

## 적설 관측자료 비교를 통한 정량적 SWE 산출에 관한 연구

노용훈<sup>1)</sup> · 장기호<sup>2)\*</sup> · 차주완<sup>1)</sup> · 정건희<sup>3)</sup> · 최지원<sup>1)</sup> · 하종철<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>국립기상과학원 응용기상연구과, <sup>2)</sup>기상레이더센터 레이더기획팀, <sup>3)</sup>호서대학교 건축토목환경공학부

(접수일: 2019년 4월 12일, 수정일: 2019년 6월 7일, 게재확정일: 2019년 6월 29일)

## A Study of Quantitative Snow Water Equivalent (SWE) Estimation by Comparing the Snow Measurement Data

Yonghun Ro<sup>1)</sup>, Ki-Ho Chang<sup>2)\*</sup>, Joo-Wan Cha<sup>1)</sup>, Gunhui Chung<sup>3)</sup>,  
Jiwon Choi<sup>1)</sup>, and Jong-Chul Ha<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Applied Meteorology Research Division, National Institute of Meteorological Sciences/KMA, Jeju, Korea

<sup>2)</sup>Radar Planning Team, Weather Radar Center, Seoul, Korea

<sup>3)</sup>Department of Civil Engineering, Hoseo University, Asan, Korea

(Manuscript received 12 April 2019; revised 7 June 2019; accepted 29 June 2019)

**Abstract** While it is important to obtain the accurate information on snowfall data due to the increase in damage caused by the heavy snowfall in the winter season, it is not easy to observe the snowfall quantitatively. Recently, snow measurements using a weighing precipitation gauge have been carried out, but there is a problem that high snowfall intensity results in low accuracy. Also, the observed snowfall data are sensitive depending on wind speed, temperature, and humidity. In this study, a new process of quality control for snow water equivalent (SWE) data of the weighing precipitation gauge were proposed to cover the low accuracy of snow data and maximize the data utilization. Snowfall data (SWE) observed by Pluvio, Parsivel, snow-depth meter using laser or ultrasonic, and rainfall gauge in Cloud Physics Observation Site (CPOS) were compared and analyzed. Applying the QC algorithm including the use of number of hydrometeor particles as reference, the increased SWE per the unit time was determined and the data noise was removed and marked by flag. The SWE data converted by the number concentration of hydrometeor particles are tested as a method to restore the QC-removed data, and show good agreement with those of the weighing precipitation gauge, though requiring more case studies. The three events data for heavy snowfall disaster in Pyeongchang area was analyzed. The SWE data with improved quality was showed a good correlation with the eye-measured data ( $R^2 > 0.73$ ).

**Key words:** Snowfall, weighing precipitation gauge, snow water equivalent, concentration of hydrometeor particles

### 1. 서 론

강수는 기상, 수문, 환경 분야에서 기상현상 감시, 모델 분석 및 예측 등 다양한 분야에 사용되는 중요

한 인자이다. 그러나 강수를 정확히 관측하는 일은 간단하지 않으며, 이는 과거부터 진행되어 온 도전과제였다. 더욱이 강수 형태가 고체와 같은 눈일 경우, 관측오차가 20~50%까지 크게 발생하는 문제가 나타난다(Rasmussen et al., 2012). 겨울철에 대설 현상이 발생할 경우 도로 결빙에 따른 교통 지연, 항공기 운항 중단, 시설물 파괴와 같은 재해 현상이 빈번하게 나타나기 때문에 강설 현상을 정량적으로 관측하는 일

\*Corresponding Author: Ki-Ho Chang, Radar Planning Team, Weather Radar Center, Seoul 07062, Korea.  
Phone: +82-2-2181-4802, Fax: +82-2-833-0429  
E-mail: khchang@korea.kr

은 중요하다.

문제는 강설 현상은 바람의 영향을 많이 받고, 시공간에 따른 입자모양, 크기, 밀도변화에 따라 적설량이 다르게 관측되기 때문에 정확하게 관측하는 것이 어렵다(Nitu, 2013). 또한 적설 자료는 다양한 관측오차 외에도, 결측으로 인한 자료의 불연속성도 강하게 나타난다. 강수 관측은 특정 지점의 값을 기반으로 인근 지역의 강수량을 결정하는 것이기 때문에 이러한 문제는 자료의 대표성에도 영향을 준다. 관측 지점의 수를 늘려 이러한 문제를 완화할 수는 있지만, 적설의 경우 초음파나 레이저를 이용하여 눈의 깊이를 측정하기 때문에 관측 장비가 고가이고, 장비의 이동도 간단하지 않은 한계가 있다.

세계기상기구(WMO)에서는 이러한 문제를 해결하고 정확한 강수 관측을 위해 국제적 차원에서 고체강수관측 비교검증 실험(Solid Precipitation Intercomparison Experiment, SPICE)을 수행하였다(WMO, 2012). SPICE의 목적은 다양한 자동 강설/적설 장비의 정확도를 평가하여 효과적인 관측체계를 수립하고, 정확한 적설량을 파악하는 것이었다. 그러나 눈과 비가 섞여 있는 혼합형 강수나 온도, 바람 등은 여전히 적설 관측에 대한 불확실성을 크게 하므로 이러한 문제를 해결할 방법이 필요하다(Lee, 2006; Solomon et al., 2007).

최근에는 강수 무게를 이용하여 강설량을 추정하는 방법이 직접 적설 깊이를 측정한 기존의 방법보다 정확한 것으로 밝혀지면서, 강수 관측에 무게식 우량계를 이용하고 있다(Vuerich et al., 2009). 이에 따라 적설량을 녹여 강수 깊이에 해당하는 물당량을 나타낸 적설상당수량(Snow Water Equivalent, SWE)을 결정하려는 연구가 수행되고 있다(Egli et al., 2009). 이는 SWE가 눈의 밀도와 강설 유형에 따른 불확실성에 따라 과학적 강설량 추정의 기준값으로 활용되고 있기 때문이다. 국내의 경우 사각의 중량 측정 적설판을 이용하여 적설 무게를 관측하였으나(Lee and Kim, 2007) 측면부 하중에 대해 오차가 발생하는 문제가 있어 원형 구조의 적설판을 이용하여 관측 성능을 개선한 사례가 있다(Lee and Kim, 2009). 이는 적설의 융해와 결빙에 따른 오측의 영향을 최소화하여 적설 중량 관측의 정확성을 개선하고 SWE의 관측과 그 자료 활용에 기여하였다.

SWE 활용이 증가함에 따라 정확한 강설 공간분포를 추정하기 위해 레이더 자료와의 관계를 분석한 연구가 활발히 수행되고 있다(Rasmussen et al., 2003). 기본적으로 레이더 반사도와 강설강도 관계를 나타낸 Z-S 관계가 이용되고 있지만, 강설 현상이 지형 및 기후조건에 따라 다르게 나타나기 때문에 주로 계절값(Gunn and Marshall, 1958)을 이용하여 결정한 관계식으로 적설량을 추정하고 있다. 이에 따라 레이더 강

설량과 관측값의 차이가 크게 나타나는 문제가 있다. 레이더 자료는 원격 탐사된 자료이기 때문에 관측오차가 크게 나타날 수 있으나 비교적 공간적으로 연속된 자료이기 때문에 자료의 분산이 크지 않다. 그러나 지상 관측 자료는 강설 사례와 지형에 따라 오측, 결측의 문제가 크게 나타나기 때문에 SWE 자료의 QC로 품질관리된 적설량 D/B 구축이 필요하다. 아울러 대설 현상과 같이 눈이 많이 오는 사례에 대해서도 정확한 적설 관측 자료가 필요시 되고 있다. 이는 적설 피해 사례와 적설량과의 관계를 결정할 수 있다면, 대설 현상으로 인해 발생할 수 있는 각종 재해에 대비할 수 있는 방안을 마련할 수 있기 때문이다. 대설기간에도 바람, 온도 습도 등에 따라서 관측된 적설량이 다르게 나타날 수 있기 때문에 SWE를 이용할 경우 자료를 QC 처리하여 신뢰도를 확보할 필요가 있다.

이에 본 연구에서는 적설 관측 자료 비교를 통해 광학우적계(Particle Size and Velocity disdrometer, Parsivel) 자료를 이용하여 무게식 우량계 Pluvio로 관측된 SWE 자료의 품질을 개선하려 하였다. 과거 발생한 대설 사례에 대해 관측된 자료를 QC 처리하였고, 개선된 자료와 재해 규모 및 목측 자료의 관계를 분석하여 적설 사례에 대한 SWE 자료의 정확성을 평가하였다. 2절에서는 국립기상과학원 산하의 적설관측 장비와 관측 자료의 특성을 정리하였고, 3절에서는 광학우적계를 이용하여 적설량을 추정하는 방법에 대한 이론적 배경을 정리하였다. 4절에서는 Pluvio 자료 QC를 위한 알고리즘을 소개하였다. 5절에서는 대관령 지역에서 과거 발생한 3개 대설 사례에 대해 관측된 자료를 QC 처리하고 그 결과를 분석하였다. 아울러 6절에서는 결과를 요약하고, 향후 추가로 필요한 연구와 개선 방향에 대해 논의한다.

## 2. 적설 관측 장비 및 관측 자료

### 2.1 관측 장비

국립기상과학원은 겨울철 강설 관측과 기상조절 실험 검증 및 구름물리 연구 수행을 위해 2006년 11월부터 강원도 평창군 대관령면에 구름물리선도센터(Cloud Physics Observation Site, CPOS; 37.69 N, 128.76 E)를 설립하여 운영해 왔다. CPOS는 해발 843 m인 고원지대에 위치하고 있으며, 이 지역 주변은 동해와 인접하고 태백산맥 자락에 위치하고 있기 때문에 지형적 요인으로 다양한 재해 기상현상이 발생하기 쉬운 특징이 있다. CPOS에는 에어로졸-구름-강수 관계를 분석하기 위해 도입된 첨단 기상관측장비들이 설치되어 있고, 대표적으로는 나노입자계수기(Scanning Nanoparticle Spectrometer, SNPS), 안개입차측정기(Fog Monitor),

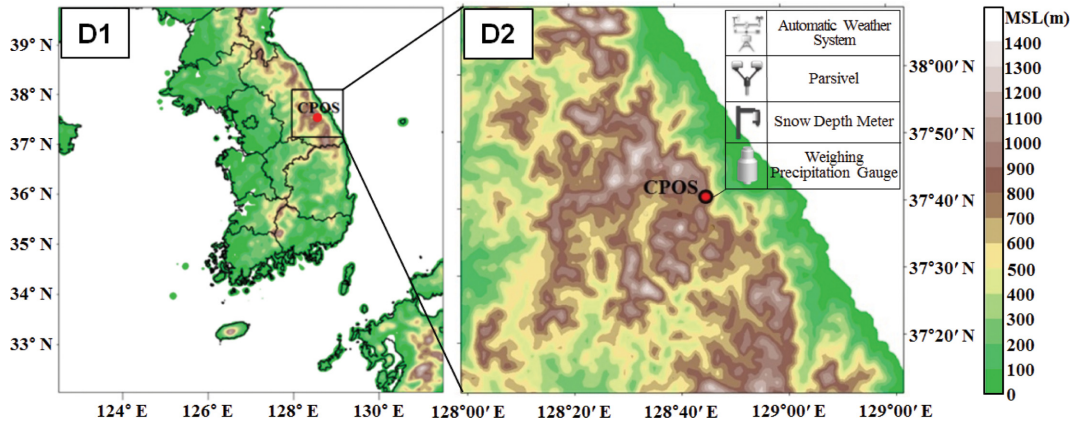


Fig. 1. The model domain and topography of the CPOS (Cloud Physics Observation Site) region.

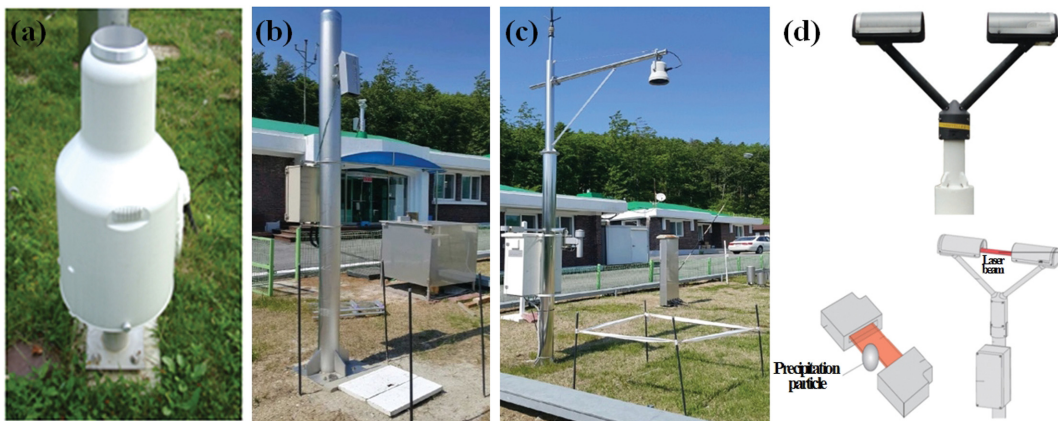


Fig. 2. Observation system of CPOS. (a) Pluvio, (b) laser snow meter, (c) ultrasonic snow meter, (d) Parsivel and its precipitation observation sensor.

광학우적계, 강수입자측정기(Meteorological Particle Spectrometer, MPS), 연직강우레이더(Micro Rain Radar, MRR), 구름자동관측시스템(Automatic Cloud Observation System, ACOS) 등이 있다. 강수 및 적설 관측 장비에는 AWS, 전도식/무계식 우량계, 적설계, 영상 적설계가 설치되어 있다. AWS는 타워로 설치되어 있어 강수 기간 동안 고도별 풍향, 풍속, 기온, 습도, 기압 정보를 관측할 수 있다. 이러한 다양한 관측 장비 중에서 본 연구에서는 무계식 우량계, 광학우적계, 적설계, 그리고 AWS 자료를 분석하였다. 기존의 CPOS 위치와 주변 지형도 및 본 연구에서 적용한 장비 목록을 그림으로 나타내면 Fig. 1과 같다.

각 관측 장비의 설치 모습을 나타내면 Fig. 2와 같다. 무계식 우량계는 Fig. 2a와 같은 OTT사의 Pluvio가 설치되어 있으며, 이는 현재 미국과 유럽에서 널리 사용되고 있다. Pluvio는 전도형 우량계로 측정하

기 어려운 적은 양의 강수량을 파악할 수 있고, 단시간에 내린 강수를 연속적으로 관측할 수 있는 이점이 있어 SWE를 직접 관측할 수 있다. 적설계는 Figs. 2b, c와 같은 레이저 적설계와 초음파 적설계가 설치되어 있다. 적설계는 레이저나 초음파가 눈에 반사되어 돌아오는 시간을 환산하여 적설량을 측정한다. 초음파 적설계는 전화선만으로도 실시간 측정이 가능하며, 레이저 적설계는 관측할 때 주위 온도차의 영향을 적게 받는 이점이 있다.

강수입자의 특성을 파악할 수 있는 광학우적계는 Fig. 2d와 같다. 광학우적계는 센서에서 2차원 배열의 레이저를 송수신하며 이 사이로 통과하는 강수 입자로부터 얻어진 신호를 환산하여 강수 입자 크기 및 개수, 낙하속도를 직접 관측하며, 이를 이용하면 반사도, 강수강도, 강수입자 직경 분포 등의 정보를 산출한다. 광학우적계는 지상에 내린 눈을 직접 관측하지

는 못하지만, 강수입자 단위로 개수 및 크기를 측정하여 레이저나 초음파 적설계보다는 강수를 감지하는데 민감하다. 또한 입자 크기 정보를 이용하면 강수 유형도 구별할 수 있어 원격으로 고산지역에서의 강수 현상(눈, 비, 우박 등)을 실시간으로 판단할 수 있는 이점이 있다.

## 2.2 관측 자료

본 연구에서는 CPOS의 관측 장비 중 레이저 적설계, 초음파 적설계, Pluvio, 광학우적계 자료를 분석하였다. 적설계는 레이저식과 초음파식 모두 10분 간격으로 강설 현상을 관측하고 있으며, 매 시점별로 누적된 적설량을 mm 단위로 표출한다. Pluvio는 1분 간격으로 강수(SWE)를 누적 관측한다. Pluvio SWE (mm)에 10배를 하여 적설량을 추정하여 분석한다. 이러한 강우량에서 적설량으로의 10배 환산은 전형적으로 사용하는 근삿값이나(Baxter et al., 2005), 눈입자의 밀도 등 환경에 따라 상당한 변동성이 있을 수 있다(Henry, 1917; LaChapelle, 1962; Potter, 1965; Grant and Rhea, 1974; Doesken and Judson, 1996; Super and Holroyd, 1997; Judson and Doesken, 2000; Roebber et al., 2003). 본 연구는 자동적설관측장비들의 적설 관측값과의 일차적인 정성적 성능비교 평가를 위해 단순 10배 추정된 것으로, 정량적 분석과는 차이가 있을 수 있다.

광학우적계도 1분 간격으로 단위 부피당 강수 입자수(# m<sup>-3</sup>)와 입자 크기(mm)를 관측하며, 관측 자료를 이용하면 강수입자직경분포를 결정할 수 있다. 각 장비에서 관측된 자료의 특성을 분석하기 위해 2017년 겨울철에 관측된 자료를 예로써 Fig. 3에 나타내었다. Figure 3에서 위의 그림은 풍속과 상대습도 변화를 나타내고, 아래 그림은 Pluvio SWE로 부터 환산한 적설량(하늘색 △), 레이저 적설계(분홍색 □), 초음파 적설계(+), 광학우적계로 관측된 강수입자(노란색 ○), 온도(파란색 실선), 0°C 기준선(검은색 점선)을 나타낸다. 각 자료는 10분 간격 별로 나타냈으며, 적설량은 10분 동안 증가한 양을 나타내고 강수 입자는 10분 동안 누적된 값을 나타낸다. 그림은 레이저/초음파 적설계, Pluvio, 광학우적계가 모두 관측된 사례로 2017년 2, 3, 11, 12월 자료이다.

Figure 3a는 2017년 2월 관측 자료를 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이, 강수 입자는 다른 자료에 비해 가장 관측이 많이 되었고 이를 통해 광학우적계가 강수 현상을 민감하게 감지할 수 있음을 알 수 있다. Pluvio는 2월 전반부에는 관측되지 않았지만, 후반부에서는 강수 입자의 증감 패턴과 유사하게 나타났다. 레이저 적설계는 일부 구간에서만 관측되었고, 자료의 불연속성이 다른 자료에 비해 크게 나타났다. 초

음파 적설계 자료는 관측 기간에 다양한 값이 나타나서 연속적인 것처럼 보이나 강설량의 증감 패턴이 명확하게 나타나지 않은 문제가 있었다. 전반적으로 Pluvio가 적설계 보다는 강설 관측에 효과적인 것으로 나타났다. 그러나 Pluvio가 관측되지 않은 구간에서 레이저나 초음파 적설계가 관측된 부분은 자료의 품질관리가 필요한 것을 알 수 있다. 이러한 구간에서는 풍속이 2 m s<sup>-1</sup> 이상으로, 강한 바람에 의해 Pluvio가 제대로 관측되지 않은 것을 알 수 있다. 온도는 2월 동안 영상과 영하가 반복적으로 나타났는데, Pluvio가 관측되었을 때는 대체로 영하로 나타났다. 또한 습도는 강수 현상이 감지되었을 때 거의 100%에 가깝게 나타났다.

Figure 3b는 3월 사례로 2월 보다는 적설량이 더 많은 것으로 나타났다. 그러나 3월의 경우에는 2월보다 Pluvio와 적설계 관측 자료 모두 강수 입자의 증감을 잘 모의하는 것으로 나타났다. 특히, 순간 적설량이 5 mm 이상 크게 나타날 때 레이저 적설계의 관측이 우수한 것으로 나타났다. 초음파 적설계는 다양한 값이 나타나는 문제가 여전히 있었지만, 레이저 적설계는 불연속적이면서도 Pluvio 자료와 유사한 관측 경향을 나타냈다. 대체로 적설 관측이 적합하게 나타난 구간에서는 바람이 2 m s<sup>-1</sup> 이하로 작게 나타났다. 온도는 Pluvio가 관측되었을 때는 대체로 0°C 부근으로 나타났기 때문에 혼합형 강수 사례인 것으로 사료된다.

11월 사례를 나타낸 Fig. 3c를 보면 전반부에는 기온이 영상으로 강우가 나타난 것을 알 수 있고, 후반부로 갈수록 기온이 영하로 나타난 것을 알 수 있다. 여기서는 Pluvio가 강수 입자의 증감과 잘 일치하나, 레이저와 초음파 적설계 자료가 비교적 작게 나타나는 경향이 있었다. 이는 고온으로 인한 강우 발생으로 인한 것으로 판단된다. 11월 전반부에는 레이저 적설계가 크게 나타났지만 Pluvio가 전혀 관측되지 않는 현상도 나타났는데, 강수 입자와 풍속을 비교해보면 바람의 영향으로 Pluvio가 제대로 관측되지 않은 것을 알 수 있다. 후반에는 Pluvio가 레이저나 초음파 적설계보다는 많이 관측되었지만, 강수 입자의 증감 패턴을 제대로 모의하지 못하는 구간도 많이 나타났다. 대체로 이러한 구간에서는 순간 적설량이 3 mm 이하로 작게 관측 되었거나 2 m s<sup>-1</sup> 이상의 강한 바람의 영향을 받은 것으로 나타났다.

Figure 3d는 2017년 12월 사례를 나타낸 것으로 이 기간에는 Pluvio의 이전 및 점검에 따라 12일까지만 관측 자료가 저장되어 있다. 온도는 전반적으로 영하를 나타냈고, 강수 입자와 Pluvio와 적설계 자료의 변동이 유사하게 나타났다. 레이저 적설계 자료는 Pluvio보다 크게 관측된 구간도 있었지만, 자료의 불연속성은 여전히 나타났다. 초음파 적설계 자료는 강수 입

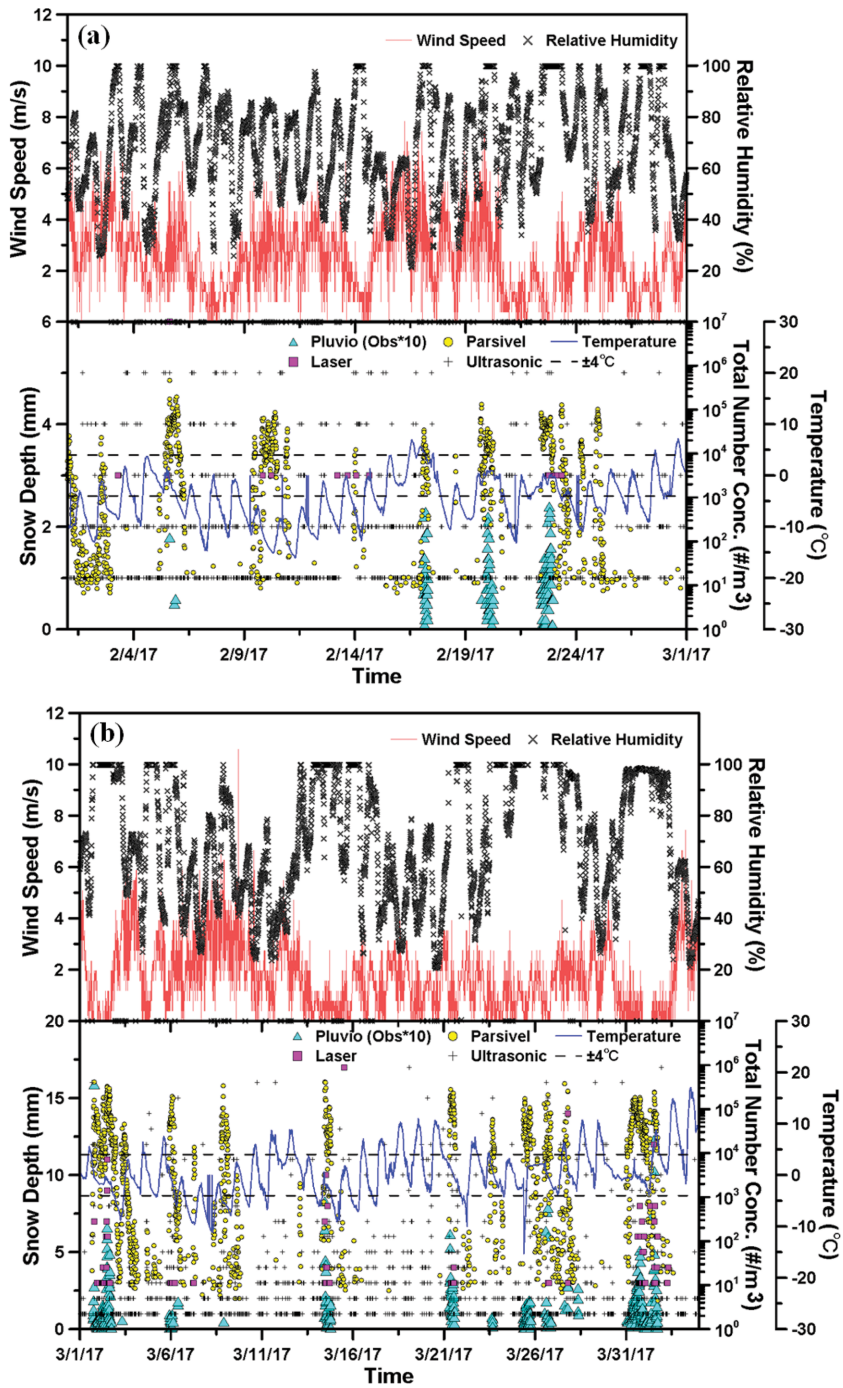


Fig. 3. Observation data of snow meter, Pluvio, Parsivel in CPOS, 2017. (a) February, (b) March, (c) November, (d) December.

자가 작게 나타나도 관측되는 문제가 있었는데, 이는 낮은 온도로 인해 강설 기간 이후에도 눈이 녹지 않음에 따라 오측된 것으로 볼 수 있다. 풍속은 Pluvio

가 관측된 구간에서는  $2\text{ m s}^{-1}$  내외로 작게 나타났다. 전반적으로 Pluvio가 적설계보다 지면으로의 유입차원에서 강수 관측에 적합한 것으로 판단된다.

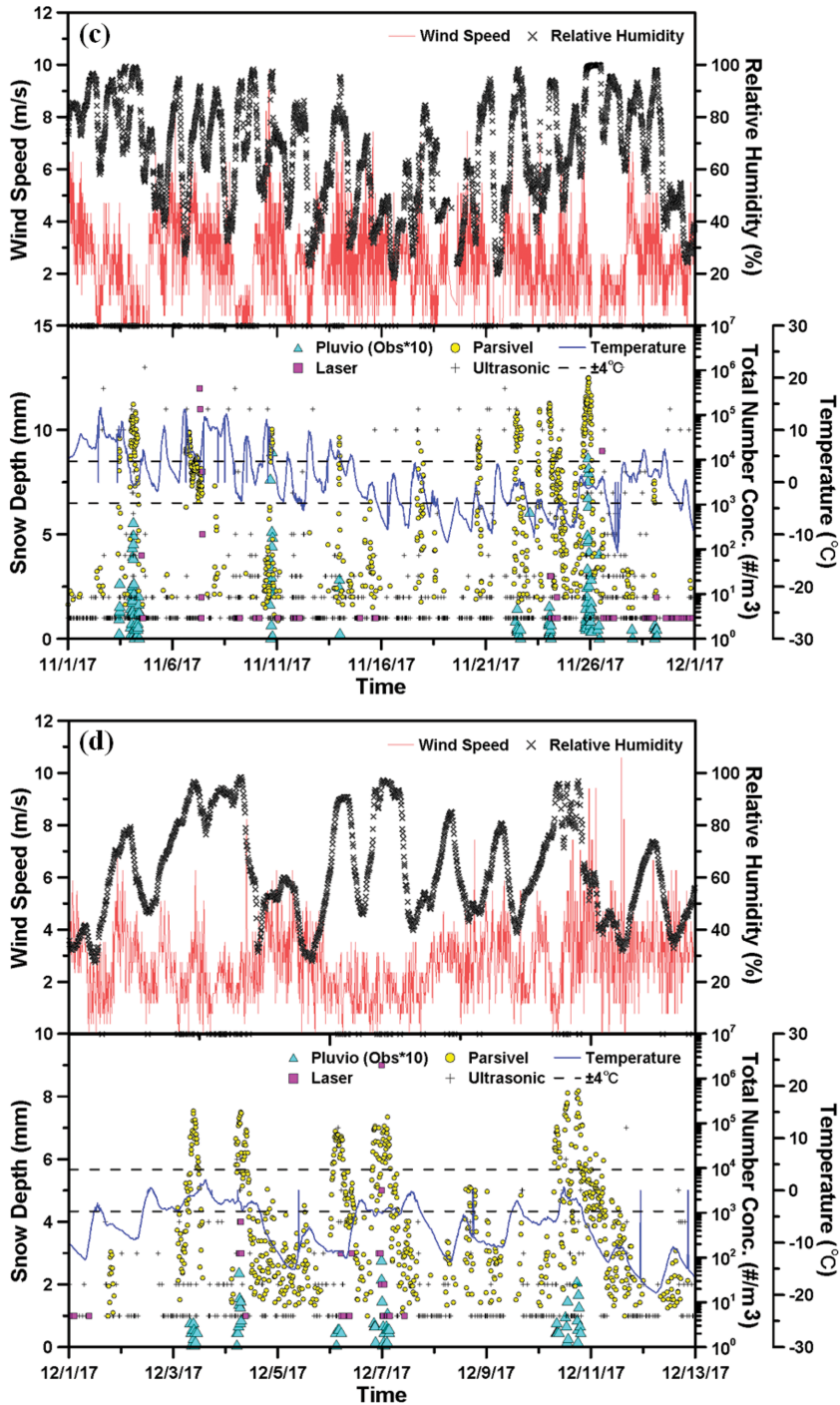


Fig. 3. Continued.

Figure 3에 나타난 강수 입자와 적설관측 자료의 관계를 분석하기 위해 자료들의 상관관계를 Fig. 4에 나타냈다. 그림은 2017년 2, 3, 11, 12월 모든 자료를

이용한 결과를 나타내고 있으며,  $\pm 4^{\circ}\text{C}$ 를 기준으로 하여 강수를 구분하였다.  $0^{\circ}\text{C}$ 를 기준으로 강수를 구분할 경우 혼합 사례의 영향으로 자료간 편차가 크게

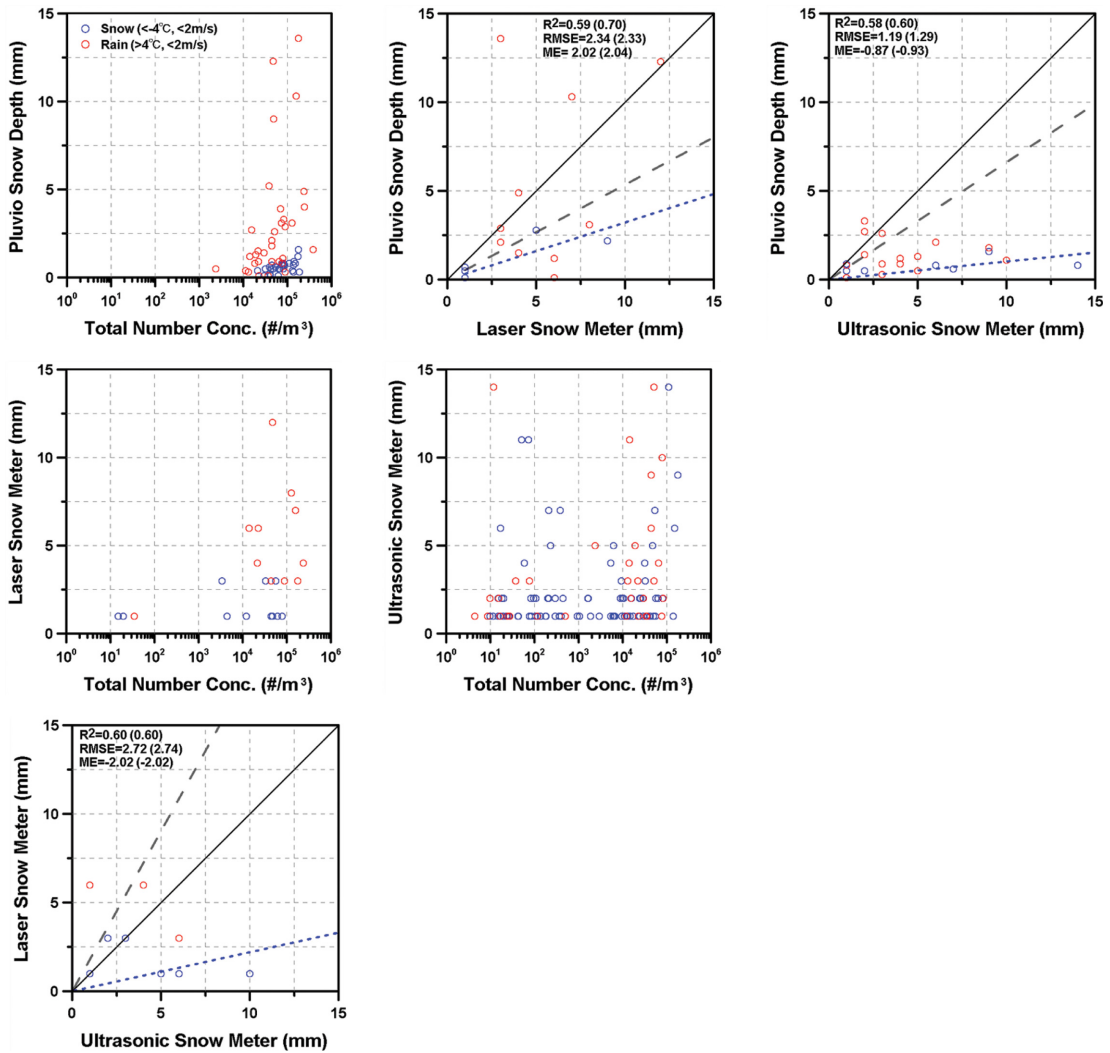


Fig. 4. Comparison of data correlation of snow meter, Pluvio, Parsivel in CPOS, 2017.

나타날 수 있기 때문에, 본 연구에서는  $\pm 4^{\circ}\text{C}$ 를 기준으로 하였다. 즉, 온도가  $-4^{\circ}\text{C}$ 보다 낮을 때 관측된 사례를 강설로,  $4^{\circ}\text{C}$ 보다 높을 때 관측된 자료를 강우로 판단하였다. 또한 바람의 영향을 고려하여 풍속이  $2\text{ m s}^{-1}$ 보다 작을 때 관측된 값을 기준으로 하였다. 본 연구에서는 온도가  $-4\sim 4^{\circ}\text{C}$ 일 때와 같이 혼합형 강수 사례는 강설 입자의 밀도 변화에 따른 관측 자료의 불확실성이 크게 나타나기 때문에 따로 고려하지 않았다.

Figure 4에서 상단의 3개 그래프는 Pluvio로 환산한 적설량과 강수 입자수, 레이저/초음파 적설계로 관측된 적설량을 비교한 것이다. 다음으로는 각 적설계 자료와 강수 입자를 비교한 것이고, 마지막 그림은 적

설계 자료들의 관계를 나타낸 것이다. 강설과 강우 사례를 비교하면 대체로 강우 사례의 편차가 크게 나타난 것을 알 수 있다. 강수 입자와 Pluvio 또는 적설계로 관측한 적설량과의 관계는 뚜렷하게 나타나지 않았지만, 대체로 강수 입자가 많을수록 적설량도 많아지는 경향을 나타냈다. 강설 사례에 대해 레이저 적설계와 Pluvio 관계는 자료 수는 많지 않지만, 비교적 선형으로 나타났고, 강우 사례에 대해서는 편차가 매우 크게 나타났다. 초음파 적설계 자료는 Pluvio 보다 매우 크게 나타났지만, 강설 사례에 대해 레이저 적설계 자료와의 관계보다 더 선형적으로 나타났다. 레이저 적설계와 초음파 적설계 자료 간에는 상관관계가 낮게 나타났다. 강우 사례에 대해 레이저 적설계

자료가 초음파 적설계 자료보다 크게, 강설 사례에 대해서는 초음파 적설계 자료가 레이저 적설계 자료보다 크게 나타났다. 이러한 결과는 Fig. 3에서 강수 입자가 관측되었을 때 적설계가 결측이나 오측이 많이 발생한 결과를 통해서도 확인할 수 있다.

### 3. 광학우적계를 이용한 적설추정

국립기상과학원은 광학우적계로 관측된 강수 입자 정보를 이용하여 적설량을 추정하였다(NIMS, 2018). 기본적으로 강수입자 크기분포를 이용한 Ulbrich(1983)의 모멘트 식을 적용하였으며, 이는 식 (1)과 같다.

$$M_n = \int_0^{\infty} D^n N(D) dD \quad (1)$$

여기서,  $M_n$ 은 강수입자 크기와 및 수농도에 대한  $n$ 차 모멘트,  $D$ 는 강수입자의 중간 직경(mm),  $N(D)$ 는 강수입자크기별 수농도( $m^{-3}mm^{-1}$ )이다. 식 (1)을 이용하면 강설 입자 크기 분포(Snow Particle Size Distribution, SPSD)를 규명할 수 있을 뿐만 아니라 입자의 성장 및 강수강도의 정보를 산출할 수 있다.

국립기상과학원은 구름물리선도센터, 용평, 목포에서 2012년부터 2014년까지 광학우적계로 관측된 강설 입자 자료 중 기온이  $-5^{\circ}C$  이하, 풍속이  $5 m s^{-1}$ 인 사례를 분석하여 식 (1)의 모멘트 차수를 결정하였다. 각 지점별 한 시간 누적자료와 식 (1)로 산정된 모멘트를 회귀분석하여 강설 입자를 이용하여 적설량을 추정할 수 있는 방법을 제안하였다. 국립기상과학원은 추정한 적설량을 Estimated Snow Depth (ESD)라고 하였고, 이는 식 (2)와 같이 나타난다.

$$ESD = A \times M_n \quad (2)$$

여기서,  $A$ 는 관측자료와 모멘트를 회귀분석하여 얻어진 계수이다. 국립기상과학원은 관측 자료를 분석하여 세 개 지점에 대한  $A$ 의 평균을  $2.21 \times 10^{-4} mm^{1.53}$ 으로, 그리고  $n$ 의 평균 2.47로 결정하였다. 이들은 ESD를 관측자료와 비교하여 두 자료의 상관성이 높게 나타날 수 있음을 알았고, 기온이 낮고 풍속이 강하지 않다면 관측자료와 비교하여 ESD의 품질이 우수하게 나타날 수 있음을 확인하였다.

### 4. 무게식 우량계 자료 QC 알고리즘

2장의 적설자료 비교 분석을 통해 Pluvio SWE 자료가 적설계보다 우수하게 관측되거나 자료의 품질관리가 필요한 것을 확인하였다. 정량적 SWE를 결정하기 위해 본 연구에서는 적설계보다 강수 관측 감도가 우수하고 정밀한 광학우적계를 이용하여 Pluvio 자료를

QC 처리하였다. Figure 3에서 확인한 것처럼 레이저 적설계와 초음파 적설계 자료는 강수 사례와 크기에 따라 관측 자료의 변동이 크게 나타나기 때문에 먼저 광학우적계 자료만을 이용하여 무게식 우량계 자료를 QC 처리하려 하였다. 물론, 적설 관측에는 온도, 바람, 습도의 영향도 무시할 수는 없으나(Schmidt, 1982) 본 연구에서는 먼저 관측자료의 특성이 SWE 결정에 미치는 영향을 평가하고자 하였다.

본 연구에서는 3단계 과정에 걸쳐 광학우적계로 관측된 강수 입자 수를 이용하여 Pluvio SWE 자료를 품질관리 하는 방법을 제안하였다. 각 과정은 크게 단위 시간 당 관측된 SWE를 결정하는 단계, 자료의 노이즈를 제거하는 단계, 강수입자 유무에 따른 강수/무강수 단계를 구분하는 과정으로 되어 있으며, 각 조건을 만족하지 않는 경우 자료를 flag 처리하였다. QC 방법을 각 단계별로 구분하여 정리하면 다음과 같다.

먼저, 1단계에서는 Pluvio 관측 자료에서 임의 시간 동안의 SWE 변화량을 결정하는 단계로 다음 식 (3)을 이용하여 결정할 수 있다.

$$Plu(t) = Plu(t) - Plu(t - \Delta t) \quad (3)$$

여기서,  $Plu(t)$ 는 Pluvio로 관측된 SWE,  $\Delta t$  임의 시간으로 보통 10분을 적용한다. 식 (1)은 1분 누적으로 관측된 Pluvio 자료에서 매시간 증가한 신적설량을 확인하기 위한 것으로 이를 이용하면 임의 시간 동안 증가한 SWE를 결정할 수 있다.

2단계는 자료의 노이즈를 제거하는 단계로 먼저 SWE가 0 mm 이상인 부분을 분류한다. 이는 강수 현상이 나타나지 않을 때 기존에 Pluvio에 쌓였던 수량이 자연적으로 증발함에 따라 1단계에서  $\Delta t$  시간 동안의 SWE 변화가 음으로 나타난 부분을 제외하려는 것이다. 이러한 현상은 주로 강수 기간이 종료되고 무강수 기간으로 전환될 때 나타나나, 강수 기간 중 무강수 기간이 오래 나타날 때도 발생하기 때문에 품질관리가 필요하다. 이러한 조건에 위배되어 자료가 음의 값으로 나타나는 부분은 flag 1 ( $f=1$ )로 자료를 '-99.9'로 처리하였다.

다음으로는 임의 시간 동안 증가한 SWE가 과도하게 나타난 부분을 제거하기 위해 10분 동안 증가한 SWE가 30 mm보다 크게 나타날 경우 이를 확인하고 제거하도록 하였다. 기준값  $30 mm 10 min^{-1}$ 은 과거 강원도 지역에서 관측된 강수 사례를 참고하여 결정한 값이다. 강원도 강릉에서는 2002년 8월 태풍 루사의 영향으로  $100.5 mm h^{-1}$ 의 강수가, 2014년 2월에는 강한 동풍의 영향으로 9일 동안 적설량이 110 cm가 넘는 사례가 나타났다(KMA, 2002, 2014). 기록적인 강수 현상으로 인하여 시간당 100 mm 이상의 강도가 기록 되었는데, 본 연구에서는 이 값으로 환



산한 10분 평균 약 16.7 mm 강수를 강원도 지역의 최대 강우강도로 결정하였다. 여기에 재해 위험을 고려하여 2배 정도로 높게 설정한 30 mm 10 min<sup>-1</sup>을 SWE가 관측될 수 있는 최대 상한값으로 선정하였다. 따라서 SWE가 10분 동안 30 mm보다 크게 나타났을 때는 관측에 다른 요인이 영향을 주었을 것으로 판단하여 오측으로 결정하고, flag 2 (f=2)로 자료를 '-99.9'로 처리하였다. 적설 메카니즘 차원에서 포화 수증기압 등의 차이가 크지만 여름철의 최대 강우강도를 이용한 것은, 최대한 관측자료를 보존하며 일시적으로 과도 오측된 SWE 노이즈만을 제거하기 위함이다.

3단계는 광학우적계로 관측한 강수 입자와 비교하여 Pluvio SWE 자료를 QC 처리하는 단계로 먼저 최소한의 강수 입자가 관측된 부분을 기준으로 강수 현상을 결정한다. 이는 고정밀의 광학우적계 자료와의 비교를 통해 SWE의 이상 유무를 확인하려는 것이다. 본 연구에서는 강수 유무를 판단할 수 있는 최소 입자 수농도를 10 m<sup>-3</sup>로 결정하였다. 이는 Fig. 3과 같이 관측 자료에서 강수 입자가 최소 8~10까지 관측될 수 있고, 이 기간에도 적설 자료가 관측되는 점을 고려하여 강수 입자 10개를 강수 판단의 하한치로 설정한 것이다. 따라서 다음 조건을 만족하는 자료를 강수로 결정하였다.

$$Par(t) > 10 \text{ m}^{-3} \text{ and } Plu(t) = 0 \text{ m} \quad (4)$$

여기서,  $Par(t)$ 는 광학우적계로 관측된 강수 입자 수를 나타낸다. 식 (4)를 이용하여 강수 사례를 분류하고, 이 외에 강수 입자 수가 10보다 작거나 Pluvio가 관측되지 않는 경우는 flag 3 (f=3)으로 자료를 '-99.9'로 처리하였다.

반면, 광학우적계와 Pluvio 자료가 모두 관측되지 않은 경우는 무강수로 판단하여 0으로 관측된 부분을 보전하였다. 이러한 경우는 두 자료가 모두 관측되지 않는 경우로 오측의 영향이 있을 수도 있으나 그 기간이 지속적으로 나타나기 때문에 실제로 강수가 발생하지 않는 사례로 분류한 것이다. 식 (4)와 같이 분류 조건을 나타내면 다음과 같다.

$$Par(t) = 0/\text{m}^3 \text{ and } Plu(t) = 0 \text{ mm} \quad (5)$$

이와 같은 3단계 과정으로 구성된 알고리즘을 이용

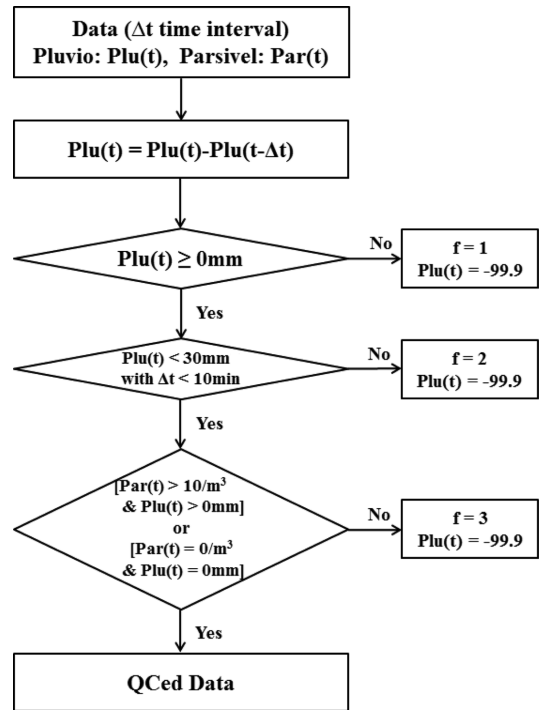


Fig. 5. QC algorithm for Pluvio SWE data in this study.

하여 본 연구에서는 Pluvio 자료를 QC 처리하였고, 제시한 방법을 알고리즘으로 나타내면 Fig. 5와 같다. 이러한 방법은 광학우적계 자료를 무조건 참이라고 가정하여 접근한 것이 아니라 강수 현상이 발생할 수 있는 최소한의 조건을 고려한 것이다. 본 연구의 목적은 강수 입자와 Pluvio 자료를 비교하여 두 자료의 이상을 파악하고 이를 통해 정량적인 SWE를 결정하려는 것이다.

### 5. 적용사례

본 연구에서는 3장에서 제안한 무게식 우량계 QC 알고리즘을 이용하여 CPOS에서 관측된 과거 강수사례의 자료를 정립하려 하였다. 강수 사례는 2008~2014년까지 강원도 평창군 지역에서 대설로 인한 막대한 시설물 파괴 비용이 발생했던 사례 중에서 선정하였다. Table 1은 소방방재청(National Emergency Management

Table 1. Cases of heavy snowfall disaster and its property damage (USD) in Pyeongchang region.

Cases	Vinyl house	Cattle Shed	Other facility	Total
Feb. 10~16, 2010	492,970	0	0	492,970
Nov. 29~Dec. 4, 2011	792,947	0	39,783	832,730
Jan. 20~22, 2013	1,173,115	262,993	262,363	1,698,471

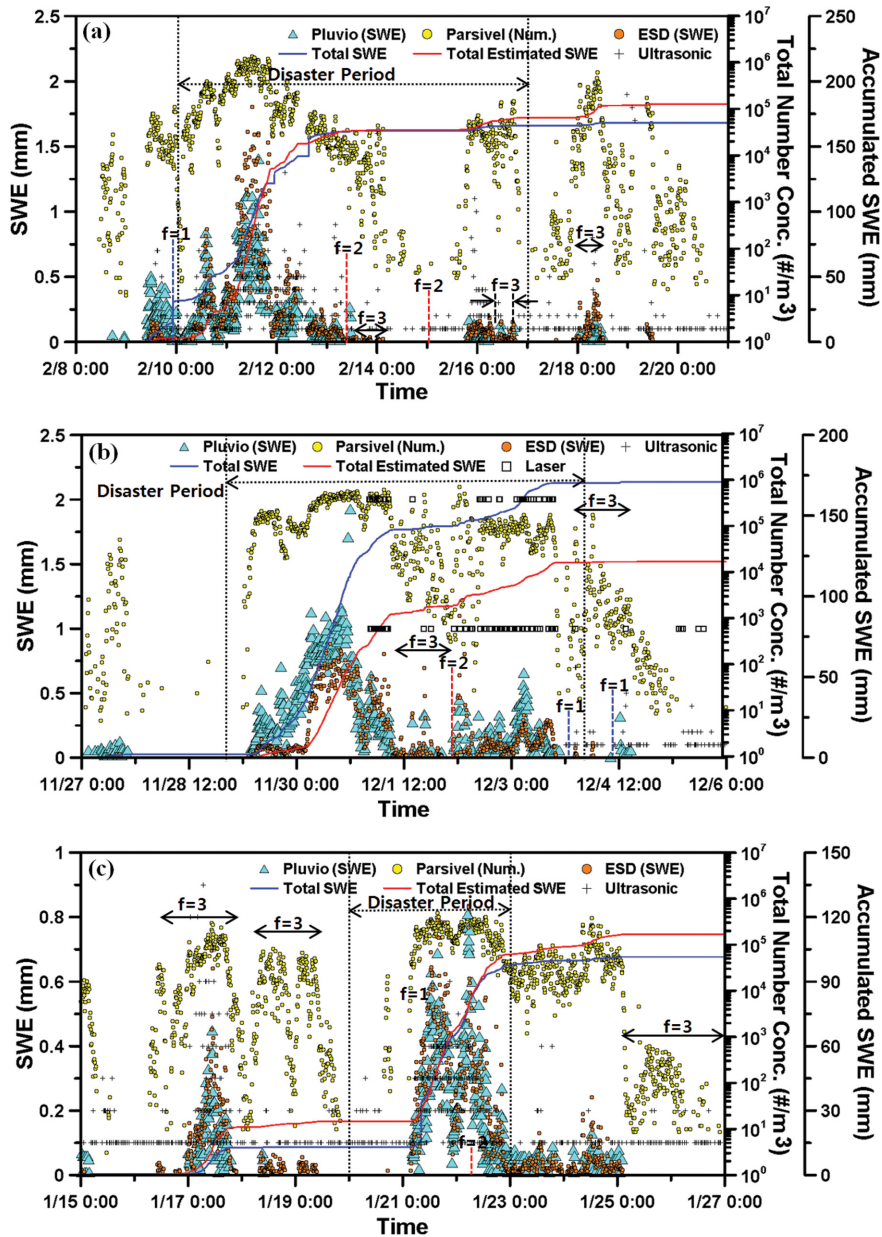


Fig. 6. Comparison of QCed Pluvio SWE and estimated SWE by Parsivel for the three cases of heavy snowfall event.

Agency, NEMA)의 재해연보에 나타난 대설 피해 사례 중 최소 1억 원(\$100,000) 이상의 막대한 피해가 발생한 사례를 정리한 것으로, 대체로 비닐하우스 붕괴로 인한 피해가 크게 영향을 미친 것을 알 수 있다. 본 연구에서는 Table 1과 같이 2010년 2월, 2011년 11월, 2013년 1월 3개 사례를 선정하였다.

선정한 3개 사례에 대해 관측된 광학우적계 강수 입자 자료를 이용하여 Pluvio SWE를 보정한 결과는

Fig. 6과 같다. 그림에는 QC 처리된 SWE 자료 외에 강수 입자를 이용하여 추정된 SWE, 초음파 적설계와 레이저 적설계로 관측된 값을 이용하여 산정한 SWE를 서로 비교할 목적으로 함께 나타냈다. 강수 입자를 이용하여 SWE를 결정할 때는 ESD 추정식을 적용하였다(3절; NIMS, 2018). 각 자료는 10분 간격으로 관측된 자료이며, Pluvio SWE와 강수 입자로 추정된 SWE는 누적값을 함께 나타냈다(각각 Total SWE,

Total Estimated SWE). 세 개 사례에 대해 누적 SWE는 100~200 mm로 이를 적설로 환산하면 재해 기간 동안 강설량이 1 m 이상으로 크게 나타난 것을 알 수 있다. 본 연구에서는 Fig. 5의 알고리즘을 적용하는데 있어 각 QC 조건을 만족시키지 못해 flag 처리된 부분을 Fig. 6에 함께 나타냈으며, 이를 통해 개선된 SWE 자료를 평가하였다.

Figure 6a는 Table 1에서 세 번째로 피해 사례가 크게 나타난 2010년 2월 10~16일에 관측된 Pluvio SWE 자료를 QC 처리한 결과이다. 2월 10일에서 12일까지 SWE가 크게 증가하는 것으로 나타났으며, 최대 1.41 mm(적설량 14.1 mm)로 임계값 30 mm 범위 내의 값으로 관측된 것을 알 수 있다. 12일 이후 SWE는 감소하는 것으로 나타났고, 13일 12시부터 15일 20시까지는 SWE가 관측되지 않았다가 이후 16일 오후까지 0~0.25 mm의 SWE가 관측된 것으로 나타났다. 총 누적 SWE는 168.25 mm로 누적 적설량이 1.68 m 이상 크게 관측된 것을 알 수 있다. 강수 입자 수는 거의 전 기간 동안 104 m<sup>-3</sup> 이상으로 연속적인 것처럼 나타났다. 강수 입자를 이용하여 환산한 SWE는 총 1.82 m로 관측값보다 좀 더 크게 나타났다. 그러나 누적된 SWE의 증가 양상을 비교하면 환산값과 관측값이 좋은 일치치를 보임을 알 수 있다. SWE가 관측되지 않았던 구간은 flag 3으로 처리된 것을 알 수 있다. 이는 강수 입자는 많이 나타나는데 반해, SWE가 관측되지 않은 것으로 캐핑이나 바람에 의한 날림 등이 관측에 영향을 준 것으로 판단된다. 동일 기간에 관측된 초음파 적설계 자료를 비교하면 이를 확인할 수 있다. 본 연구에서는 알고리즘을 통해 자료의 이러한 오측 부분을 처리할 수 있었다. 아울러, flag 1과 2로 분류된 자료의 노이즈는 일부 시점에서만 나타났고, 자료에 영향을 크게 미치지 않는 것을 알 수 있었다. f3 지점 부근에서 QC된 Pluvio 누적 SWE는 변동이 거의 없으나, Parsivel 누적 SWE는 증가 피크가 잘 나타나고 있다.

Figure 6b는 두 번째로 피해가 크게 나타났던 2011년 11월 29일에서 12월 1일 관측된 자료를 QC 처리한 결과이다. 이 기간에는 SWE가 최대 1.93 mm(적설량 19.3 mm)로 Fig. 6a의 결과와 동일하게 임계값 범위로 나타났다. SWE는 대체로 1.5 mm 이하, 강수 입자는 103~106 m<sup>-3</sup>로 관측되었다. 누적 SWE는 171.06 mm(누적 적설량 1.71 m)로 Fig. 6a 사례와 비슷하게 나타났다. 강수 입자는 재해 시작부터 12월 1일 오전까지가 다른 기간에 비해 많이 나타났고, 이 기간에 SWE가 크게 증가한 것을 알 수 있다. 이후에는 강수 입자의 변동이 크게 나타났고, SWE는 보다 작게 나타났다. 강수 입자로 환산한 SWE는 관측된 값보다 작게 나타났고, 누적 SWE도 121.45 mm로 50

mm 정도 크게 차이 나는 것으로 나타났다. 이는 눈이 많이 왔을 때, 광학우적계가 잘못 관측 또는 환산관계식 오차로 생각된다. Flag 3을 통해 이러한 문제가 반영된 부분을 확인할 수 있다. 자료의 노이즈는 거의 나타나지 않았다. 또한, 재해 기간 동안 레이저 적설계가 관측 되었지만, Pluvio에 비해 관측 자료의 변동이 없는 것으로 나타나 적설량의 변화를 파악하기 어려운 문제가 나타났다. 초음파 적설계의 경우 관측 장비의 문제로 재해 기간이 끝난 시점에만 적설량이 작게 관측되었다.

가장 대설 피해가 크게 나타났던 2013년 1월 21~22일 사례를 나타낸 Fig. 6c의 경우 SWE는 최대 0.81 mm(적설량 8.1 mm)로 앞의 두 사례보다는 작게 나타났으나 SWE 증가량은 짧은 재해기간에 비해 매우 크게 나타났다. 재해 기간 동안 강수 입자와 SWE가 모두 관측되었기 때문에 이 기간에는 자료의 노이즈만 일부 나타났다. 또한, 이 기간에는 초음파 적설계도 관측이 되었는데, SWE보다 크게 관측되는 구간도 나타났다. 누적 SWE는 101.45 mm(누적 적설량 1.01 m)로 나타났고, 강수 입자로 추정된 SWE는 총 111.97 mm(누적 적설량 1.12 m)로 유사하게 나타났다. 특히, Fig. 6c를 보면 재해 기간 동안 SWE와 추정된 SWE의 누적값이 거의 일치하는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 관측기간 동안 바람이나 캐핑의 영향이 적어 앞의 두 사례보다는 Pluvio와 광학우적계가 강설현상을 적절히 관측한 것을 나타낸다.

본 연구에서는 강수 입자를 이용하여 QC 처리한 Pluvio SWE 자료를 평가하기 위해 목측 적설량과 이를 비교하였다. 이는 Fig. 6에서 확인한 것처럼 동일 기간에 관측된 레이저 적설계와 초음파 적설계 자료의 부적합성으로 인해 SWE 자료의 비교 목적으로 목측 자료를 이용하였다. 물론 SWE와 보다 정확한 관측 자료와의 비교 분석 과정이 필요하지만 대상 지역에서 수집된 적설 자료의 한계로 인해 비교적 정확한 값으로 관측된 목측 자료와 SWE를 비교하였다. 목측 자료는 1시간 관측 자료이기 때문에 SWE를 누적하여 나타냈다. 3개 재해 사례에 대해 Pluvio 관측값을 환산한 적설량과 목측 적설량을 비교하여 나타내면 Fig. 7과 같다.

Figure 7을 보면 Pluvio 관측에서 환산한 적설량이 목측 값보다 크게 나타난 것을 알 수 있다. 특히, Fig. 7b의 2011년 11월 사례를 보면 SWE로 환산한 적설량이 목측값보다 3배 정도 크게 나타난 것을 알 수 있다. 이것은 관측지점의 거리차이(목측지점은 CPOS와 서쪽으로 약 10 km 이격된 대관령 관측소임)가 가장 큰 원인으로 사료된다. 양적인 차이는 있으나 두 지점의 관측값의 상관도가 높다고 사료된다.

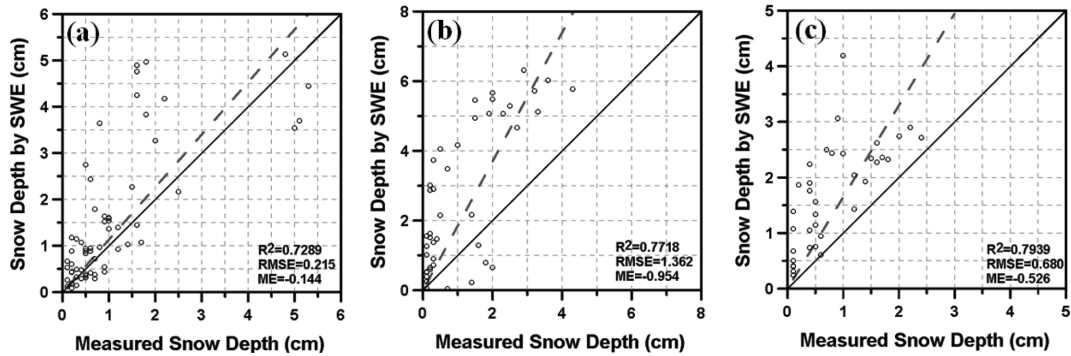


Fig. 7. Comparison of 1-hr accumulated measured and estimated (using SWE) snow depth for the three cases of heavy snowfall event (a: Feb. 10~16, 2010, b: Nov. 29~Dec. 4, 2011, c: Jan. 20~22, 2013).

### 6. 결 론

본 연구에서는 무게식 우량계 자료의 활용성을 극대화하기 위해 광학우적계 자료를 이용하여 SWE 자료를 QC 처리하였고, 개선된 자료의 성능을 평가하였다. 자료는 대관령 구름물리선도센터에 설치되어 있는 Pluvio, 광학우적계, 레이저/초음파 적설계, AWS로부터 얻어진 자료를 이용하였다. 먼저, 대설기간에 관측된 적설 자료의 특성을 비교하여 SWE 자료의 장단점을 분석하였다. 다음으로 광학우적계 자료를 이용하여 SWE를 QC 처리할 수 있는 알고리즘을 제안하였다. 본 연구에서는 알고리즘을 이용하여 단위 시간 동안 증가한 SWE를 결정하고, 자료의 노이즈를 제거하였다. 또한, 강수 입자와의 비교를 통해 부적합한 관측 자료를 Flag 처리하였다. 본 연구에서는 강원도 평창군에서 발생했던 대설 재해 3 사례를 선정하여 관측 자료를 QC 처리하였고, 개선된 자료를 다른 관측 자료와 비교하였다. 연구 결과를 정리하면 다음과 같다.

1) Pluvio SWE는 광학우적계로 관측된 강수 입자의 증감 경향을 유사하게 모의하는 것으로 나타났다. 반면, 초음파 적설계 자료는 연속적이기는 하지만 적설량이 작게 나타나는 문제가 있었고, 레이저 적설계는 자료의 불연속적 특성이 심하게 나타나고 다른 자료와 비교하여 적설 관측 시간도 상이하게 나타났다. 물론 Pluvio SWE 자료도 바람이나 온도에 따라 자료의 QC가 필요하지만 레이저나 초음파 적설계 자료보다는 상대적으로 안정적이면서 연속적인 적설 자료를 생성할 수 있음을 확인하였다.

2) 본 연구에서는 광학우적계 자료를 이용하여 Pluvio SWE 자료를 QC 처리할 수 있는 알고리즘을 제안하였다. 알고리즘은 단위 시간 동안의 SWE 결정, 노이즈 제거, 강수/무강수 결정의 3단계 과정으로 구성하

였다. 이를 통해 누적된 SWE 자료에서 단위 시간 동안 증가한 SWE를 결정할 수 있었고, 과도한 관측값과 같은 자료의 노이즈를 제거하였다. 또한 강수 입자와 SWE 자료를 비교하여 오측된 Pluvio 자료를 분류하였다. 본 연구에서는 각 단계별로 품질 관리 통과 조건을 만족하지 못한 자료는 flag 처리하였다.

3) 제안한 알고리즘을 이용하여 대설 재해 기관에 관측된 자료를 QC 처리하였다. 그 결과 바람이 강하거나 캐핑 현상(무게식 우량계 입구 부분이 눈에 덮히는 현상(Figure 8))으로 Pluvio가 정상적으로 관측되지 않는 부분을 분류하여 flag 처리할 수 있었다. 자료의 노이즈는 강설 기간에는 크게 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 3개 사례에 대한 분석을 통해 강설 기간이 짧을 때, SWE가 크게 증가할수록 대설 피해가 크게 발생할 수 있는 것으로 나타났다. 아울러 Pluvio가 바람, 온도, 캐핑 등의 영향을 받지 않는다면 강설 현상을 우수하게 관측할 수 있음을 확인하였다.

상기와 같은 결과를 통해 Pluvio 자료를 보정할 수 있었고 정량적인 SWE를 생성할 수 있었다. 이는 강수 기간에 관측된 자료의 신뢰도를 증가시킬 수 있고, 자료 활용도를 높일 수 있을 것으로 사료된다. 또한, flag 처리된 자료를 분석하여 현재 관측 장비의 한계를 파악하고 개선 방향을 결정할 수 있다. 그러나 무게식 우량계도 오측과 결측으로 인한 문제가 반영되어 있기 때문에 SWE 관측 자료의 추가적인 보정이 필요하다. 아울러 대설 현상이 나타날 경우 캐핑(capping)으로 인한 문제도 개선해야 할 것이다. 이러한 문제를 해결하여 SWE의 정확도를 개선할 경우 자료의 신뢰도를 높일 수 있고, 적설 자료의 활용을 극대화할 수 있다. 또한 보정된 SWE 자료를 이용하면 다른 적설계 자료를 개선하는데 기여할 수 있고, 적설 관측에 온도, 풍속, 습도와 같이 다른 기상 인자가 미치는 영향을 분석할 때에도 효과적일 것이다. 아울



Fig. 8. Snow capping images of the Pluvio.

러 개선된 SWE를 이용하면 레이더 강수 추정에 적용하여 공간적 확대 연구에 기여할 수 있을 것이다.

본 연구는 무게식 우량계로 관측된 SWE가 적설두께를 측정하는 방식보다는 상대적으로 우수한 대표 적설량임을 보여주었다. 그러나, 무게식 우량계의 관측 SWE 자료도 일정부분의 관측오류가 있음이 나타났다. 이 관측공백기간( $f_1$ ,  $f_2$ ,  $f_3$ )의 데이터를 과학적으로 채울 수 있는 방법(observation gap filling) 중 하나로 광학우적계를 이용한 SWE 환산방법(식 (2))을 시험하였다. 관측오류기간이 길 경우 환산 SWE를 대체 이용할 수 있을 것이나, 향후 보다 정확도가 높은 적설량 추정을 위하여 보다 많은 사례 연구가 필요하다.

### 감사의 글

이 연구는 기상청 국립기상과학원 「기상항공기 활용기술개발연구」(1365003069)의 지원으로 수행되었습니다. 본 연구에 아낌없는 조언을 주신 김경익 연구위원님과 김백조 재해기상연구센터장님께 감사드립니다.

### REFERENCES

Baxter, M. A., C. E. Graves, and J. T. Moore, 2005: A climatology of snow-to-liquid ratio for the contiguous United States. *Wea. Forecasting*, **20**, 729-744.

Doesken, N. J., and A. Judson, 1996: *The Snow booklet: a guide to the science, climatology, and measurement of snow in the United States*, Colorado State University, 86 pp.

Egli, L., T. Jonas, and R. Meister, 2009: Comparison of different automatic methods for estimating snow water equivalent. *Cold Reg. Sci. Technol.*, **57**, 107-115.

Grant, L. O., and J. O. Rhea, 1974: Elevation and meteorological controls on the density of snow. *Proc. Adv.*

*Concepts Tech. Study Snow Ice Resourc. Interdisciplinary Symp.*, Monterey, CA, National Academy of Science, 169-181.

Gunn, K. L. S., and J. S. Marshall, 1958: The distribution with size of aggregate snowflakes. *J. Meteor.*, **15**, 452-461.

Henry, A., 1917: The density of snow. *Mon. Wea. Rev.*, **45**, 102.

Judson, A., and N. Doesken, 2000: Density of freshly fallen snow in the central Rocky Mountains. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **81**, 1577-1587.

KMA, 2002: Annual climatological report. Korea Meteorological Administration, 256 pp (in Korean).

\_\_\_\_\_, 2014: Monthly weather report. Korea Meteorological Administration, 119 pp (in Korean).

LaChapelle, E. R., 1962: The density distribution of new snow. USDA Forest Service Tech. Rep. No. 2, Wasatch National Forest, Alta Avalanche Study Center, Project F, 15 pp.

Lee, B., and H. Kim, 2007: Outdoor observation of weight type snow-depth meter Development of weight type rounded snow plate. *Proc., Kor. Environ. Sci. Soc. Conf.*, The Korean Environmental Sciences Society, 136-138 (in Korean).

\_\_\_\_\_, and \_\_\_\_\_, 2009: Development of weight type rounded snow plate. *Atmosphere*, **19**, 1-8 (in Korean with English abstract).

Lee, W. J., 2006: *Weather chart and weather analysis*. Kwanggyo It'aeks Publishing Co., 97 pp (in Korean).

Nitu, R., 2013: Cold as SPICE, *Meteor. Tech. Int.*, 148-150.

NIMS, 2018: Advanced research on applied meteorology - Development of weather modification technology. Nat. Ins. Meteor. Sci., 45 pp (in Korean).

Potter, J. G., 1965: *Water content of freshly fallen snow*, Meteorological Branch, 12 pp.

- 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. Climatol.*, **42**, 20-36.
- \_\_\_\_\_, and Coauthors, 2012: How well are we measuring snow: The NOAA/FAA/NCAR winter precipitation test bed. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **93**, 811-829, doi:10.1175/BAMS-D-11-00052.1.
- Roebber, P. J., S. L. Bruening, D. M. Schultz, and J. V. Cortinas Jr., 2003: Improving snowfall forecasting by diagnosing snow density. *Wea. Forecasting*, **18**, 264-287.
- Schmidt, R. A., 1982: Vertical profiles of wind speed, snow concentration, and humidity in blowing snow. *Bound.-Layer Meteor.*, **23**, 223-246.
- Solomon, S., D. Qin, M. Manning, M. Marquis, K. Averyt, M. M. B. Tignor, H. L. Miller Jr., and Z. Chen, 2007: *Climate change 2007-The physical science basis: Working group I contribution to the fourth assessment report of the IPCC*. Cambridge University Press, 996 pp.
- Super, A. B., and E. W. Holroyd, 1997: *Snow accumulation algorithm for the WSR-88D radar: Second annual report*. US Bureau of Reclamation, 77 pp.
- Ulbrich, C. W., 1983: Natural variations in the analytical form of the raindrop size distribution. *J. Climate Appl. Meteor.*, **22**, 1764-1775.
- Vuerich, E., C. Monesi, L. Lanza, L. Stagi, and E. Lanzinger, 2009: WMO field intercomparison of rainfall intensity gauges. World Meteorological Organization-Instruments and Observing Methods Report No. 99, 290 pp [Available online at [http://library.wmo.int/pmb\\_ged/wmo-td\\_1504.pdf](http://library.wmo.int/pmb_ged/wmo-td_1504.pdf)].
- WMO, 2012: International organizing committee for the WMO solid precipitation intercomparison experiment, third session. World Meteorological Organization, 5-74.