

## 마이크로웨이브 라디오미터에서 관측된 가강수량 및 구름물량 특성 분석

양하영<sup>1,4,\*</sup> · 장기호<sup>2</sup> · 차주완<sup>3</sup> · 최영진<sup>1</sup> · 류찬수<sup>4</sup>

<sup>1</sup>기상청 국립기상연구소, 156-720, 서울특별시 동작구 여의대방로 16길 61

<sup>2</sup>기상청 국가태풍센터, 699-948, 제주특별자치도 서귀포시 남원읍 서성로 810번길 2

<sup>3</sup>기상청 기상레이더센터, 156-720, 서울특별시 동작구 여의대방로 16길 61

<sup>4</sup>조선대학교 대학원 대기과학과, 501-759, 광주광역시 동구 필문대로 309

## Characteristics of Precipitable Water Vapor and Liquid Water Path by Microwave Radiometer

Ha-Young Yang<sup>1,4,\*</sup>, Ki-Ho Chang<sup>2</sup>, Joo-Wan Cha<sup>3</sup>,  
Young-Jean Choi<sup>1</sup>, and Chan-Soo Ryu<sup>4</sup>

<sup>1</sup>National Institute of Meteorological Research, Korea Meteorological Administration, Seoul 156-720, Korea

<sup>2</sup>National Typhoon Center, Korea Meteorological Administration, Jeju 699-948, Korea

<sup>3</sup>Weather Radar Center, Korea Meteorological Administration, Seoul 156-720, Korea

<sup>4</sup>Department of Atmospheric Science, Graduate School, Chosun University, Gwangju 501-759, Korea

**Abstract:** Based on the observation of the microwave radiometers at Cheongju, Hapcheon and Daegwallyeong in Korea, the precipitable water vapor and liquid water path have been analyzed for spatio-temporal characteristics. The observed datas have been validated by comparing precipitable water vapor between the microwave radiometer and the radiosonde near the sites. It resulted in the correlation coefficient of more than 0.8 in all three sites. For three regions, the precipitable water vapor shows similar seasonal variation and diurnal cycle, and that amount of precipitable water vapor increases from around 1000 LST and has a maximum value at 1900 LST. On the other hand, the liquid water path of microwave radiometer has regional differences for its seasonal variation, which seems to be caused by the geographical characteristics including the frequent fog and clouds in Daegwallyeong, a high mountain region (834 m from sea level), almost flat land in Chengju, and Sobaek Mountains in Hapcheon that blocks the westerly clouds.

**Keywords:** precipitable water vapor, liquid water path, seasonal variation, spatio-temporal characteristics

**요약:** 가강수량과 구름물량의 시공간적 분포와 특성을 분석하기 위해 청주, 합천, 대관령에서 마이크로웨이브 라디오미터의 관측을 수행하였다. 각 지역에서 관측된 가강수량을 검증하기 위해 고층자료에서 산출된 가강수량과 비교하였으며 그 결과 상관계수가 0.8 이상으로 좋은 상관도를 보인다. 청주, 합천, 대관령 지역의 가강수량의 계절적인 변동과 일 변화는 유사하게 나타났으며 일반적으로 1000 LST부터 증가하기 시작하여 1900 LST에 극대 값을 보인다. 반면에 구름물량은 지역적으로 계절적인 차이를 보인다. 이는 평지에 위치한 청주, 소백산맥으로 인한 편서풍 구름 차폐가 발생하기 쉬운 합천, 안개 및 구름이 잦은 대관령(834 m 해발고도) 등 각기 다른 지형 및 지리적 영향에 기인한 것으로 사료된다.

**주요어:** 가강수량, 구름물량, 지역 및 계절 변동, 시공간적 특성

\*Corresponding author: hayang@korea.kr

Tel: +82-70-7850-6835

Fax: +82-2-834-5922

## 서 론

대기 중에 존재하는 수증기의 양은 매우 적지만 복사과정을 통한 대기의 에너지 전달 뿐만 아니라 구름의 형성·소멸, 강수, 지표증발산 등 수문학적 순환(hydrologic water cycle)을 통해 기후에도 큰 영향을 미친다(Chahine, 1992). 구름 내 수액량(liquid water), 즉 구름물량은 수치 모델이나 대기과학 분야에서 중요한 요소이며 잠열효과와 크기는 구름물량에 따라 변하기 때문에 여러 규모의 기상현상들과 관련하여 구름물량 추정은 중요하다. 대기 중 수증기와 구름물량의 분포와 시간적인 변동을 아는 것은 기상예보와 기후시스템을 이해하는데 중요하므로 관측이 필수적이다.

라디오존데(Radiosonde)를 이용한 고층관측은 좋은 공간분해능을 보이지만 하루 2회 또는 4회의 관측으로는 시공간적인 변화가 큰 수증기의 분포를 파악하기에는 어려움이 있다. 마이크로웨이브 라디오미터(Microwave Radiometer)는 장파복사를 수신하여 실시간으로 가강수량과 구름물량을 산출하는 기기로 고정된 위치에서 상시관측이 가능하여 라디오존데의 관측공백을 메우기 위해 사용되고 있다. 국내의 경우 3개의 관측지점(대관령, 해남, 고산기상대)에서 관측을 수행하고 있으며 2009년 이후 기상청에서 수직측풍 장비와 동일한 장소(강릉, 군산, 마산, 문산, 서해, 원주, 울진, 철원, 추풍령)에 라디오미터를 설치하여 고층기상 통합관측자료 생산 기반을 구축하여 위험기상을 감시하기 위한 상시 관측을 수행하고 있다.

라디오미터 관측 자료의 품질은 주로 라디오미터의 연직 가강수량값과 라디오존데에서 산출된 가강수량값의 비교를 통해 판단되며 많은 연구를 통해 검증이 이루어졌다(Baelen et al., 2005; Hogg et al., 1983; Liou et al., 2001). 국내에서도 해남(Radiometrics, TP/WVP-3029A)과 대관령(Radiometrics, WVR-1100)에 설치된 라디오미터 관측 자료의 검증연구가 수행되었다(전은희 외, 2008; 양하영 외, 2010). 특히 2006년 9월 30일부터 10월 20일까지 총 21일간 대관령에서 GPS와 공동관측을 수행하였는데 가강수량의 표준편차와 RMS 오차 모두 1 mm 내외로 산출되었다(하지현 외, 2007).

Snider and Rottner (1982), 정관영 외(1998)는 라디오미터에서 관측된 구름물량 분포를 조사하여 구름 내에서 물의 수평 이동량을 구하고 연직 강수량과 비교하여 인공증우 실험을 통한 강우 최대량 산출에

이용하였다. 지준범 외(2010)는 복사모형의 입력자료 중 시간에 대한 변동성이 크며 여러 파장영역에 영향을 미치는 가강수량을 보정하기 위해 각 기상관측소의 기압, 기온 및 상대습도 자료로부터 산출된 가강수량과 라디오미터에서 관측된 가강수량 자료와 비교하였다. Roebeling et al.(2008), 원혜영 외(2010a)는 장기간에 걸친 라디오미터의 관측으로 얻은 가강수량과 구름물량의 계절별, 월별, 시간별 분석 연구를 수행하였다. 또한 겨울철 강수형태에 따른 예보인자들의 분포를 분석하여 겨울철 강수형태 결정과 예측가능성이 연구되었다(원혜영 외, 2010b).

본 연구에서는 라디오미터에서 관측된 가강수량과 구름물량 자료를 이용하여 청주, 합천, 대관령지역에서 이들의 분포특성을 살펴보고자 한다.

## 자료 및 방법

본 연구에 이용된 라디오미터(Radiometrics, WVR-1100)는 대기로부터 23.8 GHz와 31.4 GHz의 장파복사를 수신하여 지정된 경로에서 밝기온도를 관측하여 가강수량과 구름물량을 실시간으로 산출하는 기기로 가강수량과 구름물량을 추정하는 기본적인 원리는 Westwater (1993)에 의해 소개되었다.

대기에서 수증기의 양은 가강수량(precipitable water vapor)이라 불리는 양으로 설명되며 어떤 두께의 대기층 내에 함유되어 있는 수증기가 전부 응결한다고 가정하였을 경우의 물의 양을 말하며 실제 강수량은 아니다. 가강수량의 단위는  $g\ cm^{-2}$ 로 물 1 g은  $1\ cm^3$ 이므로 단위는 보통  $cm^3\ cm^{-2}$  또는 간단히 cm로 표현된다. 구름물량(cloud water)은 구름 안에 존재하는 물의 양을 말하며 일반적으로 단위체적의 공기 중의 증량농도로 나타내는데 본 연구에 사용된 라디오미터는 공기 기둥 내의 누적 구름물량을 측정하며 단위는 cm로 표현된다.

Fig. 1은 라디오미터와 라디오존데의 관측 지역을 나타낸 것이다. 라디오미터는 2001년 2월부터 9월까지 청주(36.4°N, 127.3°E), 2002년 7월 달을 제외한 2001년 12월부터 2002년 11월까지 합천(35.3°N, 128.1°E), 그리고 2006년 1월부터 2010년 12월까지 대관령(37.4°N, 128.4°E)으로 이동하여 관측을 수행하였다. 본 연구에 사용된 라디오미터는 강수 시 장파복사를 수신하는 레이더 부분에 강수에 의한 수막이 형성되어 가강수량을 과대추정하기 때문에 관측 자료

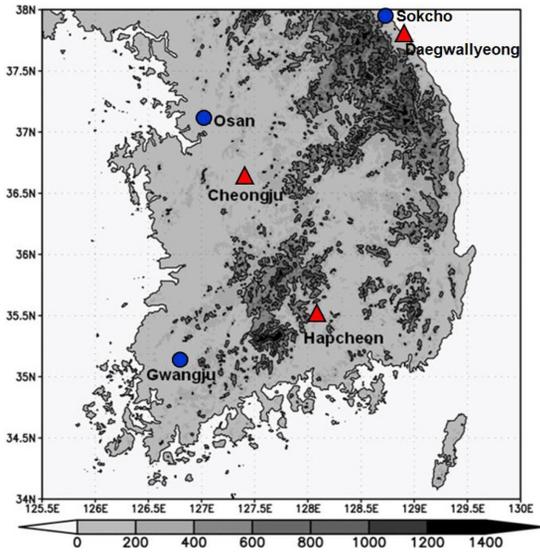


Fig. 1. Location of the microwave radiometer (triangle) and the radiosonde (circle) observation sites.

의 품질관리를 위하여 강수일의 관측 자료를 제거하였다.

청주, 합천, 대관령에서 관측된 라디오미터 자료의 정확도를 검증하기 위하여 각 관측지역에서 가장 가까이 있는 오산(37.1°N, 128.0°E), 광주(35.0°N, 126.5°E), 속초(38.1°N, 128.3°E) 라디오존데에서 산출된 가강수량을 비교하였다. 라디오존데에서 가강수량 산출 방법은 Balogun and Adedokun (1986)의 경험식을 이용하였으며 라디오미터 가강수량은 라디오존데의 비양시간을 고려하여 30분 평균한 값과 비교하였다. 0000 UTC, 1200 UTC에 관측된 고층관측자료의 표준등압면 고도(1000, 925, 850, 700, 500, 400, 300, 250, 200 hPa)에서 각 층의 온도와 노점온도를 이용하여 비습을 산출한 후 다음의 식을 이용하여 가강수량을 복원하였다.

$$PWV_{RS} = \frac{1}{\rho_w} \left( \frac{1}{g} \int_{p_1}^{p_2} \bar{q} dp \right)$$

여기서  $\rho_w$ 는 물의 밀도이고  $g$ 는 중력가속도(9.8 m s<sup>-2</sup>),  $\bar{q}$ 는 대기층 사이의 평균 비습이다.

### 결과 및 논의

#### 라디오미터 관측자료 검증

Fig. 2는 라디오미터와 라디오존데의 가강수량을

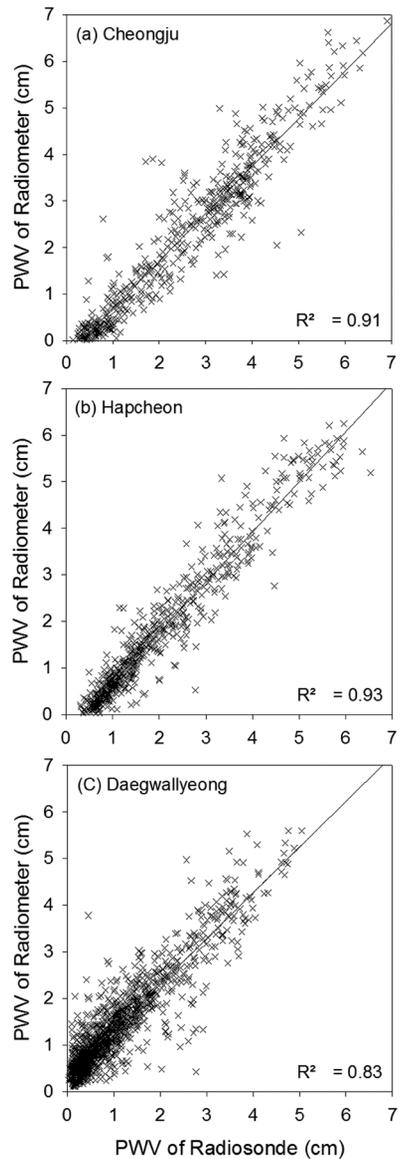
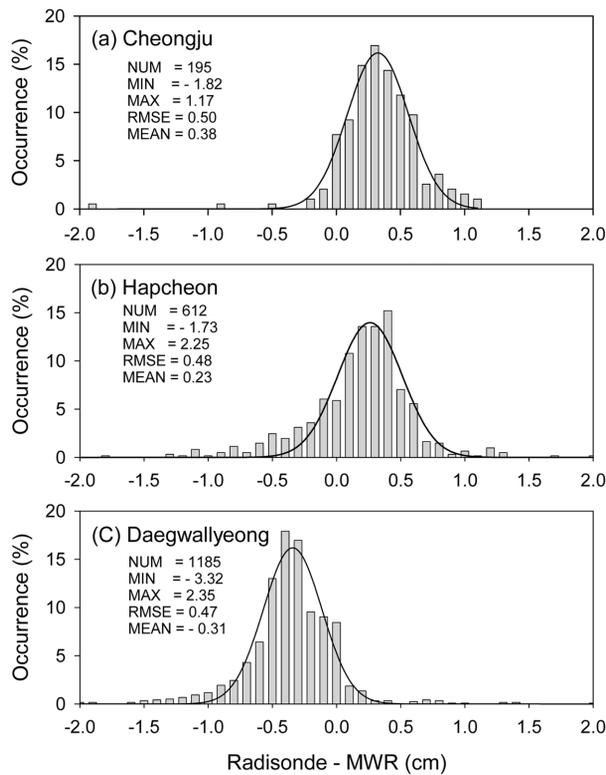


Fig. 2. Scatter diagram of the 30-min averaged precipitable water vapor measured at radiosonde versus microwave radiometer: (a) Feb. 2001-Sep. 2001 at Cheongju, (b) Dec. 2001-Nov. 2002 at Hapcheon (except Jul.), (c) Jan. 2006-Dec. 2010 at Daegwallyeong (Rainy case is eliminated).

비교한 것으로 청주-오산은 0.91, 합천-광주는 0.93, 대관령-속초는 0.83으로 좋은 상관도를 보인다. 각 지역의 평균제곱근오차(Root Mean Square Error)는 청주, 합천, 대관령이 각각 0.50, 0.48, 0.47 cm로 유사하게 나타난다(Fig. 3). 청주와 합천의 가강수량 편차는 평균 0.38, 0.23 cm으로 라디오존데 산출 가강



**Fig. 3.** Difference of the precipitable water vapor between the radiosonde and the microwave radiometer: (a) Osan-Cheongju, (b) Gwangju-Hapcheon, (c) Sokcho-Daegwallyeong.

수량이 더 크게 나타나는 반면 대관령의 경우 평균  $-0.31$  cm로 라디오미터의 관측값이 더 크게 나타난다. 이는 라디오미터와 라디오존데 관측지점 사이의 거리 차에 의해 같은 대기 상태를 관측하지 않는다는 것과 속초의 경우 라디오존데가 비양된 후 해양으로 이동하기 때문에 청주, 합천과 다른 경향을 보이는 것으로 추정된다. Wu et al.(2003)의 GPS와 라디오존데에서 산출된 가강수량을 비교한 연구결과를 보면 두 측기 간 가강수량은 0.86으로 좋은 상관도를 보이지만 RMSE가 0.47 cm로 나타나는데 그 원인으로 라디오존데 습윤 센서 보정(calibration)의 불확실성 때문이라고 지적하였다. Kwon et al.(2007)의 연구에서도 국내에서 비양된 라디오존데와 GPS에서 산출된 가강수량을 비교한 결과 RMSE가 2.45 mm로 유사한 결과가 나타났다.

위의 결과를 종합해 보면 검증 시 참값으로 사용된 라디오존데와 여러 가지 원인에 의한 편차가 존재하지만 라디오미터에서 관측된 가강수량이 각 지역의 특성을 잘 관측하고 있다고 사료된다. 이는 라디

오미터 관측 자료의 품질이 우수하다는 것을 나타내며 구름물량 또한 잘 관측하고 있음을 알 수 있다.

### 가강수량 특성 분석

Fig. 4는 청주, 합천, 대관령에서 관측된 가강수량의 월평균 값을 나타낸 것으로 여름철 가강수량은 각각 3.7, 4.0, 3.1 cm으로 위도가 낮은 합천의 가강수량이 가장 높게 나타난다.

일반적으로 대기 중에 포함할 수 있는 수증기량은 기온이 높을수록 많으므로 가강수량은 수증기량이 많은 적도지방에서 높고 극지방에 낮게 나타나며 중위도 지방에서의 가강수량은 여름철의 가강수량이 높고 겨울에 낮게 나타난다(이승호, 2007). 이광호(1999)의 1000 hPa면의 12시간 지속성 노점자료를 이용한 시공간적 가강수량 분포 특성을 보면 내륙지방에서는 상대적으로 위도가 높은 태백산맥 지역보다 위도가 낮은 지리산 부근의 가강수량이 1 cm 정도 높게 나타난다. 또한 2007년 9월부터 2008년 8월까지 해남(원혜영 외, 2010a)에서 관측된 여름철 가강수량은

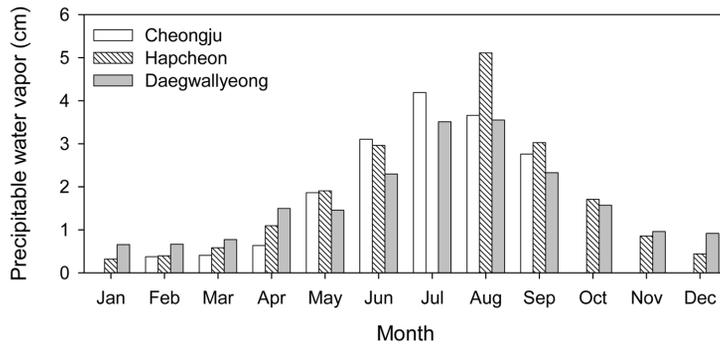


Fig. 4. Monthly means of precipitable water vapor observed by microwave radiometer at Cheongju (white bars), Hapcheon (pattern bars) and Daegwallyeong (grey bars).

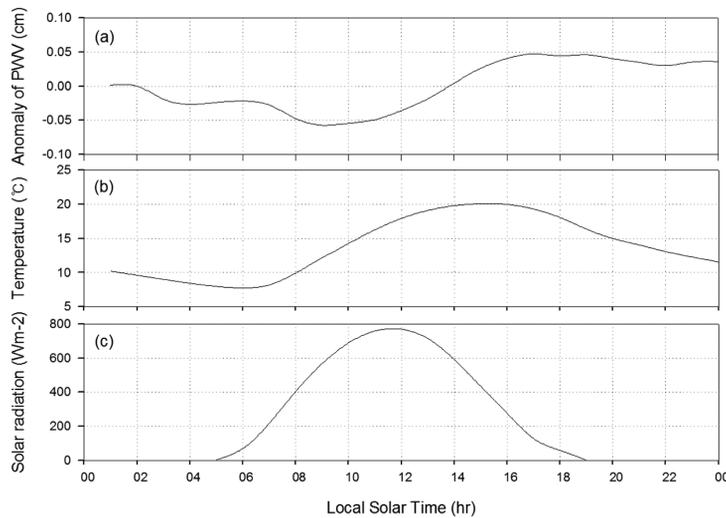


Fig. 5. Time series of mean diurnal variations: (a) anomaly of precipitable water vapor, (b) temperature, and (C) solar radiation observed at Cheongju during the period from 1 March to 31 May 2001.

4.56 cm로 본 연구의 관측지역보다 상대적으로 낮은 위도에 위치한 해남의 가강수량이 높게 나타난다.

가강수량과 기온과의 상관성을 더 자세히 알아보기 위해 청주, 합천, 대관령의 평균 가강수량 아노말리 (anomaly)와 온도, 일사량과의 관계를 분석하였다. 세 지역 다 유사한 관계를 보이므로 대표적으로 청주의 봄철 사례에 대해 Fig. 5에 나타냈다. 온도는 일출에 따라 0600 LST에 증가하기 시작하여 1500 LST에 19°C인 최대값에 달한다. 일사량을 보면 1200 LST에 최대에 달한 후에 감소하기 시작한다. 하지만 가강수량 아노말리는 1000 LST에 증가하여 1600 LST에 최대에 이르는데 일출 이후 가열된 지표면의 잔존 열 에너지에 의해 대기 중 증발산이 시작되어 이로 인해 가강수량이 증가했다고 볼 수 있다.

Dai et al.(2002) 등의 연구결과를 보면 가강수량의 일변화는 대기복사와 태양복사에너지의 영향을 받는다고 지적하였다. 또한 Guldner와 Spankuch (1998)은 가강수량의 일변화는 증발의 영향을 받는데 이 증발은 일출 후 태양복사에 의해 증가하기 시작하여 일몰 때 감소한다고 하였다. GPS에서 산출된 가강수량의 일변동량의 연구에서도 유사한 결과를 보인다 (Guerova et al., 2005; Wu et al., 2003).

#### 구름물량 특성 분석

Fig. 6은 청주, 합천, 대관령지역의 구름물량 관측 값을 월 평균한 것으로 봄철은 청주, 합천, 대관령이 0.05, 0.02, 0.05 mm이며 여름철은 각각 0.03, 0.01, 0.20 mm이다. 월평균 구름물량 분포를 보면 세 지역

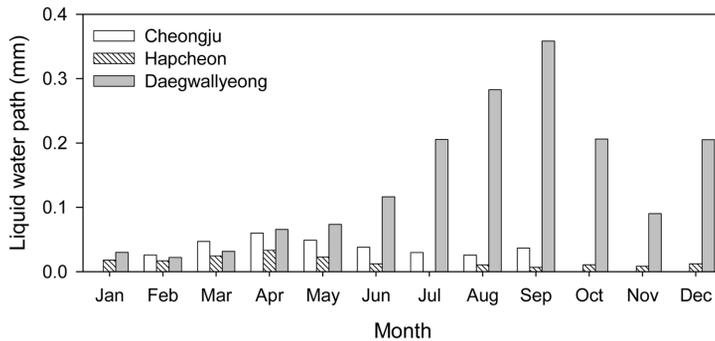


Fig. 6. Monthly means of liquid water path observed by microwave radiometer at Cheongju (white bars), Hapcheon (pattern bars) and Daegwallyeong (grey bars).

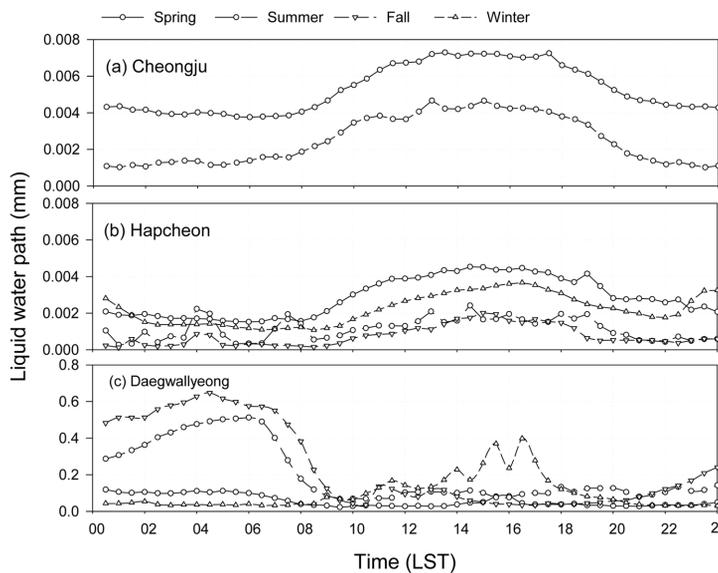


Fig. 7. Seasonal and diurnal variation of liquid water path measured at Cheongju, Hapcheon and Daegwallyeong.

모두 뚜렷한 월변화를 보이며 지역에 따른 차이를 보인다.

구름물량의 계절별 일변화를 보면 청주와 합천지역은 0800 LST부터 증가하기 시작하여 1400 LST에 최대값이 되고 그 이후부터 감소하는 경향을 보인다 (Fig. 7). 청주와 합천의 구름물량을 비교해 보면 합천이 훨씬 적게 나타나는데 평지에 위치한 청주와 달리 소백산맥으로 인한 편서풍의 구름차폐가 발생하기 쉬운 합천지역은 지형 및 지리적인 위치 때문에 청주지역보다 더 적은 구름물량을 보이는 것으로 사료된다. Roebeling et al.(2008)은 CloudNET의 2004년 4월부터 8월까지 Palaiseau와 Chilbolton에서 관측된 라디오미터와 Meteosat-8의 SEVIRI (Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager)의 구름물량

일변동을 연구하였다. 그 결과 Palaiseau는 Chilbolton보다 더 얇은 구름이 관측되었는데 이로 인해 Palaiseau의 구름물량이 Chilbolton에 비해 2배 정도 적게 나타난다고 지적하였다.

대관령은 두 지역과 다른 구름물량 일변동을 보이므로 지역에 따른 차이점을 알아보기 위해 안개 발생에 따른 구름물량 변화를 분석하였다. 청주는 전체 관측일 190일 중 안개일이 7일이므로 분석에서 제외하였다. 합천은 관측 기간 중 111일의 안개가 발생하였고 강수를 제외하면 67일 발생하였다. 안개발생 유무에 따른 합천의 일평균 구름물량의 편차(안개일-비 안개일)는 봄, 여름, 가을, 겨울이 각각 -0.003, 0.003, 0.001, 0.007 mm로 구름물량의 차이가 크지 않으며 일변동도 안개 유무와 관계없이 거의 유사하게 나타난다.

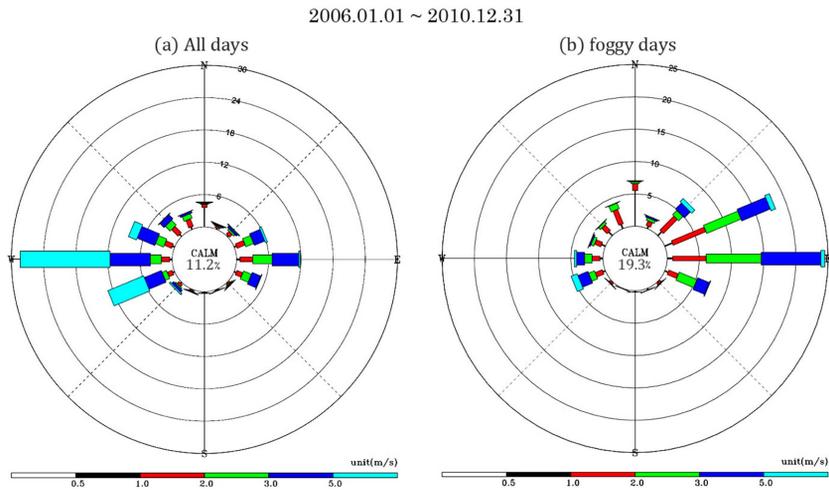


Fig. 8. Wind rose diagrams at Daegwallyeong, based on the (a) all days and (b) foggy days.

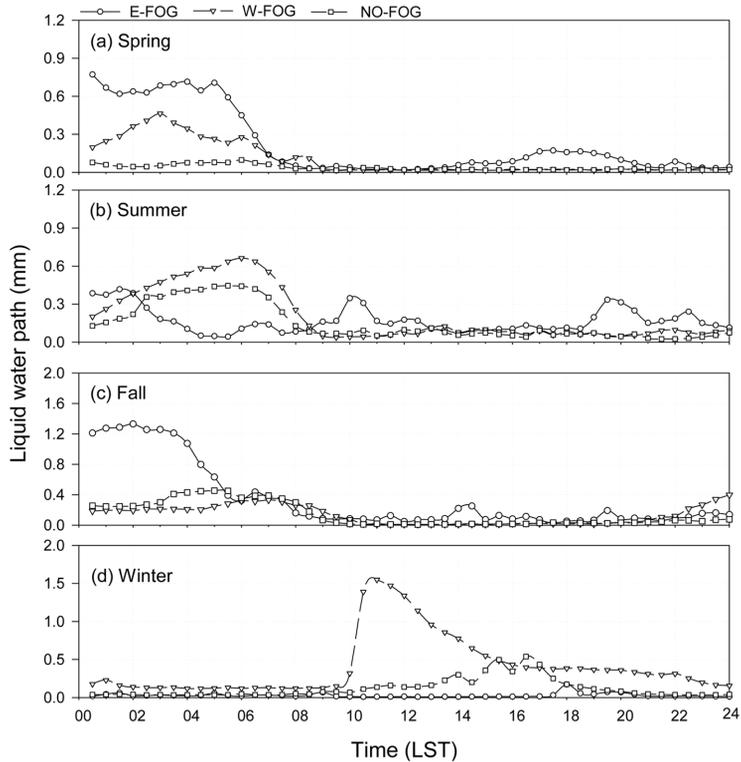


Fig. 9. Seasonal and diurnal variation of liquid water path measured at Daegwallyeong by the fog.

대관령은 태백산맥이 남북으로 놓여져 동쪽으로 급경사면을 이루고 있고 동해안과 가까운 지리적 위치 때문에 전 계절에 걸쳐 지역적인 특성에 따른 국지적인 기상현상이 많이 발생한다(소선섭과 이영기, 1998). 또한 동해상으로부터 습한 기류가 유입되어

하층운과 안개가 자주 발생한다. Fig. 8은 2006년부터 2010년까지 대관령기상대에서 관측된 전체일(Fig. 8a)과 안개일(Fig. 8b)의 바람장미로 안개는 대부분 동풍일 때 발생하며 풍속이  $0.2 \text{ m s}^{-1}$  이하인 무풍 상태도 19.3%로 나타난다. 그러므로 대관령의 구름

물량 일변화는 안개발생 유무와 안개발생 시의 풍향에 따라 분석하였다(Fig. 9).

대관령의 봄과 가을에는 동풍안개에 의해서 0000 LST부터 0600 LST까지와 1500 LST부터 2100 LST까지 수액량이 증가하며 이는 안개가 발생하는 시간과 일치한다. 대관령 안개는 대부분 2-5시간의 지속 시간을 가지는데 구름물량 증가한 후 감소하는 시간과 관련이 있는 것으로 보인다. 대관령에서 여름철에 발생하는 안개의 50% 이상이 강수와 같이 발생하므로(양하영과 오성남, 2005) 강수 사례를 제거하고 분석하여 여름철 동풍안개 사례보다 서풍안개와 안개가 없는 사례가 봄, 가을에 비해 여름철에 낮게 나타나는 것으로 사료된다.

동풍안개가 발생한 날과 비안개일의 일평균 구름물량의 편차는 봄, 여름, 가을이 각각 0.186, 0.023, 0.206 mm로 차이가 크게 나타났으며 일변동도 안개 유무에 따라 다른 특성을 보인다.

Fig. 9d를 보면 겨울철 서풍안개 사례일의 구름물량이 높게 나타나는데 이는 전날 내렸던 눈이 녹지 않고 마이크로파를 받아들이는 레이돔에 쌓여서 과대 추정된 것으로 보이며 향후 이에 대한 분석이 더 이루어질 것이다.

## 결 론

가강수량과 수액량의 시공간적 분포와 특성을 분석하기 위해 청주, 합천, 대관령에서 라디오미터의 이동관측을 수행하였다. 라디오미터 관측 자료의 품질은 라디오존데와 가강수량 비교를 통해 상관도가 0.8 이상으로 우수하다는 것을 알 수 있다.

가강수량의 경우 월별 변화가 뚜렷하게 나타났으며 비록 세 지역에서의 관측이 같은 기간이 아닌 샘플 관측이기 때문에 연별 불확실성이 존재하나 지역적인 차이는 크게 나타나지 않아 현업 동시 관측 시에도 유사한 결과가 나올 것으로 추정된다. 구름물량은 월별 변화뿐만 아니라 지역적인 차이도 보이는데 이는 연변동보다는 지형 및 지리적 영향에 기인한 것으로 판단된다. 청주와 합천의 구름물량의 일변동성은 봄철에 가장 크게 나타났으며 대관령의 경우 안개에 의한 구름물량 변동이 나타났다.

본 연구는 기상청 현업 라디오미터 9대(철원, 문산, 원주, 강릉, 서해, 군산, 창원, 추풍령, 울진)의 구축에 기여한 연구들 중 하나였으며, 향후 이 현업자료

들과 국립기상연구소 2대(해남, 대관령)의 관측 자료를 합성하면 한반도 가강수량과 수액량에 대한 전국적인 기후적 공간분포 특성 분석이 가능할 것으로 사료된다.

## 사 사

본 연구는 기상청 재원의 국립기상연구소 주요사업 “시범지역 수문기상기술개발” 및 “녹색성장 기상자원 기술개발”과 한국연구재단(No. 2009-0 085533)의 일환으로 수행되었다.

## 참고문헌

- 소선섭, 이영기, 1998, 영동 지방에서 발생한 국지적 호우의 사례분석. 한국지구과학회지, 19, 590-609.
- 양하영, 오성남, 2005, 대관령 산악지역 안개조절을 위한 구름특성 조사. 한국방재학회논문집, 5, 45-56.
- 양하영, 정진입, 장기호, 차주완, 정재원, 김유철, 이명주, 배진영, 이세종, 김금란, 최영진, 조하만, 2010, 대관령 구름물리관측시스템 산출물 평가 및 FSSP를 이용한 시정환산 시험연구. 대한원격탐사학회지, 26, 65-73.
- 원혜영, 김연희, 장동언, 2010a, 해남 라디오미터로부터 산출된 가강수량과 구름물량의 분포특성. 한국기상학회 대기지, 20, 1-12.
- 원혜영, 김연희, 장동언, 2010b, 라디오미터를 이용한 겨울철 강수형태 결정 및 예측가능성 고찰. 한국기상학회 대기지, 20, 229-238.
- 이광호, 1999, 한국에서 기록된 호우의 수분최대화를 위한 1000 hPa면 12시간 지속성 최대 노점에 관한 수문기상학적인 연구. 한국기상학회 대기지, 35, 519-530.
- 이승호, 2007, 기후학. 푸른길, 서울, 403 p.
- 전은희, 김연희, 김기훈, 이희상, 2008, 지상 기반 듀얼 밴드 라디오미터의 운영 및 활용 가이드선. 한국기상학회 대기지, 18, 441-458.
- 정관영, 김효경, 이선기, 정영선, 1998, Microwave radiometer를 이용한 안동지역의 수액량 및 증우가능량 추정. 대한원격탐사학회지, 14, 165-174.
- 지준범, 김영도, 이원학, 이규태, 2010, 일사 관측 자료에 의한 남한의 태양복사 시공간 분포. 한국지구과학회지, 31, 720-737.
- 하지현, 박관동, 장기호, 양하영, 2007, MWR 관측치와 비교를 통한 GPS 가강수량 정밀도 검증. 한국기상학회 대기지, 17, 291-298.
- Baelen, J.V., Aubagnac, J.P., and Dabas, A., 2005, Comparison of near-real time estimates of integrated water vapor derived with GPS, Radiosonde, and microwave radiometer. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 22, 201-210.
- Balogun, E.E. and Adedokun, J.A., 1986, On the variation

- in precipitable water over some west african station during the special observation period of WAMAX. *Monthly Weather Review*, 114, 772-776.
- Chahine, M.T., 1992, The hydrological cycle and its influence on climate. *Nature*, 359, 373-380.
- Dai, A., Wang, J., Ware, R.H., and Hove, T.V., 2002, Diurnal variation in water vapor over North America and its implications for sampling errors in radiosonde humidity. *Journal of Geophysical Research*, doi:10.1029/2001JD000642.
- Guerova, G., Brockmann, E., Schubiger, F., Morland, J., and Matzler, C., 2005, An integrated assessment of measured and modeled integrated water vapor in Switzerland for the period 2001-03. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 44, 1033-1044.
- Guldner, J. and Spankuch, D., 1998, Results of year-round remotely sensed integrated water vapor by ground-based microwave radiometer. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 38, 981-988.
- Hogg, D.C., Guiraud, F.O., Snider, J.B., Decker, M.T., and Westwater, E.R., 1983, A steerable dual-channel microwave radiometer for measurement of water vapor and liquid in the troposphere. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 22, 789-806.
- Kwon, H.-T., Iwabuchi, T., and Lim, G.-H., 2007, Comparison of precipitable water derived from ground-based GPS measurements with radiosonde observations over the Korean Peninsula. *Journal of Meteorological Society of Japan*, 85, 733-746.
- Liou, Y.A., Teng, Y.T., Hove, T.V., and Liljegren, J.C., 2001, Comparison of precipitable water observations in the near tropics by GPS, microwave radiometer, and radiosondes. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 40, 5-15.
- Roebeling, R.A., Deneke, H.M., and Feijt, A.J., 2008, Validation of cloud liquid water path retrievals from SEVIRI using one year of CloudNET observation. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 47, 206-222.
- Snider, J.B. and Rottner, D., 1982, The use of microwave radiometry to determine a cloud seeding opportunity. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 21, 1286-1291.
- Westwater, E.R., 1993, Ground based microwave remote sensing of meteorological variables. *Remote sensing by Microwave Radiometry*, John Wiley & Sons, NY, USA, 561 p.
- Wu, P., Hamada, J., Mori, S., Tauhid, Y.I., Yamanaka, D., and Kimura, F., 2003, Diurnal variation of precipitable water over a mountainous area of Sumatra Island. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 42, 1107-1115.

---

2011년 11월 2일 접수  
 2012년 4월 26일 수정원고 접수  
 2012년 6월 7일 채택