

영동 대설사례의 레이더 강설강도 추정 관계식에 관한 연구

정승필¹⁾ · 권태영^{2)*} · 박준영²⁾ · 최병철¹⁾

¹⁾국립기상과학원 관측기반연구과 재해기상연구센터, ²⁾강릉원주대학교 대기환경과학과

(접수일: 2016년 6월 16일, 수정일: 2016년 9월 30일, 게재확정일: 2016년 10월 13일)

A Study on the Radar Reflectivity-Snowfall Rate Relation for Yeongdong Heavy Snowfall Events

Sueng-Pil Jung¹⁾, Tae-Yong Kwon^{2)*}, Jun-Young Park²⁾, and Byoung-Choel Choi¹⁾

¹⁾High-impact Weather Research Center, Observational Research Division,
National Institute of Meteorological Sciences, Gangneung, Korea

²⁾Department of Atmospheric and Environmental Sciences,
Gangneung-Wonju National University, Gangneung, Korea

(Manuscript received 16 June 2016; revised 30 September 2016; accepted 13 October 2016)

Abstract Heavy snowfall events have occurred frequently in the Yeongdong region but understanding of these events have trouble in lack of snowfall observation in this region because it is composed of complex topography like the “Taebaek mountains” and the “East sea”. These problems can be solved by quantitative precipitation estimation technique using remote sensing such as radar, satellite, etc. Two radars which are able to cover over Yeongdong region were installed at Gangneung (GNG) and Gwangdeoksan (GDK). This study uses radar and water equivalent of snow cover to investigate the characteristics of radar echoes and the Z_e -R relations associated with the 10 Yeongdong heavy snowfall events during the last 5 years (2010~2014). It was found that the heights which the probability of detection (POD) of snow detection by GNG radar is more than 80% are 3,000 m and 1,500 m in convective cloud and stratiform cloud, respectively. The vertical gradient of radar reflectivity is less decreased in convective cloud than stratiform cloud. However, POD by GDK radar are lower than 80% at all layers because the majority of Yeongdong observational stations are more than 100 km away from GDK radar site. Furthermore, we examined Z_e -R relation from the 10 events using GNG radar and compared the “a” and “b” obtained from these examinations at Sokcho (SC) and Daegwallyeong (DG). These “a” and “b” are estimated from radar echo at 500 m (SC) and 1,500 m (DG). The values of “a” differ in their stations such as SC and DG are 30~116 and 6~39, respectively. But “b” is 0.4~1.7 irrespective of stations. Moreover, the value of “a” increased with surface air temperature. Therefore, quantitative precipitation estimation in heavy snowfall events by radar echo using fixed “a” and “b” is difficult because these values changed according to those precipitation characteristics.

Key words: Yeongdong region, heavy snowfall, radar reflectivity, water equivalent of snow cover, Z_e -R relation

*Corresponding Author: Tae-Yong Kwon, Department of Atmospheric and Environmental Sciences, Gangneung-Wonju National University, 7 Jukheon-gil, Gangneung 25457, Korea.
Phone: +82-33-640-2323, Fax: +82-33-644-2324
E-mail: tykwon@gwnu.ac.kr

1. 서 론

영동 대설의 특성 가운데 하나는 적설의 공간 변동성이 크다는 것이다. 많은 대설 사례에서 영동과 영서 지역 사이에 그리고 때로는 영동 지역 내에서도 해안과 산악 지역 사이에 큰 적설 차이가 나타난다(Cho and Kwon, 2014). 이러한 큰 공간 변동성 때문에 소수의 수동식 적설 관측이나 AWS 강수량 관측(강수량으로부터 신적설을 추정하는 방법)으로는 적설의 공간 분포를 정확하게 파악하는데 어려움이 있다. 또한 적설의 변동성이 큰 영동과 영서의 경계 지역이 대부분 산악 지역이라는 점은 직접 관측을 더욱 어렵게 한다. 따라서 영동 대설의 정확한 공간 분포를 파악하기 위해서는 원격탐사 기법 중 하나인 레이더 강수를 추정 기법을 활용할 필요가 있다.

지난 60년 동안 많은 연구자들(Marshall and Gunn, 1952; Sekhon and Srivastava, 1970; Fujiyoshi et al., 1990; Rasmussen et al., 2003; Wolfe and Snider, 2012)은 레이더를 이용하여 강설에 대한 강수율(liquid equivalent snowfall rate)을 추정해왔다. 이들 연구는 레이더 강수율을 레이더 상당반사도 인자 Z_e ($\text{mm}^6 \text{m}^{-3}$)와 강설의 강수율 R (mm h^{-1}) 사이의 관계식을 이용하여 추정하였다. 그러나 위의 연구들은 이러한 관계식이 강설 사례에 따라 변화할 뿐만 아니라 단일 강설 사례 내에서도 변화할 수 있음을 발견하였다. 또한 이들 연구는 레이더 반사도 인자와 강설의 강수율 사이의 관계식이 눈의 밀도, 결정 종류, 결착과 부착의 정도 그리고 중단 낙하 속도에 따라 크게 변화한다고 보고하였다.

산악 지형은 레이더로부터 추정된 지상 강수율에 오류를 가져오는 중요한 요소 중 하나이다. 레이더가 산의 정상에 위치한 경우 겨울철 강수 시스템의 최하층을 관측하는데 한계가 있고 이는 곧 레이더 추정 강수율에 오류로 나타난다(Brown et al., 2002; Wood et al., 2003; Wolfe and Snider, 2012). 또한 레이더가 낮은 고도에 위치한 경우 산악 지형에 의한 레이더 빔의 차폐로 레이더 관측의 공백지역이 존재한다. 이러한 차폐 현상은 흔히 강한 대류가 아닌 낮은 층운형 구름에 의해서 발생하는 겨울철 강설의 에코 패턴에서 뚜렷이 나타난다(Wetzel and Coauthors, 2004). 특히 영동지역의 강설구름을 탐지할 수 있는 레이더가 해안가인 강릉과 해발고도 1,000 m 이상의 광덕산에 설치되어 있기 때문에 이 두 레이더의 관측 특성에 대한 연구가 필요하다.

한반도에서 레이더를 활용하여 강설강도를 추정하는 연구는 부족한 실정이며 몇몇 연구만이 제한적으로 수행되었다. Kim et al. (2002)은 공군의 서산기지 에서 관측된 도플러 레이더의 반사도와 적설의 관계

성을 분석하여 양의 상관관계를 가진다고 하였다. 또한 풍속이 8 knots 미만이고 층후가 2,850 gpm 이하일 경우 상관관계가 높게 나타난다고 보고하였다. Cho et al. (2009)은 대관령 구름물리선도센터에 설치된 연직 지향레이더의 반사도와 전자저울로부터 측정된 강설의 무게를 비교하여 Z_e - R 관계식을 도출하였다. 또한 관계식을 통해 낙하속도와 눈의 밀도를 추정하여 각각 290 cm s^{-1} 와 0.108 g cm^{-3} 를 가진다고 하였다. 그러나 앞서 언급된 두 연구는 적설과 레이더 반사도간의 상관관계가 있음을 보이거나, 추세선을 조사하는데 그치어 Z_e - R 관계식의 정량적인 계수를 제안하지 못하였다.

영동 지역에서 발생하는 강설의 예측성 향상과 공간 분포의 정확한 이해를 위해서는 레이더를 활용한 추정기술에 대한 연구가 필요하다. 이 연구에서는 강릉과 광덕산 레이더를 활용하여 구름의 유형에 따른 반사도의 연직 특징을 조사하고, 그에 따른 Z_e - R 관계식을 분석하고자 한다. 이 논문의 2장에서는 연구에 사용한 레이더와 지상 강수율 자료, 그리고 분석 방법을 소개한다. 3장에서는 레이더의 위치와 구름의 유형에 따른 탐지율과 고도별 반사도의 특징을 비교하고, 위성자료를 통해 레이더 관측 공백지역을 조사한다. 4장에서는 강릉레이더를 통해 영동대설사례의 Z_e - R 관계식을 제시하고, 이 관계식에 영향을 끼치는 인자들과의 상관성을 분석한다. 마지막 5장에서는 주된 결과를 요약 및 토의한다.

2. 자료 및 연구방법

2.1 자료

이 연구에서는 영동지역에서 발생한 대설현상의 레이더 반사도 특징을 분석하기 위하여 레이더와 지상 관측소의 적설, 그리고 위성 자료를 활용하였다. 레이더의 경우 영동지역의 강설에코를 탐지할 수 있는 2지점(광덕산과 강릉)의 반사도 자료를 사용하였고, 적설은 영동지역에 위치한 지상관측소 5개소(속초, 강릉, 북강릉, 동해, 대관령)의 관측 값을 활용하였다. 그리고 위성자료의 경우 MTSAT의 휘도온도(Brightness Temperature) 자료를 이용하였다. 본 연구에서는 앞서 언급된 3가지 유형의 관측 자료를 사용하여 강릉과 광덕산 레이더의 강설구름 탐지율, 레이더 반사도 인자와 지상 적설관측의 관계, 그리고 위성자료를 통한 관측공백지역을 조사하였다.

광덕산과 강릉 레이더는 약 10 cm의 파장을 가지는 S밴드 단일편파 도플러 레이더로서 각각 2003년 12월과 2010년 4월부터 운영되었다(Table 1과 Fig. 1). 광덕산레이더는 내륙에 위치하고 있으며 안테나의 해발고도는 1,064 m, 관측반경은 240 km, 그리고 2887 MHz의 주파수를 사용한다. 강릉레이더의 경우 해안

Table 1. Information of radar traits.

| Site | Gangneung (GNG) | Mt. Gwangdeok (GDK) |
|--------------------------------------|-----------------------|------------------------|
| Operation date | 28 April 2010 | 17 December 2003 |
| Type | S band single Doppler | |
| Gate size | 250 m | |
| Elevation above sea level of antenna | 99 m | 1064 m |
| Elevation angle | 16 (0.4°~20.0°) | 10 (0.0°~20.0°) |
| Beam width | 0.99° | 1° |
| Observation radius | 280 km | 240 km |
| Transmit frequency | 2855 MHz | 2877 MHz |

가에 설치되어 안테나의 해발고도가 99 m로 상대적으로 낮고, 관측반경은 280 km로 좀 더 넓다. 주파수의 경우 2855 MHz를 사용하고 있다. 두 레이더 모두 250 m의 게이트 크기(gate size)와 약 1°의 빔폭(beam width)을 가지고, 고도각(elevation angle)은 강릉이 16개로 광덕산(10개) 보다 많다.

두 레이더의 자료가 동시에 사용이 가능한 기간은 2010년 4월 이후이며 본 연구에서는 이 기간에 발생한 대설현상의 레이더 반사도 특징을 분석하기 위하여 1시간 간격의 3차원 CAPPI (Constant Altitude Plan Position Indicator) 반사도(CZ)자료를 사용하였다. 레이더 자료의 경우 10분 단위의 관측이 수행되지만 적설의 경우 정시를 기준으로 측정되기 때문에 두 자료를 비교하기 위해서는 시간적 일치가 중요하다. 본 연구에서는 정시, 1시간 평균, 매시간 30분, 10분 등 다양한 시간의 반사도 자료를 비교해 보았다. 유의미한 수준의 반사도와 강수 값을 비교하기 위하여 강수발생 초기(0.5 mm h⁻¹ 미만)의 약한 신호를 제외하고 비교한 결과, 시간 해상도에 따른 반사도 차이가 뚜렷하지 않았다. 따라서 이 연구에서는 분석의 용이함과 적설 관측시간의 중간에 해당하는 매시간 30분 자료가 1시간 동안의 레이더 반사도를 대표한다고 가정한 후, 대설의 발생시간부터 소멸시간까지의 매시 30분 자료를 사용하였다. 선행연구(Cho and Kwon, 2014; National Institute of Meteorological Sciences, 2014b; Kwon et al., 2015)에 따르면 영동지역에서는 대류운과 하층운에 의해서 강설이 발생한다고 보고하였다. 구름의 유형에 따른 차이를 비교하기 위하여 500 m에서 4,000 m까지, 500 m 간격의 3차원 CAPPI 반사도 자료를 사용하였다.

기상청에서는 레이더 반사도를 활용하기 위해 다양한 품질관리과정(Quality Control, QC)을 적용하고 있다. 이 중 “반사도의 연직경도를 이용한 기상청 레이더자료 품질관리 알고리즘”은 2006년부터 현업에 적용된 가장 대표적인 품질관리 알고리즘이며 현재까지 활용

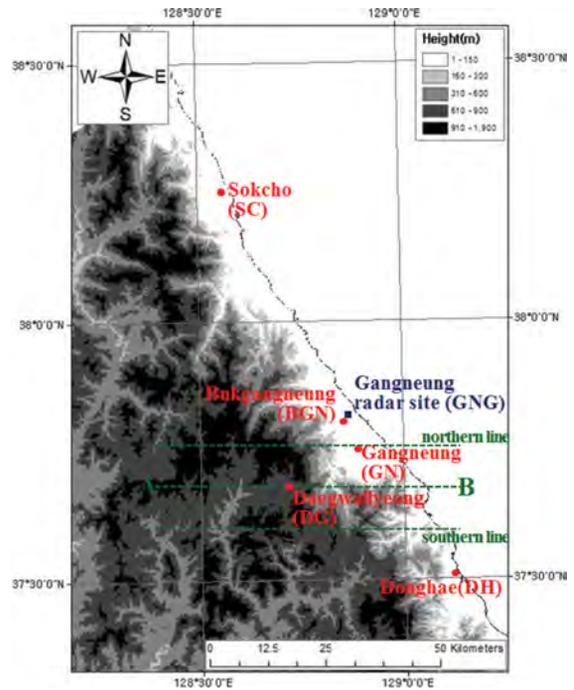


Fig. 1. Topographical map at Yeongdong region. The Gangneung radar site and five ASOS stations are denoted by a blue square and red dots, respectively. The green dashed lines delineate crossline at Daegwallyeong station (A-B), northern and southern lines (± 10 km than A-B).

되고 있다. 그러나 Park et al. (2014)은 이러한 품질관리 알고리즘이 강설현상에서 약한 강수예코를 과다제거하기 때문에 겨울철에 적용하기에 적합하지 않다고 하였다. 본 연구는 대설사태에 대한 연구이기 때문에 품질관리가 적용되지 않은 자료(NoQc)를 사용하였다.

영동 대설현상의 Z_e-R 관계식을 도출하기 위해서는 정확한 적설 관측자료가 필요하다. 영동지역에서는 총 5개의 지상관측소가 존재하며 속초, 강릉, 북강릉, 동해는 해안지역에 위치하고 있고, 대관령은 산간지역에 해당된다(Fig. 1). 각 지상관측소에서는 강수량과 적설 관측이 이루어지고 있으며 두 자료의 정의와 관측방법에는 차이가 있다. 먼저, 강수량은 눈으로 내린 물의 양(단위: mm)을 의미하고 AWS를 통해 1시간 단위의 관측이 이루어지고 있다. 반면 적설은 고체상의 강수가 지면에 내려 쌓인 깊이(단위: cm)를 의미하고 관측자에 의해 적설은 1시간, 신적설은 3시간 단위로 측정된다. 또한 우설량계를 통해 적설의 무게(단위: g cm⁻²)를 측정하고 이를 강수량으로 환산한 적설상당수량(water equivalent of snow cover, 단위: mm)을 구할 수 있다. 현재 영동지역의 지상관측소 중 3개소(북강릉, 속초, 대관령)에서만 우설량계를 활용한

Table 2. Characteristics of precipitation for 10 Yeondong heavy snowfall events.

| Case no. | Period of precipitation (KST) | | Accumulated fresh snow depth (cm) | | | |
|----------|-----------------------------------|---------|-----------------------------------|------|-------|-------|
| | | | SC | DG | BGN | DH |
| 1 | 2011. 02. 11. 01:00~02. 13. 00:00 | (48 h) | 43.1 | 63.5 | 90.4 | 100.8 |
| 2 | 2011. 02. 27. 04:00~03. 02. 00:00 | (69 h) | 29.8 | 35.7 | 27.7 | 9.9 |
| 3 | 2011. 11. 29. 01:00~12. 04. 00:00 | (120 h) | - | 66.5 | - | - |
| 4 | 2011. 12. 08. 13:00~12. 10. 00:00 | (36 h) | 39.2 | 41.7 | 52.4 | - |
| 5 | 2012. 03. 23. 01:00~03. 25. 00:00 | (48 h) | - | 39.2 | - | - |
| 6 | 2012. 12. 14. 11:00~12. 16. 00:00 | (38 h) | - | 26.0 | - | - |
| 7 | 2013. 01. 16. 20:00~01. 18. 00:00 | (29 h) | 35.1 | 16.8 | 29.1 | 0.5 |
| 8 | 2013. 01. 21. 05:00~01. 24. 02:00 | (70 h) | 9.1 | 39.6 | 3.6 | - |
| 9 | 2014. 01. 21. 08:00~01. 23. 00:00 | (41 h) | 13.3 | 21.9 | 36.3 | - |
| 10 | 2014. 02. 08. 07:00~02. 11. 13:00 | (79 h) | 94.5 | 83.1 | 124.6 | - |

적설 관측을 하고 있으며, 2개소(동해, 강릉)에서는 AWS 관측이 이루어지고 있다. 본 연구에서는 기상청에서 제공받은 영동지역 지상관측소 3개소의 매시간 적설상당수량강도(단위: mm h^{-1})와 2개소의 AWS 강수량 자료를 사용하였다.

마지막으로, 위성자료는 레이더 자료의 활용기간동안 연속적인 관측이 이루어진 MTSAT 위성의 적외 1채널($10.8 \mu\text{m}$) 1시간 간격 자료를 사용하였다. MTSAT 적외 1채널을 통해 계산된 휘도온도가 운정온도(Cloud Top Temperature, CTT)라고 가정하였고, 이를 통해 강설 구름의 위치와 레이더가 탐지하지 못하는 관측 공백지역을 조사하였다.

2.2 사례선정 및 연구방법

영동지역 대설현상의 레이더 반사도 특징을 분석하기 위해서는 대설사례에 대한 조사 및 선정이 수행되어야 한다. 강릉과 광덕산 레이더가 동시에 활용 가능한 2010년 4월 이후부터 2014년 12월까지 총신적설 20 cm 이상을 조사한 결과 총 10개 사례가 선정되었다(Table 2). 이 과정에서 총 강설량은 3시간간격의 적설자료가 활용되었고, 강수시간은 1시간 간격의 적설상당수량을 통해 계산하였다. 특히 위성자료를 통해 분석된 선행연구(Cho and Kwon, 2014; National Institute of Meteorological Sciences, 2014b; Kwon et al., 2015)에서 1번과 8번, 그리고 10번 사례는 각각 대류형과, 층운형으로 조사되었고, 나머지 7개 사례는 운형의 구분이 쉽지 않았다. 이들 연구에 따르면 대류형의 경우 -30°C 이하의 운정온도가 나타나고, 강수시간은 짧은 반면 강수강도는 강하다. 또한 층운형은 운정온도가 -30°C 이상으로 상대적으로 높고, 강수기간은 길고 강수강도는 약하다는 특징이 있다.

Cho and Kwon (2014)에 따르면 강설운의 운정온도가 -30°C 이하로 감소하는 시간부터 최저운정온도를 나타내는 시간까지 대류성 강설이 나타난다고 보고하

였다. 본 연구는 위 결과를 착안하여 1번 사례의 총 강수시간 중 대류성 강설이 발생한 시간만을 선별하여 분석하였다. 층운형 사례의 경우 지속시간이 70시간 이상으로 길어 사례기간동안 다양한 강설 구름이 나타난다. 층운형 강설시간만을 선별하기 위하여 운정온도가 -30°C 이상으로 상대적으로 높고, 영동지역을 대표하는 37개 화소(약 $1,000 \text{ km}^2$)의 표준편차가 2°C 이하로 운정온도가 균질할 때를 층운형이라고 정의하였다(Kwon et al., 2015).

본 연구에서는 선행연구에서 운형의 분석이 이루어진 3개 대설사례의 레이더 반사도 특징을 우선적으로 분석하였다. 강릉과 광덕산 레이더를 통해 생산된 3차원 CAPPI 반사도를 활용하여 지상관측소 500 m~4,000 m 상공의 강설에코 탐지율과 반사도를 구하였다. 이를 통해 두 레이더간의 특징과 강설 유형에 따른 차이를 비교하고, 지상관측소의 위치(내륙과 해안)에 따른 차이를 조사하였다. 다음으로 MTSAT 위성 영상의 운정온도와 강릉레이더의 반사도 자료를 비교하여 2018년 동계올림픽이 열리는 평창지역에서 강릉 레이더가 탐지하지 못하는 관측공백지역을 조사하였다. 마지막으로 Table 2에 제시된 20 cm 이상 대설사례의 강릉 레이더 반사도와 속초와 대관령 지점의 적설상당수량 자료를 이용하여 Z_e -R 관계식을 조사하였다.

$$Z_e = aR^b$$

여기서 Z_e 는 레이더 에코의 상당반사도 인자, R은 적설상당수량강도로 각각 $\text{mm}^6 \text{ m}^{-3}$ 과 mm h^{-1} 의 단위를 가진다. a와 b는 Z_e 와 R의 관계를 나타내는 계수이고, 레이더와 우설량계를 통해 관측된 Z_e 와 R을 이용하여 각 고도별, 구름의 유형별에 따른 계수를 구하였다. 정확한 Z_e -R 관계식을 산출하기 위하여 여기서 Trace를 제거한 적설상당수량강도만을 분석에 활용하였다. 또한 지상기온과 눈의 밀도를 조사하여 a, b계수와의 연관성을 살펴보았다.

3. 강설유형에 따른 레이더 탐지율과 반사도

영동대설은 층운과 대류형 두 가지 유형의 구름에 의해서 주로 발생하며, 이러한 구름 유형에 따른 레이더 반사도의 차이를 살펴보고자한다. 강릉과 광덕산 레이더로 수신된 상당반사도 인자와 지상관측지점 5개소의 적설상당수량과 강수량을 분석하여 고도와 지점에 따른 탐지율과 반사도를 조사하였다. 각 지상관측지점과 가장 가까운 4개 화소의 레이더 반사도를 선택하였고, 이들 4개 화소의 평균값이 지상관측지점 상공의 레이더 반사도 값이라고 정의하였다. 지상관측지점에서 0.5 mm h⁻¹ 이상의 강수가 관측되었을 때 지상관측지점 상공의 레이더 반사도 신호가 존재하면 (0 dBZ 초과) 탐지가 되었다고 가정하였고, 전체 강수 시간에 대해서 레이더 반사도가 탐지된 시간의 비를 고도별 탐지율로 정의하였다. 즉, 탐지율은 각 사례의 강수시간동안 레이더를 통해 강수 신호가 나타난 시간의 비를 의미한다. 선행연구를 통해 구름의 유형이 구별된 3개 대설사례의 지상관측소에서 강설이 발생한 시간을 조사하여 탐지율 계산하였다. 각 고도별 반사도는 동시간대에 고도별 자료가 모두 존재하는 시간만을 선별하여 이들의 고도별 평균값을 제시하였다. 또한 강릉레이더를 사용할 때 북강릉지점과의 직선거리가 1.7km로 가깝기 때문에 정확한 반사도 산출이 이루어지지 않아 북강릉 지점을 제외하였고, 광덕산 레이더를 사용할 경우 동해지점과의 직선거리가 150 km 이상으로 수신율이 낮아 분석에서 제외하였다. 강릉과 동해지점은 적설상당수량 관측 값이 존재하지 않아 AWS 강수량 값을 활용하였다.

Figures 2와 3은 구름의 유형이 분류된 3개 대설사례의 고도별 탐지율이다. 먼저 Fig. 2는 강릉 레이더에서 북강릉을 제외한 4개 지상관측지점 상공의 탐지율을 의미한다. 대관령지점의 경우 1,000 m 자료가 존재하지 않아 1,500 m부터 제시하였다. 대류형 강설이 내린 1번 사례의 경우 지점과 관계없이 하층 500~2,000 m까지 100% 탐지되었고, 3,000 m까지는 약 80% 이상의 탐지율을 보였다. 층운형 강설이 내린 8번과 10번 사례의 탐지율의 경우, 하층 1,000~1,500 m까지만 80% 이상으로 나타났고 그보다 높은 고도에서는 급격히 감소하여 지점과 관계없이 3,000 m에서는 0%가 됨을 확인하였다. 이는 위성영상을 분석한 선행연구에서 층운형 대설의 운정고도가 약 2~2.5 km(운정온도: -15 ~ -20°C)로 나타나고, 대류형 대설은 이보다 높은 4~8 km(운정온도: -35 ~ -52°C)까지 발달한다는 결과와 일치한다(Cho and Kwon, 2014; National Institute of Meteorological Sciences, 2014b; Kwon et al., 2015).

광덕산 레이더의 탐지율을 살펴보기에 앞서 반사도에서 나타난 특징을 조사하였다. 광덕산 레이더는 해

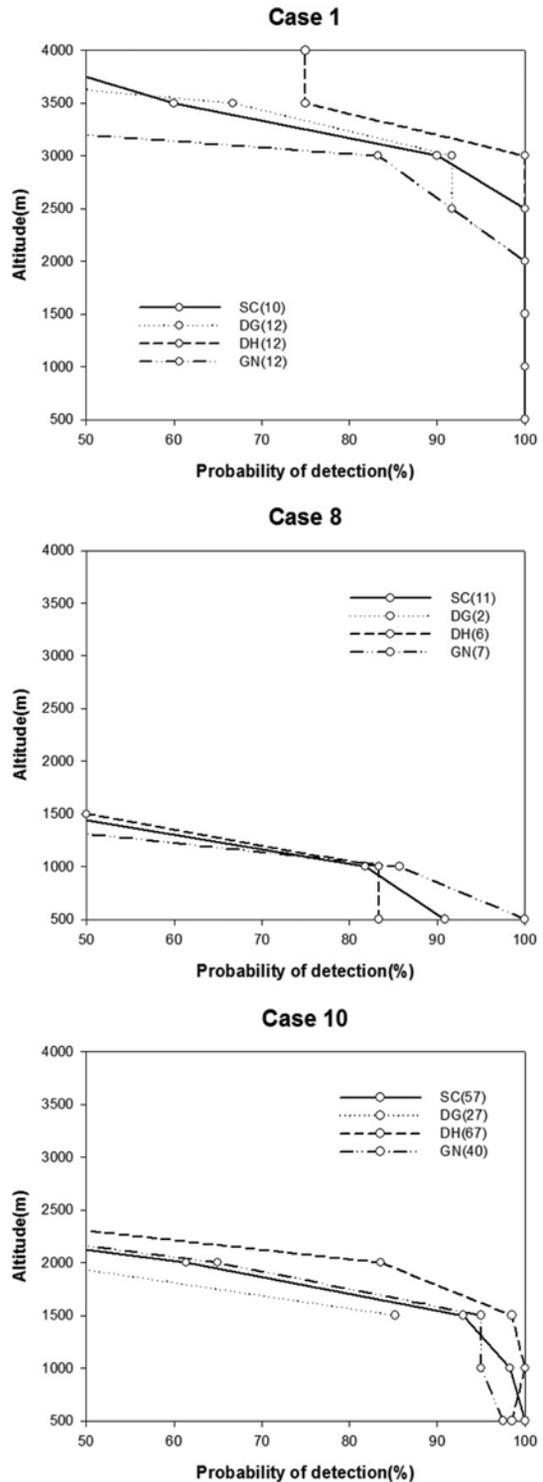


Fig. 2. Probability of detection of precipitation echo in 3 Yeongdong heavy snowfall events using Gangneung (GNG) radar.

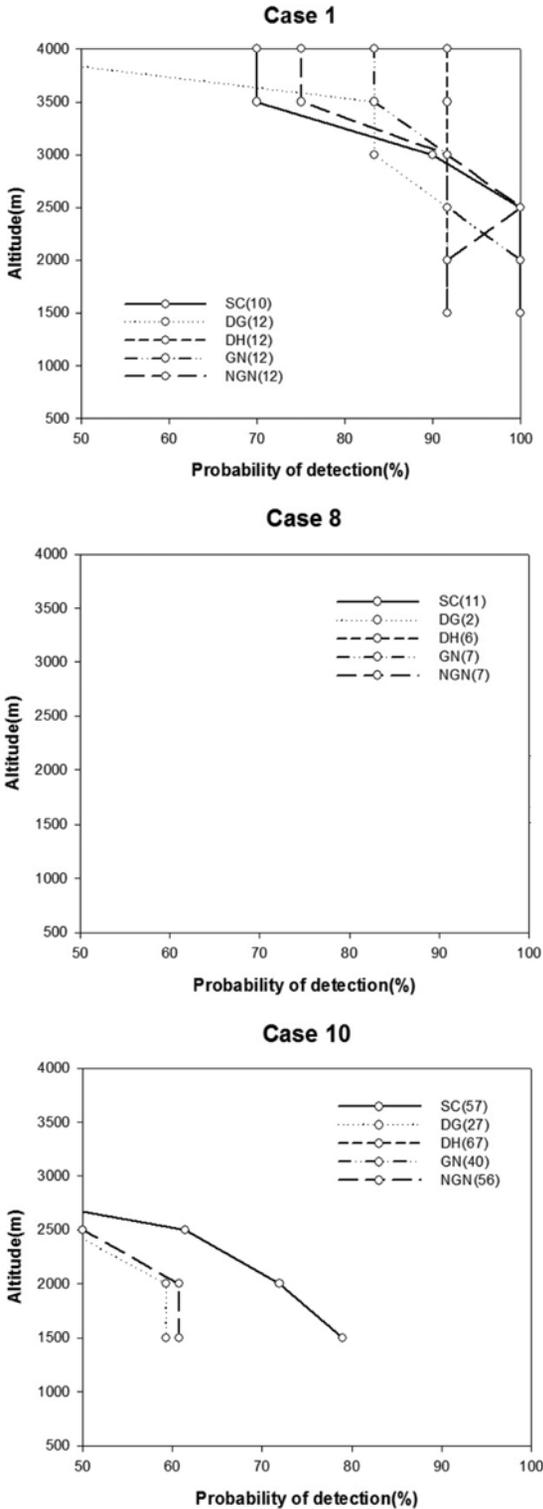


Fig. 3. Same as Fig. 2 except for the Gwangdeoksan (GDK) radar.

발고도가 1,064 m이기 때문에 500 m의 반사도 자료가 존재하지 않았고, 속초지점의 1,000 m 반사도는 1,500 m와 같은 값을 보였다(Fig. 3). 그리고 강릉과 대관령은 속초보다 직선거리가 멀어서 1,000~2,000 m까지 3개 층의 반사도가 같은 값을 나타냄을 확인하였다. 탐지율을 살펴보았을 때 대류형 강설인 1번 사례에서는 해안가에 위치한 강릉과 속초의 탐지율이 80% 이상으로 약 70%를 보인 산지의 대관령보다 높았다. 층운형 강설에 해당되는 8번과 10번 사례에서의 탐지율은 고도에 관계없이 80% 이하를 보였고, 특히 8번 사례는 속초지점에서만 10%의 탐지율을 보여 사례별 탐지율의 차이가 크게 나타났다. 이는 레이더와 분석지점 사이에 약 100 km의 거리차가 존재하여 특정고도의 관측 값이 다른 고도에 내삽된 것으로 판단되며, 이로 인해 탐지율이 높게 추정된 것이라고 사료된다. 두 레이더의 탐지율을 비교해 보았을 때 영동 대설현상에서는 강릉레이더의 탐지율이 광덕산 레이더보다 더 높은 것을 확인하였다. 또한 광덕산 레이더를 활용하여 영동 대설현상을 분석할 경우 과대 내삽으로 인해 정확한 반사도 산출이 이루어지지 않아 주의가 필요하다.

영동대설현상의 유형에 따른 고도별 반사도 차이를 비교하기 위하여 대류형인 1번 사례와 층운형인 10번 사례를 분석하였다(Fig. 4). 여기서 광덕산 레이더는 앞서 확인한 것과 같이 고도별 변화가 뚜렷하지 않기 때문에 강릉 레이더 자료만을 활용하였다. 각 고도별 평균 반사도는 500~3,000 m까지 모든 고도에서 동시에 반사도 신호가 탐지된 시간만을 선정하여 구하였다. 층운형은 500 m에서 약 20 dBZ 이하의 값을 보인 후 반사도가 급격히 감소하여 2,500 m에서 5 dBZ 미만으로 나타났다. 앞서 층운형 구름의 탐지율이 2,500 m에서 20% 이하로 나타나고 3,000 m에서는 탐지되지 않았기 때문에 3,000 m의 반사도 값이 존재하지 않았다. 이러한 결과는 층운형 구름의 강수입자가 대부분 1,500 m 이하의 낮은 고도에 위치함을 의미하고, 앞서 조사된 탐지율과도 일치한다.

대류형 사례는 지점에 따른 차이가 나타났다. 강릉과 동해의 경우 500~2,000 m의 하층에서 약 20 dBZ 이상의 반사도가 유지되었고, 이후 서서히 감소하여 3,000 m에서도 10 dBZ 이상의 값을 보였다. 그러나 속초지점에서는 층운형 사례와 유사한 감소경향을 보였다. 이는 대류형 사례의 중심부가 영동남부 해안에 위치하여 강릉과 동해의 운영온도가 -40°C 이하인 반면, 속초는 대류운 가장자리에 위치하여 운영온도가 상대적으로 높았기 때문이다(Cho and Kwon, 2014). 즉, 대류형 강설에서는 하층 500 m에서 약 2,500 m까지 반사도의 연직적인 변화가 크지 않았지만, 층운형 강설 또는 대류운의 가장자리에서는 고도에 따라 반

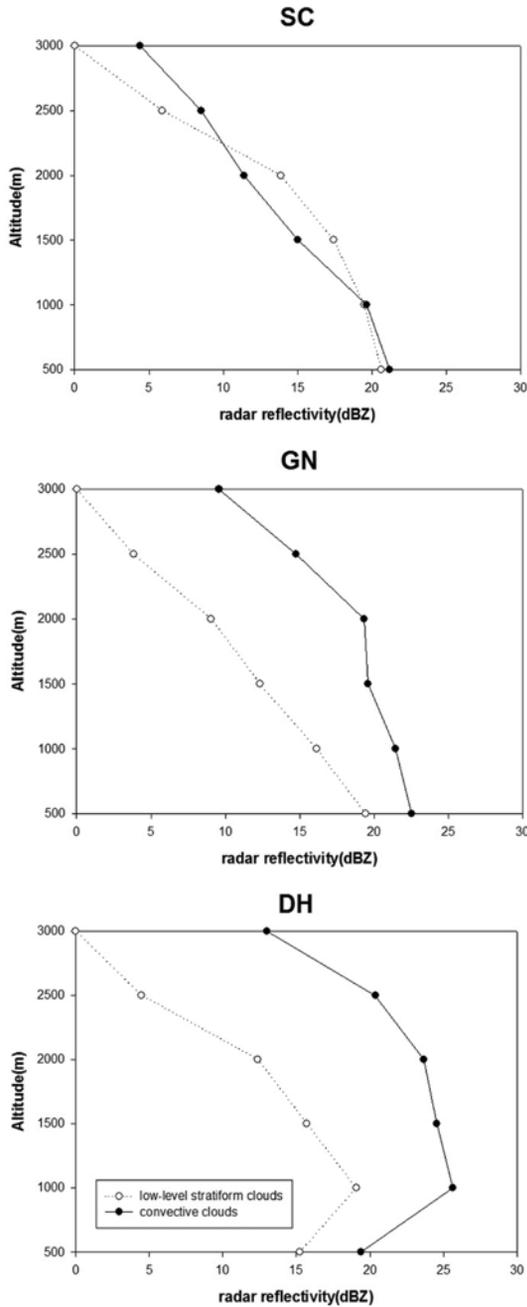


Fig. 4. Vertical radar reflectivity for two types of clouds at 3 ASOS stations. The low-level stratiform clouds and convective clouds are denoted by dotted line with open dot and solid line with closed dot, respectively.

사도가 급격히 감소하는 차이가 있었다.

위의 결과를 종합하였을 때, 강릉 레이더의 경우 운정온도 -40°C 이하로 잘 발달된 대류형 강설에서는

약 3,000 m까지 80% 이상의 탐지율과 10 dBZ 이상의 반사도를 보였다. 그러나 -30°C 이상의 층운형 강설에서는 하층 1,000~1,500 m까지만 80% 이상의 탐지율을 보였고, 고도에 따라 탐지율과 반사도가 급격히 감소하는 특징을 확인하였다. 광덕산 레이더는 대류형 강설에서만 3,000 m까지 80% 탐지율을 보였지만, 이는 외삽된 반사도 값에 의해 과대 추정된 것으로 생각된다. 즉, 광덕산 레이더와 영동지역의 지상관측 지점이 약 100 km 이상의 거리차가 존재하기 때문에 층운형 강설과 같이 2,000 m 이하에 수적이 분포하는 현상의 탐지가 어렵다. 또한, 3,000 m 이상까지 발달하는 대류형 강설에서도 외삽된 값으로 인해 정확한 반사도가 나타나지 않는다. 영동대설과 관련된 강설 구름을 탐지 및 예측하는데 있어서는 광덕산 레이더 자료의 사용에 주의가 필요하다.

다음으로 강릉레이더를 활용하여 2018년 동계올림픽이 열리는 평창군 부근의 강설관측 공백지역이 존재하는지 조사하였다. 층운형(10번 사례) 구름에서 강릉레이더의 탐지율은 대관령지점의 1,500 m 이상에서 급격히 낮아졌다(Fig. 2). 대관령지역의 고도별 탐지율은 1,500 m에서는 약 85%로 높게 나타났지만, 1,000 m 이하에서는 탐지를 하지 못하였고 2,000 m 이상에서는 탐지율이 50% 이하로 급격히 떨어지는 것을 확인하였다. 이러한 경우는 구름의 고도가 낮아 강릉레이더에서 대관령지점을 탐지 할 때 지형적인 차폐의 영향을 받은 것으로 판단되며, 이를 확인하기 위해 레이더와 위성을 활용하여 강설 구름의 탐지가 이루어지지 못한 공백지역을 조사하였다. 분석에 사용된 자료는 탐지율이 85%로 상대적으로 높은 1,500 m 고도의 강릉레이더 반사도와 MTSAT 휘도온도이다.

레이더의 관측공백지역을 조사하기 위하여 10번 사례의 강설시간에 해당하는 2014년 2월 8일~11일 동안의 대관령지점의 신적설, 레이더 반사도, 그리고 휘도를 조사하였다. 그 결과 대관령지점에서 적설이 관측됐지만 레이더 신호가 나타나지 않는 시간이 존재함을 확인했다(2월 10일 7시, 9시, 11시, 그리고 11일 00시). 그 중 2014년 2월 10일 6시 30분(KST)의 대관령지점을 기준으로한 동서 횡단면의 휘도온도와 레이더 반사도 변화를 Fig. 5b에 제시하였다. 여기서 A-B 선은 Fig. 1에 표시하였고, Figs. 5a와 5c는 각각 A-B 선의 북쪽 10 km 지점과 남쪽 10 km 지점의 횡단면을 의미한다.

Figure 5의 모든 횡단면에서 $-13 \sim -20^{\circ}\text{C}$ 의 휘도온도가 나타나는 것을 볼 수 있고, 이는 해안선에서 대관령 서쪽지역까지 층운형 구름이 넓게 분포하고 있음을 의미한다. 그러나 레이더 반사도는 대관령 동쪽 지역에서는 5~20 dBZ가 탐지된 반면 대관령 서쪽 지역에서는 레이더 신호가 탐지되지 않는 것을 확인하

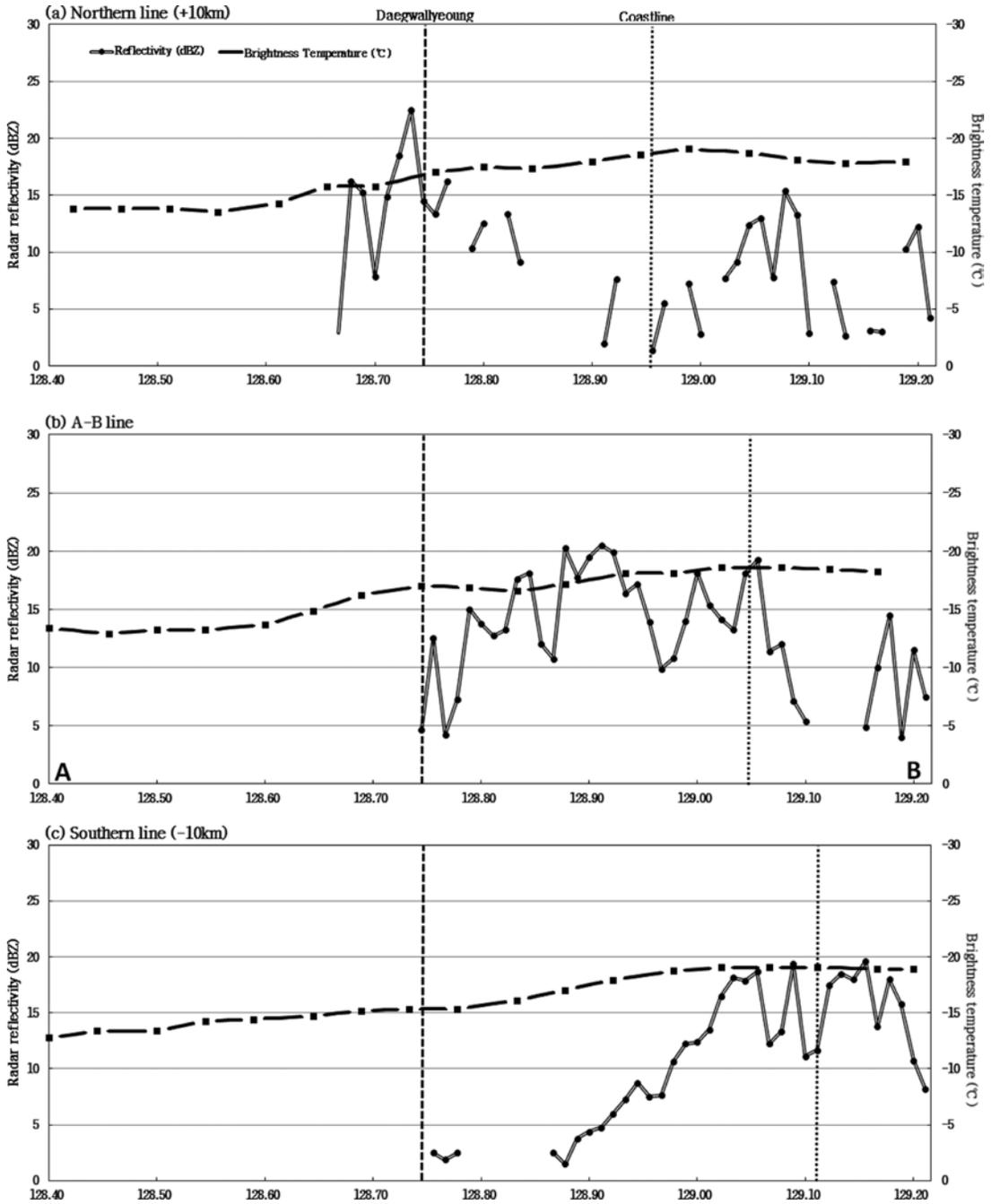


Fig. 5. Cross section of radar reflectivity and brightness temperature from MTSAT along (b) A-B line in Fig. 1. (a) and (c) cross sections showed a more northerly and southerly lines than A-B line.

였다(Fig. 5b). 레이더 반사도 신호가 탐지되는 지역은 대관령 지점의 남북 10 km 지점에서 차이가 있었다. 먼저 북쪽에서는 대관령지점을 기준으로 서쪽 5 km 부근까지 반사도 신호가 나타나는 반면, 남쪽에서는

동쪽 20 km 부근에서 신호가 잡히지 않거나, 5 dBZ 이하로 급격히 감소하였다.

즉, 강릉레이더의 강설 구름 탐지영역이 산맥을 따라서 변화함을 의미하고, 대관령 서쪽지역에 강설현

상이 나타나는 층운형 구름이 존재할 때 강릉레이더로 탐지하는데 한계가 있음을 보여준다. 이러한 결과는 강릉레이더의 고도각에 기인하여 지형적인 차폐의 영향인 것으로 판단된다. 따라서 평균군을 포함한 영서지역의 강수에코를 정확하게 탐지하기 위해서는 낮은 고도의 구름의 탐지가 가능한 추가적인 레이더의 설치 필요시 된다.

4. 영동대설현상의 Z_e -R 관계식

4.1 속초와 대관령지점의 Z_e -R 관계식

영동대설과 관련된 Z_e -R 관계식을 조사하기 위하여 겨울철 영동대설 10개 사례를 분석하였다(Table 2). 사례기간동안 영동지역에서 수동식 적설관측이 연속적으로 수행된 속초와 대관령 지점의 적설상당수량강도를 사용하였고, 레이더 자료의 경우 강릉 레이더를 통해 추정된 고도별(500 m~4,000 m, 500 m 간격) 상당 반사도 인자를 활용하였다. Z_e -R 관계식을 조사하는 과정에서 $\log(Z_e) = \log(a) + b\log(R)$ 식의 직선으로부터 $\log(Z_e)$ 가 벗어난 값들의 제곱이 최소가 되는 a와 b를 구하였다.

Figure 6은 10번 사례의 Z_e -R 관계식 산출결과이다. 두 지점 모두 500 m~4,000 m까지 500 m 간격으로 모든 a, b 값을 구하였지만, 이 연구에서는 상관성이 가장 높은 속초 500 m와 대관령 1,500 m의 결과만을 제시하였다. 동일한 강설 사례 내에서도 두 지점의 a와 b 값은 뚜렷하게 다르게 나타남을 확인할 수 있다. Figure 6과같이 10개 영동대설 사례의 Z_e -R 관계식을 분석하였고 그 결과를 Table 3과 4에 제시하였다. 여기서, 3번, 5번, 그리고 6번 사례는 대관령에서만 눈이 관측된 사례(Table 2 참조)이지만 강설 유형에 따른 차이를 비교하기 위하여 속초지점의 분석결과도 포함하였다. 또한 각 사례의 상관계수와 유의수준(P-value)을 나타내었고, Z_e -R 관계식에 영향을 끼치는 인

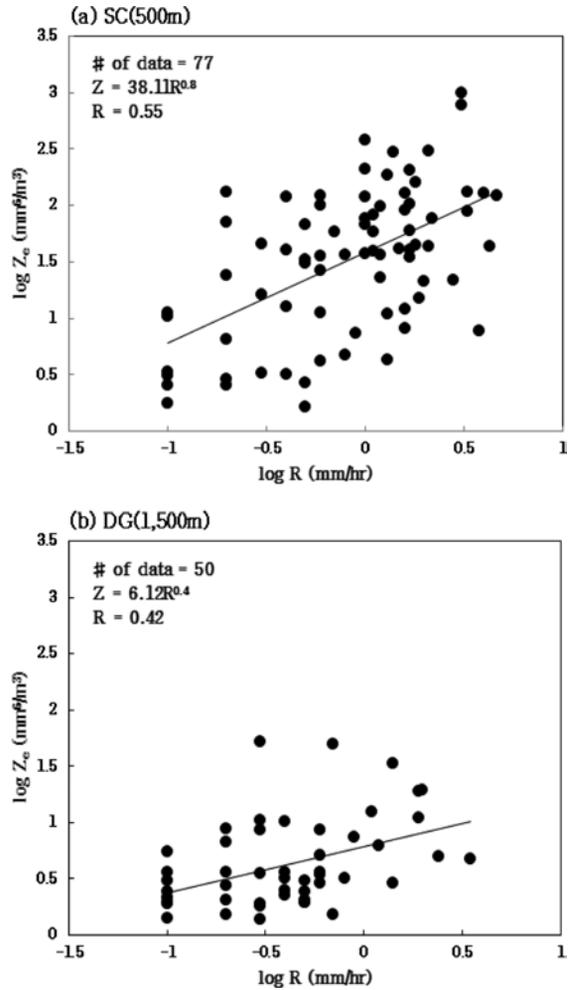


Fig. 6. Scatter diagrams of $\log Z_e$ and $\log R$ for the case 10 using (a) CAPPI 500 m radar data at Sokcho station and (b) CAPPI 1,500 m radar data at Daegwallyeong station. Those trend line is denoted by a black solid line.

Table 3. Results of Z_e -R relation of the 10 heavy snowfall events and precipitation characteristics at the Sokcho (SC) station.

| Case no. | Number of data | a | b | R (p-value) | \bar{T}_{sfc} ($^{\circ}$ C) | Snow density ($g\ cm^{-3}$) | Remarks |
|----------|----------------|-------|-----|-------------|---------------------------------|-------------------------------|-------------------|
| 1* | 31 | 51.6 | 0.8 | 0.68 (0.01) | -1.1 | 0.10 | Convective clouds |
| 2* | 38 | 40.6 | 0.4 | 0.33 (0.04) | 0.9 | 0.13 | Snow |
| 3* | 79 | 54.3 | 1.4 | 0.69 (0.01) | 5.8 | - | Rain |
| 4* | 18 | 116.5 | 0.9 | 0.73 (0.01) | 0.0 | 0.11 | Snow |
| 5* | 19 | 69.3 | 0.9 | 0.65 (0.02) | 3.7 | - | Rain |
| 6* | 20 | 99.2 | 1.7 | 0.69 (0.01) | 2.9 | - | Rain |
| 7* | 16 | 29.8 | 1.0 | 0.54 (0.03) | -2.3 | 0.10 | Snow |
| 8 | 18 | 24.1 | 0.5 | 0.26 (0.29) | 1.3 | 0.44 | Stratiform clouds |
| 9 | 7 | 57.6 | 0.7 | 0.63 (0.13) | -2.6 | 0.11 | Snow |
| 10* | 77 | 38.1 | 0.8 | 0.55 (0.01) | -1.7 | 0.11 | Stratiform clouds |

*P-value from $R < 0.05$; 95% confidence level.

Table 4. Same as Table 3 except for the Daegwallyeong (DG) station.

| Case no. | Number of data | a | b | R (p-value) | \bar{T}_{sfc} (°C) | Snow density (g cm ⁻³) | Remarks |
|----------|----------------|------|------|--------------|----------------------|------------------------------------|-------------------|
| 1* | 25 | 15.9 | 0.5 | 0.42 (0.04) | -6.1 | 0.07 | Convective clouds |
| 2* | 32 | 31.7 | 1.3 | 0.71 (0.01) | -1.9 | 0.05 | Snow |
| 3* | 45 | 19.6 | 1.0 | 0.67 (0.01) | 0.4 | 0.10 | Snow |
| 4* | 21 | 18.4 | 0.6 | 0.58 (0.01) | -5.1 | 0.06 | Snow |
| 5 | 26 | 22.2 | 0.2 | 0.12 (0.56) | -0.5 | 0.11 | Snow |
| 6* | 15 | 38.7 | 1.7 | 0.81 (0.01) | 0.4 | 0.14 | Snow |
| 7 | 14 | 5.1 | 0.03 | 0.03 (0.92) | -7.2 | 0.05 | Snow |
| 8 | 9 | 10.5 | -0.2 | -0.11 (0.78) | -1.0 | 0.08 | Stratiform clouds |
| 9 | 6 | 11.4 | 0.6 | 0.69 (0.13) | -5.6 | 0.30 | Snow |
| 10* | 50 | 6.1 | 0.4 | 0.42 (0.01) | -6.1 | 0.05 | Stratiform clouds |

*P-value from $R < 0.05$; 95% confidence level.

자(평균 지상기온, 눈 밀도, 강수유형 등)를 함께 제시하였다. 여기서 눈 밀도는 적설상당수량을 신적설로 나눈 후 물의 밀도를 곱하여 계산하였다.

속초 지점에서의 Z_c 와 R의 상관계수는 약 0.3~0.7로 나타났으며 8사례에서 신뢰수준 95%에서 유의하였다. 대관령 지점의 경우 상관계수가 약 -0.1~0.8로 다양하게 분포하였고 이 중 6사례가 신뢰수준 95%에서 유의하였다. 유의수준이 0.05에서 기각되어 통계적으로 유의하지 않는 경우는 속초와 대관령지점에서 각각 2사례와 4사례였다. 이들 사례는 다른 사례들에 비해 자료의 수가 적고 상관계수와 신뢰수준이 낮아 종합적인 Z_c -R 관계식을 제시하는데 오류를 가져올 수 있기 때문에 분석에서 제외하였다. 즉, 앞서 조사된 10개 사례 중 유의수준 0.05를 만족하는 속초지점 8개 사례와 대관령지점 6개 사례를 분석에 사용하였다.

통계적으로 유의한 상관관계를 보이는 사례의 속초와 대관령지점에서 추정된 a 값은 각각 29.8~116.5와 6.1~38.7로 해안에 위치한 속초가 더 높게 나타났다. 이러한 차이는 두 지점간의 고도차 또는 레이더 자료의 고도차에 기인한 것으로 판단되며, 동일한 고도인 속초 1,500 m의 레이더 자료를 사용할 경우 7.4~41.0으로 유사한 a 값을 보였다. 그러나 해당 고도의 레이더 자료를 사용할 경우 대부분 사례에서 상관계수가 0.6 이하로 낮아졌다. b 값의 범위는 두 지점 모두에서 0.4~1.7로 유사하여 지점에 따른 차이가 뚜렷하게 나타나지 않았다. 또한 두 지점에서 계산된 a와 b 값은 사례에 따라서 그 변화가 크게 나타남을 확인하였다. 각 사례 또는 지점에 따라서 a와 b 값이 다르게 나타난 이유는 다음절에 자세히 다루었다.

4.2 강설특징에 따른 Z_c -R 관계식 차이

National Institute of Meteorological Sciences (2014a)에 의하면 이러한 a와 b 값의 변화는 강수형태, 강수 입자의 크기와 모양 등에 따라 다르게 나타난다고 하

였고, 특히 강설의 경우 눈 입자의 크기와 밀도, 종단 낙하속도가 영향을 끼친다고 하였다. 그리고 Cooper (1986)와 Meyers et al. (1992)는 지상기온이 증가함에 따라 a 값이 증가한다고 보고하였다. 따라서 이 연구에서는 대설 유형(대류형, 층운형), 지상기온자료, 눈의 밀도 그리고 강수형태(눈, 비)에 따라 a, b 값의 변화를 살펴보았다.

먼저 대설 유형에 따른 비교를 위해 앞서 3장에서 언급한 선행연구를 통해 구름의 유형이 분석된 3개 사례(1번, 8번, 10번) 중 통계적으로 유의한 상관관계를 가지는 1번과 10번 사례의 a, b 값의 특징을 비교하였다. 층운형 10번 사례의 a 값을 살펴보면 속초와 대관령에서 각각 38.1과 6.1로 나타나고, b 값은 각각 0.8과 0.4이었다. 대류형 구름인 1번 사례에서의 속초와 대관령의 a 값은 각각 51.6과 15.9로 층운형 사례보다 약 10 정도 증가한 것을 볼 수 있었다. 하지만 b 값은 0.8과 0.5로 층운형 사례와 유사한 값을 보였다. 즉, b 값은 유형과 관계없이 유사하게 나타났지만, a 값은 대류형 구름일 때 층운형 보다 더 큰 값을 보임을 확인할 수 있었다.

다음으로 지상기온에 따른 Z_c -R 관계식의 차이를 비교하였다. Figure 7은 두 지점에서 사례기간동안의 평균 지상기온과 Z_c -R 관계식으로부터 계산된 a, b 값의 산포도이다. 속초지점의 경우 8사례 가운데 3사례가 비로 관측되었고, 나머지 5사례는 눈 또는 눈과 비가 혼합되어 관측되었다(Table 2 참고). 이 연구에서는 눈과 비가 혼합된 경우는 눈이 온 사례로 간주하였다. 비인 사례의 지상기온은 약 3°C 이상으로 나타났고, a 값은 54.3~99.2, b 값은 0.9~1.7로 분포하였다. 눈인 사례의 지상기온은 1.3°C ~ -2.6°C로 비인 사례에 비해 상대적으로 낮았고, a와 b 값은 각각 29.8~116.5와 0.7~1.0에 분포하는 특징을 확인하였다. 이러한 결과를 통해 눈보다 비인 경우 a와 b 값이 더 크게 나타남을 알 수 있었다.

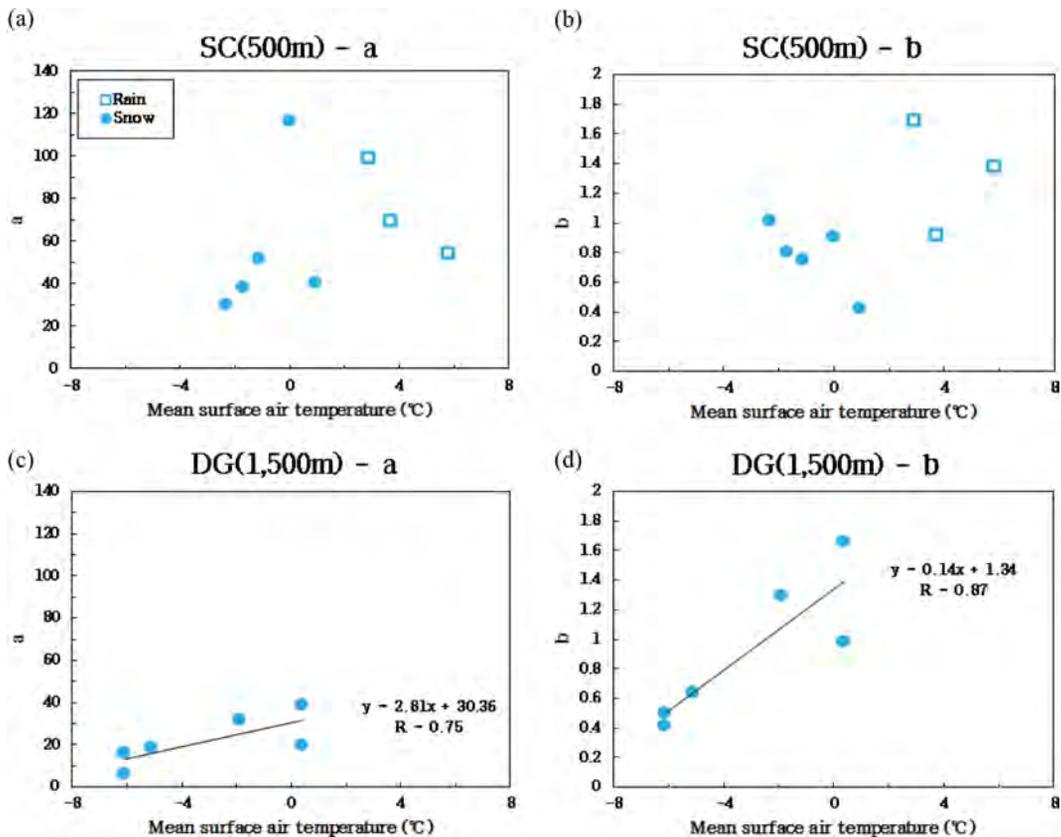


Fig. 7. Scatter diagrams of coefficients of Z_c -R relation and mean surface air temperature at Sokcho (a, b) and Daegwallyeong (c, d). Precipitation type such as rain and snow are denoted by a open square and closed dot, respectively.

대관령지점의 경우 6사례 모두 눈으로 분류되었고, 평균 지상기온은 약 $0.4 \sim -6.1^\circ\text{C}$ 사이에 분포하였다. 또한 평균 지상기온이 감소함에 따라 a와 b 값도 감소하는 경향을 볼 수 있다. 이때 지상기온과 a 값의 상관계수는 0.75이고 b 값과의 상관계수는 0.87로 각각 신뢰수준 90%와 95%에서 유의하다. 이러한 경향성은 지상기온이 증가함에 따라 a 값이 증가한다는 Cooper (1986)와 Meyers et al. (1992)의 결과와 일치한다. 그러나 강설현상의 경우 단일 강설 사례 내에서도 Z_c -R 관계가 변화하는 문제가 있으며, 본 연구에서 분석한 사례만으로 영동지역 강설현상의 Z_c -R 관계를 규정하는 데는 한계가 있다. 따라서 보다 신뢰성 있는 결과를 얻기 위해서는 다양한 사례에 대한 추가적인 분석이 필요하다.

대관령지점에서의 평균지상기온에 따른 눈의 밀도 변화를 각 사례 별로 분석해 보았다. 이 지점에서 기온이 -1°C 이상인 경우 눈 밀도가 약 0.1 g cm^{-3} 이었고, -5°C 이하에서는 약 0.05 g cm^{-3} 이하로 더 낮았다(Table 4 참조). 이 중 9번 사례는 특정시간의 눈 밀

도가 1.24 g cm^{-3} 로 높게 나타나 평균 눈 밀도에 영향을 주었다. 지상기온에 따라서 눈의 밀도가 변화함을 확인할 수 있었고, 이는 Imai (1960)와 Puhakka (1975)가 제시한 결과와 잘 일치한다. 결론적으로 지상기온과 눈의 밀도가 증가함에 따라 a 값도 증가하는 것을 확인할 수 있었다.

강수형태에 따른 Z_c -R 관계를 비교하기 위하여 각 지점의 강수형태 또는 지상기온을 기준으로 분류하였다(Fig. 8). 속초지점의 경우 강수형태를 기준으로 비 3개 사례와 눈 5개 사례를 각각 그룹화 하였고, 대관령지점은 -3°C 를 기준으로 그 이상 3개 사례와 그 미만 3개 사례를 각각 그룹화 하여 Z_c -R 관계를 비교하였다. 속초지점에서 비와 눈에 대한 a 값은 각각 62.2와 46.5였고, b 값은 각각 1.4와 0.8로 나타났다. 상관계수는 각각 0.67과 0.56로 두 그룹 모두 신뢰수준 99%에서 유의하였다. 대관령에서는 -3°C 이상과 -3°C 미만에서 a와 b 값은 각각 a: 27, 10.9와 b: 1.2, 0.6으로 나타났으며 상관계수는 각각 0.72와 0.55로 두 그룹 모두 신뢰수준 99%에서 유의하였다. 결과적

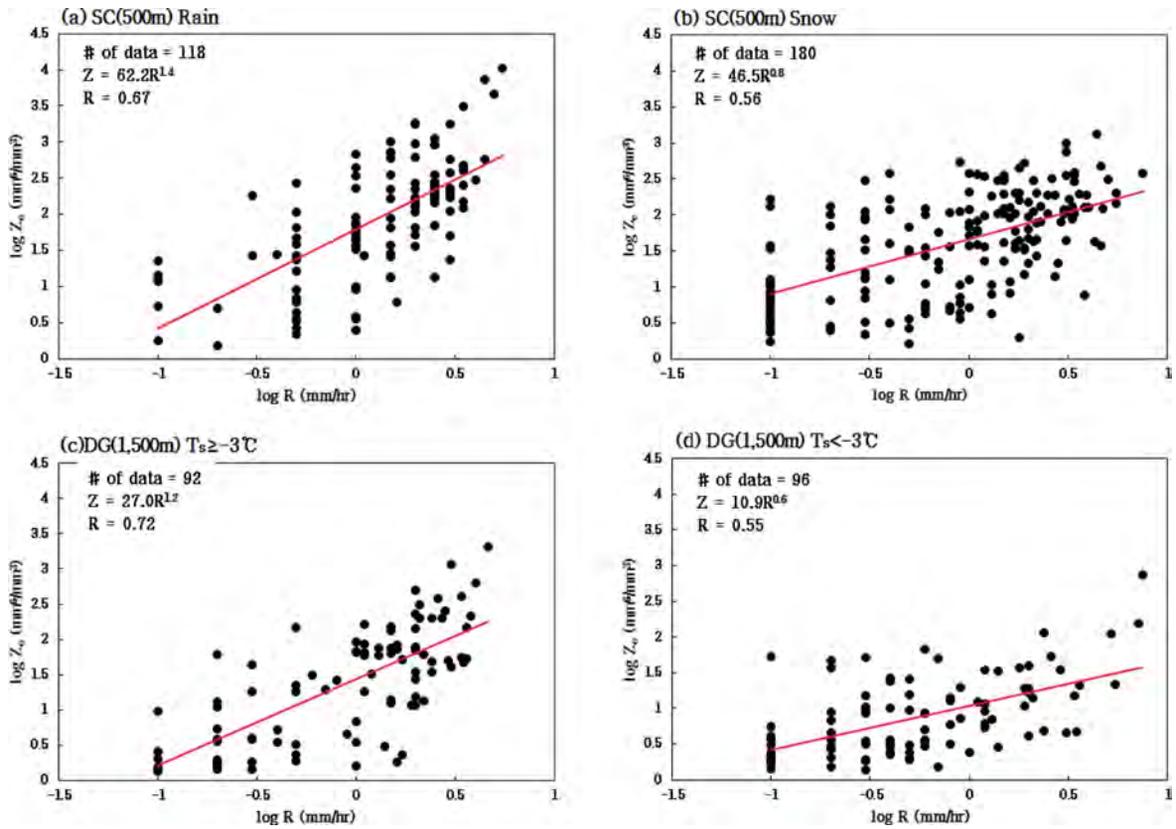


Fig. 8. Same as Fig. 6 except for the (a) 3 rainfall cases and (b) 5 snowfall cases at Sokcho (SC) station and (c) 3 warm cases and (d) 3 cold cases at Daegwallyeong (DG). Those trend line is denoted by a red solid line.

Table 5. Results of Z_c -R relation for precipitation type and water equivalent of snow cover (R) rate at the Sokcho station.

| Precipitation type | | a | b | R |
|-------------------------------|----------------------------|------|---------------|------|
| Rain (Case 3, 5, 6) | Total (n = 118) | 62.2 | 1.4 | 0.67 |
| | R > 0.5 mm h ⁻¹ | 45.5 | 1.9 | 0.67 |
| | (n = 107) | 42.7 | b = 2 (fixed) | |
| Snow (Case 1, 2, 4, 7, 10) | Total (n = 180) | 46.5 | 0.8 | 0.56 |
| | R > 0.5 mm h ⁻¹ | 35.1 | 1.2 | 0.52 |
| | (n = 130) | 23.9 | b = 2 (fixed) | |

으로 속초지점에서의 a, b 값은 눈보다는 비로 나타났을 때 높은 것을 확인하였고, 대관령지점에서는 -3°C 이상으로 상대적으로 따뜻할 때 a와 b 값, 그리고 상관계수가 높은 것으로 확인하였다.

Z_c -R 관계에서 a와 b 값의 변화는 약한 강수에 의해 영향을 받을 수 있기 때문에 적설상당수량 또는 강수량이 0.5 mm h⁻¹ 이하로 약한 강수에 해당하는 시간을 제외하여 a, b 값을 산출해 보았다(Table 5와 6). 또한 a 값은 b 값의 영향을 받기 때문에 Rasmussen

et al. (2003)과 Wolfe and Snider (2012)의 이론적 연구에서 보고된 b 값(b=2)을 적용하여 계산된 a 값도 함께 제시하였다. 약한 강수시간의 자료를 제거했을 때, 앞서 눈과 비, -3°C 이상과 -3°C 미만으로 그룹화한 4가지 경우 모두에서 a 값은 감소하고 b 값은 증가하였다. b를 2로 고정한 경우에도 같은 결과가 나타났다. 강설과 관련된 a 값은 속초와 대관령지점에서 각각 23.9~46.5와 7.2~27.0의 범위에 분포하였다. 이는 지면온도가 감소함에 따라 a 값도 감소하고, -5°C

Table 6. Results of Z_c -R relation for surface air temperature and water equivalent of snow cover rate (R) at the Daegwallyeong station.

| Surface air temperature | | a | b | R |
|---|--|--------------|----------------------|------|
| $T_{sfc} \geq -3^\circ\text{C}$ (Case 2, 3, 6) | Total (n = 92) | 27.0 | 1.2 | 0.72 |
| | R > 0.5 mm h ⁻¹ (n = 67) | 23.1 18.6 | 1.5 b = 2 (fixed) | 0.54 |
| $T_{sfc} < -3^\circ\text{C}$ (Case 1, 4, 10) | Total (n = 96) | 10.9 | 0.6 | 0.55 |
| | R > 0.5 mm h ⁻¹ (n = 53) | 9.2 7.2 | 1.0 b = 2 (fixed) | 0.59 |

부근의 a 값이 약 40으로 보고한 선행연구결과와도 일치한다(Meyers et al., 1992). b 값은 약한 강수 시간을 제거할 경우 0.4 정도 증가하여 1.0~1.5의 값을 보였다.

5. 요약 및 토의

본 연구에서는 영동 대설현상의 정량적 예측성 향상을 위하여 레이더 강수 탐지율, 반사도의 연직변화, 그리고 Z_c -R 관계식을 분석하였다. 영동지역에서 2011~2014년 동안 30 cm 이상의 적설이 관측된 10개 대설 사례를 선정하였고, 지상관측 5개소(속초, 북강릉, 강릉, 대관령, 동해), 강릉과 광덕산 레이더, 그리고 MTSAT 위성의 자료를 분석에 활용하였다. 먼저, 선행연구를 통해 층운형과 대류형으로 분석된 3개 사례를 활용하여 대설 구름의 유형에 따른 탐지율과 반사도의 연직변화를 비교하였다. 다음으로, 층운형 대설사례를 통해 나타난 대관령지역의 레이더 관측공백지역을 조사하였다. 마지막으로 영동대설 10개 사례의 Z_c -R 관계식을 산출하였고, 강설특성에 따른 a와 b 계수의 값의 차이를 비교 분석하였다.

강릉레이더를 통해 탐지율 80% 이상을 보이는 최대 고도는 대류형과 층운형에서 각각 3,000 m와 1,500 m로 차이를 보였다. 또한 대류형의 경우 지상에서 약 25 dBZ가 나타난 후 서서히 감소해 3,000 m에서는 약 10 dBZ를 보였다. 그러나 층운형에서는 지상에서 약 20 dBZ를 보인 후 급격히 감소하여 1,500 m에서는 약 10 dBZ 그리고 3,000 m에서는 0 dBZ를 나타냈다. 이러한 두 구름의 탐지율과 반사도 차이는 운정고도가 각각 4~8 km와 2~2.5 km라는 선행연구와 유사한 결과이다. 또한 광덕산 레이더의 경우 영동지역과의 직선거리가 100~150 km로 다소 멀기 때문에 층운형 대설사례를 탐지하지 못함을 확인하였다.

층운형 10번 사례기간동안 대관령지점 부근의 레이더 관측 공백지역을 조사하였다. 대관령지점을 기준으로 동서 횡단면의 휘도온도와 밝기온도를 비교해 보았을 때, 대관령 서쪽지역까지 층운형 구름이 덮여

있고 지상에서 강설이 관측되지만 레이더 신호가 탐지되지 않음을 확인하였다. 이는 강릉레이더를 통해 대관령 부근을 탐지할 경우 고도각에 기인한 지형적인 차폐에 의해 평창군을 포함한 영서지역의 강수에 코를 탐지하는데 한계가 있음을 의미한다.

강릉레이더의 반사도와 속초, 대관령지점의 관측 자료를 활용하여 영동대설 10개 사례의 Z_c -R 관계식을 산출하였다. 두 지점의 고도별 반사도와 지상 적설상당수량의 상관관계를 조사한 결과 속초지점의 500 m와 대관령 지점의 1,500 m가 가장 높은 관계를 나타내어 해당 고도 자료를 사용하였다. Z_c 와 R의 상관계수의 신뢰수준이 95% 이상인 사례는 속초와 대관령에서 각각 8개 사례와 6개 사례였다. 먼저 Z_c -R 관계식의 a 계수는 속초와 대관령지점에서 각각 30~116과 6~39로 속초가 높게 나타났다. 이는 두 지점의 지형이 해안과 산악으로 다르고, 고도가 다르다는 차이에 기인한 것이다. 다음으로 b 값은 두 지점 모두 약 0.4~1.7의 범위에 분포하였다. a 계수가 상대적으로 넓은 범위를 가지는 이유는 각 사례의 구름유형, 지상기온, 눈밀도 등의 차이에 기인한 것이며 강설특성에 따라서 Z_c -R 관계식을 다르게 적용해야함을 확인할 수 있었다.

지상기온에 따른 Z_c -R 관계식의 차이를 비교하였을 때, 속초에서는 영상 3°C 이상의 기온에서 비가 관측되었고, 이때 a와 b 값은 눈인 사례의 a와 b 값보다 크게 나타났다. 눈인 사례의 a와 b 값은 각각 30~116과 0.7~1.0에 분포하였다. 대관령지점에서는 6개 사례 모두 눈으로 관측되었고 지상기온과 a, b 값은 각각 0.75와 0.87의 양의 상관관계를 보여 지상기온이 감소할수록 a와 b 값도 감소함을 확인할 수 있었다. 이 6개 사례의 지상기온과 눈밀도를 비교한 결과, 기온이 -1°C 이상인 경우에는 눈 밀도가 약 0.1 g cm⁻³인 반면 -5°C 이하에서는 약 0.05 g cm⁻³ 이하로 눈 밀도가 더 낮았다. 결론적으로 지상기온과 눈의 밀도가 증가함에 따라 a 값도 증가함을 알 수 있었다. 시간당 0.5 mm 이상의 적설상당수량을 보이는 시간의 Z_c -R 관계식을 산출한 결과, a와 b 계수는 각각 7.2~35.1과 1.0~1.5 값을 보였다. 특히 a 값은 속초와 대관령 지점에

따른 차이가 나타났고, 이는 두 지역의 지형적 차이가 지상기온, 눈의 밀도에 영향을 준 것으로 사료된다.

본 연구에서는 강릉과 광덕산 레이더의 반사도 특징과 구름 유형에 따른 차이를 비교하고, 강릉레이더와 지상관측소의 적설상당수량을 통해 Z_e -R 관계식을 산출하였다. 그 결과 강설현상에서 Z_e -R 관계식의 a와 b 계수가 다양하게 변화함을 확인하였고, 이는 지상기온, 눈밀도 등과 같은 강설특성에 기인하였다. 이로 인해 고정된 a와 b 계수를 사용하여 레이더의 정량적 강설량 추정에는 어려움이 있다. 특히 하나의 강설사례에도 대류형과 층운형 구름이 혼재되어 나타날 수 있기 때문에 위성의 운정온도와 같은 추가적인 자료를 통해 이를 분류할 필요가 있다. 즉, 레이더를 통해 정확한 강설량을 추정하기 위해서는 강설사례의 특성이 고려되어야 하며, 추후 다양한 사례에 대한 추가적인 분석이 이루어진다면 이러한 영동대설사례의 강설특성의 이해와 예측성 향상에 기여할 수 있을 것으로 기대한다.

감사의 글

이 연구는 국립기상과학원의 R&D사업인 ‘기상업무 지원기술개발연구(과제번호: NIMS-2016-3100)’의 일환으로 수행되었습니다. 또한 본 논문의 개선을 위해 좋은 의견을 제시해 주신 심사위원분들께 깊은 감사를 드립니다.

REFERENCES

- Brown, R. A., V. T. Wood, and T. W. Barker, 2002: Improved detection using negative elevation angles for mountaintop WSR-88Ds: Simulation of KMSX near Missoula, Montana. *Wea. Forecasting*, **17**, 223-237.
- Cho, Y.-H., G.-W. Lee, S.-H. Jung, H.-M. Park, J.-Y. Jung, Y.-A. Oh, G.-D. Ahn, and K.-H. Jang, 2009: Characteristics of microphysical process in snowfall case in Yeongdong region. *Proc., the Autumn meeting of Korea Meteor. Soc.*, **10**, Daegu, 162-163.
- Cho, Y.-J., and T.-Y. Kwon, 2014: Cloud-cell tracking analysis using satellite image of extreme heavy snowfall in the Yeongdong region. *Korean J. Remote Sens.*, **30**, 83-107 (in Korean with English abstract).
- Cooper, W. A., 1986: Ice initiation in natural clouds. In R. R. Braham Jr. Eds., *Precipitation Enhancement: A Scientific Challenge*. American Meteorological Society, 29-32.
- Fujiyoshi, Y., T. Endoh, T. Yamada, K. Tsuboki, Y. Tachibana, and G. Wakahama, 1990: Determination of a Z-R relationship for snowfall using a radar and high sensitivity snow gauges. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **29**, 147-152.
- Imai, J., 1960: Raindrop size distributions and the Z-R relationship. *Proc. Eighth Weather Radar Conf.*, Boston, MA, Amer. Meteor. Soc., 321-326.
- Kim, B.-W., Y.-J. Bang, and S.-H. Cho, 2002: Correlation between snowfall amount and Radar echo: about Westerly. *Atmosphere*, **12**, 126-129 (in Korean).
- Kwon, T.-Y., J.-Y. Park, B.-C. Choi, and S.-O. Han, 2015: Satellite image analysis of low-level stratiform cloud related with the heavy snowfall events in the Yeongdong region. *Atmosphere*, **25**, 577-589 (in Korean with English abstract).
- Marshall, J. S., and K. L. S. Gunn, 1952: Measurement of snow parameters by radar. *J. Meteor.*, **9**, 322-327.
- Meyers, M. P., P. J. DeMott, and W. R. Cotton, 1992: New primary ice-nucleation parameterizations in an explicit cloud model. *J. Appl. Meteor.*, **31**, 708-721.
- National Institute of Meteorological Sciences, 2014a: Research for radar snowfall rate estimation and new technologies of next generation radar. 105 pp (in Korean).
- _____, 2014b: Establishment and operation of high impact weather research center (IV). 623 pp (in Korean).
- Park, S., H.-A. Kim, J. W. Cha, J.-S. Park, and H.-Y. Han, 2014: Analysis of quality control technique characteristics on single polarization radar data. *Atmosphere*, **24**, 77-87 (in Korean with English abstract).
- Puhakka, T., 1975: On the dependence of the Z-R relation on the temperature in snowfall. Preprints, *16th Conf. on Radar Meteorology*, Houston, TX, Amer. Meteor. Soc., 504-507.
- Rasmussen, R., M. Dixon, S. Vasiloff, F. Hage, S. Knight, J. Vivekanandan, and M. Xu, 2003: Snow nowcasting using a real-time correlation of radar reflectivity with snow gauge accumulation. *J. Appl. Meteor.*, **42**, 20-36.
- Sekhon, R. S., and R. C. Srivastava, 1970: Snow size spectra and radar reflectivity. *J. Atmos. Sci.*, **27**, 299-307.
- Wetzel, M., and Coauthors, 2004: Mesoscale snowfall prediction and verification in mountainous terrain. *Wea. Forecasting*, **19**, 806-828.
- Wolfe, J. P., and J. R. Snider, 2012: A relationship between reflectivity and snow rate for high-altitude S-band radar. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **51**, 1111-1128.
- Wood, V. T., R. A. Brown, and S. V. Vasiloff, 2003: Improved detection using negative elevation angles for mountaintop WSR-88Ds. Part II: Simulations of the three radars covering Utah. *Wea. Forecasting*, **18**, 393-403.