in $3 \text{ km} \times 3 \text{ km}$ square cartesian grid data around AWS	12
Fig. 6.	The frequency distribution and the percentage of frequency of one hour accumulated rain by rain gauge	16
Fig. 7.	The number of frequency and percentage according to each raw rain rate	17
Fig. 8.	The ratio of S-band radar reflectivity to C-band radar reflectivity (a) logarithm radar reflectivity(dBZ) (b) linear radar reflectivity(mm^6/m^3).	22
Fig. 9.	The frequency distribution of (a) S-band radar reflectivity(dBZ) and (b) C-band radar reflectivity(dBZ). ...	22
Fig. 10.	The distribution of radar reflectivity between S-band radar and C-band radar at (a) light rain, (b) moderate rain and (c) heavy rain	25

Fig. 11. The frequency distribution of radar reflectivity at (a) S-band in light rain, (b) C-band in light rain, (c) S-band in moderate rain, (d) C-band in moderate rain, (e) S-band in heavy rain and (f) C-band in heavy rain.	26
Fig. 12. Scatter distribution of (a) one hour accumulated rain of rain gauge vs one hour average rain rate and (b) ten min. accumulated rain vs ten min. rain rate.	28
Fig. 13. The number of frequency and percentage according to each rain rate in light rain	32
Fig. 14. Error distribution of (a) S-band and (b) C-band	34
Fig. 15. Error distribution of (a) S-band and (b) C-band in light rain	37
Fig. 16. The same as Fig. 15 but for moderate rain	39
Fig. 17. The same as Fig. 15 but for heavy rain	41
Fig. 18. The CAPPI (1.5 km) images of reflectivity and estimated rain rate by JinDo and KunSan radar at 1620 LST 1 Jun. 2005 ..	43
Fig. 19. The same as Fig. 18 but for at 1630 LST 1 Jun. 2005	44
Fig. 20. The same as Fig. 18 but for at 1640 LST 1 Jun. 2005	45
Fig. 21. The same as Fig. 18 but for at 1650 LST 1 Jun. 2005	46

The comparison of precipitation estimation between S-band and C-band radar by rain rate

Hae-Mi Noh

Department of Environmental Atmospheric Sciences,
Graduate School, Pukyong National University

Abstract

S-band and C-band radar are generally classified by using 15.00~7.50 cm and 7.50~3.75 cm in wavelength. They are used to the detection of precipitation phenomena and applied to nowcasting and local warning etc. To know the characteristics and differences of precipitation estimation between S-band and C-band radar, radar rain rate by using $z=200R^{1.6}$ was compared with two radars, relatively.

Rain rate which was obtained by radar reflectivity and rain gauge was investigated at each radar. To compare with one hour average rain rate of radar, rain rate of AWS was divided into three rain rate intensity categories : light rain ($R < 2.5$ mm/h), moderate rain ($R = 2.5-10$ mm/h), and heavy rain ($R > 10$ mm/h). Comparing with RMSE (Root Mean Square Error) by each rain rate intensity category, its value of C-band radar had less than S-band radar in light rain and had more than S-band radar in moderate and heavy rain.

For the analysis of bias, scatter and error distribution, raw rain rate (R_{raw}) was divided into three categories : light rain ($R_{\text{raw}} = 3 \text{ mm/h}$), moderate rain ($R_{\text{raw}} = 6-9 \text{ mm/h}$) and heavy rain ($R_{\text{raw}} \geq 2 \text{ mm/h}$).

In every case of rainfall, the bias of S-band radar had lower than C-band radar. The scatter of S-band radar in light rain and heavy rain had higher than C-band radar, however its value of S-band radar had lower than C-band radar in moderate rain.

Bias and scatter values were highly shown at high rain rate in both radars. It means that precipitation estimation between radar and rain gauge had lower relationship at higher rain rate in both radars.

Error distribution represented at 28.11% overestimation and 71.89% underestimation in S-band radar, whereas C-band radar almost underestimated to 98.77%. Overestimating rates of both radars were shown as the lower percentage at high rain rate. Error distribution of C-band radar had the negative value at heavy precipitation.

1. 서론

우리나라에서는 1970년 2월 관악산 레이더(C-band) 관측을 시작으로, 두 대의 C-band 레이더가 S-band 레이더로 교체되어, 현재 여섯 대의 S-band 레이더와 다섯 대의 C-band 레이더를 운영하고 있다. S-band는 15.00~7.50 cm의 파장과 2000~4000 MHz의 주파수를 사용하고, C-band는 7.50~3.75 cm 파장과 4000~8000 MHz의 주파수를 이용하여, 저기압성 강우, 태풍, 집중호우, 국지경보(local warning)와 레이더 네트워크에 활용되고 있다(Sauvageot, 1992).

레이더는 전파를 발사해서 강수입자로부터 산란되어 돌아오는 반사도 신호의 강도를 측정하여 레이더 반사도와 강우강도와의 $z-R$ 관계식으로부터 강우강도를 추정하게 된다. 레이더를 이용한 강수량 추정은 수문예보와 기후연구 등에 다양하게 적용되어 유용하게 사용되므로 레이더의 강수량 산정에 대한 평가는 매우 중요하다(Krajewski et al., 1991; Ciach et al., 1997; Creutin et al., 1997; Borga et al., 2000). 그러나 레이더의 반사도 값을 이용한 강수량 추정은 1)입자크기분포(DSD) 변화, 2)레이더 측정 오차, 3)전파의 감쇠, 4)레이더 빔 블로킹, 5)부분적인 빔 차폐 등의 이유로 오차가 발생하게 된다(Ryzhkov and Zrnich, 1995). 특히 레이더 반사도 값은 전파의 효과와 전파가 대기를 진행하는 동안 대기를 구성하고 있는 각종 기체 및 강수입자에 의한 감쇠(attenuation)로 강수량 추정 시 오차가 발생한다(Hitschfeld and Bordan, 1954; Holt, 1984; Aydin and Girdhar, 1992).

감쇠 영향에 의한 레이더 자료 오차에 관한 연구는 여러 연구자들에 의해 수행되어왔다(Gunn and East, 1954; Wexler and Atlas, 1963; McCormic, 1970; Atlas et al., 1993).

Rinehart(1997)에 의하면 대기기체에 의한 감쇠는 산란되는 레이더 에너지의 양이 매우 적어 종종 무시되지만, 강수입자에 의한 감쇠 영향은 매우 커서 레이더로 강수량을 추정하는데 큰 오차를 발생시킨다고 한다.

또한 파장이 짧고 강우강도가 클수록 감쇠의 영향을 많이 받아, 파장이 짧은 C-band 레이더가 파장이 긴 S-band 레이더보다 강수에 의한 감쇠가 커서 강수량을 추정하는데 보다 큰 오차를 발생시킨다고 한다. 그러나 민감도와 가격의 측면을 고려할 때, C-band 레이더의 사용은 상당한 이점을 제공한다. 안테나의 크기는 주파수에 반비례하므로 C-band는 S-band보다 안테나의 설치 및 기계의 유지보수비용이 적게 드는 이점이 있다(Capsoni et al., 2001). 밴드별 레이더의 반사도 오차와 강수량 추정 에 대한 레이더의 민감도는 강수 발생 시 각 밴드별 강수량 추정 능력을 평가하는 데에 있어 매우 중요하다.

Kessler and Wilk(1968), Wilson and Brandes(1979), Doviak(1983)는 정성적인 측면에서 레이더로 추정된 강수량의 정확도를 평가하였으며, Klazura(1981)는 5 cm 파장의 C-band 레이더를 이용하여, 강우강도가 큰 폭풍우에서 추정된 레이더의 강수량과 관측된 우량계의 강수량 차를 조사하여 대류성 폭풍우에 대한 레이더와 우량계 자료를 객관적으로 분석하였다.

Austin(1987)은 10.5 cm 파장의 WR 66 레이더와 5.3 cm 파장의 WR 73 레이더를 이용하여, 레이더 반사도 측정과 지상 강수량 사이의 관계에 영향을 끼치는 여러 물리적인 요소를 고려하여, 지상 우량계가 관측한 강수량에 대한 레이더로 추정한 강수량의 비 값을 도출하였다.

현재까지 국내에서는 레이더 반사도의 오차 및 민감도에 대한 연구는 그다지 많지 않고, 레이더 밴드별 특성을 비교 분석한 연구는 거의 없는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 현재 기상청에서 사용하고 있는 C-band와 S-band 레이더를 사용하여 강우강도에 따른 강수량 추정에 대한 오차를 정량적으로 비교하고, 강수량 추정에 대한 두 밴드의 특징과 차이에 대해서 비교 분석하였다.



2. 자료 및 분석방법

분석에 사용된 S-band 레이더의 자료는 진도레이더(34.47°N , 126.32°E)에서 관측한 값이고, C-band 레이더의 자료는 군산레이더(36.01°N , 126.79°E)에서 관측한 값이다. 진도레이더와 군산레이더의 외경은 Fig. 1과 Fig. 2에 나타냈으며, 자세한 제원은 Table 1과 같다. 진도레이더는 독일 AMS사에서 제작된 Meteor-1500S의 일종으로 10분마다 20개 고도각의 볼륨자료를 생산하며, 관측반경은 240 km이다. 군산레이더는 미국 EEC(Enterprise Entertainment Company)사에서 제작된 DWSR-90C의 일종으로 10분마다 7개 고도각의 볼륨자료를 생산하며, 관측반경은 240 km이다.

분석영역은 레이더의 유효반경을 고려하여 진도레이더와 군산레이더로부터 반경 120 km 이내에 위치하고 각 레이더로부터의 거리 차이가 가장 작은 세 지점을 선정하였으며, 분석지점인 하남공, 영광, 무등봉 지점의 AWS 자료를 이용하여 레이더로 추정된 강수량을 비교분석하였다. Table 2는 각 AWS와 레이더와의 거리와 각 레이더 사이트로부터의 거리 차를 나타낸다. Fig. 3은 관측에 사용된 레이더와 AWS 우량계의 위치를 나타낸다. 무등봉 AWS는 군산레이더로부터 약 101.54 km 떨어져 있으며, 레이더로부터의 방위각은 약 169.07° 이며, 진도레이더로부터 약 94.09 km 떨어져 있으며, 레이더로부터의 방위각은 약 41.27° 이다. 하남공 AWS는 군산레이더로부터 약 91.32 km 떨어져 있으며, 방위각은 약 178.69° 이며, 진도레이더로부터 약 90.97 km 떨어져 있으며, 방위각은 약 29.56° 이다. 영광 AWS는 군산레이더로부터 약 85.79 km 떨어져 있으며, 방위각은 약 199.73° 이며, 진도레이더로부터 약 90.71 km 떨어져 있으며, 방위각은 약 8.77° 이다.



Fig. 1. The photograph of JinDo radar



Fig. 2. The photograph of KunSan radar

Table 1. The characteristics of JinDo radar and KunSan radar

Radar site name	JinDo	KunSan
Type	S-band	C-band
Transmitter tube	Klystron	Magnetron
Effective/Max. detect. Range(km)	240/480	240/480
PRF (Hz)	250-1200	1180
	250-550	250
Peak power(KW)	750	250
Frequency (MHz)	2890	5340
Beam Width(°)	1	1.2
Antenna diameter(m)	8.5	3.6

Table 2. Range from JinDo radar and KunSan radar, and range difference between both radars at each AWS station

AWS station	Range from JinDo radar(A)	Range from KunSan radar(B)	Range difference between A and B
HaNamGong	90.97 km	91.32 km	0.34 km
YeongGwang	90.71 km	85.79 km	4.92 km
MuDeungBong	94.09 km	101.54 km	7.45 km

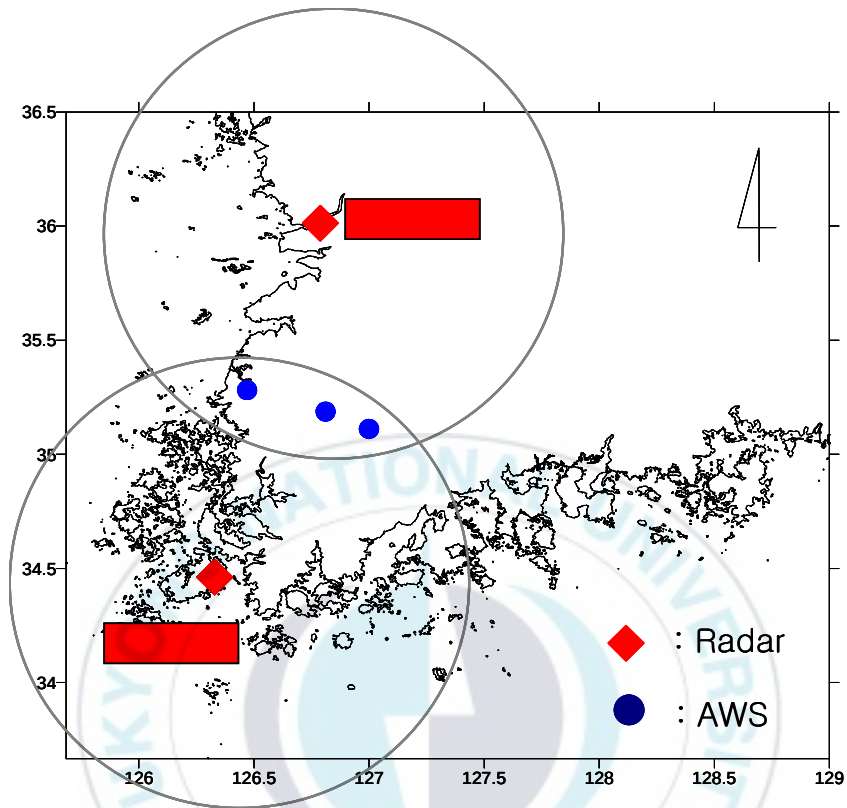


Fig. 3. The observation sites of C-band radar, S-band radar and AWS

본 연구에서는 2005년을 중심으로 강우강도에 따른 S-band 레이더와 C-band 레이더의 강수량 추정을 비교하였다. 분석지점인 하남공, 영광, 무등봉 AWS 세 지점 모두 일강수량이 10 mm 이상인 날을 대상으로 분석하였으며, 레이더 자료가 없는 날은 분석에서 제외시켰다. 분석에 사용된 일자는 Table 3과 같다.

Table 3. Date used in data analysis

DATE	
17 March 2005	22 March 2005
10 April 2005	19 April 2005
17 May 2005	1 June 2005
2 June 2005	10 June 2005
28 June 2005	9 July 2005
11 July 2005	28 July 2005
1 August 2005	2 August 2005
8 August 2005	19 August 2005
21 August 2005	22 August 2005
20 September 2005	21 September 2005
5 November 2005	6 November 2005

2.1 Radar 관측

레이더 반사도 자료는 약 850hPa 고도로, 강수의 발생유무를 판단하는 고도로 알려져 있는 관측고도 1.5 km의 CAPPI 자료를 사용하였다.

CAPPI란 Constant Altitude Plan Position Indicator의 줄임말로 일정 고도의 PPI (Plan Position Indicator)를 뜻한다. PPI는 극좌표계에서 안테나의 고도각을 일정하게 고정시켜 수평방향으로 회전하여 나타나는 에코의 강도를 나타내는 영상을 의미하며, 고도각에 관계없이 등고도면을 나타낸 것이 CAPPI 화상이다(Rinehart, 1997).

레이더 자료는 극좌표계에서 481 km × 481 km의 직교좌표계 자료로 바꾸어 각각의 격자마다 반사도(dBZ)의 값을 얻었다.

강수 시 바람에 의해서 우적은 이동을 한다. 따라서 우량계가 존재하는 지점과 상공의 레이더 관측지점이 일대일로 정확하게 일치하지 않는다. 이런 효과를 고려하여 AWS 지점으로부터 가장 가까운 빔을 기준으로 좌우, 앞뒤로 각각 반사도 값을 하나씩 더 두어서 3 km × 3 km의 격자 값을 평균하였다. 이 평균한 레이더 반사도 값을 이용하여 추정한 강우강도와 지상 우량계가 관측한 강우강도를 비교하였다.

Fig. 4는 CAPPI 영상의 생성원리를 나타낸 모식도이며, Fig. 5는 레이더 반사도의 평균값을 구하기 위하여 AWS 지점을 중심으로 3 km × 3 km의 격자로 변환하여 평균 레이더 반사도 자료를 얻기 위한 모식도이다.

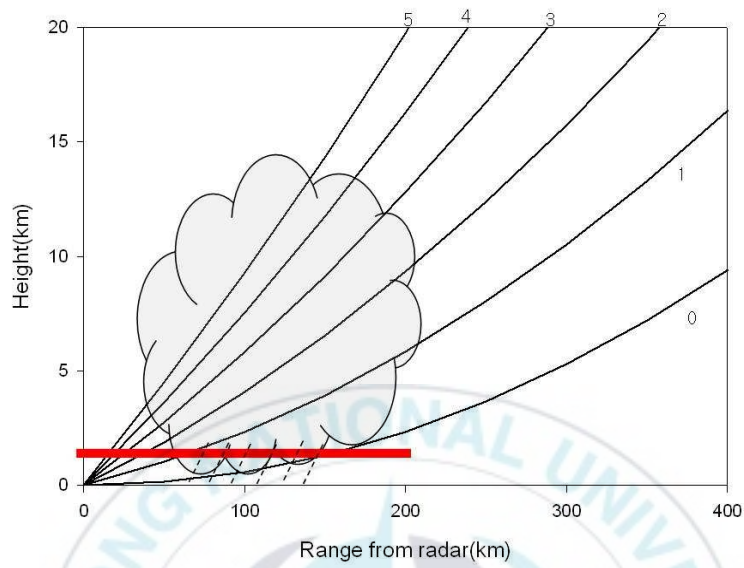


Fig. 4. A principle of CAPPI (Constant Altitude Plan Position Indicator)

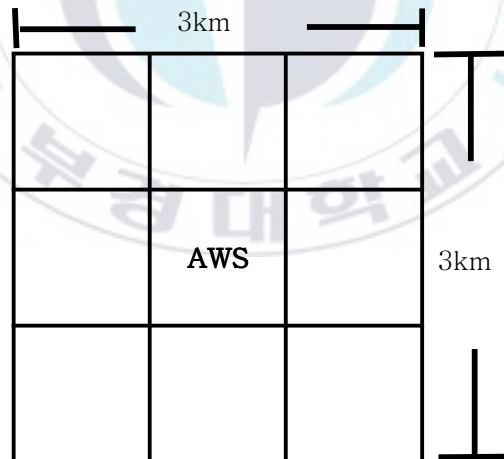


Fig. 5. The radar reflectivity averaged in 3 km $\times$ 3 km square cartesian grid data around AWS

2.2 강우강도 산출

Marshall and Palmer(1948)는 z 는 R 의 함수인 입자크기분포(DSD : Drop Size Distribution), 즉 단위 체적에 분포하는 빗방울의 직경과 빗방울의 개수에 의존함을 밝혔다. 강수입자의 직경분포를 관측해서 얻어진 자료를 통계적 방법을 사용하여 z - R 관계식을 유도하면 식(1)과 같다. 레이더에서 산출된 강수량은 기상레이더에서 관측된 반사도 값을 주로 식(1)과 같은 형태의 관계식에 적용하여 추정한다(Battan, 1973).

$$z=AR^b \text{-----}(1)$$

여기서 z 는 반사도(Reflectivity)로, 단위부피(m^3)에 존재하는 강수 입자의 직경의 6승에 비례하는 값이며, R 은 강우강도(mm/h)이다. 그리고 상수 A 와 지수 b 는 강수의 입자크기분포에 따라 결정되는 경험 값으로 강수형태와 지형, 계절 등에 따라서 다양한 값을 가진다.

현재 기상청에서는 1948년 Marshall과 Palmer에 의해서 경험적으로 산출한 식인 $z=200R^{1.6}$ 을 사용하여 강수량을 산출하고 있다. 따라서 본 연구에서는 현재 기상청에서 사용하고 있는 현업용 식인 $z=200R^{1.6}$ 을 사용하여, S-band와 C-band 레이더의 강수량 추정에 대해서 비교 분석하였다. Table 4는 이 관계식을 이용하여 반사도 값을 강우강도로 대응 산출시킨 값이다. 식(1)을 통해 레이더 반사도로 추정된 강우강도(R)는 mm/h 로 표기되며, 1시간에 대한 강수율을 의미한다.

Table 4. Conversion of reflectivity to rain rate using $z=200R^{1.6}$

Reflectivity	Rain rate
(dBZ)	(mm/h)
23	1.0
24	1.2
25	1.3
26	1.5
27	1.7
28	2.0
29	2.3
30	2.7
31	3.2
32	3.6
33	4.2
34	4.7
35	5.6
36	6.4
37	7.5
38	8.6
39	10.6
40	11.5
41	13.3
42	15.4
43	17.8
44	20.5
45	23.6
46	27.3
47	31.6
48	36.4
49	42.1
50	48.6
51	56.1
52	64.8
53	74.8
54	86.4
55	99.8

진도 S-band 레이더와 군산 C-band 레이더는 10분마다 볼륨자료를 생산하여 반사도 값을 제공한다. 시간적 오차의 안정성을 고려하여 10분마다 제공되는 레이더 반사도로 추정된 강우강도를 1시간 평균하여 AWS의 1시간 누적 강수량과 비교하였고, 실시간 변화와 레이더와 우량계 모두 강수를 감지했을 때, 두 밴드의 강수량 추정을 비교하기 위하여 10분마다 제공되는 레이더 반사도로 추정한 강우강도와, AWS의 10분 누적강수량을 한 시간 강우강도로 전환한 순간강우강도(R_{raw})를 비교하였다.

분석 지점인, 하남공, 영광, 무등봉 AWS의 전도형(tipping bucket) 우량계는 1분 간격으로 누적 강우강도를 측정하여 자료를 저장한다. 세 지점 모두 0.5 mm 전도형 bucket을 사용하기 때문에 한 시간 누적 강수량의 최소값은 0.5 mm/h이며, 10분의 최소 순간강우강도는 3 mm/h가 된다.

각 강우강도의 빈도 분포를 알아보기 위하여, 한 시간 AWS 누적강수량의 빈도 분포를 0.5 mm/h 간격으로 나누어 Fig. 6에 나타내었다. 횡(x)축은 강우강도를 나타내고 종(y)축은 빈도수를 나타낸다. 실선은 해당 강우강도가 발생한 빈도수를 백분율로 나타낸 값이다. 한 시간 AWS 누적강수량의 빈도 분포를 보면 강우강도가 가장 작은 0.5 mm/h에서 가장 빈도수가 많았으며, 강우강도가 클수록 빈도수가 적어지는 경향이 있었다.

본 연구에서는 한 시간 누적 강수량이 2.5 mm/h 미만인 강수를 light rain, 2.5 mm/h 이상 10 mm/h 이하인 강수를 moderate rain, 10 mm/h 초과하는 강수를 heavy rain으로 정의하여 S-band 레이더와 C-band 레이더의 한 시간 평균 강우강도와 비교 분석하였다(Varma and Liu, 2006). Light rain은 분석 자료의 57.28%, moderate rain은 38.57%, heavy rain은 4.15%를 차지한다.

Rain rate distribution

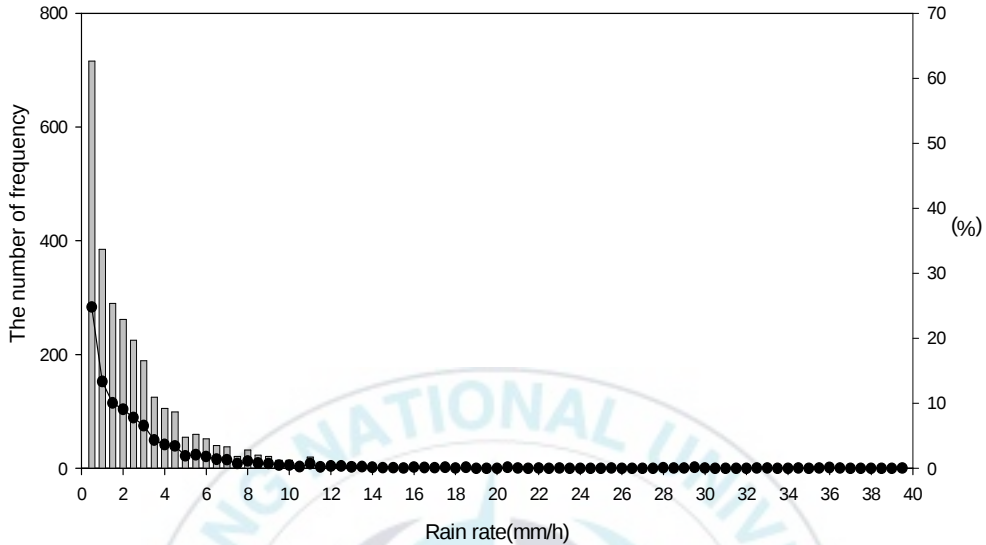


Fig. 6. The frequency distribution and the percentage of frequency of one hour accumulated rain by rain gauge

또한, 레이더와 AWS가 모두 강수를 감지했을 때, 레이더의 강수량 추정정도를 비교하기 위하여, S-band와 C-band 레이더로 추정된 강우강도를 지상 우량계의 순간강우강도와 비교하였다. 두 레이더와 지상 우량계가 모두 강수를 감지했을 때의 자료만을 사용하여 빈도 분포를 알아보았으며, 3 mm/h 간격으로 강우강도를 나누어 Fig. 7에 나타내었다.

Fig. 7의 횡(x)축은 강우강도를 나타내고 종(y)축은 빈도수를 나타낸다. 실선은 해당 강우강도가 발생한 빈도수를 백분율로 나타낸 값이다. 가장 강우강도가 작은 3 mm/h가 가장 많은 빈도수를 나타내고, 강우강도가 클수록 빈도수가 적어지는 경향을 보였다. 순간 강우강도는 최소값인 3 mm/h를 light rain으로 정의하고, moderate rain과 heavy rain은 AWS의 한 시간 누적강수량 분리 기준에 따라서, 6-9 mm/h를 moderate rain, 12

mm/h 이상을 heavy rain으로 정의하여 S-band와 C-band 레이더의 강수량 추정을 비교하였다. Light rain은 분석 자료의 61.12%, moderate rain은 28.73%, heavy rain은 10.16%를 차지한다.

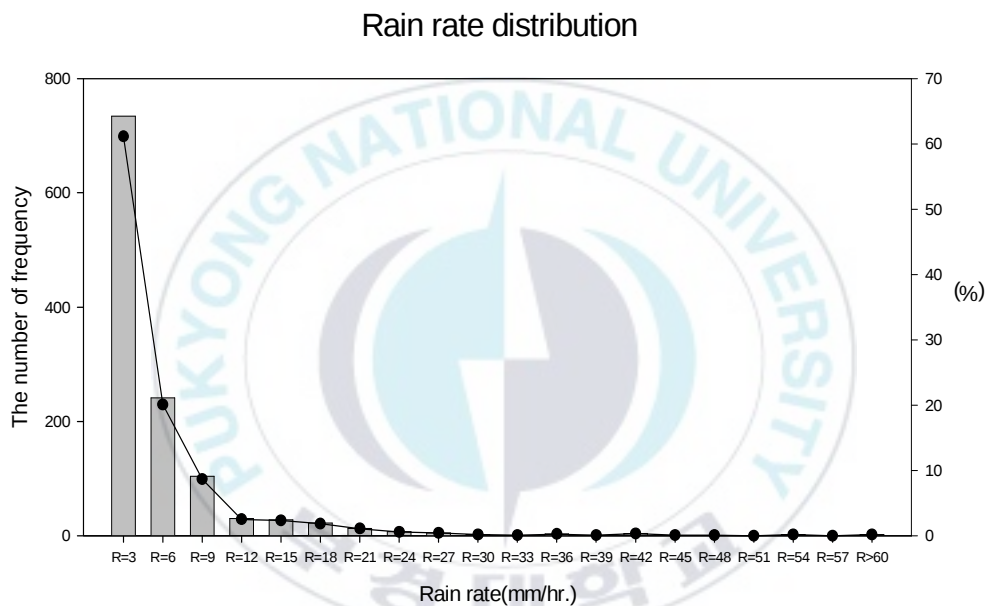


Fig. 7. The number of frequency and percentage according to each raw rain rate

2.3 분석방법

본 연구에서는 군산레이더와 진도레이더의 반사도 값을 강우강도로 전환하여 지상 강수량과 비교하였다. 레이더는 10분마다 볼륨자료를 생산하여 반사도 값을 제공한다. 제공받은 반사도 값을 강우강도로 전환하여 10분 간격으로 한 시간 평균한 강우강도와 지상 AWS의 한 시간 누적강수량을 비교 분석하였다. 또한, 레이더의 강우강도와 AWS의 10분 누적강수량을 한 시간 강우강도로 전환한 순간강우강도(R_{raw})를 비교하였다.

S-band와 C-band로 추정한 강수량과 AWS가 관측한 강수량과의 상관계수(CC, Correlation Coefficient)를 비교하였다. 상관계수는 추정강수량과 관측강수량의 일치 정도를 나타내는 계수로 식(2)와 같이 나타낸다.

$$CC = \frac{\sum (R - \bar{R})(G - \bar{G})}{\sqrt{\sum (R - \bar{R})^2} \sqrt{\sum (G - \bar{G})^2}} \quad \text{---(2)}$$

여기서 R과 G는 레이더로 추정한 강수량과 지상 우량계가 관측한 강수량을 뜻하며, $\bar{R}$ 과 $\bar{G}$ 는 레이더로 추정한 강수량의 평균값과 지상 우량계가 관측한 강수량의 평균값을 뜻한다.

또한, S-band와 C-band의 한 시간 평균 강우강도의 RMSE (Root Mean Square Error)를 분석하였다. 분석은 전체 강수량에 대한 S-band와 C-band 레이더의 강수량 추정에 대해 비교하였고, light rain ($R < 2.5$ mm/h), moderate rain ($R = 2.5-10$ mm/h), heavy rain ($R > 10$ mm/h)으로 나누어서 비교하였다.

RMSE는 레이더로 추정한 강수량과 관측한 실제 강수량의 차이를 제공

하여 평균한 것의 제곱근 값으로 추정강수량의 절대적인 오차의 크기로 식(3)과 같이 나타낸다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (R_i - G_i)^2} \quad \text{-----}(3)$$

여기서 (R_i , G_i)는 n 쌍의 레이더로 추정한 강수량과 지상 우량계가 관측한 강수량 중 i 번째 레이더로 추정한 강수량과, 지상 우량계가 관측한 강수량을 뜻한다. RMSE는 레이더로 추정한 강수량과 지상 우량계가 관측한 강수량이 완벽하게 일치했을 때 0으로, 오차 값이 커질수록 레이더로 추정한 강수량과 우량계가 관측한 강수량의 불일치 정도가 커짐을 뜻한다.

또한 레이더와 우량계가 동시에 강수를 감지했을 때, 10분마다 볼륨 자료를 생산하는 레이더 반사도로 추정된 순간 강우강도와 그 때의 실제 지상강우강도의 비를 통해 오차의 분포도, bias, scatter를 살펴보았다. Bias와 scatter 그리고 오차 분포도는 정확한 강수량을 추정할 수 있는 레이더의 역량을 나타낸다.

Bias는 지상 우량계가 관측한 총강수량에 대한 레이더로 추정한 총강수량의 비로 정의 된다(Galli et al., 2006). Bias는 레이더로 추정한 강수량이 지상 우량계가 관측한 강수량에 대해서 얼마나 일치하는가를 나타낸다. 양의 bias는 레이더로 추정한 강수량이 지상 우량계보다 과대 추정되었으며, 음의 bias는 과소 추정되었음을 뜻한다(Galli et al., 2006).

오차분포도는 우량계에 대한 레이더의 비의 함수로서 총강수량의 누적 기여도로 표현된다. 오차분포도에서는 레이더가 강수를 감지하지 못하거나, 우량계가 강수를 감지하지 못하는 경우는 포함되지 않는다(Galli et

al., 2006).

Scatter는 오차분포도의 16%와 84% 사이의 반값으로 정의한다(Galli et al., 2006). 16%와 84%의 거리는 정규분포에서 표준편차의 2배에 해당하는 값으로, Radar/Gauge 비가 중심(레이더로 추정된 강수량과 지상 우량계가 관측한 강수량이 완벽하게 일치)에서 얼마나 떨어져 있는가를 나타낸다.

Bias는 지상 우량계에 대한 레이더로 추정된 강수량이 일치하는 정도를 정량화 할 수 있는 반면, scatter는 지상 우량계의 강수량과 레이더로 추정된 강수량이 정확하게 일치할 때를 기준으로 지상 우량계의 강수량에 대한 레이더로 추정된 강수량이 얼마나 분산되어 있는가를 알 수 있다(Galli et al., 2006).

Bias와 scatter가 0 dB이면, 레이더로 추정된 강수량과 지상 우량계가 관측한 강수량이 완벽하게 일치함을 의미한다.

레이더로 강수량을 추정할 때, 발생하는 오차는 대부분 승법적인 성격을 띤다. 예를 들어 레이더에 묻은 물에 의해 발생된 오차는 가법적인 오차 보다는 승법적인 오차의 결과이다. 따라서 bias와 오차 분포도, scatter는 dB로 표현된다(Galli et al., 2006).

3. 분석결과

3.1 반사도 비교

2005년도 강수 중 세 지점 모두 일강수량이 10 mm 이상인 날의 레이더 반사도 패턴을 살펴보았다. 일반적으로 레이더는 z -R 계수가 결정되어 있으면 식 (1)을 이용하여 레이더 반사도로 강우강도를 추정한다. 따라서 강우강도를 추정하기 위한 S-band 레이더와 C-band 레이더가 관측한 반사도 값을 비교하였다. 레이더에서 관측되는 반사도 Z 는 dBZ 단위의 로그스케일의 레이더 반사도 (logarithm radar reflectivity)이며, z -R 관계식에 사용되는 z 는 mm^6/m^3 의 선형적인 레이더 반사도 (linear radar reflectivity)이다(Doviak, 1992). z 는 1m^3 에 들어있는 수상입자의 직경 D 를 6제곱하여 더한 값이고, dBZ는 decibel z 로써 식으로 나타내면 식(3)과 같다.

$$Z=10*\log(z)------(3)$$

Fig. 8은 S-band 레이더와 C-band 레이더가 관측한 로그스케일 레이더 반사도의 비와, 선형적인 레이더 반사도의 비를 나타내었다. S-band 레이더가 C-band 레이더보다 높은 반사도 값을 관측한 것은 전체의 95.9%이고, C-band 레이더가 S-band 레이더보다 높은 반사도 값을 관측한 것은 4.1%로, S-band 레이더가 C-band 레이더보다 높은 반사도 값을 나타내었다. C-band 레이더가 관측한 로그스케일의 반사도(dBZ)에 대한 S-band 레이더가 관측한 로그스케일의 반사도(dBZ)의 최대 비 값은 3.7이다. 두 밴드의 반사도 값을 $z(\text{mm}^6/\text{m}^3)$ 값으로 전환하면, C-band 레이더가 관측한 선형반사도(mm^6/m^3)에 대한 S-band 레이더가 관측한 선형 반사도(mm^6/m^3)의 최대 비 값은 309.0이다.

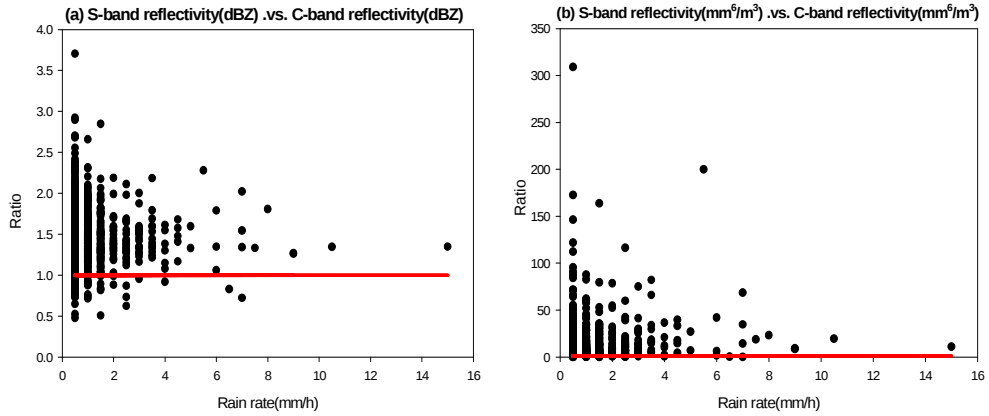


Fig. 8. The ratio of S-band radar reflectivity to C-band radar reflectivity (a) logarithm radar reflectivity(dBZ) (b) linear radar reflectivity(mm^6/m^3).

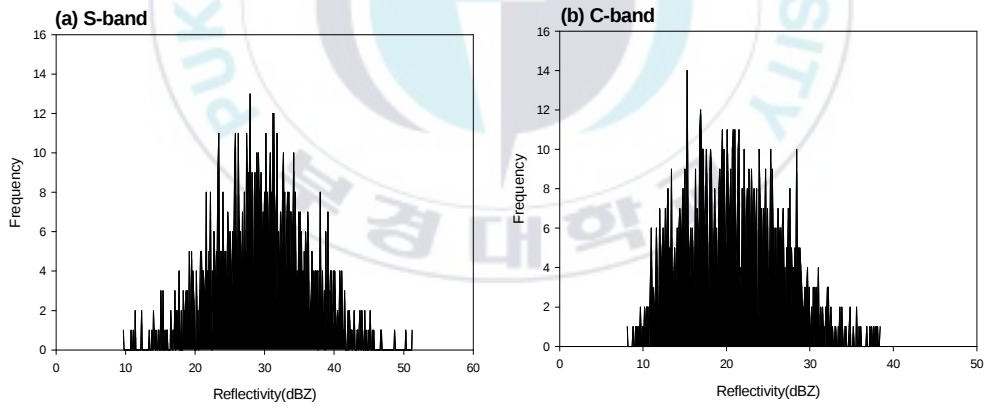
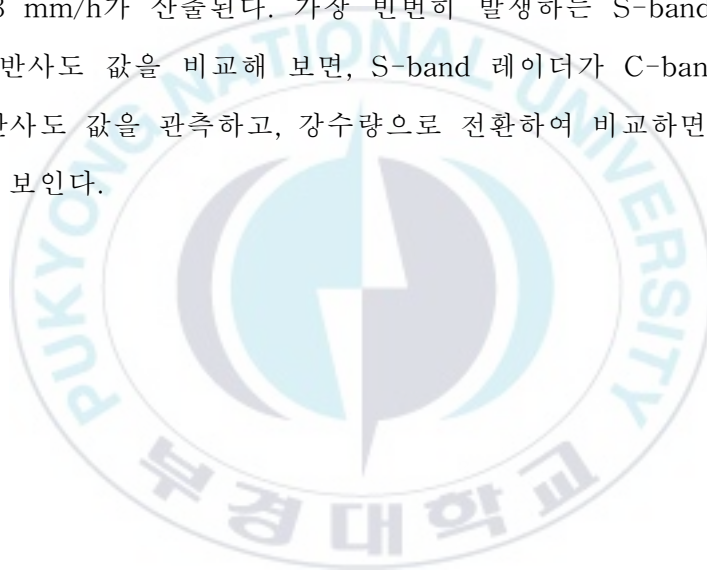


Fig. 9. The frequency distribution of (a) S-band radar reflectivity(dBZ) and (b) C-band radar reflectivity(dBZ).

우량계가 존재하는 세 지점에서 S-band와 C-band 레이더가 관측한 상층 레이더 반사도(dBZ)를 추출하여 빈도 분포를 구하였으며, 그 분포를 Fig. 9에 나타내었다. 횡(x)축은 반사도(dBZ)를 나타낸 것이며, 반사도 값을 0.1 dBZ 간격으로 나누어 빈도를 구하였다. 가장 빈번하게 관측된 S-band 레이더의 반사도 값은 27.3 dBZ로 $z=200R^{1.6}$ 식에 대입하여 강우강도를 추정하면 1.9 mm/h가 산출된다. 가장 빈번하게 관측된 C-band 레이더의 반사도 값은 15.3 dBZ로 $z=200R^{1.6}$ 식에 대입하여 강우강도를 추정하면 0.3 mm/h가 산출된다. 가장 빈번히 발생하는 S-band와 C-band 레이더의 반사도 값을 비교해 보면, S-band 레이더가 C-band 레이더보다 높은 반사도 값을 관측하고, 강수량으로 전환하여 비교하면, 1.6 mm/h의 차이를 보인다.



순간 강우강도를 light rain, moderate rain, heavy rain으로 세분화하여 S-band와 C-band 레이더가 관측한 반사도의 분포를 Fig. 10에 나타내었으며, 반사도의 빈도분포를 Fig. 11에 나타내었다.

Light rain에서 S-band 레이더가 관측한 최대 반사도 값은 46.7 dBZ, 최소 반사도 값은 9.7 dBZ이며, 평균 반사도 값은 27.5 dBZ이다. C-band 레이더가 관측한 최대 반사도 값은 33.6 dBZ, 최소 반사도 값은 8.1 dBZ, 평균 반사도 값은 18.9 dBZ이다. Light rain에서 가장 빈번히 관측된 S-band 레이더의 반사도 값은 25.8 dBZ이며, C-band 레이더의 반사도 값은 15.3 dBZ로 $z=200R^{1.6}$ 식을 이용하여 강우강도를 추정하면, 각각 1.49 mm/h와 0.33 mm/h가 산출되었다.

Moderate rain에서 S-band 레이더가 관측한 최대 반사도 값은 45.2 dBZ, 최소 반사도 값은 10.8 dBZ이며, 평균 반사도 값은 31.3 dBZ이다. C-band 레이더가 관측한 최대 반사도 값은 37.2 dBZ, 최소 반사도 값은 10.4 dBZ, 평균 반사도 값은 22.6 dBZ이다. Moderate rain에서 가장 빈번히 관측된 S-band 레이더의 반사도 값은 27.9 dBZ이며, C-band 레이더의 반사도 값은 20.8 dBZ로 $z=200R^{1.6}$ 식을 이용하여 강우강도를 추정하면, 각각 2.02 mm/h와 0.73 mm/h가 산출되었다.

Heavy rain에서 S-band 레이더가 관측한 최대 반사도 값은 51.2 dBZ, 최소 반사도 값은 15.4 dBZ이며, 평균 반사도 값은 36.5 dBZ이다. C-band 레이더가 관측한 최대 반사도 값은 38.4 dBZ, 최소 반사도 값은 11.0 dBZ, 평균 반사도 값은 26.6 dBZ이다. Heavy rain에서 가장 빈번히 관측된 S-band 레이더의 반사도 값은 36.8 dBZ이며, C-band 레이더의 반사도 값은 25.5 dBZ로 $z=200R^{1.6}$ 식을 이용하여 강우강도를 추정하면, 각각 7.28 mm/h와 1.43 mm/h가 산출되었다. 모든 강우강도에서 S-band가 C-band 레이더보다 높은 반사도 값을 관측하고 있다.

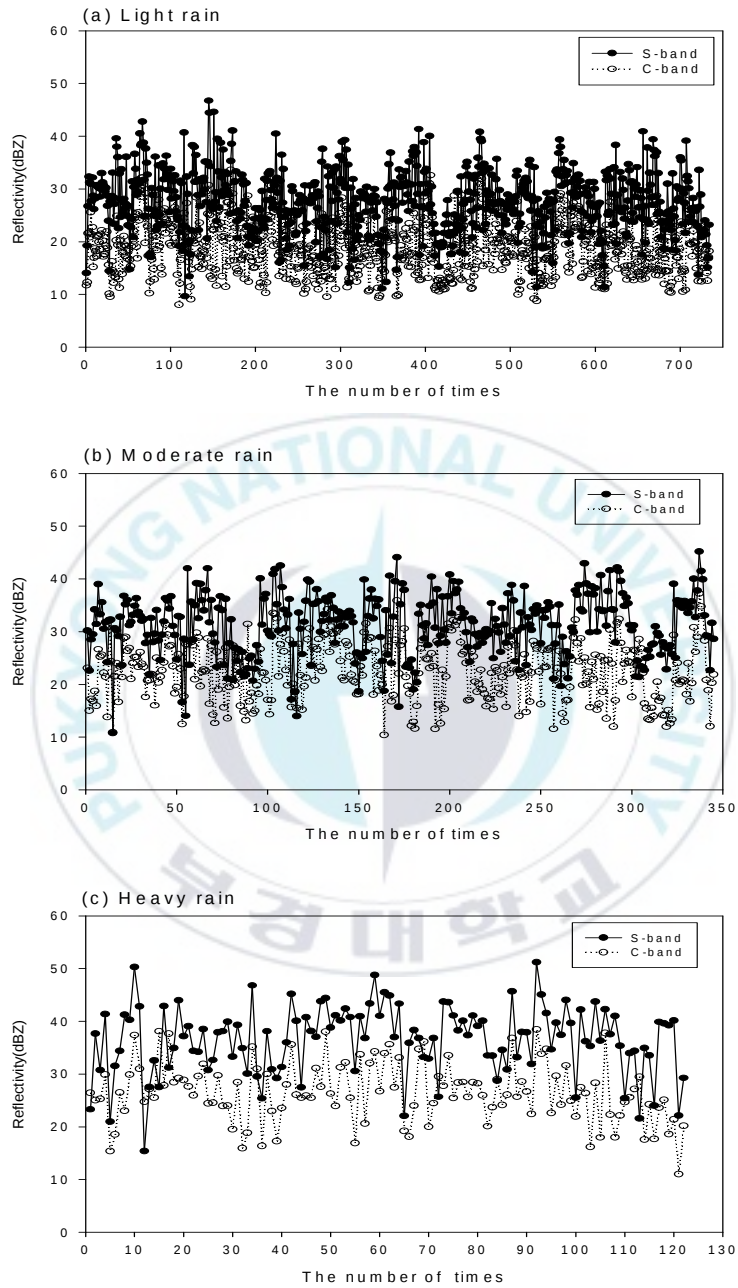


Fig. 10. The distribution of radar reflectivity between S-band radar and C-band radar at (a) light rain, (b) moderate rain and (c) heavy rain.

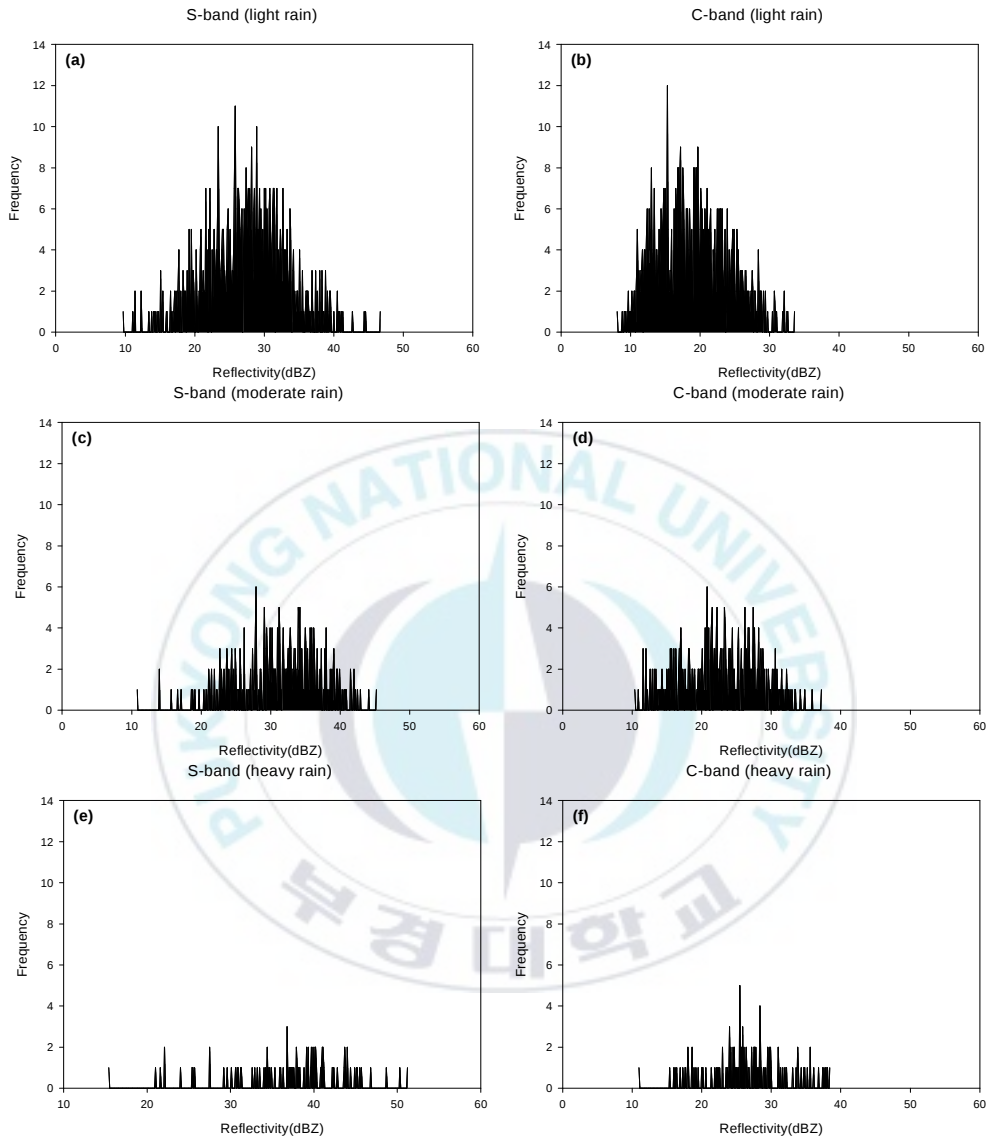


Fig. 11. The frequency distribution of radar reflectivity at (a) S-band in light rain, (b) C-band in light rain, (c) S-band in moderate rain, (d) C-band in moderate rain, (e) S-band in heavy rain and (f) C-band in heavy rain.

3.2 강수량 비교

S-band와 C-band 레이더로 관측된 반사도 값을 층상형 강수 시스템의 일반 관계식인 $z=200R^{1.6}$ 식을 사용하여 강수량을 추정하였다. Fig. 12는 레이더로 추정한 강수량과 AWS가 관측한 강수량의 산포도를 나타낸 것이다. 시간적인 오차의 안정성을 고려하여 레이더의 한 시간 평균 강우강도와 같은 시간의 AWS 한 시간 누적강수량을 비교해보면, S-band 레이더의 기울기는 0.59로 나타나고, C-band 레이더의 기울기는 0.10으로 나타났다.

실시간 변화를 고려하여 레이더의 강우강도와 같은 시간의 지상 AWS의 10분 누적 강수량을 한 시간 강우강도로 전환한 순간강우강도(R_{raw})를 비교해보면, S-band 레이더의 기울기는 0.38로 나타나고, C-band 레이더의 기울기는 0.08로 나타났다. S-band 레이더의 기울기가 C-band 레이더의 기울기보다 커서 S-band 레이더로 추정한 강우강도가 C-band 레이더로 추정한 강우강도보다 지상 우량계가 관측한 강우강도에 더 근접하게 나타났다.

또한, 한 시간 평균한 레이더의 강우강도와 지상 우량계의 강우강도의 상관계수는 S-band 레이더가 0.78, C-band 레이더가 0.63으로 나타났으며, 레이더의 강우강도와 순간강우강도의 상관계수는 S-band 레이더가 0.52, C-band 레이더가 0.49로 나타났다. 따라서 S-band 레이더의 강우강도가 C-band 레이더의 강우강도보다 우량계의 강우강도와 상관성이 크므로, S-band 레이더가 C-band 레이더보다 지상 우량계의 강우강도에 근접하게 추정하였다.

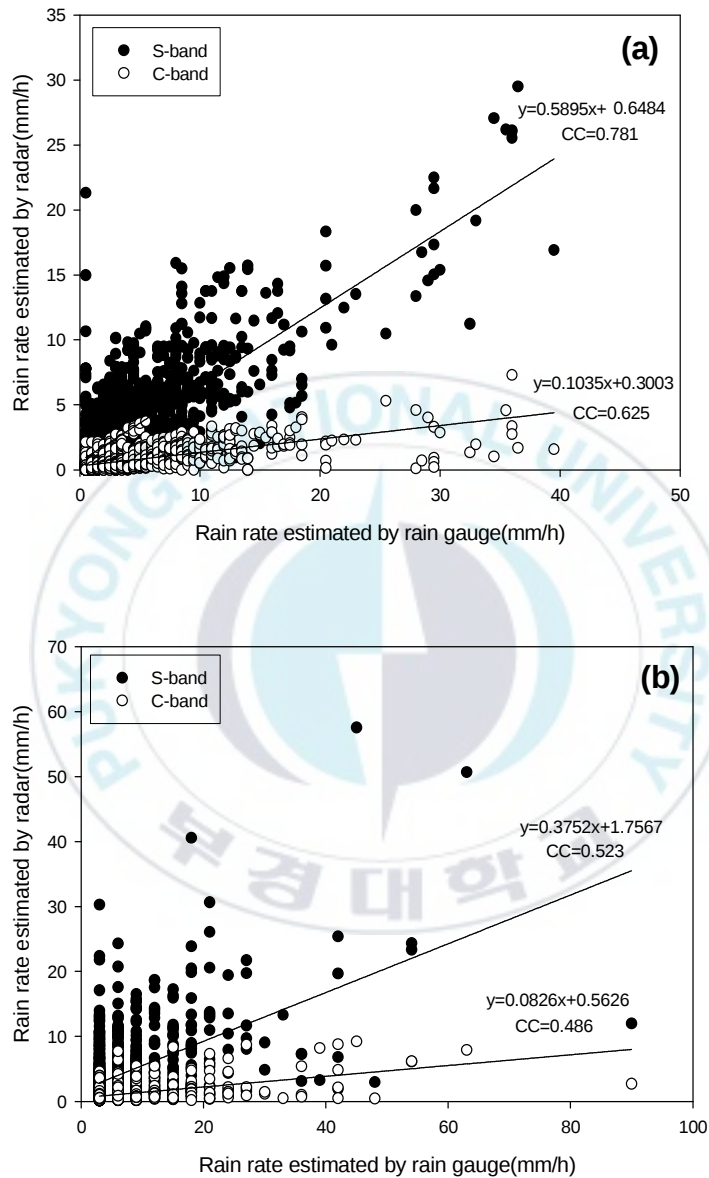


Fig. 12. Scatter distribution of (a) one hour accumulated rain of rain gauge vs one hour average rain rate and (b) ten min. accumulated rain vs ten min. rain rate.

3.2.1 평균 강우강도 비교

지상우량계가 관측한 강수량에 대한 레이더로 관측된 반사도 값을 $z=200R^{1.6}$ 식을 사용하여 추정한 강수량의 비율을 Table 5에 나타냈다. S-band 레이더는 C-band 레이더보다 많은 강수량을 추정하였다.

레이더가 추정한 강수량을 light rain, moderate rain, heavy rain으로 나누어서 비교하였다. S-band 레이더는 light rain에서 우량계의 강수량보다 많은 강수량을 추정하였으며, moderate rain과 heavy rain에서는 우량계의 강수량 보다 적은 강수량을 추정하였다. C-band 레이더는 모든 강우강도에서 우량계의 강수량 보다 강수량을 적게 추정하였다.

두 밴드 모두 강우강도가 클수록 우량계가 관측한 강수량에 대한 레이더가 추정한 강수량의 비율이 작아졌다.

Table 5. The percentage of estimated radar precipitation to one hour accumulated rain by rain gauge according to rain rate categories

Type of rain	Percentage(%)	
	S-band	C-band
Light rain	115.28	31.31
Moderate rain	75.82	20.13
Heavy rain	62.51	11.60
Total	80.61	20.38

Table 6은 S-band와 C-band 레이더로 관측된 반사도 값을 $z=200R^{1.6}$ 의 식을 통해 추정된 강수량의 RMSE 값이다. 모든 강우강도에 대한 S-band 레이더의 RMSE 값은 C-band 레이더의 값보다 작았다. 따라서 S-band 레이더가 C-band 레이더보다 강수량 추정에 대한 오차의 크기가 작아 실제 우량계가 관측한 강수량에 보다 근접하게 추정함을 보였다.

AWS의 한 시간 누적강수량을 light rain, moderate rain, heavy rain 으로 나누어서 S-band와 C-band 레이더로 추정된 강수량의 RMSE 값을 비교하였다.

Light rain의 경우 C-band 레이더의 RMSE 값은 S-band 레이더의 값보다 작게 나타났고, moderate rain과 heavy rain에서는 S-band의 RMSE 값이 C-band 레이더의 값보다 작게 나타났다. Light rain에서는 우량계의 강수량에 대한 레이더로 추정된 강수량의 오차가 C-band 레이더보다 S-band 레이더가 컸으며, moderate rain과 heavy rain에서는 우량계의 강수량에 대한 레이더로 추정된 강수량의 오차가 S-band 레이더보다 C-band 레이더가 컸다. 따라서 light rain에서는 S-band 레이더보다 C-band 레이더가 우량계와 보다 일치함을 보였고, moderate rain과 heavy rain에서는 C-band 레이더보다 S-band 레이더가 우량계와 보다 근접하였다.

두 밴드 모두 강우강도가 클수록 RMSE 값이 커졌다. 따라서 강우강도가 클수록 실제 관측된 강수량에 대한 레이더로 추정된 강수량의 오차가 커져, 레이더로 추정된 강수량과 실제 강수량의 차이가 커지게 된다.

Table 7은 light rain을 0.5 mm/h 간격으로 더 세분화하여 분석한 RMSE 값을 나타내었다. 1.0 mm/h 이하일 경우 C-band 레이더의 RMSE 값이 S-band 레이더의 값보다 작게 나타났으며, 1.0 mm/h를 초과

할 경우 S-band 레이더의 RMSE 값이 C-band 레이더의 값보다 작게 나타났다. 따라서 1.0 mm/h 이하의 강수에서는 지상 우량계의 강수량에 대하여 C-band 레이더의 강수량이 S-band 레이더의 강수량보다 오차 크기가 작아 실제 우량계가 관측한 강수량에 보다 근접하게 추정하였다.

Fig. 13은 light rain ($R < 2.5$ mm/h)을 0.5 mm/h 간격으로 분류하여, 빈도분포를 나타낸 것이다. Light rain에서는 강우강도 0.5 mm/h가 43.3%, 1.0 mm/h가 23.3%로 나타났고, 1.0 mm/h 이하의 강우강도가 66.6%를 차지하였다. 따라서 light rain에서 C-band 레이더의 RMSE 값이 S-band 레이더의 값보다 작게 나타났으나, 0.5 mm/h 간격으로 세분화하면, 강우강도가 1 mm/h 이하인 강우강도에서, C-band 레이더가 S-band 레이더보다 RMSE 값이 작게 나타나, 실제 지상 우량계에 대한 오차가 작게 나타났다.

Table 6. RMSE (Root Mean Square Error) of rain rate categories

Type of rain	RMSE	
	S-band	C-band
Light rain	1.12	0.88
Moderate rain	2.61	4.01
Heavy rain	7.91	16.30
Total	2.26	4.40

Table 7. RMSE (Root Mean Square Error) by each rain rate in light rain

Rain rate (mm/h)	RMSE	
	S-band	C-band
R=0.5	1.41	0.41
R=1.0	0.91	0.74
R=1.5	1.04	1.10
R=2.0	1.18	1.53

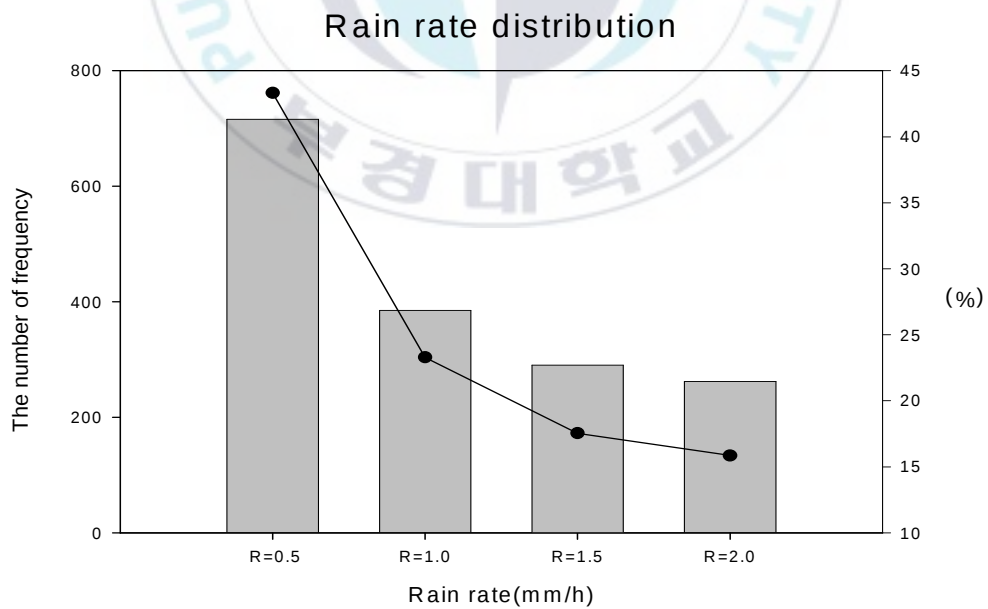


Fig. 13. The number of frequency and percentage according to each rain rate in light rain

3.2.2 순간 강우강도 비교

레이더와 우량계가 동시에 강수를 감지했을 때, 10분마다 제공되는 레이더 반사도로 추정된 강우강도에 대한 실제 지상강우강도의 비(오차)를 통해 오차의 분포도, bias, scatter를 알아보았다. Fig. 14에서 17은 S-band와 C-band의 오차분포도를 나타낸 것이다. Fig. 14는 전체 강우강도에 따른 오차분포도를 나타낸 것이며, Fig. 15에서 17은 light rain ($R_{\text{raw}} = 3 \text{ mm/h}$), moderate rain ($R_{\text{raw}} = 6-9 \text{ mm/h}$), heavy rain ($R_{\text{raw}} \geq 12 \text{ mm/h}$)으로 나누어서 S-band와 C-band의 오차분포도를 나타낸 것이다. Table 8은 모든 강우강도와 light rain, moderate rain, heavy rain의 bias(dB)와 scatter(dB)를 나타내었다.

오차분포도에서 횡(x)축은 우량계가 관측한 강수량에 대한 레이더가 추정한 강수량의 비(오차)를 dB로 나타낸 것으로 음의 값은 과소평가를 의미하며, 양의 값은 과대평가를 의미한다. 종(y)축은 우량계에 대한 레이더의 비인 오차의 누적기여도를 나타내며, 1은 100%를 의미한다. S자 모양의 굵은 실선이 종(y)축의 0에서 1로, 즉 붉은 실선으로 이동하면, 레이더로 추정한 강우강도와 지상 우량계가 관측한 강우강도가 완벽하게 일치함을 나타낸다. 오차 분포도에서 푸른 면적은 레이더의 추정 강수량과 우량계의 관측 강수량이 일치할 때의 편차를 의미하고, 화살표는 16%와 84% 사이의 값으로 이 값의 반은 scatter를 의미한다(Galli et al., 2006).

Fig. 14의 오차분포도를 보면 S-band 레이더가 우량계보다 과소평가하는 횡수의 비율이 75.06%이며, 과대평가하는 횡수의 비율이 24.94%로 나타났다. C-band 레이더는 우량계보다 과소평가하는 횡수의 비율이 98.90%이며, 과대평가하는 횡수의 비율이 1.10%로 나타났다. S-band 레이더는 약 3:1의 비율로 과소평가와 과대평가를 하지만, C-band 레이더는

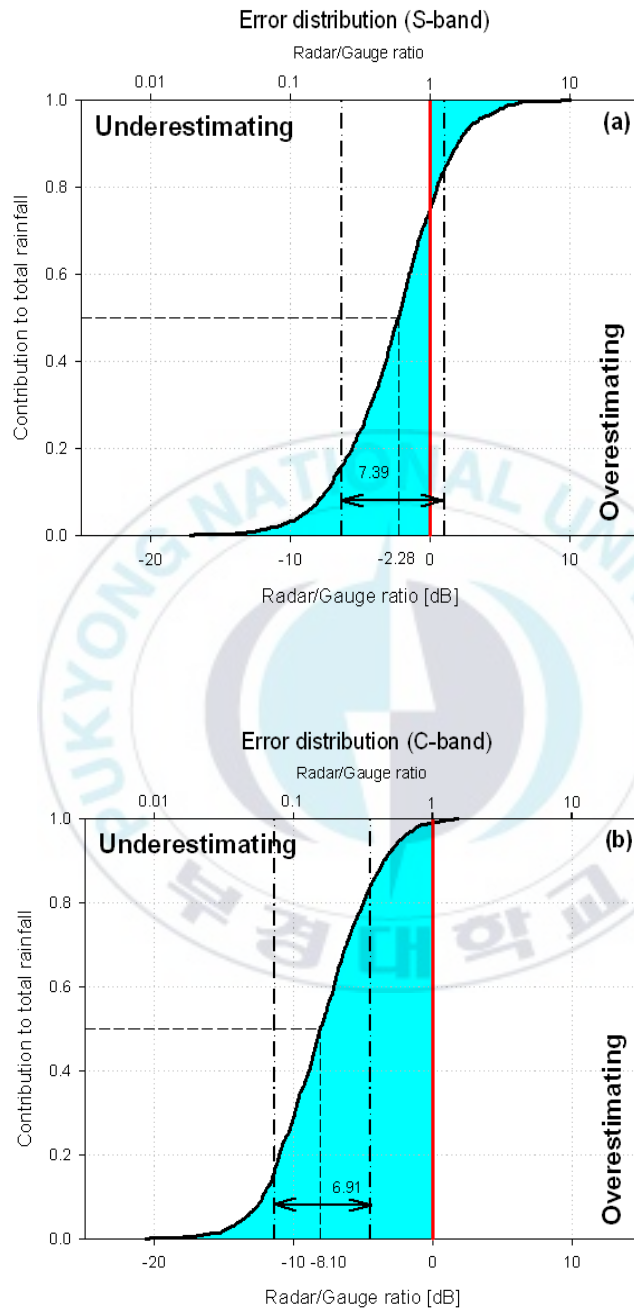


Fig. 14. Error distribution of (a) S-band and (b) C-band

Table 8. Bias and scatter of rain rate categories

Type of rain	Bias(dB)		Scatter(dB)	
	S-band	C-band	S-band	C-band
Light rain	-0.45	-6.12	3.54	3.45
Moderate rain	-1.85	-7.32	3.65	3.66
Heavy rain	-3.09	-9.50	3.78	3.76
Total	-1.72	-7.50	3.70	3.46

거의 과소평가를 하였다.

지상 우량계가 관측한 강우강도에 대한 레이더로 추정된 강우강도의 비인 오차의 분포를 알아보았다. S-band 레이더는 -17.19 dB에서 10.04 dB로 분포하였으며, C-band 레이더는 -20.62 dB에서 1.84 dB로 분포하였다. 오차분포도에서 50%의 비 값인 지상 우량계가 관측한 강우강도에 대한 레이더로 추정된 강우강도의 평균오차는 S-band 레이더가 -2.28 dB, C-band 레이더가 -8.10 dB이다. 두 밴드 모두 음의 값을 가져, 레이더가 추정된 강수량은 과소평가함을 알 수 있고, C-band 레이더는 S-band 레이더보다 평균오차의 절대 값이 커서, 보다 과소평가함을 보였다.

S-band 레이더의 scatter는 C-band 레이더의 scatter보다 커서 우량계가 관측한 강우강도에 대한 레이더가 추정된 강우강도의 비 값이 S-band 레이더가 C-band 레이더보다 중심 (레이더로 추정된 강수량과 지상 우량계로 관측한 강수량이 완전 일치)에서 떨어져 분포하였지만, S-band 레이더가 C-band 레이더보다 bias의 절대 값이 더 작아, S-band 레이더의 강수량이 C-band 레이더의 강수량보다 우량계의 강수량에 더 근접하였다.

Fig. 15는 light rain의 오차분포도이다. Light rain에서 S-band 레이더가 우량계보다 과소평가하는 횟수의 비율은 70.22%로 나타났으며, 과대평가하는 횟수의 비율은 29.78%로 나타났다. C-band 레이더가 우량계보다 과소평가하는 횟수의 비율은 98.47%로 나타났으며, 과대평가하는 횟수의 비율은 1.53%로 나타났다.

지상 우량계가 관측한 강우강도에 대한 레이더로 추정된 강우강도의 비인 오차의 분포를 알아보았다. S-band 레이더는 -13.12 dB에서 10.04 dB로 분포하였으며, C-band 레이더는 -14.11 dB에서 1.84 dB로 분포하였다. 오차분포도에서 50%의 비 값인 지상 우량계가 관측한 강우강도에 대한 레이더로 추정된 강우강도의 평균 오차는 S-band 레이더가 -1.85 dB, C-band 레이더가 -7.51 dB이다. 두 밴드 모두 음의 값을 가져, 레이더가 추정된 강수량이 과소평가함을 나타내며, C-band 레이더는 S-band 레이더보다 평균오차의 절대 값이 커서 보다 과소평가함을 보였다.

Light rain에서 S-band 레이더의 scatter는 C-band 레이더보다 커서 S-band의 오차가 C-band의 오차보다 중심 (레이더로 추정된 강수량과 지상 우량계로 관측한 강수량이 완전 일치)에서 많이 떨어져 분포하지만, S-band 레이더가 C-band 레이더보다 bias의 절대 값이 작아, 우량계의 총강수량에 대하여 보다 근접하게 추정하였다.

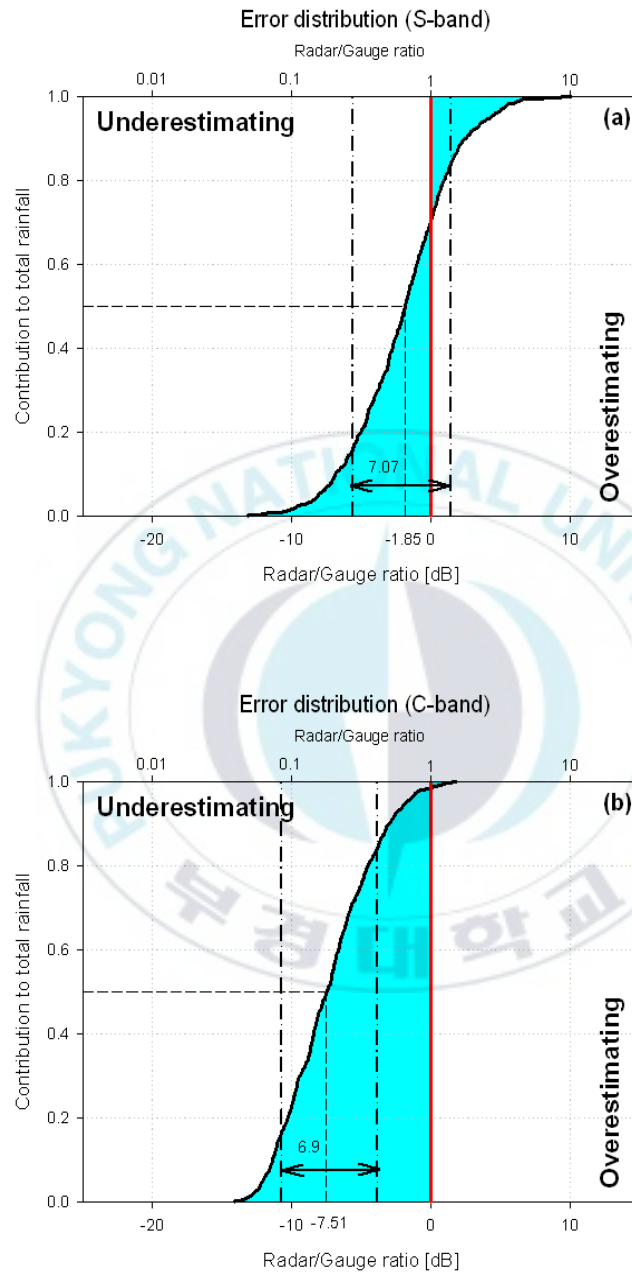


Fig. 15. Error distribution of (a) S-band and (b) C-band in light rain

Fig. 16은 moderate rain의 오차분포도이다. Moderate rain에서 S-band 레이더가 우량계보다 과소평가하는 횟수의 비율은 81.48%, 과대평가하는 횟수의 비율은 18.52%로 나타났다. C-band 레이더가 우량계보다 과소평가하는 횟수의 비율은 99.66%, 과대평가하는 횟수의 비율은 0.34%로 나타났다.

지상 우량계가 관측한 강우강도에 대한 레이더로 추정된 강우강도의 비인 오차의 분포를 알아보았다. S-band 레이더는 -17.19 dB에서 6.07 dB로 분포하며, C-band 레이더는 -17.41 dB에서 1.09 dB로 분포한다. 오차분포도에서 50%의 비 값, 즉 지상 우량계가 관측한 강우강도에 대한 레이더로 추정된 강우강도의 평균 오차는 S-band 레이더가 -2.73 dB, C-band 레이더가 -8.34 dB이다. 두 밴드 모두 음의 값을 가져, 레이더가 추정된 강수량이 과소평가함을 알 수 있고, C-band 레이더는 S-band 레이더보다 평균오차의 절대 값이 커서 보다 과소평가함을 보였다.

Moderate rain의 경우, S-band 레이더가 C-band 레이더보다 scatter와 bias의 절대 값이 모두 작아, S-band 레이더는 C-band 레이더보다 지상 우량계의 강수량에 대한 레이더가 추정된 강수량의 비가 덜 분산되어 분포하고 있고, 우량계가 관측한 총강수량에 대하여 보다 근접하게 추정하였다.

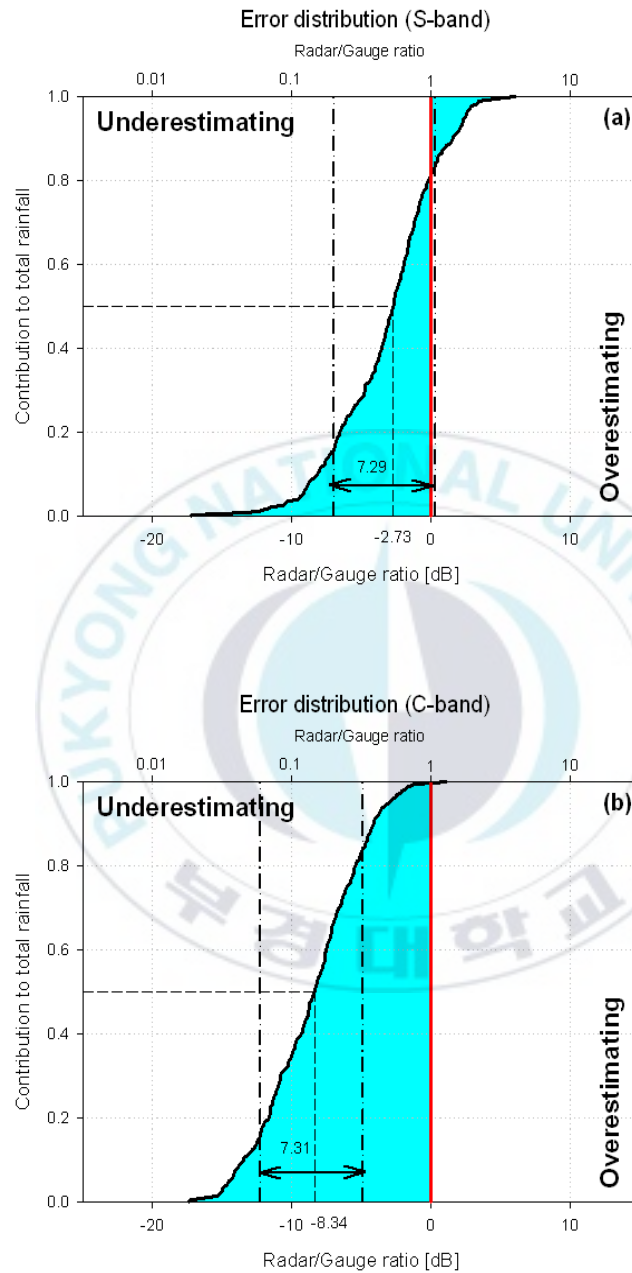


Fig. 16. The same as Fig. 15 but for moderate rain

Fig. 17은 heavy rain의 오차분포도이다. S-band 레이더가 우량계보다 과소평가하는 횟수의 비율은 86.27%로 나타났고, 과대평가하는 횟수의 비율은 13.73%로 나타났다. C-band 레이더는 모두 우량계보다 과소평가하였다.

지상 우량계의 강우강도에 대한 레이더로 추정된 강우강도의 비인 오차의 분포를 알아보았다. S-band 레이더는 -16.51 dB에서 3.53 dB로 분포하며, C-band 레이더는 -20.62 dB에서 -2.55 dB로 분포한다. 오차분포도에서 50%의 비 값인 지상 우량계가 관측한 강우강도에 대한 레이더로 추정된 강우강도의 평균오차 값은 S-band가 -3.62 dB, C-band가 -9.95 dB이다. 두 밴드 모두 음의 값을 가져, 레이더가 추정된 강수량이 과소평가하여 나타났고, C-band 레이더는 S-band 레이더보다 평균오차의 절대값이 커서 보다 과소평가하였다.

Heavy rain의 경우, S-band 레이더의 scatter는 C-band 레이더보다 커서 S-band 레이더의 오차가 C-band 레이더의 오차보다 중심 (레이더로 추정된 강수량과 지상 우량계로 관측한 강수량이 완전 일치)에서 떨어져 분포하지만, S-band 레이더가 C-band 레이더보다 bias의 절대값이 작아, 우량계가 관측한 총강수량에 대하여 더 근접하게 추정하였다.

강우강도에 따른 오차 분포도를 보면, 두 밴드 모두 강우강도가 클수록 과소평가하는 횟수의 비율은 커지고, 과대평가하는 횟수의 비율은 작아지는 경향을 보였으며, C-band 레이더는 heavy rain에서 모두 과소평가함을 보였다.

두 밴드 모두 강우강도가 커질수록 bias와 scatter가 커져, 레이더 반사도로 추정된 강수량과 지상 우량계가 관측한 강수량과의 불일치가 커지는 경향이 있다.

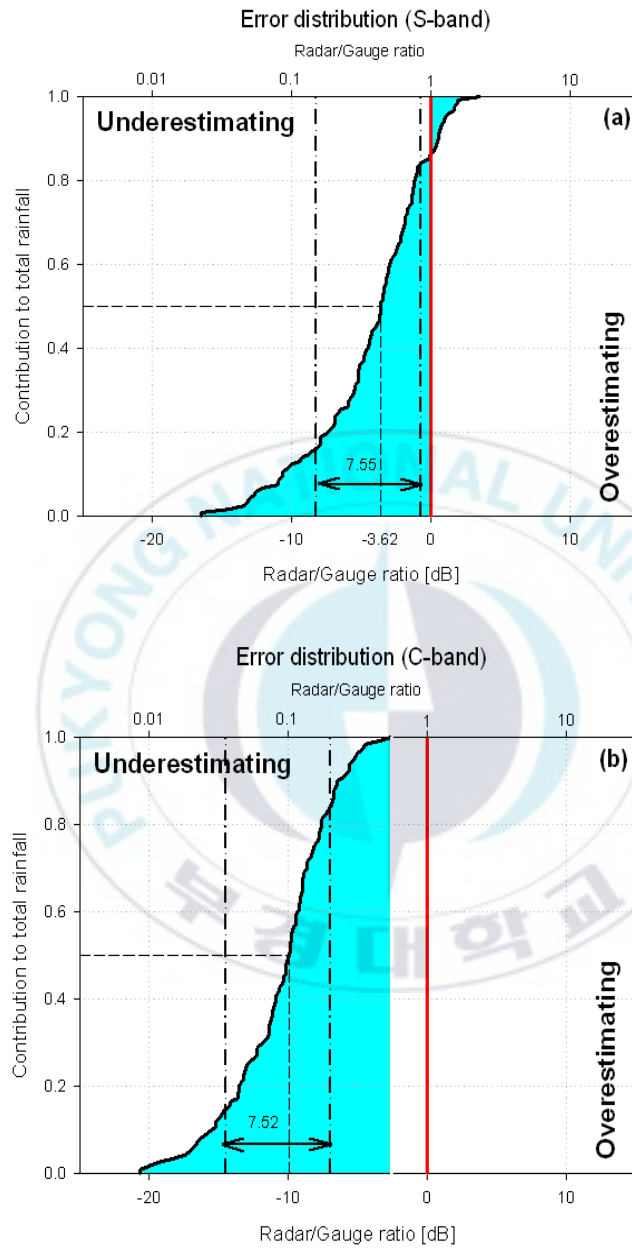


Fig. 17. The same as Fig. 15 but for heavy rain

S-band와 C-band의 레이더로 추정된 강수량을 이미지로 나타내서 비교하였다. Fig. 18에서 Fig. 21은 2005년 6월 1일 16시 20분에서 50분까지 같은 시간에 진도레이더와 군산레이더가 관측한 CAPPI 화상과, 레이더 반사도 값을 가지고 $z=200R^{1.6}$ 식을 사용하여 추정된 강우강도의 화상이다. 화상을 통해, S-band인 진도레이더가 C-band인 군산레이더보다 큰 반사도 값으로 표출되고 있어, S-band로 추정된 강우강도가 C-band로 추정된 강우강도보다 큰 강우강도를 나타냄을 알 수 있다.



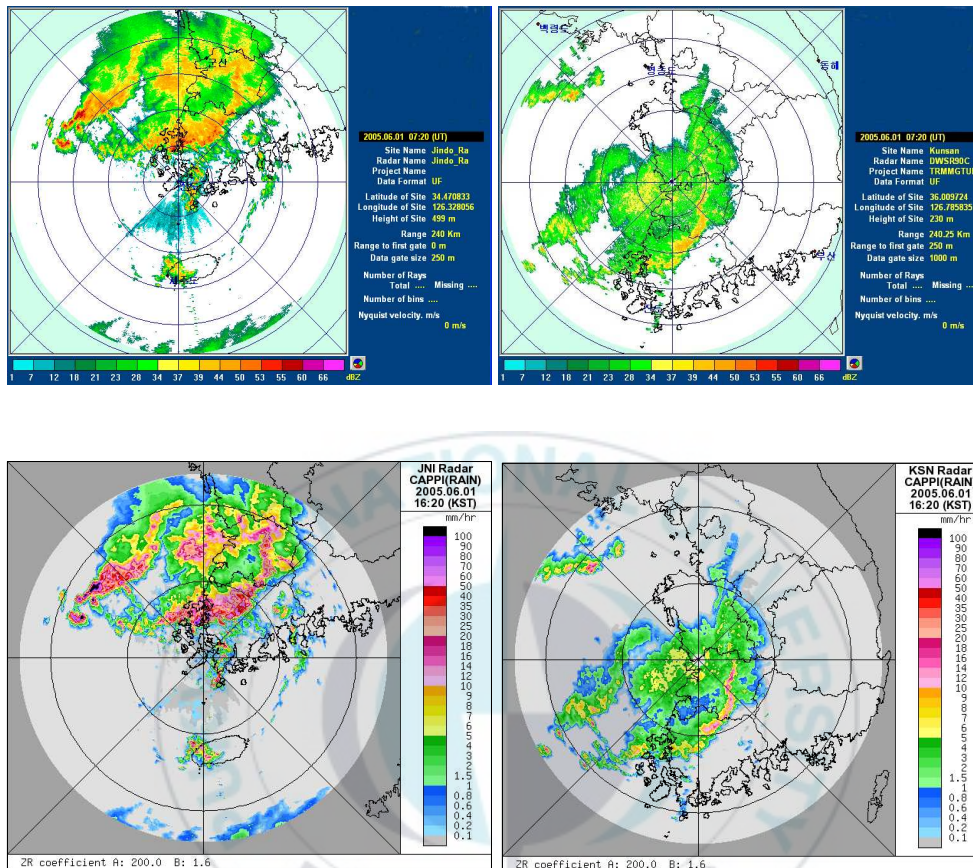


Fig. 18. The CAPPI (1.5 km) images of reflectivity and estimated rain rate by JinDo and KunSan radar at 1620 LST 1 Jun. 2005

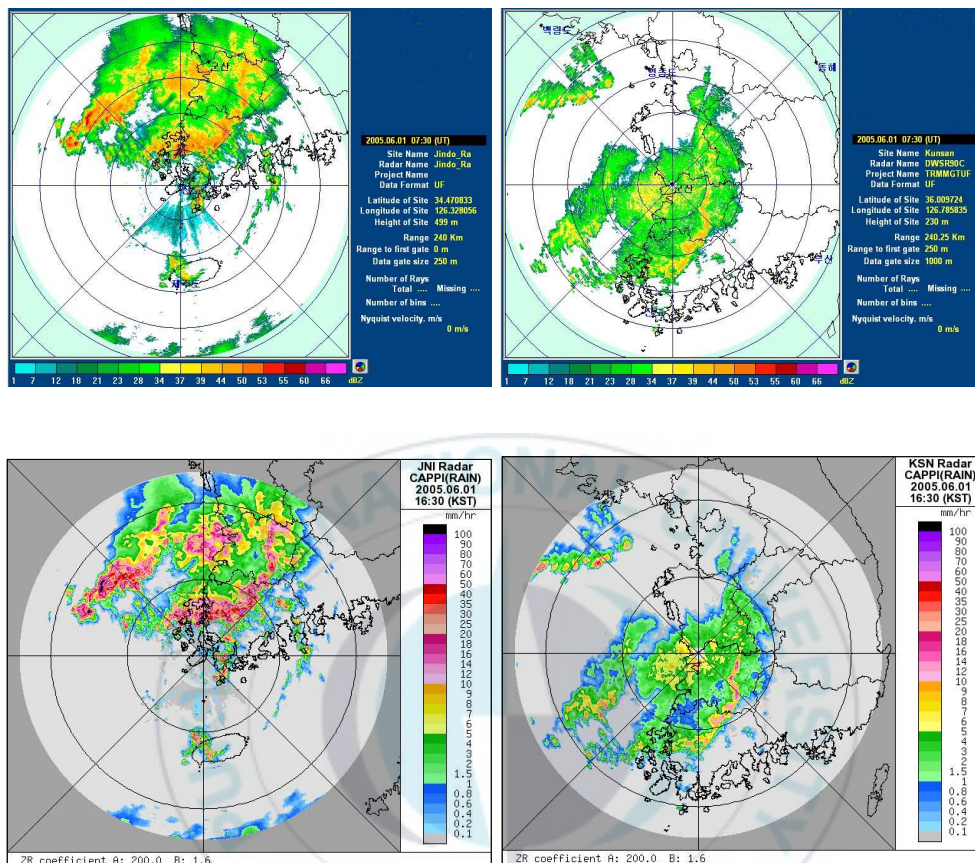


Fig. 19. The same as Fig. 18 but for at 1630 LST 1 Jun. 2005

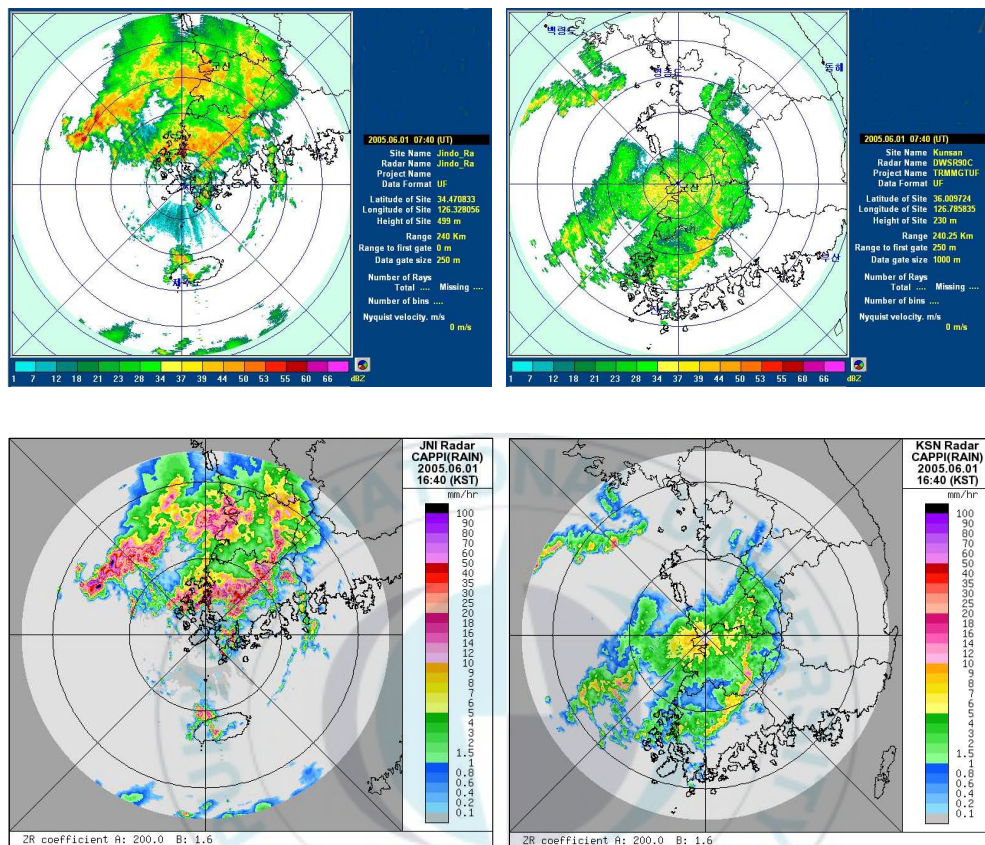


Fig. 20. The same as Fig. 18 but for at 1640 LST 1 Jun. 2005

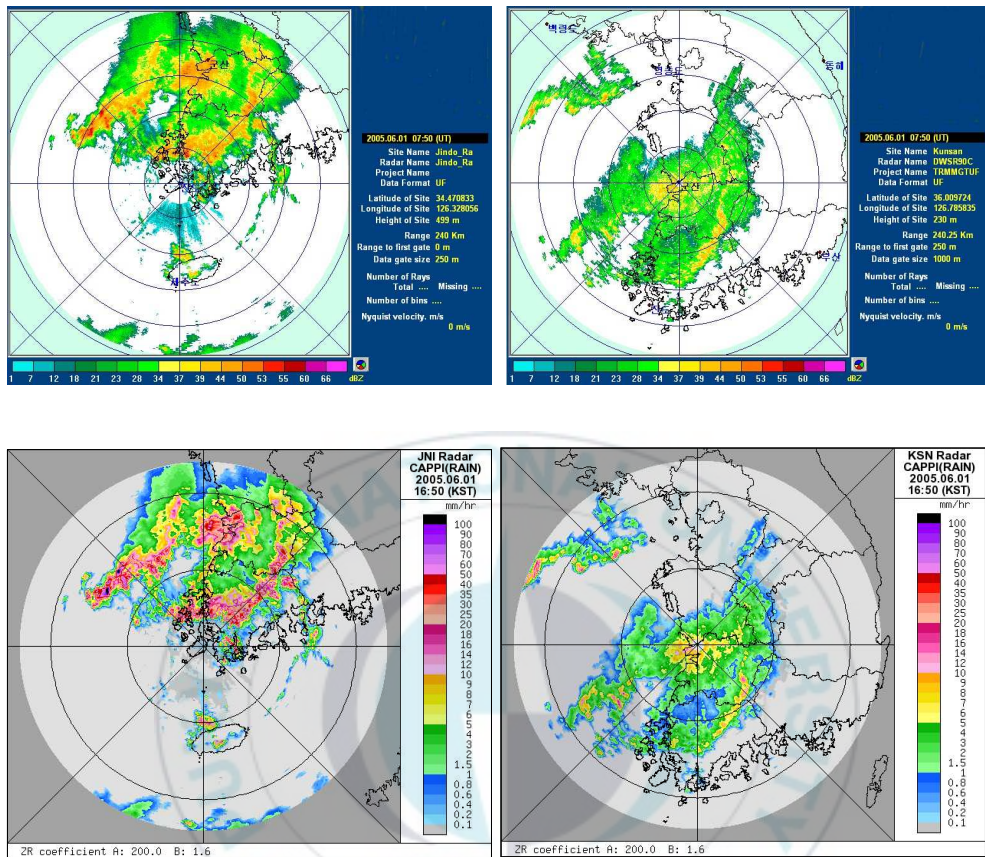


Fig. 21. The same as Fig. 18 but for at 1650 LST 1 Jun. 2005

4. 결 론

2005년 전라남도 하남공, 영광, 무등봉 AWS 지점의 강우강도 자료를 이용하여 강우강도에 따른 진도 S-band 레이더와 군산 C-band 레이더의 강수량 추정 정도를 비교하였다. 레이더로 관측한 반사도 값을 현업용 z - R 관계식인 $z=200R^{1.6}$ 식을 이용하여 강우강도를 추정하였고, 추정된 강우강도를 한 시간 평균한 강우강도와 AWS의 한 시간 누적 강수량을 비교하였다. 또한 레이더 강우강도와 AWS의 10분 누적강수량을 한 시간 강우강도로 전환한 순간강우강도(R_{raw})를 비교하였다.

레이더 반사도 값은 S-band 레이더가 C-band 레이더보다 높게 나타났으며, 지상 우량계 강수량과 레이더로 추정한 강수량의 상관계수는 S-band 레이더가 C-band 레이더보다 커서 S-band 레이더로 추정한 강수량이 C-band 레이더보다 우량계로 관측한 강수량에 더 근접하였다.

AWS의 한 시간 누적 강수량을 light rain ($R < 2.5$ mm/h), moderate rain ($R = 2.5-10$ mm/h), heavy rain ($R > 10$ mm/h)으로 나누어서 S-band와 C-band 레이더로 추정한 강수량의 RMSE 값을 비교하였다. RMSE 값은 light rain에서는 C-band 레이더가 S-band 레이더보다 작았으며, moderate rain과 heavy rain에서는 S-band 레이더가 C-band 레이더보다 작았다. 따라서 light rain에서는 C-band 레이더로 추정한 강수량이 S-band 레이더보다 우량계의 강수량과 더 일치하였으며, moderate rain과 heavy rain에서는 S-band 레이더로 추정한 강수량이 C-band 레이더보다 우량계의 강수량과 보다 일치함을 보였다. 그러나 light rain을 0.5 mm/h 간격으로 세분화해서 비교하면, 강우강도가 1 mm/h 이하일 때, C-band 레이더가 S-band 레이더 보다 RMSE 값이 작아, C-band 레이더로 추정한 강수량이 S-band 레이더 보다 지상 우량계의 강수량에 대

한 오차가 작았다.

실시간 변화와 레이더와 우량계가 모두 강수를 감지했을 때, 두 밴드의 강수량 추정을 비교하기 위하여 순간강우강도(R_{raw})를 light rain ($R_{raw}=3\text{mm/h}$), moderate rain ($R_{raw}=6-9\text{mm/h}$), heavy rain ($R_{raw}\geq 12\text{mm/h}$)으로 나누어 bias, scatter, 오차분포도를 알아보았다.

오차 분포도를 보면, S-band 레이더는 약 3:1의 비율로 과소평가와 과대평가를 하였지만, C-band 레이더는 대부분 과소평가(98.77%)를 하였다. 두 밴드 모두 강우강도가 커질수록 과소평가하는 횟수의 비율이 커지고 과대평가하는 횟수의 비율이 작아지는 경향을 보였으며, C-band 레이더는 heavy rain에서 모두 과소평가를 하였다.

Scatter는 moderate rain에서 C-band 레이더가 S-band 레이더보다 크고, light rain과 heavy rain에서 S-band 레이더가 C-band 레이더보다 크게 나타났다. 따라서 moderate rain일 때는 우량계의 강우강도에 대한 레이더의 강우강도의 비 값인 오차가 C-band 레이더가 S-band 레이더보다 더 분산되어 분포하고, light rain과 heavy rain에서는 S-band 레이더가 C-band 레이더보다 더 분산되어 분포하였다. 그러나 bias는 모든 강우강도에서 C-band 레이더보다 S-band 레이더가 0에 근접하여, S-band 레이더로 추정된 총강수량이 C-band 레이더보다 지상 우량계로 관측한 총강수량에 근접하였다.

두 밴드 모두 강우강도가 커질수록 scatter와 bias의 값이 모두 커져서, 레이더로 추정된 강수량과 지상 우량계가 관측한 강수량과의 불일치가 커지는 경향을 보였다.

이상으로 진도 S-band 레이더와 균산 C-band 레이더를 이용하여 강우강도에 다른 밴드별 강수량 추정을 비교하였다. 본 연구의 강우강도에 따른 S-band 레이더와 C-band 레이더의 강수량 추정비교 분석은 강수에

국한되어 수행되었지만, 앞으로 우리나라 강수 발생 시 레이더 밴드별 강수량 산정에 대한 특징을 규명하는 기초 자료로 될 수 있을 것이다.



참고문헌

- Atlas, D., D. Rosnefeld and D. B. Wolff, 1993: C-Band Attenuation by Tropical Rainfall in Darwin, Australia, Using Climatologically Tuned Z_e -R Relations. *J. Applied Meteorology*, **32**, 426-430
- Austin, P. M., 1987: Relation between Measured Radar Reflectivity and Surface Rainfall. *Mon. Wea. Rev.*, **115**, 1053-1070
- Aydin, K. and V. Giridhar, 1992: C-Band dual-polarization radar observables in rain. *J. Atmos. Oceanic Techol.*, **9**, 383-390
- Battan. L. J., 1973: *Radar Observation of the Atmospherics*. University of Chicago Press, 323pp.
- Borga, M., E. N. Anagnostou and E. Frank, 2000: On the use of real-time radar rainfall estimates for flood prediction in mountainous basins. *J. Geophys. Res.*, **105** (D2), 2269-2280.
- Capsoni, C. M. D'amico and T. Tarsi, 2001: Statistical Characterization of Path Attenuation of Radar Signals at C Band. *J. Atmos. Oceanic Techol.*, **18**, 609-615
- Ciach, G. J., W. F. Krajewski, E. N. Anagnostou, M. L. Baecj, J. A. Smith, J. R. McCollum and A. Kruger, 1997: Radar rainfall estimation for ground validation studies of the Tropical Rainfall Measuring Mission. *J. Apppl. Meteor.*, **36**, 735-747
- Creutin, J. D., H. Andrieu and D. Faure, 1997: Use of weather radar for the hydrology of mountainous area. Part II: Radar measurement validation. *J. Hydrol.*, **193**, 26-44

- Doviak, R. J. and D. S. Zirmic, 1992: *Doppler radar and weather observation*. Academic press, INC., 562pp.
- , 1983: A survey of radar rain measurement techniques. *J. Climate Appl. Meteor.*, **22**, 832–849.
- Galli, G., M. Boscacci and M. Bolliger, 2006: Radar precipitation measurement in a mountainous region. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* **132**, 1669–1692.
- Gunn, K. L. S. and T. W. R. East, 1954: The Microwave Properties of Precipitation Particles. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* **80**, 522–545
- Hitschfeld, W. and J. Bordan, 1954: Errors inherent in the radar measurement of rainfall at attenuation wavelengths. *J. Meteor.*, **11**, 58–67
- Holt, A. R., 1984: Some factors affecting the remote sensing of rain by polarization diversity radar in the 3- to 35-GHz frequency range. *Radio Sci.*, **19**, 1399–1412
- Kessler, E. and K. E. Wilk, 1968: *Radar Measurements of Precipitation for Hydrological Purposes*, Rep. No. 5 on WMO/IHD Projects, WMO, Geneva, 46pp.
- Klazura, G. E., 1981: Differences between Some Radar-Rainfall Estimation Procedures in a High Rain Rate Gradient Storm. *J. Applied Meteorology*, **20**, 1376–1380
- Krajewski, W. F., V. Lakshmi, K. P. Georgakakos and S. C. Jain, 1991: A Monte-Carlo study of rainfall sampling effect on a distributed catchment model. *Water Resour. Res.*, **27**, 119–128

- Marshall, J. S. and W. M. K. Palmer, 1948: The distribution of raindrops with size. *J. Meteorol.*, **5**, 165–166.
- McCormick, G. C., 1970: Reflectivity and attenuation observations of hail and radar bright band. Preprints, *14th Radar Meteor. Conf., Amer. Meteor. Soc.*, Boston, 19–24
- Rinehart, R. E., 1997: *Radar for meteorologists*. Rinehart publishing, 428pp.
- Ryzhkov, A. and D. S. Zrnich, 1995: Precipitation and Attenuation Measurements at a 10cm Wavelength. *J. Applied Meteorology*, **34**, 2121–2134
- Sauvageot, H., 1992: *Radar Meteorology*. ARTECH HOUSE, INC., 366pp.
- Varma A. K. and G. Liu, 2006: Small-Scale Horizontal Rain-Rate Variability Observed by Satellite, *Mon. Wea. Rev.*, **134**, 2722–2733
- Wexler, R. and D. Atlas, 1963: Radar Reflectivity and Attenuation of Rain. *J. Applied Meteorology*, **2**, 276–280.
- Wilson, J. W. and E. A. Brandes, 1979: Radar measurement of rainfall. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* **60**, 1048–1058.

감사의 글

무슨 말로 어떻게 시작해야 할지 한참을 모니터만 쳐다보고 있었습니다. 학부를 졸업하고 기상청에 입사하여 동기들보다 1년 늦게 시작한 대학원 생활도 어느덧 막바지를 향해 달려가고 있습니다. 일과 공부란 두 마리 토끼를 잡기 위해 동동거렸던 지난 2년간의 시간들이 파노라마처럼 스쳐지나갑니다. 부족한 논문이지만 많은 사람들의 도움이 있었기 마무리를 할 수 있었습니다. 그분들께 이 지면을 빌어 감사의 마음을 전하려 합니다.

먼저 부족한 저를 환경 대기확산 및 탐측실험실(GEAR)의 일원으로 받아주시고, 끊임없는 가르침과 많은 조언을 해주신 이동인 교수님께 감사의 말씀을 드립니다. 교수님의 가르침 덕분에 지금의 제가 있을 수 있었습니다. 아직은 많이 부족하고 모자라지만, 앞으로 더 열심히 노력해서 교수님의 부끄럽지 않는 제자가 되도록 노력하겠습니다.

또한 이 논문이 완성되기까지 언제나 관심어린 눈으로 지켜봐주시고 많은 조언을 해주신 변희룡 교수님과 권병혁 교수님께도 감사의 말씀을 드립니다. 그리고 언제나 저희에게 많은 가르침을 주시고, 늘 환경대기과학과의 발전을 위해 애쓰시는 한영호 교수님, 정형빈 교수님, 옥곤 교수님, 오재호 교수님, 김재진 교수님의 노고에 깊은 감사의 마음을 전합니다. 감사드립니다.

제게 또 다른 가족인 우리 GEAR 선후배님들의 따뜻한 배려와 관심이 있었기에 제가 논문을 마무리 할 수 있었습니다. 진심으로 감사드립니다. 논문을 쓰면서 제게 많은 도움을 준 정희 언니에게 감사드립니다. 언니

논문 쓰기에도 바쁘셨을 텐데, 하나하나 챙겨주시고 가르쳐 주셔서 정말 고맙습니다. 언니와 함께 생활을 하면서 많은 것을 배웠습니다. 그리고 이제는 남이 아닌 친오빠 같은 민이 선배에게 진심으로 감사의 마음을 전합니다. 힘들 때마다 칭얼거리는 저를 후배의 응석으로 받아주시고 위로해주셔서 정말 감사합니다. 선배의 따뜻한 마음과 든든한 울타리가 있어 참 많은 힘이 되었습니다. 지치고 힘든 기색이 보일 때마다 방명록에 위로의 글을 적어주시는 센스 만점의 길종 선배, 지금은 일본에 있지만 항상 웃는 얼굴로 많은 조언을 해주신 동순 언니, 힘들 때 가장 많이 위로해주고 말벗이 되어준 상민 선배, 유일한 남자 후배라 힘든 일을 도맡아 해준 현기, 굳은 일도 마다하지 않는 우리 감쪽이 근육이 그리고 한결같이 똘똘 열심히 하는 너무 예쁜 민경이와 에너지 넘치는 막둥이 유라에게도 고마움을 전합니다. 또한 바쁘신 와중에도 싫은 내색 없이 자료를 제공해주신 철환 선배, 멀리서나마 많이 응원해 주시는 부경 선배, 늘 열심히 하는 모습으로 후배들에게 귀감이 되시는 효경 언니, 미국에서 열심히 학문을 닦으시는 동철 선배, 늘 따뜻하게 챙겨주시는 미영이 언니, 논문 잘 쓰고 있는지 관심 가져주시고 응원해주시는 경옥이 언니와 지영이 언니, 유일한 실험실 동기 하나, 그리고 지금은 사회에 나가 있지만 함께 실험실 생활을 했던 수정이 언니, 시원이 언니, 윤정이, 미혜, 민지, 성화에게도 감사의 마음을 전합니다. 또, 각자의 자리에서 최선을 다해 자신의 몫을 하고 있는 그 외의 우리 GEAR 가족들에게도 감사의 마음을 전합니다. 논문을 쓰기까지 제게는 조금 힘든 시간들이었지만, 실험실 선후배님들이 있어 참 많은 힘이 되었습니다. 정말 감사합니다. 우리 GEAR 가족들의 앞날에 무궁한 영광이 가득하길 간절히 소망합니다.

그리고 4호관 3층의 선후배님들께도 감사드립니다. 논문을 쓰기까지

많은 도움을 주신 영철선배, 상은선배, 인혁선배, 민호선배, 한세선배, 경민선배, 도우선배께도 감사를 드립니다. 언제나 따뜻하고, 다정하게 대해 주시는 철수선배, 종민선배, 봉길선배, 석형선배, 성민선배에게도 감사드리며, 행정적인 절차를 꼼꼼히 챙겨준 지경언니와 유경언니에게도 감사드립니다. 대학 입학했을 때 배웠던 ‘동기사랑 나라사랑’을 몸소 실천해준 고마운 환경대기과학과 00학번 동기들(영임, 성욱, 진영, 은주, 다연, 수민, 동현, 웅기, 무길, 근희, 준상, 재원, 노진...)에게도 정말 감사합니다. 함께 논문을 쓰면서 정말 많은 힘이 되어준 커피메이트 태희언니와 갑영이에게도 고마운 마음을 전합니다. 또한 이 지면을 빌어 물신양면으로 저를 도와주고, 응원해주신 대기과학과 선·후배님들께 감사의 마음을 전합니다. 고맙습니다.

그리고 제가 학업을 마칠 수 있도록 허락해주시고, 많은 격려를 해주신, 엄원근 청장님, 김성진 과장님, 이현 과장님, 우덕모 과장님, 임하권 과장님, 이동한 대장님, 손철희 서기관님, 김봉석 예보관님, 조서환 예보관님, 정광모 예보관님, 서광신 예보관님, 조진대 사무관님과 함께 일했던 예보과 계장님들과 주임님들께도 감사의 말씀을 드립니다. 많은 조언을 해준 미정이언니, 바쁜 와중에서도 늘 웃는 얼굴로 저를 참 많이 도와준 정희언니(96)와 아정이에게도 감사의 마음을 전합니다. 정말 고맙습니다. 그리고 늘 다정하고 대해주고, 살뜰히 챙겨주는 부산(청) 아름다운 직장 만들기 아름다운 여직원들께도 이 지면을 빌어 감사의 마음을 전합니다.

그리고 좋은 인연을 맺어, 늘 아버지처럼 저희를 챙겨주시는 김석윤 교수님께도 감사의 말씀을 드립니다. (김)현지, 경분, 재훈이 오빠, 오준이 오빠, 창석이 오빠에게도 감사의 마음을 전합니다. 힘들 때마다 많이 위로

해주고, 혹 도와줄 일이 없나 챙겨주고 신경 써주는 그 마음에 정말 감사합니다. 함께 공유한 아름다운 추억들이 영원하기를 간절히 소망합니다.

많이 든든하고 너무 좋은 성아 언니, 항상 웃는 얼굴로 삶의 활력소를 불어넣어주는 인희 언니와, 데미 언니에게도 정말 고맙습니다. 그리고 나의 사랑하는 친구들에게도 너무 감사합니다. 힘들 때마다 전화를 걸면 늘 따뜻하게 위로해준 우신이, 지쳐있을 때 학교로 와서 영양보충 시켜줬던 미정이, 그리고 늘 나를 응원해준 선희와 나의 소울메이트 (이)현지에게 정말 고맙습니다. 친구들이 있었기에 참 많은 힘이 되었습니다.

마지막으로 사랑하는 나의 가족에게 감사의 마음을 전합니다. 사랑하는 언니, 형부 그리고 우리 감찍이 조카 은혁에게 정말 고맙습니다. 앞으로 가족들에게 부끄럽지 않은 사람이 되도록 더 열심히, 부지런히 살겠습니다.

저는 참 복 많은 사람이란가 봅니다. 너무나 많은 사람들의 도움과 관심이 있었기에 지금의 제가 있을 수 있었습니다. 정말 감사하고 고맙습니다.

저를 이렇게 복 많은 사람으로 낳아주시고, 길러주신 사랑하는 나의 부모님께 감사와 존경의 마음을 전하며 이 작은 결실을 바치고자 합니다.