

구름물리 관측시스템 및 산출물 검정

장기호¹ · 오성남¹ · 정기덕¹ · 양하영^{1,*} · 이명주¹ · 정진임¹ · 조요한¹ · 김효경¹ ·
박균명² · 염성수³ · 차주완³

¹기상청 기상연구소 원격탐사연구실

²기상청 진도기상대

³연세대학교 대기과학과

(2006년 11월 29일 접수; 2007년 1월 12일 승인)

Cloud Physics Observation System (CPOS) and Validation of Its Products

Ki-Ho Chang¹, Sung-Nam Oh¹, Ki-Deok Jeong¹, Ha-Young Yang^{1,*}, Myoung-Joo Lee¹,
Jin-Yim Jeong¹, Yohan Cho¹, Hyo-Kyung Kim¹, Gyun-Myeong Park²,
Seong-Soo Yum³ and Joo-Wan Cha³

¹Remote Sensing Research Laboratory, Meteorological Research Institute, KMA

²Jindo Weather Station Office, KMA

³Department of Atmospheric Sciences, Yonsei University

(Manuscript received 29 November 2006; in final form 12 January 2007)

Abstract

To observe and analyze the cloud and fog characteristics, the METeorological Research Institute (METRI) has established the Cloud Physics Observation System (CPOS) by implementing the cloud observation instruments: Forward Scattering Spectrometer Probe (FSSP), PARTICle SIZE and VELOCITY (PARSIVEL), Microwave Radiometer (MWR), Micro Rain Radar (MRR), and 3D-AWS at the Daegwallyeong Enhanced Mountain Weather Observation Center. The cloud-related products of CPOS and the validation status for the size distribution of FSSP, the precipitable water of MWR, and the rainfall rate of MRR and PARSIVEL are described.

Key words: CPOS, FSSP, MWR, MRR, PARSIVEL

1. 서 론

기상에 있어 구름은 중요한 요소이다. 특히 구름으로 인한 기후변화 예측의 불확실성으로 구름에 대한 연구의 필요성이 점점 부각되고 있다. 외국의 경우 원격탐사나 직접 관측을 통해 구름의 물리화학적 특성을 연구하여 구름에 대한 이해를 높이고 있다. 이에 기상청 기상연구소에서는 미세구름물리 특성에 대한 기초연

구를 위해 국내 유일의 구름물리 관측시스템 (Cloud Physics Observation System, 이하 CPOS)을 강원지방기상청의 협력으로 (구)대관령 기상대 (37.4°N, 128.4°E, 842 m)에 구축하였다 (Fig. 1).

CPOS는 전방산란스펙트로메타 (Forward Scattering Spectrometer Probe, 이하 FSSP), 광학 디스트로메타 (Particle Size Velocity Disdrometer, 이하 PARSIVEL), 마이크로 레디오미터 (Microwave Radiometer, 이하 MWR), 마이크로 강우 레이더 (Micro Rain Radar, 이하 MRR) 등에서 관측된 자료들의 DB와 실시간 관측 자료들을 웹 기반 (<http://weamod.metri.re.kr>)으로 보여주고 있다. 그리고 신뢰할 수 있는 구름관련 산출물을 위해 각 측기들의 검정을 수행하고 있다.

기상 선진국에서는 구름관련 관측을 위하여 관측소 또는 이동식 관측시스템을 이용하고 있다 (Fig. 2).

*Corresponding Author: Ha-Young Yang, Remote Sensing Research Laboratory, Meteorological Research Institute, KMA, 460-18, Shindaebang-dong, Dongjak-gu, Seoul, 156-720, Korea.
Phone : +82-2-841-2786, Fax : +82-2-841-2787
E-mail : hayang@metri.re.kr

Fig. 2a의 Mobile Integrated Profiling System (MIPS)은 주로 단기간 예보나 토네이도 등의 정보를 위해 Huntsville (University of Alabama)에서 운영하고 있는 시스템으로 연직적인 대기관측 데이터를 실시간 (<http://vortex.nsstc.uah.edu/mips/>)으로 제공하고 있다. MIPS에 포함되는 관측기기에는 915 MHz 윈드프로파일, Ceilometer, 12채널 레디오미터, Sodar 등이 있다.

Karan and Knupp (2006)는 International H₂O Project (IHOP) 동안 MIPS 관측과 항공기 관측을 통합하여 느리게 이동하는 이슬점불연속선과 역행 이슬점불연속선, 그리고 얇은 한랭전선 상태에서 수렴경계층의 미소 규모 특성에 관하여 연구하였다.

일본의 Mobile Platform (Fig. 2b)은 2D-Grey imaging probe, 레디오미터, 기상요소 관측기기인 온도계, 습도계, 기압계와 GPS 수신기 등을 차량에 장착하여 겨울철 지형효과에 의한 구름의 수액량 및 눈입자 (직경 0.1 ~ 6.4 mm)의 수적량 관측을 수행하였다 (Kusunoki *et al.*, 2005).

중국 길림성지역의 기상조절연구중심(센터)은 기상조절 및 구름관측 전용항공기 및 우량계, 레이더, 그리고 위성자료의 격자형 통합을 통해 (Fig. 2c) 기상조절

실험 후 비 또는 구름의 변화량 검증을 하고 있다 (Lei, 2005).

이와 같이 통합적으로 관측한 자료들은 악기상, 구름물리 특성 등 기상정보의 시공간적 특성을 알 수 있게 한다. 기상연구소의 CPOS는 구름물리 요소를 상시 관측하고 인공증설(우)과 안개소산 같은 기상조절 실험의 검증을 위해 구축되었다. 본 논문은 상시 관측되는 CPOS의 구름물리 관련 관측 장비와 산출물을 소개하고 산출물들의 검증 및 검증 결과를 보여주고자 한다.

2. CPOS 구성장비 및 산출물 검증

2.1 지상구름(안개 또는 하층운) 특성 측정

1) FSSP (Forward Scattering Spectrometer Probe)

FSSP는 광학적 특성을 이용하여 구름과 에어러솔 입자의 크기 분포를 측정하는 기기로 국외의 구름 비행관측 연구와 기상조절 프로젝트에 널리 이용되어 왔으며 구름물리 연구의 발달에 크게 기여해왔다 (Arends *et al.*, 1994; Wendisch, 1998). FSSP는 원래 항공기 장착용으로 개발되었으나 공기흡입기를 표본공기 유입구에 장착하면 지상의 정지된 위치에서 관측이 가능하

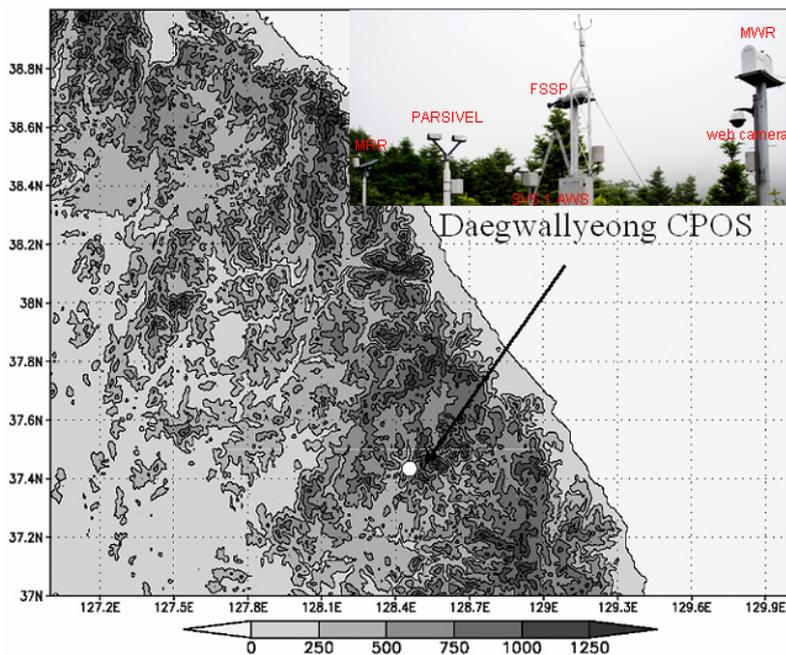


Fig. 1. Location of the Daegwallyeong Cloud Physical Observation System (CPOS) in the Korean Peninsula.

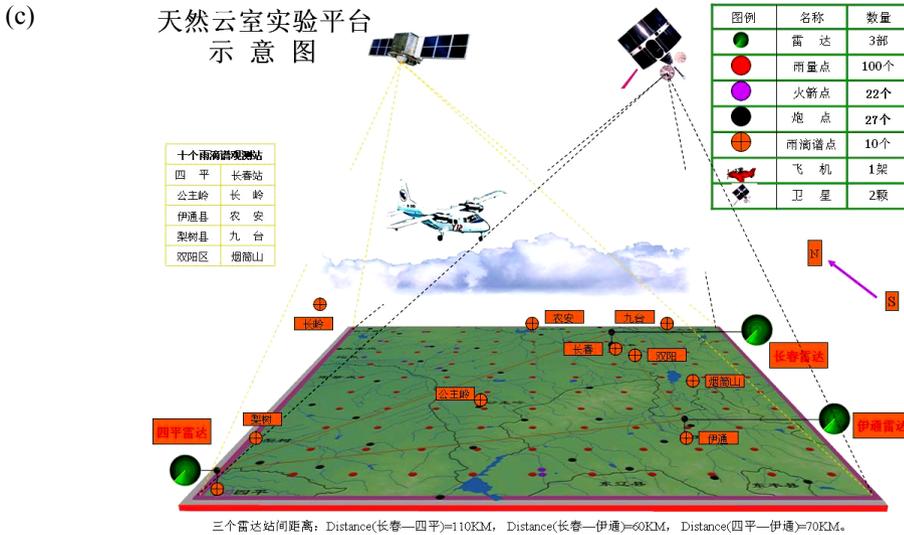
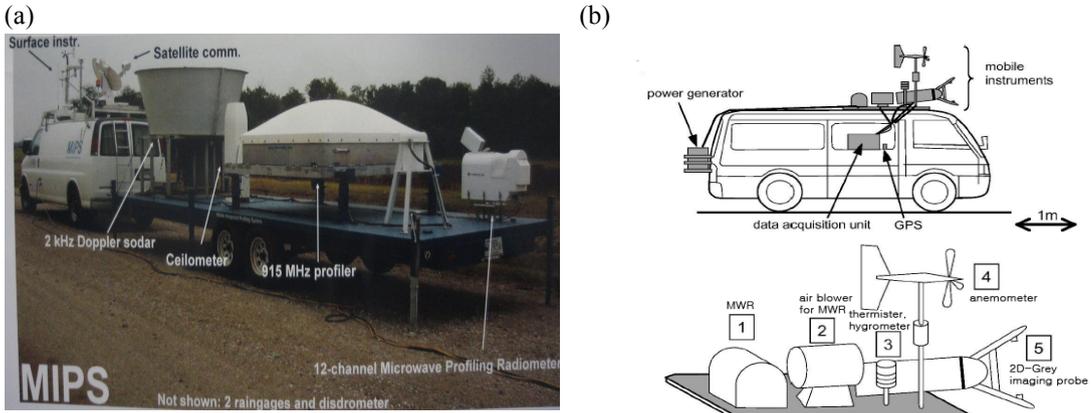
로 대관령에 고정 설치하여 활용하고 있다. FSSP로 관측할 수 있는 구름미세물리 요소에는 입자의 크기별 수농도 분포와 이로부터 유도되는 수함량과 입자평균 직경이 있다. 관측 범위는 직경 0.5~47 μm 이며 15구간의 입자크기로 구분 되어진다 (Jeong *et al.*, 2006).

FSSP를 이용한 구름입자 크기분포에 관한 대부분의 연구가 주로 수 시간에서 수 일 동안의 짧은 집중관측이나 비정기적인 관측결과가 많은 반면 1년 이상의 장기적인 관측을 바탕으로 한 연구결과는 많지 않은 실정이다. 구름입자크기 분포가 시공간적으로 변동성이 크다고 하나 약 2년 동안의 FSSP 측정 자료를 통계

분석함으로써 대관령 지역의 대표적인 안개 및 구름의 입자크기 분포 자료를 제공한다는 데 그 의의를 가진다. 이는 한국에서는 최초로 구름입자를 직접 관측하는 연구이며 이 결과는 한반도 구름물리에 대한 지식을 더 넓히는데 기여할 수 있을 것이다.

염성수 (2004) 등은 이 장비를 이용하여 대관령 및 안면도에서의 구름입자크기를 비교 연구하였다. 이들 연구에서 FSSP에 대한 원리 및 특성에 대해 간략하게 소개하였다.

염화칼슘 (CaCl_2) 성분의 흡습성 물질 (hygroscopic material)을 이용하여 FSSP 관측기기의 검정을 실시



(a) Karan, 2006, p.93, (b) Kusunoki, 2005, p.745, (c) Lei, 2005, p.30

Fig. 2. Observation system: (a) the Mobile Integrated Profiling System (MIPS) in Huntsville, USA, (b) the mobile platform in Japan, (c) field observation in Jilin, China.

하였다. Fig. 3은 대관령 기상대에서 2005년 6월 16일 17시 10분부터 18시 40분 까지 PM10 Sampler (모델명: FH62C14-100)로 관측한 염화칼슘의 5분 평균 질량농도와 FSSP로 관측한 염화칼슘의 5분 평균 질량농도를 비교한 것이다. PM10 Sampler는 입경이 10 μm 이하의 분진 입자의 질량농도를 측정하는 기기이다. 이 기기는 분진의 양에 따라 지수 함수적으로 감소하는 C-14의 β -ray 강도로부터 질량농도를 계산한다. 한편 FSSP는 질량농도가 아닌 수농도를 관측하는 기기이기 때문에 여기의 FSSP로 관측된 염화칼슘 질량농도는 Jiusto (1968)등의 논문을 참조하여 입자 수농도를 질량농도로 환산한 값이다. 두 기기에서 산출된 질량농도의 R^2 값이 0.64로 나왔는데 이는 시공간 변동성이 심한 입자의 물리적 특성을 고려해보았을 때 양호한 값이라 볼 수 있다.

2) PARSIVEL (PARticle Size and VELOCITY)

PARSIVEL 은 모든 형태의 강수입자의 직경 분포 스펙트럼을 측정하기에 적합한 레이저 기반의 광학 시스템이다. 관측 가능한 액체 형태의 강수의 입자크기 범위는 0.2 - 5 mm이며 고체 형태의 강수 범위는 0.2 - 25 mm이다. PARSIVEL의 방출기는 레이저 센서로부터 30 mm 너비, 180 mm 폭, 그리고 1 mm 두께를 가진 빔을 방출한다. 이 빔은 입자 유입구를 통과하는데 만약 이 유입구에 어떠한 강수입자도 존재하지 않는다

면 최대 강도의 전압이 수신기에 50 kHz의 속도로 감지된다. 만약 강수입자가 레이저 빔의 경로에 존재한다면 입자의 지름에 비례하여 레이저 빔의 일부가 차폐되고 결국 이에 비례하여 수신기에 감소된 전압이 감지된다. 감소된 전압은 입자 크기의 함수이므로 결국 강수입자의 크기가 결정된다. 강수입자의 속도는 신호의 주기를 측정함으로써 결정할 수 있다. 신호는 강수입자가 수평 빔 폭 범위로 들어오자마자 시작되어 완벽하게 폭 범위를 벗어나면 끝나게 된다. 빔 폭 범위는 일정한 값이므로 이 시차가 강수입자의 속도로 변환되는 것이다. 또한 이렇게 구해진 강수입자의 크기와 속도로부터 강수입자 직경 분포 스펙트럼, 강수 유형, 운동에너지, 강수강도, 레이더 반사도, 시정의 물리량 등을 유도할 수 있다.

Joss and Waldvogel (1969)등은 PARSIVEL을 이용하여 Z-R 관계식을 산출하는 새로운 방법을 제시하였고 이 방법을 이용하여 산출한 강수량과 4개의 우량계로부터 구한 강수량을 비교한 결과 두 값이 거의 일치함을 증명하였다.

PARSIVEL 산출 자료의 정확도 검증을 위해 2006년 6월 22일 강수 사례에 대해 TB01 (1 mm 우량계)에서 산출된 강우강도와 상관도 및 RMSE를 구하였다. 분석을 위해 목포기상대 (34.5°N, 126.2°E)에 설치된 PARSIVEL과 TB01의 자료를 사용하였다. PARSIVEL은 1분 단위의 관측 자료를 생산하지만 TB01과의 비교를 위해 30분 평균 강우강도를 사용하였다.

PARSIVEL은 0.001 mm h⁻¹ 해상도의 강우강도를 산출하는데 반해 AWS 우량계는 해상도에 제한이 있다. 따라서 일반적으로 PARSIVEL 등의 광학 기기는 강수 측정에 있어 우량계의 참조로 간주된다. Fig. 4는 TB01과 PASIVEL의 30분 평균 강우강도를 비교한 것으로 그 결과를 보면 R^2 값이 0.997로 PARSIVEL로 관측된 강우강도와 TB01의 강우강도가 거의 일치함을 알 수 있다. 따라서 바람이 5 m/s 이하일 때 높은 정확성과 신뢰성을 보이는 PASIVEL 관측 값을 강수 사례 분석 시 적합한 참조기기로 고려할 수 있을 것이다.

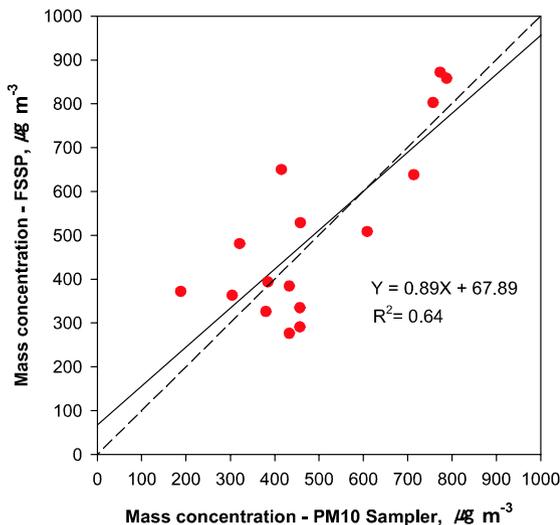


Fig. 3. Comparison of the 5-minute averaged mass concentration between the FSSP and the PM10 sampler.

2.2 구름의 수직특성 측정

1) MWR (Microwave Radiometer)

대기의 수증기량은 중요한 기상요소 중 하나이다. 기상과정에서 수증기량의 중요성을 인식하고 있지만 측정의 대부분은 시간·공간적 제약을 가지고 있는 라

디오존데에 의해 이루어지고 있어서 변화하는 수증기량의 상태를 측정하기에는 부족하다.

2003년 11월에 대관령 슈퍼사이트에 설치된 MWR (Radiometrics, WVR-1100)은 대기로부터 23.8GHz와 31.4 GHz의 장파복사를 수신하여 지정된 경로에서 밝기 온도를 관측하여 가강수량 (Precipitable Water Vapor, 이하 PWV)과 수액량 (Liquid Water Path, 이하 LWP)을 실시간으로 산출한다. 즉 대기로부터 23.8 GHz와 31.4 GHz의 장파 복사를 수신하여 지정된 경로에서 밝기 온도를 관측하게 되고, 관측된 값을 통해 수증기량과 수액을 산출할 수 있게 되는 것이다. 대기의 주어진 체적에 포함된 수함량은 입자관측기에 의해 측정된 입자 분포의 질량적분을 통하여 결정 되어진다. MWR은 구름의 수함량 분포를 조사하여 구름 내에서 물의 수평 이동량을 구하고 연직 강수량과 비교하여 인공증우 실험을 통한 강우 최대량 산출에 이용된다 (Snider and Rottner, 1982). 차주완 (2005)등은 FSSP와 이 장비를 이용하여 2003년도 대관령 동계 안개사례분석을 하였다. 이들 연구에서 MWR에 대한 원리 및 특성 등이 간략하게 소개되었다.

MWR에서 산출된 가강수량 (Precipitable Water Vapor, 이하 PWV)의 정확도 검증을 위해 2003년 11월부터 2004년 3월까지 CPOS에서 관측된 MWR자료와 북서쪽으로 약 30 km 떨어진 속초 (38.1°N, 128.3°E)

라디오존데에서 산출된 PWV값을 비교하였다. 강수일의 경우 MWR의 정확한 관측이 어렵기 때문에 강수일은 제거하였다. 그리고 기상청 기후자료관리시스템에 기록된 전운량이 2.4이하인 날을 맑은 하늘 (clear sky)로 그리고 2.4이상인 날을 구름 낀 하늘 (cloudy sky)로 구분하였다.

Fig. 5를 보면 R^2 값이 clear sky (A)일 때 0.88이고, cloudy sky (B)일 때 0.79로서 MWR과 라디오존데에서 산출된 PWV값의 상관도가 높게 나타남을 알 수 있다. 이는 MWR에서 산출된 PWV값이 관측지역의 값을 잘 나타내고 있으며, 특히 맑은 날에 보다 정확한 산출이 가능한 것으로 볼 수 있다.

하지만 라디오존데에서는 액체수액량을 산출할 수 없기 때문에 다른 장비와의 검증이 필요하고 관측 자료의 신뢰도 향상을 위해 지속적인 검증이 이루어져야 할 것이다.

2) MRR (Micro Rain Radar)

대관령에 MRR이 설치된 시기는 2005년 1월이며 현재까지 관측중이다. MRR은 대기 중에 전기파 (24GHz)를 연직으로 방사하여 구름내부에 있는 물 입자에 의해 반사되어 되돌아오는 신호를 측정하여 레이더 반사도와 입자의 낙하속도를 관측하는 장비이다. 이 두 가지 정보를 이용하여 강우강도, 액체수함량 (Liquid

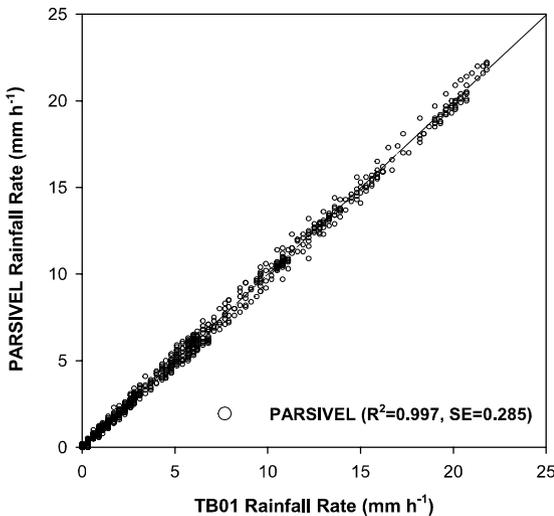


Fig. 4. Scatter diagram of the 30-min averaged PARSIVEL (O) rainfall rate versus the TB01 one. The RMSE denotes a standard error and solid line is the linear fitted line.

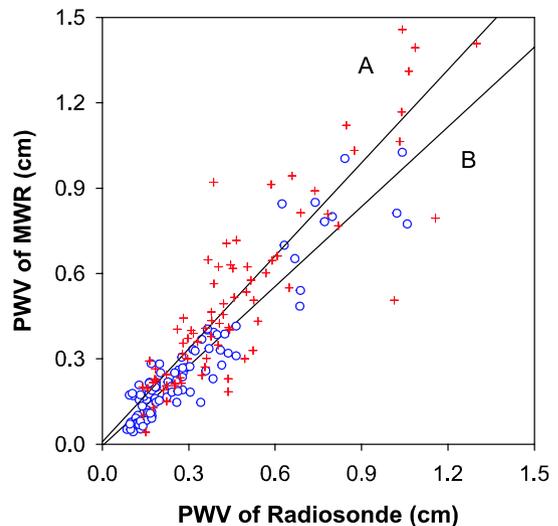


Fig. 5. Scatter plot of the PWV calculated by the MWR against that derived from Radiosonde for clear sky (A, cross) and cloud sky (B, circle) conditions for Dec. 2003 - Apr. 2004.

Water Contents, 이하 LWC), 입자크기분포 (Drop Size Distribution, 이하 DSD)를 산출할 수 있다 (조요한, 2005).

24GHz의 마이크로파를 사용하기 때문에 공기 중의 물 입자에 의한 감쇄가 주로 작용하므로 대기 중하층을 분석하는데 주로 사용된다. 또한, 강우강도 분해능이 $0.01 \mu\text{m h}^{-1}$ 로 일반 전도식 AWS 우량계 (0.5 mm h^{-1})보다 정밀하게 측정된다. MRR 장비는 반사도 자료를 이용하여 강우강도와 LWC를 산출하는데, 이 때 송신된 전자기파가 물로 된 입자들에 의해 반사되었다는 가정이 포함된다. 만일 MRR이 수적이 아닌 고체상 입자 즉, 강설 입자를 관측하게 되면 레이더 방정식의 오류로 인해 산출량들의 값에 오차가 크게 된다. 그러므로 MRR의 관측 자료를 검증하기 위해서 대관령 지방에 눈이 내리지 않았던 2005년도 4월 1일부터 8월 31일까지 5개월 기간에 대해서 지상에서 관측된 AWS의 강우량과 MRR로 관측한 강우강도값을 비교 분석하였다.

MRR의 강우량 추정의 한계를 알아보기 위하여 시간에 따른 누적 강우량을 산출하였다. 각각의 장비에서 생산된 자료를 10분, 20분, 30분 그리고 60분으로 누적시켜 서로 비교한 그림이 Fig. 6이다. 그림에서와 같이 누적시간이 60분과 30분일 때 상관계수가 각각 0.85, 0.84로 높은 상관관계를 보였고, 20분과 10분 일 때는 각각 0.79, 0.72로 30분과 60분 보다는 낮은 상관관계를 보였지만 대체적으로 높은 상관성을 보인다. 우량계는 지상에 실제로 오는 강우량을 측정하는 것이고 MRR은 대기 중의 수적을 강우강도로 환산한 값이기 때문에 직접적으로 비교할 수는 없지만, 누적량으로 환산을 했을 때 서로 상관성이 높았다.

MRR에서 생산되는 대기하층의 강우정보는 지상강우량과 높은 상관관계를 보이므로 MRR은 최소 30분 누적강수에 대하여 직접 사용가능한 강우량을 산출하며, 강우량 프로파일 및 용해층을 모니터링 할 수 있는 장비로 판단된다. 강수 프로파일 자료는 강수 자료 동화 등에 활용될 수 있으며 용해층의 모니터링은 기상조절

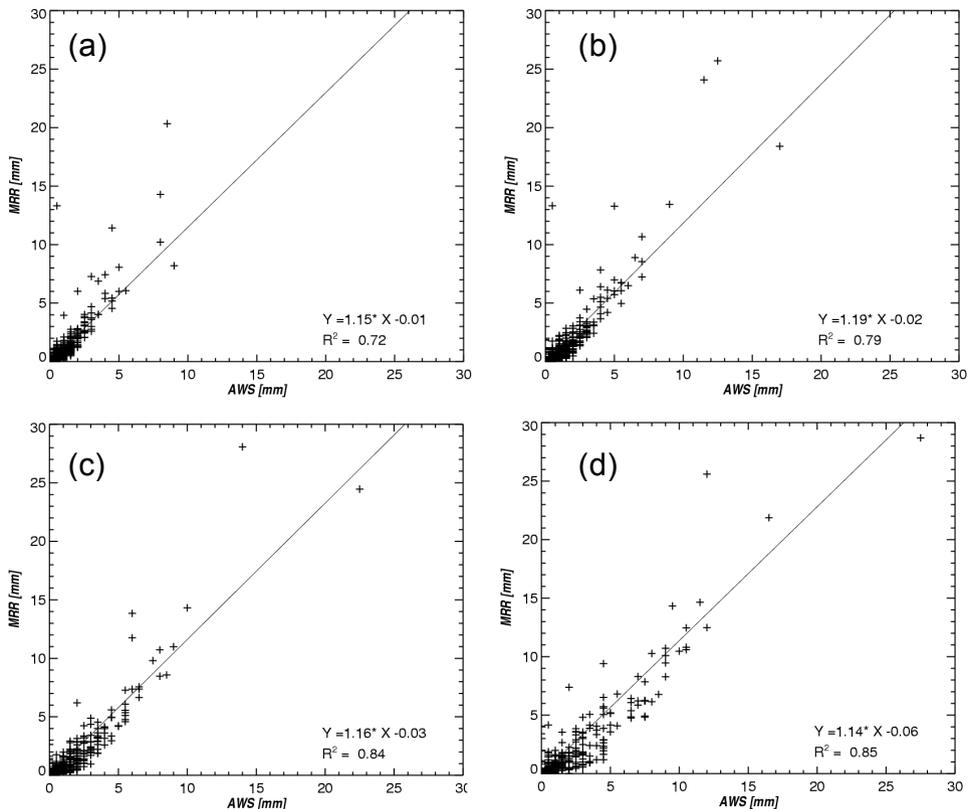


Fig. 6. Comparison of (a) 15 min, (b) 20 min, (c) 30 min and (d) 60 min cumulative rainfall from AWS and MRR.

Table 1. The specifications of the instruments of Cloud Physical Observation System (CPOS) and their calibration status.

	Measurement	Range	Calibration	Validation	Install Date
FSSP	Size Distrib. of cloud	0.5 - 47 μm	1)Check for the 31 μm standard particle 2)Qualitative comparison with the PM10 results for the CaCl ₂ seeding	$R^2 = 0.64$	'03.11.27
PARSIVEL	Size Distrib. of Rain/Snow	0.2 - 25 mm	Compare with the 30-min. accumulated rain-gauge rainfall in Mokpo during 1 days	$R^2 = 0.966$	'06.09.29
MWR	PWV, LWP	23.8 GHz, 31.4 GHz	Compare with the PWV calculated from the Sokcho sonde data (2003.12-2004.4)	(clear sky) $R^2 = 0.88$ (cloudy sky) $R^2 = 0.79$	'03.11.23
MRR	Reflectivity, Rain-Rate, LWC	150 m interval	Compare with the 30-min. accumulated rain-gauge rainfall (2005.4-2005.7)	$R^2 = 0.84$	'05.04.04

을 위한 시딩층 판단을 가능케 한다.

3. 결론 및 향후계획

Table 1은 대관령에 설치되어있는 CPOS의 구름관측 장비들의 상세한 현황과 그의 보정 및 검증사항을 서술하고 있다. 앞으로 액체수액량과 같은 관측 자료들에 대한 신뢰도 향상과 정확도 검증에 대하여 지속적으로 이루어질 것이다. 구름의 미세물리는 구름입자의 생성에 직접적으로 관여하는 구름응결핵의 분포뿐만 아니라 상승류 속도 등의 역학적인 조건에 크게 좌우되기 때문에 관측된 값이 한반도 구름을 대표한다고 할 수 없다. 그러나 1년 이상의 장기간에 걸친 구름 미세물리 관측자료 데이터베이스는 한반도 구름의 미세물리 및 구름화학 연구의 기반을 위한 자료로 충분히 활용될 수 있을 것이다.

사 사

이 논문은 2006년도 정부 (과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 특정기초연구 (R01-2006-000-11233-0) 지원과 기상연구소 주요사업 연구용 도플러 기상레이더 운영 및 자료 분석 기술개발과 구름물리 관측시스템 유지 및 연구의 지원으로 수행되었습니다. 또한, 염성수 교수와 차주완 박사는 기상청 기상지진기술개발사업 (CATER 2006-2307)의 지원으로 FSSP 하드웨어

를 검토정 등을 수행하였습니다.

참고문헌

- 염성수, 오성남, 김정윤, 김창기, 남재철, 2004: 전방산란스펙트로메타(FSSP)를 이용한 한반도에서의 구름입자 크기 분포 관측. *한국기상학회*, **40**, 623-631.
- 조요한, 김은연, 장기호, 2005: 대관령슈퍼사이트: 마이크로 강수 레이더의 특성. *2005년도 한국기상학회 가을 학술대회 논문집*, 168-169.
- 차주완, 장기호, 정진임, 박균명, 양하영, 2005: 전방산란스펙트로메타(FSSP-100)와 마이크로 레디오미터를 이용한 2003년도 대관령 동계 안개 사례 분석. *대기*, **15**, 167-178.
- Arends, B. G., G. P. A. Kos, R. Maser, D. Schell, W. Wobrock, P. Winkler, J. A. Ogren, and K. J. Noone, 1994: Microphysics of clouds at Kleiner Feldberg. *J. Atmos. Chemistry*, **19**, 59-85.
- Jeong, J. Y., K. H. Chang, B. C. Choi, and S. S. Yum, 2006: Daegwallyeong supersite: Fog droplet spectra measured with the FSSP. *Proc. Spring Meeting of KMS, 2006*, Korean Meteor. Soc., 126-127.
- Jiusto, J. E., R. J. Pilie, and W. C. Kocmond, 1968: Fog modification with giant hygroscopic nuclei. *J. Appl. Meteor.*, **7**, 860-869.
- Joss, J., and A. Waldvogel, 1969: Raindrop size distribution and sampling size errors. *J. Atmos. Sci.*, **26**, 556-569.
- Karan, H., and K. Knupp, 2006: Mobile Integrated Profiler System (MIPS) observations of low-level convergent boundaries during IHOP. *Mon. Wea. Rev.*, **134**, 92-112.
- Kusunoki, K., M. Murakami, N. Orikasa, M. Hoshimoto, Y. Tanaka, Y. Yamada, H. Mizuno, K. Hamazu, and H.

- Watanabe, 2005: Observations of quasi-stationary and shallow orographic snow clouds: Spatial distributions of supercooled liquid water and snow particles. *Mon. Wea. Rev.*, **133**, 743-751.
- Lei, H., 2005: Research on structure of stratiform cloud and its potential of precipitation enhancement. *Proc. 2nd Int. Workshop on Weather Modification*, Seoul, Korea, METRI, 20-32. [Available from H. Lei, Laboratory of cloud-precipitation physics and severe storms, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences.]
- Snider, J. B., and D. Rottner, 1982: The use of microwave radiometry to determine a cloud seeding opportunity. *J. Appl. Meteor.*, **21**, 1286-1291.
- Wendisch, M., 1998: A quantitative comparison of ground-based FSSP and PVM measurements. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **15**, 887-900.