

초단기 예측모델에서 지상 GPS 자료동화의 영향 연구

김은희^{1)*} · 안광득¹⁾ · 이희춘²⁾ · 하종철³⁾ · 임은하³⁾

¹⁾국립기상과학원 관측예보연구과, ²⁾국립기상과학원 황사연구과, ³⁾국립기상과학원 관측기반연구과

(접수일: 2015년 7월 30일, 수정일: 2015년 11월 19일, 게재확정일: 2015년 11월 19일)

A Study on the Effect of Ground-based GPS Data Assimilation into Very-short-range Prediction Model

Eun-Hee Kim^{1)*}, Kwang-Deuk Ahn¹⁾, Hee-Choon Lee²⁾, Jong-Chul Ha³⁾, and Eunha Lim³⁾

¹⁾Numerical Data Application Division, National Institute of Meteorological Sciences, KMA, Seoul, Korea

²⁾Environmental Meteorology Research Division, National Institute of Meteorological Sciences, KMA, Jeju, Korea

³⁾Observation Research Division, National Institute of Meteorological Sciences, KMA, Jeju, Korea

(Manuscript received 30 July 2015; revised 19 November 2015; accepted 19 November 2015)

Abstract The accurate analysis of water vapor in initial of numerical weather prediction (NWP) model is required as one of the necessary conditions for the improvement of heavy rainfall prediction and reduction of spin-up time on a very-short-range forecast. To study this effect, the impact of a ground-based Global Positioning System (GPS)-Precipitable Water Vapor (PWV) on very-short-range forecast are examined. Data assimilation experiments of GPS-PWV data from 19 sites over the Korean Peninsula were conducted with Advanced Storm-scale Analysis and Prediction System (ASAPS) based on the Korea Meteorological Administration's Korea Local Analysis and Prediction System (KLAPS) included "Hot Start" as very-short-range forecast system. The GPS total water vapor was used as constraint for integrated water vapor in a variational humidity analysis in KLAPS. Two simulations of heavy rainfall events show that the precipitation forecast have improved in terms of ETS score compared to the simulation without GPS-PWV data. In the first case, the ETS for 0.5 mm of rainfall accumulated during 3 hrs over the Seoul-Gyeonggi area shows an improvement of 0.059 for initial forecast time. In other cases, the ETS improved 0.082 for late forecast time. According to a qualitative analysis, the assimilation of GPS-PWV improved on the intensity of precipitation in the strong rain band, and reduced overestimated small amounts of precipitation on the out of rain band. In the case of heavy rainfall during the rainy season in Gyeonggi province, 8 mm accompanied by the typhoon in the case was shown to increase to 15 mm of precipitation in the southern metropolitan area. The GPS-PWV assimilation was extremely beneficial to improving the initial moisture analysis and heavy rainfall forecast within 3 hrs. The GPS-PWV data on variational data assimilation have provided more useful information to improve the predictability of precipitation for very short range forecasts.

Key words: Ground-based GPS PWV, very-short-range forecast, data assimilation

*Corresponding Author: Eun-Hee Kim, Numerical Data Application Division, National Institute of Meteorological Sciences, 61 16-gil, Yeouidaebang-ro, Dongjak-gu, Seoul 156-720, Korea.
Phone : +82-70-7850-6861, Fax : +82-2-2181-0908
E-mail : ehkim2010@korea.kr

1. 서 론

최근 짧은 시간에 좁은 지역에서 발생하는 집중호우와 같은 위험기상 현상이 증가하고 있다. 이러한 위험기상 현상에 대해 수치예보 모델의 초단시간 강수 예측을 향상하기 위해서는 초기 강수형성에 소요되는 스핀업(spin-up) 시간을 줄이는 것이 중요하다. 강수 스핀업 시간은 뇌우와 같은 스톰규모 예측에서는 3~6 시간 적분이며(Kain et al., 2010; Sun et al., 2014), 이 시간 내의 강수 과소모의를 개선하기 위한 연구들이 활발히 진행되어 왔다(Kasahara et al., 1992; Kim et al., 2004).

강수 스핀업 시간을 감소시킬 수 있는 방법으로 Sun et al. (2012)은 대류규모가 고려된 모델 초기장 생성과 잦은 분석을 통한 warm start 방법(Benjamin et al., 2004)을 제시하였다. 또한, Clark et al. (2007)은 모델 초기장에 구름물리 변수를 추가하는 “hot start” 방안을 개발하여 미국해양대기청(National Oceanic and Atmospheric Administration)에서 개발된 LAPS (Local Analysis and Prediction System)에 적용하였다(Jian et al., 2003).

LAPS의 hot start 방법은 레이더, 위성, 윈드프로파일러 등 시공간 고해상도 관측 자료를 이용한 3차원 구름 분석과정과 이를 이용한 비단열 초기화 과정으로 구성된다(Albers et al., 1996; Schultz and Albers, 2001). 비단열 초기화는 구름의 유형 및 두께에 따른 연직속도 프로파일이나 구름 및 강수 물리량과 역학적으로 균형을 이루도록 조절하는 과정을 말한다. Kim et al. (2004)은 위의 과정을 통해 산출된 역학장과 균형을 이룬 구름 및 강수 물리량 초기 자료가 적분 시간에 따라 모델 환경에 빠르게 적용하여 강수 생성 시간을 단축하는 것을 보였다.

효과적인 hot start 방법은 수증기, 구름 관련 변수 등에 대한 고해상도의 관측 자료를 요구한다. RUC (Rapid Update Cycle)은 NCEP (National Centers for Environmental Prediction)에서 1시간 자료동화와 예측을 수행하는 분석 순환체계(cycle)로서 항공기, 위성, 윈드프로파일러, 지상기반 GPS (Global Positioning System) 등 짧은 주기의 관측 자료를 이용한다(Benjamin et al., 2004). Sun et al. (2014)은 도플러 레이더 이외에 지상기반 GPS, 위성 적외/가시 자료, 항공기 자료가 중규모 RUC에 유용한 자료임을 보였다.

수치모델에서 지상기반 GPS 자료는 수증기 관련 정보를 시공간적으로 조밀하게 제공할 수 있어 이를 이용하여 모델의 예측 성능을 향상시키려는 연구들이 전 세계적으로 활발히 진행되고 있다. 미국은 RUC에 GPS 가강수량(Precipitable Water Vapor: PWV)을 동화하여 수증기 정보를 실시간으로 활용한 경우, 다른

관측 자료를 사용하였을 때 보다 단기 습도 예측이 정확해졌으며 특히, 850 hPa와 700 hPa 습도의 6시간, 12시간 예측 결과에서 긍정적인 효과를 보였다(Smith et al., 2007). 영국 기상청에서는 NAE (North Atlantic and European) 모델에 지상 GPS의 연직총지연량(Zenith Total Delay, ZTD) 자료를 각각 3차원 변분 자료동화와 4차원 변분 자료동화에 활용한 결과, 모델 예측에서 상대습도와 운량이 증가하는 결과를 보였다(Bennitt and Jupp, 2012). 일본 기상연구소는 현업 MSM (Mesoscale Model) 모델에 GPS로부터 산출된 가강수량을 집중호우 사례에 대해 4차원 변분 자료동화한 경우 집중호우를 일으키는 수렴역과 강수 예측의 위치 오차가 개선됨을 보였다(Shoji et al., 2009). 중국에서는 MM5 (Fifth-Generation NCAR/Penn State Mesoscale Model)의 4차원 변분 자료동화 시스템에 GPS 가강수량을 활용하여 장마(Meiyu) 전선을 따라 중규모 대류계가 연속적으로 발생한 집중호우 사례를 성공적으로 모의한 바 있다(Zhang et al., 2007).

국내에서는 고층 관측 자료 또는 모델 자료와 비교를 통해 지상기반 GPS 가강수량의 정확도를 검증하는 연구가 수행되었다(Ha et al., 2007; Park et al., 2009; Kwon et al., 2010). 수치모델에 활용한 연구로는 한반도 GPS 관측망으로부터 획득된 가강수량을 WRF (Weather Research and Forecasting) 3차원 변분 자료동화에 적용하여 강수강도와 강수대의 위치를 관측과 유사하게 모의한 바 있다(Kwon and Lim, 2008). 또한 한반도의 GPS 관측지점에 대해 MM5를 사용한 관측시스템 시뮬레이션 실험(Observation System Simulation Experiment)을 수행하여 모의 가강수량 관측 자료를 4차원 변분 자료동화를 했을 때 연직 습윤장 구조 모의에 긍정적인 효과를 보였다(Kwon et al., 2001).

본 연구에서는 지상기반 GPS 가강수량 자료동화가 초단기 예측모델에 미치는 효과를 분석하였다. 이를 위해 먼저 수도권에서 상시 관측하는 지상기반의 GPS 자료로부터 가강수량을 산출하여 고층기상관측 및 재분석자료와 비교하여 정확도 분석을 수행하였다.

2절에서는 GPS 관측 자료 및 정확도 분석결과를 제시하였고, 3절에 수치모델과 자료동화 방법에 대해 기술하였다. 4절에 사례실험의 분석 결과를 서술하고 5절에 연구내용을 요약하였다.

2. GPS 가강수량 자료

GPS 신호는 대류층을 통과하면서 대기의 건조가스와 수증기에 의해 신호가 굴절되어 오차가 발생하며, 이를 대류층 신호지연이라 한다. 대류층 신호지연량은 대기 중의 가스, 에어로졸 및 수증기량에 비례한

다. 산소, 질소, 이산화탄소 등의 가스와 에어로졸에 의한 지연은 건조지연(dry delay), 수증기에 의한 지연은 습윤지연(wet delay)이라 한다. GPS 기반의 수증기량 추정에는 습윤지연량을 역으로 이용해 신호 경로 상의 대기 수증기량을 산출하여 가강수량으로 표현한다. GPS 기반의 가강수량 산출은 수신지점을 기준으로 천정방향의 대류층 총지연량(Zenith Total Delay: ZTD)을 이용한다. 천정방향 총지연량, 천정방향 건조지연(Zenith Hydrostatic Delay: ZHD)과 천정방향 습윤지연(Zenith Wet delay: ZWD)의 관계는 식(1)과 같다.

$$ZTD = ZHD + ZWD \quad (1)$$

이 중 건조지연량은 전체 대류층 신호지연량 중 90%를 차지하며 GPS 관측지점의 지상 기압을 이용해 산출 가능하다(Saastamoinen, 1972). ZTD는 대략 2~3 m 범위 내에서 분포하며 지상 기압의 오차를 0.3 hPa 미만으로 보정한다면 ZHD의 잡음을 1 mm 이내로 계산해 낼 수 있다(Bevis et al., 1992).

$$ZHD = \frac{(2.2779 \pm 0.0024)P_s}{1 - 0.00266\cos 2\phi - 0.00028 h} \quad (2)$$

식(2)에서 P_s 는 지상기압(hPa), ϕ 는 관측소 위도(°), 그리고 h 는 관측소의 타원체고(ellipsoid height, m)이다. 여기에서 타원체고는 지구타원체 기준의 고도이다. 습윤지연량은 수증기의 시공간적 변이가 심해 지상관측만으로 정확한 양을 계산하기 어렵기 때문에 경험적 방법을 이용한다(Hopfield, 1969). 고정밀 과학 기술용 GPS 자료처리 소프트웨어인 GIPSY-OASIS (GNSS-Inferred Positioning System and Orbit Analysis Simulation Software)로 산출된 연직총지연량에서 위의 실험식으로 계산한 건조지연량을 감산하면 습윤지연량을 얻을 수 있고, 아래 식을 이용하여 가강수량으로 환산할 수 있다.

$$PWW = \frac{ZWD}{\rho R_v \left(\frac{k_3}{T_m} + k_2 \right)} \times 10^6 \quad (3)$$

여기서 ρ 는 물의 밀도로서 $998.00896 \text{ (kgm}^{-3}\text{)}$ 이고, R_v 는 수증기 기체상수로 $4.165 \times 10^2 \text{ (JK}^{-1}\text{kg}^{-1}\text{)}$ 이다. k_2 와 k_3 는 기체 굴절지수로서 Davis et al. (1985)에서 제시한 $17 \pm 10 \text{ (KhPa}^{-1}\text{)}$ 와 $(3.766 \pm 0.004) \times 10^5 \text{ (K}^2\text{hPa}^{-1}\text{)}$ 을 각각 사용하였다. T_m 은 평균온도(K)로 한국형 평균온도식(Ha and Park, 2008)을 사용하였다.

$$T_m = 0.884T_s + 23.4 \quad (4)$$

여기서 T_s 는 관측소 지상 기온(K)이고, GPS 가강수량 산출을 위해 필요한 기온 및 기압 자료는 동일 지

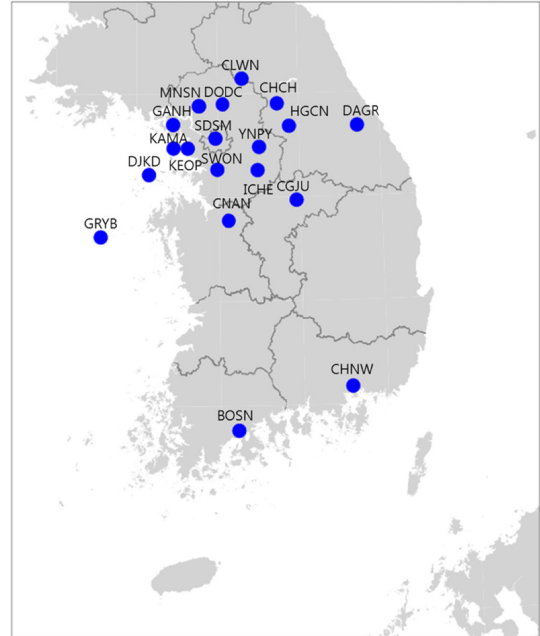


Fig. 1. The location of GPS observation sites.

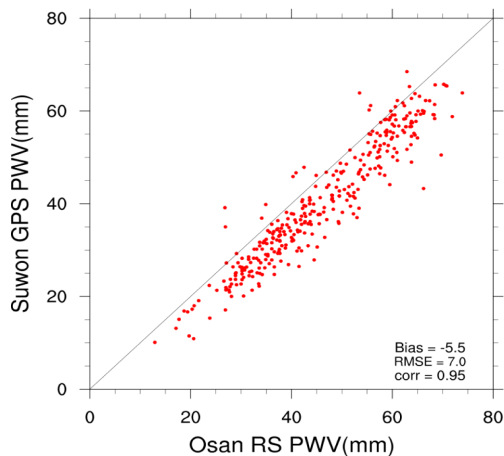
점에 설치된 AWS 자료를 활용하였다(Kim et al., 2011; Kim et al., 2012).

Figure 1은 국립기상과학원에서 대기의 수증기량 관측을 통한 위험기상 감시를 목적으로 운영중인 지상 기반의 GPS 수신기 위치를 나타낸 것이고, 각 수신기의 위도와 경도 정보를 Table 1에 나타내었다. 지상 기반 GPS로부터 수집되는 자료는 고정밀 자료처리 프로그램인 GIPSY-OASIS을 이용하여 단독측위기법으로 매시간 처리된다. IGS (International GNSS Service)에서 제공하는 GPS 위성궤도력 자료인 초신속궤도력(ultra rapid orbits)을 이용하면 관측시간에 대해 약 2시간 30여분 지연 후에 가강수량이 산출된다. Bernese를 이용하여 단독측위 및 짧은 거리의 두 지점만을 사용한 상대측위 결과에 따른 가강수량이 시간에 따른 변동폭이 크고, 라디오존데로부터 환산된 가강수량에 비해 5배 정도 크게 나타난 연구(Lim et al., 2013)와 비교하면 GIPSY-OASIS 단독측위기법은 안정적인 값을 산출하고 있다고 볼 수 있다.

GPS 산출 가강수량의 정확도를 비교하기 위해 수원 GPS와 직선거리로 약 20 km 떨어진 오산 라디오존데의 가강수량을 직접 비교하였다. 오산 라디오존데로부터 산출된 가강수량 자료는 기상청의 단열선도에서 제공하는 값을 이용하였다. 라디오존데는 6시간 간격으로 관측을 하므로 동일한 시각의 GPS 자료를 추출하여 비교하였다. 비교 기간은 2013년 여름철(6~8월)이며 초신속궤도력을 적용하여 산포도를 작성하였

Table 1. The list of GPS observational sites.

Station name	Latitude	Longitude
Boseong (BOSN)	34.7640934	127.2126392
Changwon (CHNW)	35.1705529	128.5724748
Cheorwon (CLWN)	38.1480021	127.3045737
Dongducheon (DODC)	37.9021147	127.0611616
Ganghwa (GANH)	37.707321969	126.446352682
Gyeongju(GRYB)	36.625351314	125.559526687
Icheon (ICHE)	37.2641806	127.4841819
Suwon (SWON)	37.2725	126.9854
Yangpyeong (YNPY)	37.486200748	127.507040616
Incheon airport (KAMA)	37.4796143	126.4485945
Incheon (KEOP)	37.4775	126.6244
Songwongdong (SDSM)	37.5715306	126.9660119
Daegwallyeong(DAGR)	37.677385	128.7187418
Chuncheon(CHCH)	37.90277706	127.736102002
Deokjeokdo(DJKD)	37.226424208	126.146641852
Hongcheon(HGCN)	37.6838	127.8803
Paju(MNSN)	37.8862	126.7658
Cheonan(CNAN)	36.7800	127.1189
Cheongju(CGJU)	36.9705	127.9526

**Fig. 2.** Scatterplot of the 6 hourly PWVs estimate from Radiosonde at Osan and GPS at Suwon using ultra rapid orbit from June to August 2013.

고, 상관관계 및 Bias와 RMSE를 계산하였다(Fig. 2). 라디오존데와 GPS로부터 산출된 가강수량은 여름철에 80 mm 범위 내에서 값이 분포하고 있으며 이전 연구(Shoji, 2009; Ha et al., 2010)와 유사한 결과를 보였다. 상관계수는 0.95로 높지만 GPS가 라디오존데보다 5.5 mm 낮게 가강수량을 산출하는 특성이 있고, RMSE는 7 mm로 나타났다. 이 수치는 2003~2009년 동안 한반도에 상륙한 태풍과 집중호우 6개 사례에

대해 전국 5개소의 GPS와 라디오존데를 분석한 결과(KMA, 2010)인 3~4 mm의 차이를 보인 것과 비교하면 3 mm 정도 크다. KMA (2010)에서는 GPS 상시관측소에서 산출된 가강수량을 라디오존데 관측지점의 가강수량으로 환산하기 위해 역거리가중법을 적용하여 비교하였고, 위험기상 사례에 대해서만 분석을 하였기 때문에 대기가 안정적으로 습한 상태이므로 오차가 크지 않은 것으로 판단된다.

라디오존데 관측 자료 외에 모델 분석장의 가강수량과도 비교를 수행하였다. 라디오존데와 GPS는 거리상 떨어져있기 때문에 GPS 지점 위치에 가장 가까운 모델 자료를 추출하여 비교하였다. 비교에 사용된 모델 자료는 KLAPS (Korea Local Analysis and Prediction System) 재분석 자료로 한반도 5 km 해상도의 1시간 간격 자료이다(Ha et al., 2010). 창원 지점의 라디오존데와 해당 지점의 KLAPS 재분석 자료 사이의 온도 프로파일을 비교한 연구(Ahn et al., 2015)에서 고도 9 km 이하에서 1 K 내의 Bias를 보였고, GPS와 비교할 수 있는 라디오존데의 개수가 적기 때문에 KLAPS 재분석 자료와 비교하였다. Figure 3은 KLAPS 재분석과 GPS 산출 가강수량간의 상관계수와 Bias, RMSE를 나타낸 것이다. 상관계수는 전국의 GPS 중 대관령과 보성 등에서 0.94 이하의 값을 보이며 그 외 지점에서는 0.94 이상으로 나타났다. 이 수치는 Park et al. (2009)이 같은 관측소 부지 내에 위치한 속초 GPS와 모델 예보장에 대해 상관계수를 구한 것과 비슷한 값이며, Vey et al. (2010)의 전지구

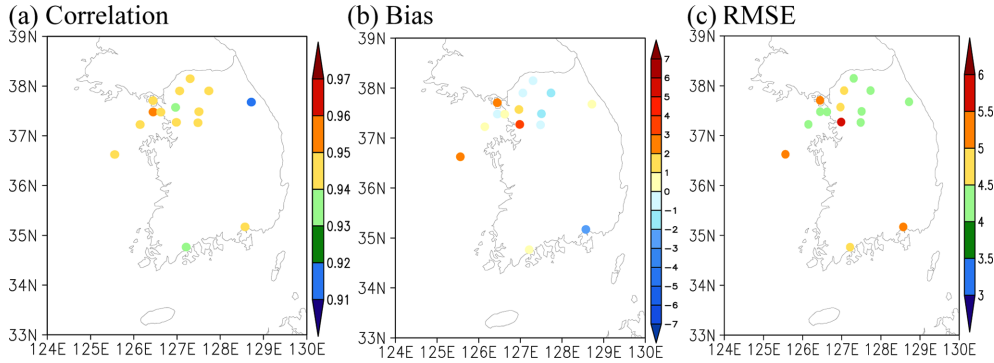


Fig. 3. Distribution of (a) correlation coefficients between the 1 hr PWV from reanalysis of KLAPS and GPS, (b) Bias and (c) RMSE from June to August 2013.

GPS와 NCEP/DOE (National Centers for Environmental Prediction/Department of Energy) 재분석 자료를 비교한 것보다 유사한 범위를 보이고 있다. 서해상과 경기 해안가에서는 모델에 비해 GPS가 가강수량을 과다 산출하며 내륙에서 과소 산출하는 특징을 보인다. 대관령과 같은 산악지역도 모델에 비해 GPS 관측에서 가강수량을 과다 산출하였다. 대체로 Bias가 큰 지점에서는 RMSE도 5 mm 정도로 크게 분포하였고, 나머지 지점에서는 5 mm 이하의 오차를 나타내었다.

3. 수치모델 및 자료동화 방법

3.1 수치모델

GPS로부터 산출된 가강수량을 활용하기 위해 사용한 수치모델은 KLAPS를 기반으로 설계된 수도권 특화예측시스템(Advanced Storm-scale Analysis and Prediction System: 이하 ASAPS)이다. KLAPS는 한반도를 영역으로 1시간 간격으로 분석과 예측을 수행하지만, ASAPS는 수도권을 영역으로 30분 간격으로 분석과 예측을 수행하는 특징이 있다. ASAPS는 배경장을 생산하는 체계와 분석장 및 예측장을 생산하는 체계로 나누어져 수행되며 1 km 예측을 수행하기 위해서는 5 km-1 km로 둥지격자체계가 필요하다. 모델의 수평 영역은 Fig. 4와 같이 배경장은 5 km (D01), 분석장 및 예측장은 1 km (D02)로 2개 영역이다. 수도권 특화예측시스템의 배경장은 5 km 모델에 대해 매 시간 수행되어 한반도 지역에 대해 9시간, 수도권 지역에 대해 6시간 예측을 수행하며 30분 간격으로 결과를 생성한다. 1 km 분석장을 생산하기 위해서는 배경장 결과로부터 분석을 위한 입력 자료를 처리하는 과정을 거쳐 다양한 관측 자료를 활용하여 분석을 수행한다(Ha et al., 2011). 1 km 예측장은 수도권 지역에 대한 5 km 예측장을 경계장으로 하고, 1 km 분석

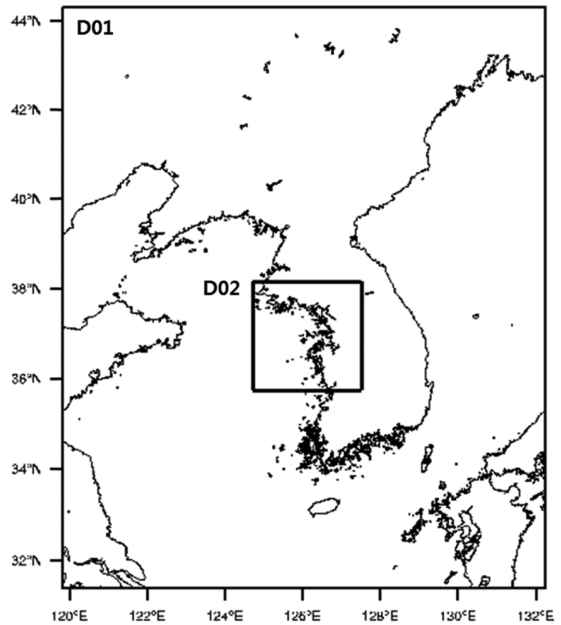


Fig. 4. Model grid for domain 1 (5 km) and domain 2 (1 km).

결과를 초기장으로 하여 매 30분마다 30분 간격으로 6시간 예측이 이루어지도록 구성하였다(NIMR, 2012).

예측을 위한 중규모 모델은 WRF V3.4.1 (Skamarock et al., 2008)이다. 수평해상도 5 km 영역에 대해 동서 격자 235개, 남북 격자 283개이고, 1 km 영역은 동서 격자 266개, 남북 격자 266개이다. 연직층은 지형을 따르는 시그마 면으로 40층이며 모델 상단은 50 hPa이다. 토지이용도 자료는 30초 해상도의 MODIS (MODerate resolution Imaging Spectroradiometer) 자료의 식생지수를 이용하여 군집화(clustering) 기법을 적

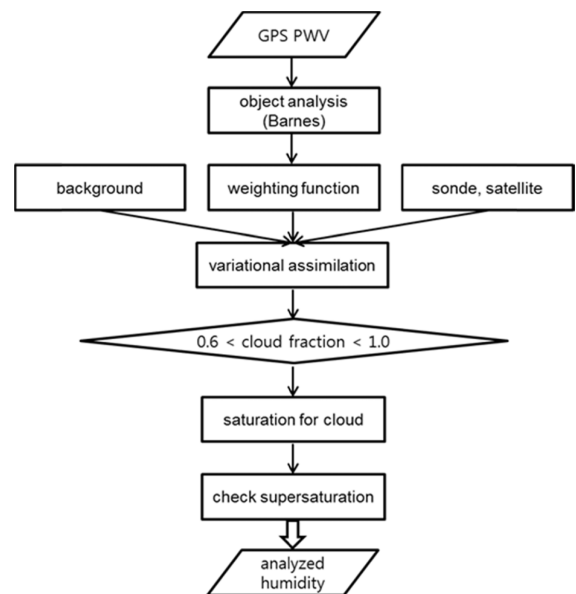
Table 2. The configuration of WRF model.

Model	WRF V3.4.1	
Domains	Domain 1	Domain 2
Horizontal resolution	5 km (235 × 283)	1 km (266 × 266)
Vertical resolution	40 eta levels (top: 50 hPa)	
Forecast time	9 hr (5 km, 30 min. intervals) 6 hr (1 km, 30 min. intervals)	6 hr (30 min. intervals)
Time step	20 s	4 s
Landuse	30 s MODIS+KLC	
Initial condition	5 km analysis	1 km analysis
Boundary condition	15 km forecast	5 km forecast
Microphysics	WDM 6 class	
Cumulus parameterization	None	
Radiation	SW: Dudhia, LW: RRTM	
Surface scheme	Noah land surface model	
Planetary Boundary Layer	YSU PBL	

용한 후 현장 관측 자료 등으로 검증을 거쳐 한반도 영역의 지면피복을 분류한 KLC (Kongju national university Land Cover) 자료를 이용하였다(Kang et al., 2010). 지면물리과정은 Noah-LSM (Land Surface Model)을 적용하였다. 구름 미세물리 모수화는 WDM6 기법(Lim and Hong, 2010), 장파복사 과정은 구름과 상호작용하는 RRTM 기법(Mlawer et al., 1997), 단파복사 과정은 청천 대기의 산란, 수증기의 흡수를 단순하게 하향 계산하는 Dudhia 기법(Dudhia, 1989)을 적용하였다. 경계층 물리과정은 YSU 방법(Hong et al., 2006), 적운 모수화 과정은 이용하지 않았다. Table 2는 수치실험 설정에 대한 요약이다.

3.2 자료동화 방법

GPS 가강수량 자료는 5 km 배경장에 입력되는 분석장을 생산하는 과정 중 습도분석과정에 활용하였다. 먼저 각 지점별 가강수량 자료를 Barnes 기법을 이용하여 분석 격자로 변환한다. 이 연구에서 GPS 가강수량값은 KLAPS의 분석 격자로 변환할 때 모델의 지형고도와 GPS 수신기 고도간의 차이에 대해 별도의 고도 보정(Kwon et al., 2010)을 수행하지 않고 분석에 사용하였다. 이후 거리에 따른 격자별 비증함수를 계산하고 모델 배경자료 및 라디오존데, 위성과 함께 변분방법으로 습도분석장을 산출한 후, 구름을 포화시키고 과포화된 영역을 확인하여 분석된 습도장을 산출해낸다(Fig. 5). GPS 자료를 분석에 활용하기 위해서는 가강수량 외에 위도, 경도, 고도, 기압, 기온이

**Fig. 5.** The analysis process of GPS precipitable water vapor.

포함되어야 한다. 변분과정에서 사용하는 비증함수 중 GPS에 관련된 항만을 식(5)에 나타내었다.

$$J_{GPS} = S_{GPS} \frac{(\sum_{i=1}^N c_i q_i - Q^{GPS})^2}{E_{GPS}^2 L_{GPS}^2} \quad (5)$$

위 식에서 S_{GPS} 는 GPS 관측 자료 활용 여부를 결

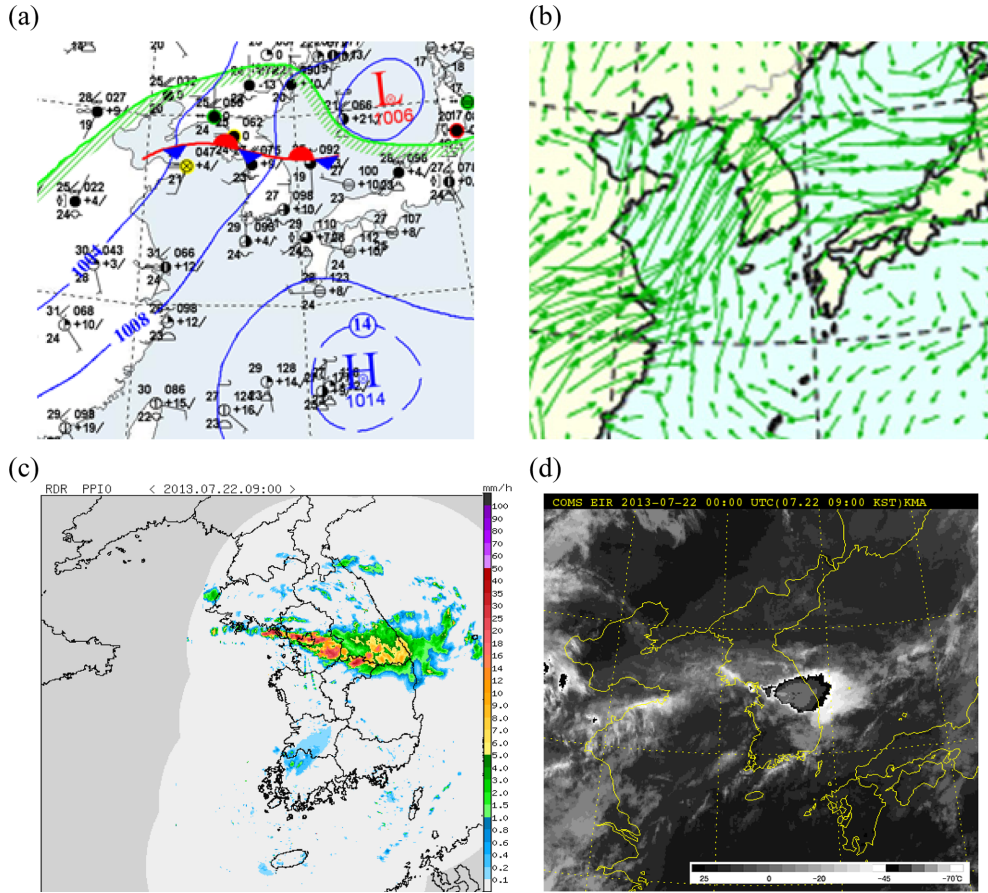


Fig. 6. (a) Surface weather chart, (b) 850 hPa moisture flux, (c) radar rain rate (mm hr^{-1}) and (d) COMS enhanced infrared image from KMA at 0900 LST 22 July 2013.

정하고, c_i 는 각 층(i)에서 모델 비습(q_i)에 적용되는 계수이며, 이들의 적분으로 모델의 가강수량이 계산된다. Q^{GPS} 는 GPS로부터 산출된 가강수량을 분석 격자로 객관분석한 가강수량 자료, E_{GPS} 는 관측 자료에 대한 오차항, L_{GPS} 는 관측 자료에 대한 거리 비중 함수를 나타낸다(Birkenheuer, 2006). 번분과정에서 GPS 지점으로부터 거리에 따른 비중 함수 및 관측 오차공분산에 따라 지점별 가강수량에 대한 영향 정도가 결정된다. 관측 자료의 영향이 50%로 떨어지는 영향반경은 5 km 간격마다 분석을 수행(그림 미제시)하여 GPS를 활용한 것과 활용하지 않은 분석장의 차이가 적절하게 나타난 30 km로 설정하였다. 추후에 관측 영향반경은 관측지점 거리에 따른 배경오차공분산의 분포를 활용하는 것이 필요하다(Hollingsworth and Lonnberg, 1986). 관측오차공분산(E)은 관측 자료의 영향이 크게 작용하도록 작은 값(0.01)을 설정하였다.

4. 사례 실험 결과

4.1 장마전선에 동반된 집중호우 사례

2013년 7월 22일에 중부 지역에서 장마전선이 정체되면서 집중호우가 발생하였다. 집중호우 기간 동안 최대 6시간 누적강수량은 경기도 여주시 대신면에 299 mm, 경기도 여주시 흥천면에는 110.5 mm가 1시간 동안 기록되었다.

Figure 6은 사례 기간에 해당하는 지상일기도와 수분속(moisture flux), 레이다와 위성영상을 나타낸 것이다. 지상일기도를 보면 한반도 중북부에 전선이 위치하고 한반도 남쪽에 북태평양고기압, 서쪽으로 저압대가 위치해 한반도 상에 남서기류의 유입이 용이한 기압 패턴을 보이고 있다. 850 hPa 수분속은 바람에 의한 습기의 이류를 나타내는 변수로 동중국해에서 서해를 거쳐 경기만 부근으로 이동하면서 습윤한 공기가 강하게 유입되고 있다. 레이다와 위성영상을

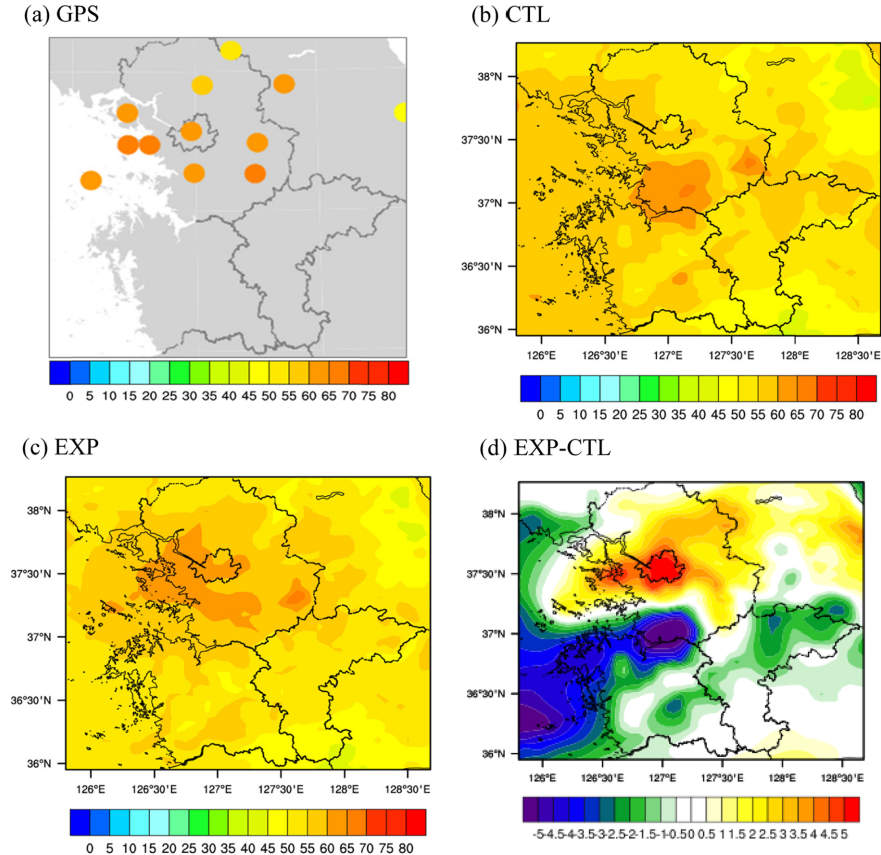


Fig. 7. The precipitable water vapor (mm) of observed by GPS (a) analyzed without GPS assimilation (b, CTL), with GPS assimilation (c, EXP) and (d) difference between EXP and CTL at 0800 LST 22 July 2013.

보면, 수분속이 수렴하는 구역에서 강한 에코와 대류성 구름이 발달한 것을 알 수 있다.

Figure 7은 수도권 주변 GPS로부터 산출된 관측 가강수량, GPS를 활용하지 않은 체계(CTL)의 분석 가강수량, GPS를 활용한 체계(EXP)의 분석 가강수량, 두 분석 가강수량 차이를 나타낸 것이다. EXP의 분석 가강수량이 EXP와 CTL의 차이가 양의 값을 보이는 지역에서 증가하여 GPS 자료가 분석 과정에 적절하게 반영된 것으로 나타났다. 분석 과정시 지점별 관측 가강수량의 영향반경을 30 km로 설정한 것과 관련하여 GPS 수신기 위치로부터 일정거리에 영향을 주는 것을 알 수 있다. EXP와 CTL의 두 분석 가강수량 차이는 $-5 \sim +5$ 의 범위 내에서 분포하며 GPS 가강수량이 65 mm 이상인 지역에서 큰 양의 값이 분포하고 있다.

Figure 8는 GPS 동화 여부에 따른 분석장을 초기장으로 사용한 1시간 예측 강수량 분포도이다. CTL과 EXP의 전반적인 강수 패턴은 매우 유사하게 모의하

였다. EXP와 CTL의 차이를 살펴본 결과, 서울 동부에 해당하는 수도권 중부지역에서 EXP의 강수량이 약 10 mm 이상 감소한 것으로 모의되었다. 하지만, 경기도 남동부의 강한 강수예코가 나타나는 영역에서는 EXP의 강수량이 약 8 mm 증가한 것으로 모의되었다. 또한, EXP는 CTL에 비해 강수가 발생하지 않은 충청남도과 충청북도의 강수가 줄어든 것으로 나타났다. 충청도에는 GPS 수신기가 없지만 변분 자료 동화 과정시 GPS 자료의 거리 가중치가 적용되는 영역에 포함되어 있다. 따라서, GPS 가강수량은 강한 강수예코 영역의 강수를 증가시키며 강수가 발생하지 않은 지역의 강수를 줄이는 효과를 나타내었다.

이 사례에서 1시간 최대 강수가 발생한 홍천 AWS 지점과 가장 가까운 GPS 지점인 이천의 강수 현상 전후에 대한 GPS 산출 가강수량 및 CTL, EXP의 분석 가강수량과 AWS 시간 강수량을 시계열로 나타내었다(Fig. 9). GPS 가강수량은 강수가 시작하는 22일

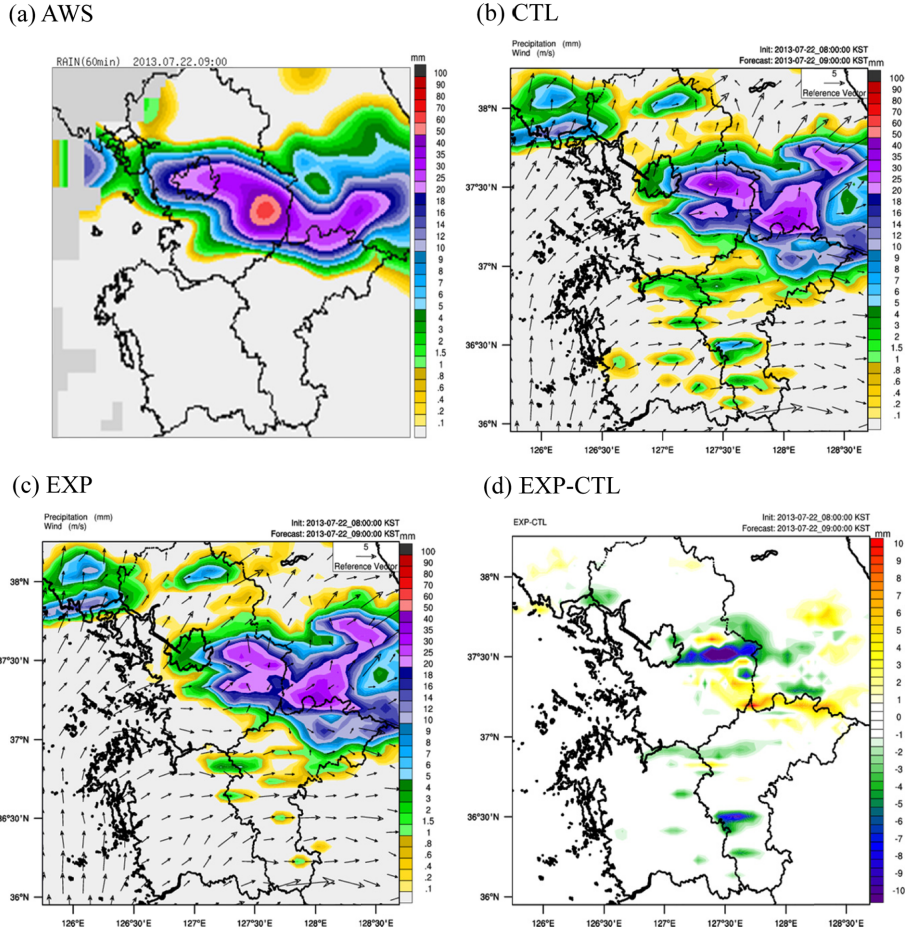


Fig. 8. The 1 hr accumulated precipitation of (a) AWS, (b) without GPS (CTL), (c) with GPS (EXP) and (d) difference between EXP and CTL at 0900 LST 22 July 2013.

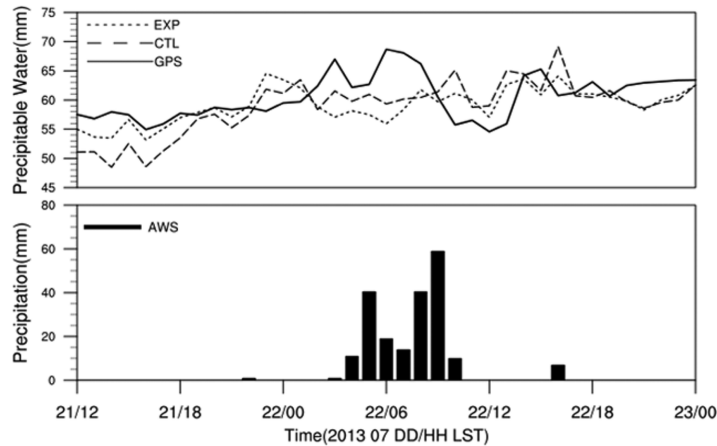


Fig. 9. Time series of analyzed, observed PWV in Icheon and 1 hr accumulated precipitation in Heungcheon from 19 to 23 July 2013.

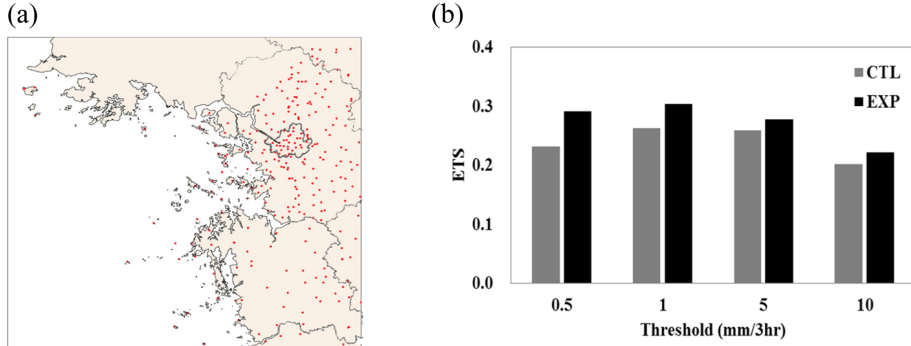


Fig. 10. (a) AWS stations for verification and (b) the Equivalent Threat Scores (ETS) of 3 hrs accumulated precipitation from 0300 LST to 1200 LST 22 July 2013.

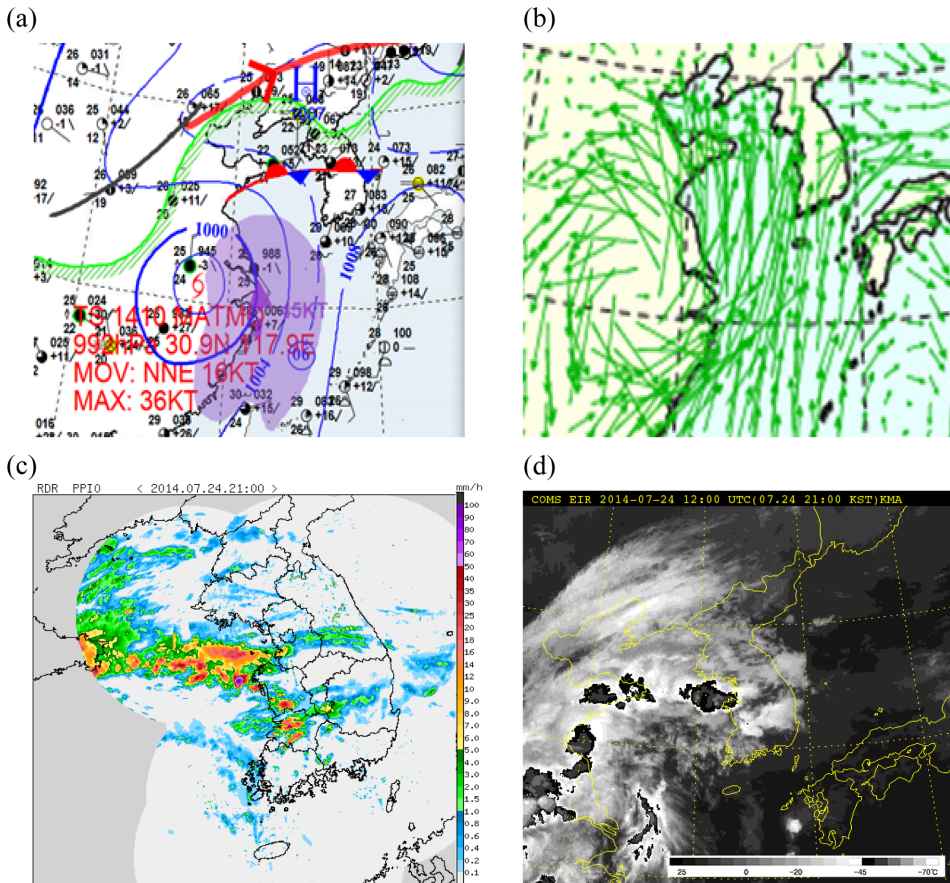


Fig. 11. Same as Fig. 6 except for 2100 LST 24 July 2014.

0300 LST에 67 mm의 1차 최대값을 나타내었고, 이는 1시간 최대강수 40.5 mm가 나타나기 2시간 전에 해당한다. 이어 2차 최대강수 59.0 mm가 나타나기 3시간 전인 0600 LST에 68.7 mm의 2차 최대값을 보였다.

급격하게 증가한 후에 바로 급감하였는데, 이는 수증기가 응결하여 구름물량으로 상변화를 일으켜 수증기량이 감소한 것이다. CTL과 EXP는 각각 22일 0100 LST, 21일 2300 LST에 분석 강수량이 최대를 보여

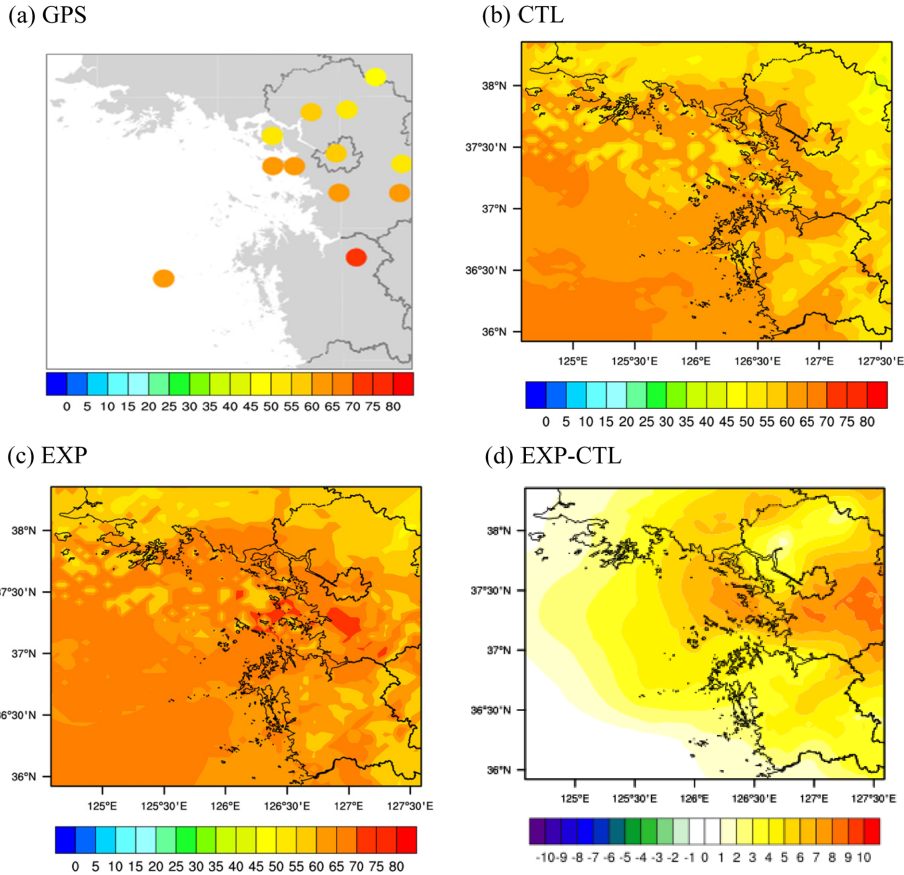


Fig. 12. Same as Fig. 7 except for 2300 LST 24 July 2014.

모델 예측 강수의 시작 시간에 영향을 주었을 것으로 생각된다. 강수 시계열의 최대가 2회 나타나는 것과 관련하여 GPS 가강수량의 시계열에서도 각각 2시간, 3시간 전에 최대값이 나타났다.

강수 예측의 정확도를 살펴보기 위해 3시간 누적강수량의 Equitable Threat Score (ETS)를 구하였다. 관측 강수는 1 km 모델 영역에 존재하는 279개의 AWS 자료를 사용하였다. 2013년 7월 22일 0300 LST부터 1200 LST까지 CTL과 EXP의 분석장을 각각 사용하여 예측을 수행하여 초반 3시간 누적강수량 0.5, 1, 5, 10 mm의 임계값에 대한 ETS를 구하여 Fig. 10b에 나타내었다. 검증 기간이 9시간으로 짧기 때문에 강한 강수에 대한 빈도가 충분하지 않아 10 mm 이하의 강수에 대해서만 검증을 수행하였다. 또한, 집중호우 사례의 경우 강수 초기 시간대의 예측성이 중요하므로 초반 3시간의 누적강수량에 대해 검증하였다. Figure 9의 시계열 결과에서 보았듯이 모든 임계값에서 GPS 자료를 활용한 EXP의 강수예측정확도가 더 높은 것으로 나타났다. 임계값 중 가장 약한 강수인 0.5 mm

의 ETS는 CTL에서 0.232, EXP에서 0.291로 ETS 증가폭이 가장 크게 나타났고, 5 mm와 10 mm에서 증가폭은 동일하게 나타났다. 약한 강수일수록 EXP와 CTL의 ETS 증가폭이 크게 나타나는 특징을 보였다.

4.2 태풍에 동반된 집중호우 사례

Figure 11는 2014년 제 10호 태풍 ‘마트모(MATMO)’에 동반된 집중호우 사례의 지상일기도와 수분속, 레이더와 위성영상을 나타낸 것이다. 태풍에 동반된 다량의 수증기가 남서쪽에서 유입되면서 장마전선을 활성화시켜 집중호우가 발생한 사례이다. 동중국해로부터 우리나라 경기만으로 다량의 수분속이 유입되어 수렴하고 있다. 수렴은 대기 하층의 이슬점온도를 증가시켜 강한 강수를 유발시키고 상당온위 값도 증가시킨다. 습윤한 공기의 이류는 특정한 지점에 연속적으로 습기를 이동시키기 때문에 실제 강수량은 가강수량보다 훨씬 많을 수 있다(KMA, 2012). 또한, 수분속이 강하게 유입되는 영역에 대류운이 발달해 있고 이후 6시간 동안 수도권에 지속되었다.

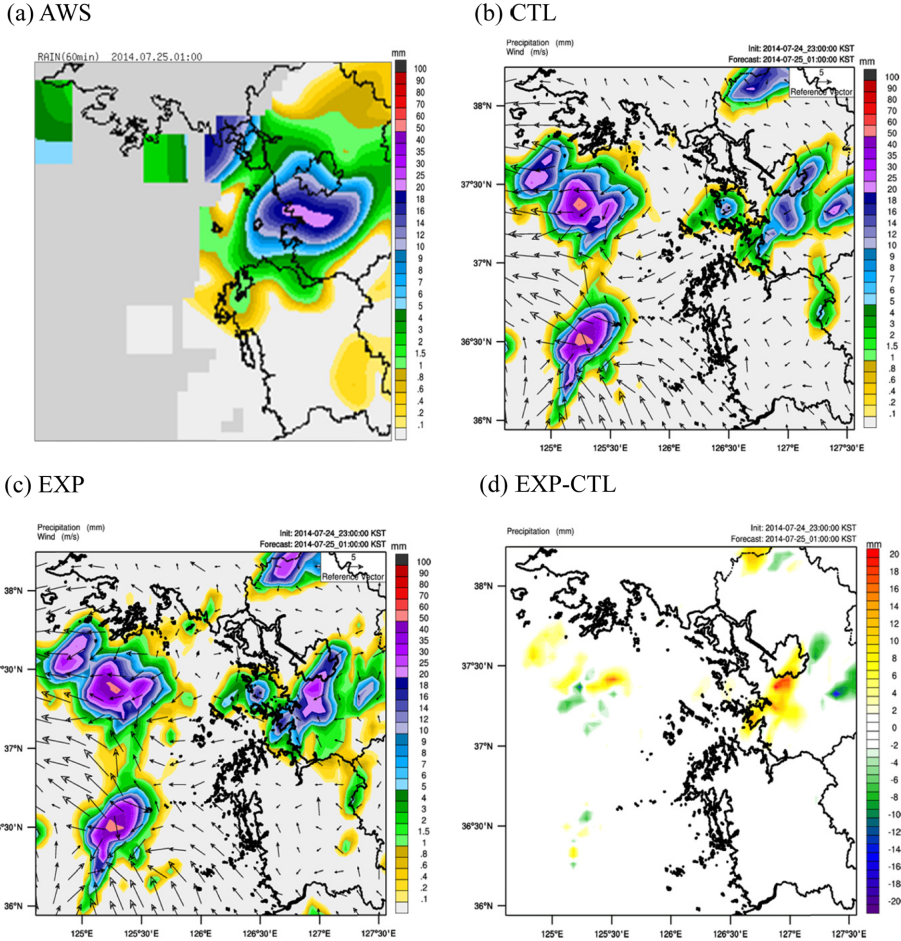


Fig. 13. Same as Fig. 8 except for 0100 LST 25 July 2014.

Figure 12은 2014년 7월 24일 2300 LST의 GPS 산출 가강수량 분포와 GPS 산출 가강수량을 활용한 실험(EXP)과 활용하지 않은 실험(CTL)의 분석장을 각각 나타낸 것이다. 사례 1과는 달리 GPS 가강수량을 자료동화 하였을 때의 분석 가강수량이 CTL과 비교하여 전체 도메인에서 증가하였다. CTL에서 가강수량을 과소모의한 반면, EXP에서 GPS 가강수량이 분석 가강수량을 증가시키는 효과를 나타내었다. 특히, GPS 관측 가강수량이 55 mm 이상인 지역의 분석 가강수량의 증가량이 큰 것으로 나타났다.

Figure 13은 Fig. 12의 두 분석장을 각각 사용한 2 시간 예측 강수량이다. CTL과 EXP의 전반적인 강수 패턴은 유사하게 모의하였지만 수도권 남부지역에서 EXP가 약 15 mm의 강수를 더 모의한 것으로 나타났다. EXP는 강수형태가 관측과 유사하지는 않았지만 수도권 남서부의 시간당 20 mm 이상 강수를 모의하였다. 이 결과로 보아 GPS 가강수량이 강한 강수대

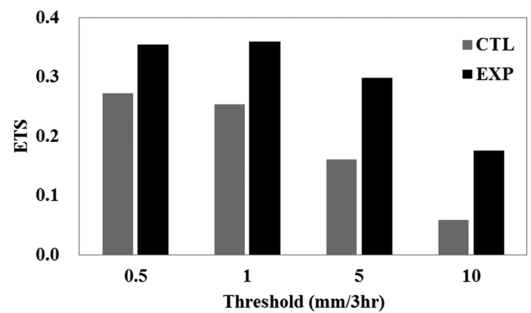


Fig. 14. ETS score of 3 hrs accumulated precipitation from 2300 LST 24 to 0700 LST 25 July 2014.

모의에 긍정적인 영향을 준 것을 알 수 있다.

Figure 14는 강수 사례 기간에 대한 후반 3시간 동안 강수예측정확도의 결과를 나타내는 그림이다. 태풍 사례의 경우, 우리나라에 태풍이 영향을 미치는 시

기가 태풍이 충분히 발달한 이후이므로 예측 후반부에 대한 정확도를 살펴보았다. 0.5, 1, 5, 10 mm의 각 임계값에서 ETS는 EXP가 CTL보다 차례대로 0.082, 0.105, 0.137, 0.116으로 증가된 것으로 나타났다. 특히, 임계값 5 mm의 향상 폭이 가장 증가한 것으로 나타나 약한 강수보다는 상대적으로 강한 강수에서 효과가 크게 작용하는 것으로 판단된다.

5. 요약 및 제언

본 연구에서는 국립기상과학원에서 설치하여 운영하고 있는 지상기반 GPS로부터 산출된 가강수량 자료를 초단기 강수 예측에 미치는 영향을 살펴보았다. GPS로부터 산출된 가강수량의 정확도 검증은 위해 2013년 여름철에 대해 오산 라디오존데와 가장 근접한 20 km 거리에 위치한 수원 GPS 자료의 가강수량을 비교한 결과, 두 값의 상관계수는 0.95로 높게 나타났다. 하지만 라디오존데에 비해 GPS 자료가 5.5 mm 낮게 가강수량을 산출하는 특징을 보였다. 라디오존데와 GPS를 직접 비교하기에는 거리상 떨어져있기 때문에 GPS 지점 위치에 가장 가까운 KLAPS 재분석 자료를 추출하여 비교하였다. KLAPS 재분석 자료와 수원 GPS 사이의 상관계수는 0.94로 나타났고, 재분석 자료가 GPS 관측에 비해 3.2 mm 높게 산출되는 특성을 보였다.

이러한 특성을 보이는 GPS 가강수량 분포는 강수 형태를 잘 반영하는 것으로 나타났다. GPS 가강수량은 변분 습도 분석 과정을 통해 분석장의 가강수량을 개선시킨 것으로 나타났다. 2013년 7월 22일 수도권 남동부에서 장마전선에 의해 발생한 집중호우 사례와 2014년 7월 24일에 태풍에 의한 사례에 대해 수도권 특화예측시스템의 초기장으로 강수 예측에 활용하였다. 장마전선에 의한 집중호우 사례에서 예측 초반 3시간 누적강수량 0.5 mm에 대해 GPS 자료를 활용한 경우의 ETS가 0.059 증가하였다. 태풍에 의한 집중호우 사례에서는 예측 후반 3시간 누적강수량 0.5 mm에 대해 GPS 자료를 활용하였을 때의 ETS가 0.082 증가하는 것으로 나타났다. 선정된 두 집중호우 사례에 대해 GPS 자료를 추가하여 예측을 수행한 결과, GPS 자료를 활용하지 않은 결과에 비해 강수 예측 성능이 향상된 것으로 나타났다. GPS 가강수량을 활용한 결과에서 강수의 패턴은 크게 바뀌지 않았지만 강한 강수에코가 발생하는 영역에서 강수를 증가시키는 것으로 나타났다. 즉, 장마전선에 의한 집중호우 사례에서는 경기도 남동부에서 8 mm, 태풍에 동반된 사례에서는 수도권 남부지역에서 강수를 15 mm 증가시키는 것으로 나타났다. 따라서 GPS로부터 산출된 가강수량은 한반도에 강한 남서류가 유입되어 집중호우

를 유발한 사례에 대해서 모델의 초기 분석장을 관측 값과 유사하게 모의하여 강수 예측 결과에 긍정적 영향을 주었음을 알 수 있다.

이 연구의 결과는 두 사례를 실험한 것이므로, 향후 연속적인 관측 자료를 데이터베이스화하여 보다 많은 집중호우 사례에 대한 실험이 필요하다. 또한, GPS 가강수량을 이용하여 강수 예측 성능을 향상하기 위해서는 서해상에 위치한 해상이나 선박 등에 설치되어 있는 GPS 수신기 자료를 활용하는 것이 필요할 것으로 보인다.

감사의 글

본 연구는 국립기상과학원 주요사업 ‘예보기술지원 및 활용연구(NIMR-2012-B-1)’의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- Ahn, M.-H., H. Y. Won, D. Han, Y.-H. Kim, and J.-C. Ha, 2015: Characterization of downwelling radiance measured from the ground-based microwave radiometer using the theoretical reference data. *Atmos. Meas. Tech. Discuss.*, **8**, 4347-4377.
- Albers, S. C., J. A. McGinley, D. L. Birkenheuer, and J. R. Smart, 1996: The local analysis and prediction system: analysis of clouds, precipitation and temperature. *Wea. Forecasting*, **11**, 273-287.
- Benjamin, S. G., D. Devenyi, S. S. Weygandt, K. J. Brundage, J. M. Brown, G. A. Grell, D. Kim, B. E. Schwartz, T. G. Smirnova, and T. L. Smith, 2004: An hourly assimilation forecast cycles: The RUC. *Mon. Wea. Rev.*, **132**, 495-518.
- Bennett, G. V. and A. Jupp, 2012: Operational assimilation of GPS zenith total delay observations into the Met Office numerical weather prediction models. *Mon. Wea. Rev.*, **140**, 2706-2719.
- Bevis, M., S. Businger, T. A. Herring, C. Rocken, R. A. Anthes, and R. H. Ware, 1992: GPS meteorology: Remote sensing of atmospheric water vapor using the Global Positioning System. *J. Geophys. Res.*, **97**, 15787-15801.
- Birkenheuer, D., 2006: The initial formulation of a technique to employ gradient information in a simple variational minimization scheme. *NOAA Technical Memorandum OAR-GSD-32*. 26 pp.
- Clark, A. J., W. A. Gallus JR., and T.-C. Chen, 2007: Comparison of the diurnal precipitation cycle in convection-resolving and non-convection-resolving mesoscale

- models. *Mon. Wea. Rev.*, **135**, 3456-3473.
- Davis, J. L., T. A. Herring, I. L. Shapiro, A. E. Rogers, and G. Elgered, 1985: Geodesy by radio interferometry: Effects of atmospheric modeling errors on estimates of baseline length. *Radio Sci.*, **20**, 1593-1607.
- Dudhia, J., 1989: Numerical Study of Convection Observed during the Winter Monsoon Experiment Using a Mesoscale Two-Dimensional Model. *J. Atmos. Sci.*, **46**, 3077-3107.
- Ha, J.-C., Y.-H. Lee, H.-C. Lee, J.-E. Nam, and J.-S. Lee, 2011: The operational manual of Korea Local Analysis and Prediction System. NIMR-TN-2011-006. 58 pp (in Korean).
- _____, J.-S. Lee, Y.-H. Lee, H.-C. Lee, and D.-E. Chang, 2010: The production of high resolution reanalysis data of Korean Peninsula based on KLAPS. *Proc. Spring Meeting KMS*, 227-228 (in Korean).
- Ha, J.-H., and K.-D. Park, 2008: Comparison of local mean temperature equations for GPS-based precipitable water vapor determination. *J. Astron. Space Sci.*, **25**, 425-434 (in Korean with English abstract).
- _____, _____, K.-H. Chang, and H.-Y. Yang, 2007: Precision validation of GPS precipitable water vapor via comparison with MWR measurements. *Atmosphere*, **17**, 291-298 (in Korean with English abstract).
- _____, _____, K.-H. Kim, and Y.-H. Kim, 2010: Comparison of atmospheric water vapor profiles obtained by GPS, MWR, and radiosonde. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **46**, 233-241.
- Hollingsworth, A., and P. Lonnberg, 1986: The statistical structure of short range forecast errors as determined from radiosonde data. Part I: The wind errors. *Tellus*, **38A**, 111-136.
- Hong, S.-Y., Y. Noh, and J. Dudhia, 2006: A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes. *Mon. Wea. Rev.*, **134**, 2318-2341.
- Hopfield, H. S., 1969: Two-quartic tropospheric refractivity profile for correcting satellite data. *J. Geophys. Res.*, **74**, 4487-4499.
- Jian, G.-J., S.-L. Shieh, and J. A. McGinley, 2003: Precipitation simulation associated with Typhoon Sinlaku (2002) in Taiwan area using the LAPS diabatic initialization for MM5. *Terr. Atmos. Oceanic Sci.*, **14**, 261-288.
- Kain, J. S., M. Xue, M. C. Coniglio, S. J. Weiss, F. Kong, T. L. Jensen, B. G. Brown, J. Gao, K. Brewster, K. W. Thomas, Y. Wang, C. S. Schwartz, and J. J. Levit, 2010: Assessing Advances in the assimilation of radar data and other mesoscale observations within a collaborative forecasting-research environment. *Wea. Forecasting.*, **25**, 1510-1521.
- Kang, J.-H., M.-S. Suh, and C.-H. Kwak, 2010: Land cover classification east Asian region using recent MODIS NDVI data (2006-2008). *Atmosphere*, **20**, 415-426 (in Korean with English abstract).
- Kasahara, A., A. P. Mizzi, and L. J. Donner, 1992: Impact of cumulus initialization on the spinup of precipitation forecasts in the tropics. *Mon. Wea. Rev.*, **120**, 1360-1380.
- Kim, K.-H., J.-C. Ha, Y.-H. Kim, and D.-E. Chang, 2011: The calculation of estimated precipitable water vapor and development its monitoring system using ground GPS. NIMR-TN-2011-001. 41 pp (in Korean).
- Kim, H.-H., Y.-H. Kim, and K.-Y. Chung, 2012: Monitoring precipitable water vapor in near real-time using ground GPS. NIMR-TN-2012-016. 35 pp (in Korean).
- Kim, Y.-S., C.-H. Cho, and O.-R. Park, 2004: A three dimensional cloud analysis for diabatic initialization of mesoscale model and its impact study. *J. Korean Meteor. Soc.*, **40**, 497-509 (in Korean with English abstract).
- KMA, 2010: Development of technologies for intensive observation data processing and application: The development of hazard weather monitoring system and strategic study for Korean atmospheric refraction model. 116 pp (in Korean).
- Kwon, H.-T. and G.-H. Lim, 2008: Impact of GPS-PW assimilation on the rainfall forecast over the Korean Peninsula. *Proceedings of the Autumn Meeting of KMS*, 398-399.
- _____, B.-M. Kim, and G.-H. Lim, 2001: The four-dimensional variational data assimilation experiments with GPS precipitable water vapor using OSSE. *Atmosphere*, **11**, 229-231 (in Korean).
- _____, E.-H. Jung, and G.-H. Lim, 2010: A comparison of GPS- and NWP-derived PW data over the Korean Peninsula. *Adv. Atmos. Sci.*, **27**, 871-882, doi: 10.1007/s00376-009-9069-4.
- Lim, K.-S. S., and S.-Y. Hong, 2010: Development of an effective double-moment cloud microphysics scheme with prognostic cloud condensation nuclei (CCN) for weather and climate models. *Mon. Wea. Rev.*, **138**, 1587-1612.
- Lim, Y.-K., S.-O. Han, S.-P. Jung, and J.-H. Seong, 2013: The characteristic analysis of precipitable water vapor according to GPS observation baseline determination. *Jour. Korean Earth Science Society*, **34**, 626-632

(in Korean with English abstract).

- Mlawer, E. J., S. J. Taubman, P. D. Brown, M. J. Jacono, and S. A. Clough, 1997: Radiative transfer for inhomogeneous atmosphere: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave. *J. Geophys. Res.*, **102**, 16663-16682.
- NIMR, 2012: Development of the advanced storm-scale analysis and prediction system (I). 81 pp (in Korean with English abstract).
- Park, C.-G., J.-H. Baek, and J.-H. Cho, 2009: Comparison of precipitable water vapor observations by GPS, Radiosonde and NWP simulation. *J. Astron. Space Sci.*, **26**, 555-566 (in Korean with English abstract).
- Saastamoinen, J., 1972: Introduction to practical computation of astronomical refraction. *Bulletin Geodesique*, **106**, 383-397.
- Schultz, P., and S. Albers, 2001: The use of three-dimensional analyses of cloud attributes for diabatic initialization of mesoscale model. Preprints, *14th Conf. Numerical Weather Prediction*, Fort Lauderdale, FL, Amer. Meteor. Soc., J122-J124.
- Shoji, Y., M. Kunii, and K. Saito, 2009: Assimilation of nationwide and global GPS PWV data for a heavy rain event on 28 July 2008 in Hokuriku and Kinki, Japan. *SOLA*, **5**, 045-048, doi:10.2151/sola.2009-012.
- _____, 2009: A study of near-time water vapor analysis using a nationwide dense GPS network of Japan. *J. Meteor. Soc. Japan*, **87**, 1-18.
- Sun, J., M. Xue, J. W. Wilson, I. Zawadzki, S. P. Ballard, J. O. Hooimeyer, P. Joe, D. M. Barker, P.-W. Li, B. Golding, M. Xu, and J. Pinto, 2014: Use of nwp for nowcasting convective precipitation: Recent progress and challenges. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **95**, 409-426.
- _____, and S. B. Trier, 2012: Sensitivity of 0-12-h warm-season precipitation forecasts over the central United States to model initialization. *Wea. Forecasting*, **27**, 832-855.
- Skamarock, W. C., J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, D. M. Barker, M. G. Duda, X.-Y. Huang, W. Wang, and J. G. Powers, 2008: A description of the advanced research WRF version 3. *NCAR Technical Note*, NCAR/TN-475+STR. 96 pp.
- Smith, T. L., S. G. Benjamin, S. I. Gutman, and S. Sahn, 2007: Short-range forecast impact from assimilation of GPS-IPW observations into the rapid update cycle. *Mon. Wea. Rev.*, **135**, 2914-2930.
- Vey, S., R. Dietrich, A. Rulke, and M. Fritsche, 2010: Validation of precipitable water vapor within the NCEP/DOE reanalysis using global GPS observations from one decade. *J. Climate*, **23**, 1675-1695.
- Zhang, M., Y. Ni, and F. Zhang, 2007: Variational assimilation of GPS precipitable water vapor and hourly rainfall observations for a Meso- β scale heavy precipitation event during the 2002 mei-yu season. *Adv. Atmos. Sci.*, **24**, 509-526.