

악천후시 GPS PWV의 측정 정밀도 검증 및 GPS PWV 변화도 작성 Precision Evaluation of GPS PWV and Production of GPS PWV Tomograph during Foul Weather

윤홍식¹⁾, Hong-Sic Yun · 송동섭²⁾, Dong-Seob Song

¹⁾ 성균관대학교 토목환경공학과 교수, Professor, Dept. of Civil & Environmental Engineering, Univ. of SungKyunKwan

²⁾ 성균관대학교 토목환경공학과 박사과정, Ph. D. candidate, Dept. of Civil & Environmental Engineering, Univ. of SungKyunKwan

SYNOPSIS : GPS/Meteorology technique for PWV monitoring is currently actively being researched an advanced nation. But, there is no detailed research on an evaluation of precision of GPS derived PWV measurements during the period of foul weather condition. Here, we deal with the precision of GPS derived PWV during the passage of Typhoon RUSA. Typhoon RUSA which caused a series damage was passed over in Korea from August 30 to September 1, 2002. We compared th tropospheric wet delay estimated from GPS observation and radio-sonde data at four sites(Suwon, Kwangju, Taegu, Cheju). The mean standard deviation of PWV differences at each site is $\pm 0.005\text{mm}$.

We also obtained GPS PWV at 13 GPS permanent stations(Seoul, Wonju, Seosan, Sangju, Junju, Cheongju, Taegu, Wuljin, Jinju, Daejeon, Mokpo, Sokcho, Jeju). GPS PWV time series shows, in general, peak value before and during th passage of RUSA, and low after the RUSA. GPS PWV peak time at each station is related to the progress of a typhoon RUSA. We obtained very similar result as we compare GMS satellite image with tomograph using GPS PWV and we could present th possibility of practical use by numerical model for weather forecast.

Key words : GPS PWV, Radio-sonde, Tomograph, RUSA

1. 서 론

대류권내의 수증기는 대기중의 에너지 흐름에 핵심적인 인자이므로 기후변화 및 일기예보에 있어서 매우 중요한 요소이다. 또한, 수증기는 전 지구적 기후 시스템에 결정적 영향을 미치는 온실기체인 동시에 구름과 에어로졸의 형성 그리고 대기 하층부의 화학조성에도 관계하고 있다(Bevis,1992). 이러한 수증기 요소를 탐측하기 위해 우주 측지 기술중 하나인 Global Positioning System(GPS)을 통해 GPS 위성으로부터 송신된 신호를 이용하여 대류권 지연량 으로부터 Precipitable Water Vapor(PWV)를 도출하는 GPS/Meteorology 기술에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 미국의 NOAA/FSL에서는 약 50개소의 상시관측소를 운영중이며 현재 전 미국의 PWV 분포도를 작성하고 있고, 기상예보를 위한 수치모델로 이용중이다. 또한, Texas Austin University의 SRC(우주연구소)와 UCAR의 GST(GPS Science and Technology) 프로그램 역시 GPS를 이용한 기상 예측에 많은 노력을 기울이고 있다. 일본의 경우에도 1997년부터 GEONET이라는 GPS Meteorology 5개년 연구 프로젝트를 계획하여 2003년에 연구 결과를 발표하기 위한 워크숍을 개최하였다. 이러한, GPS 위성 신호를 이용하여 대류권내의 수증기를 역으로 산출하는 GPS/Meteorology 기술을 이용한 GPS PWV의 정밀도 검증에 관한 연구 결과는 많이 발표가 되어 있으나 실제로 태풍과 같은 악천후시에 그 측정 정밀도에 대하여 연구된 논문은 거의 없는 실정이다. 이에 본 연구에서는 2002년 8월 31일부터 9월 1일까지 한반도를 강타해 인명피해 184명(사망 122명, 실종 62명), 재산피해 5조516억원의 피해를 입혔던 태풍 RUSA가 진행되는 기간동안 국립지리원에서 운용중인 GPS 상시관측소중에서 기상청에서 운용중인 radio-sonde 장비를 관측하는 지역과 인접한 지역에 위치한 수원, 광주, 대구, 제주 4개소의 GPS 상시관측소에서 수신한 GPS 데이터를 처리하여 얻은 GPS PWV를 국내 유일의 고층기상관측 기구인 radio-sonde에서 얻은 PWV 와 비교하여 태풍과 같은 악천후시에 GPS PWV의 측정 정밀도를 검증하는데 그 목적이 있다. 또한, 국내 13개소의 GPS 상시관측소 데이터를 처리하여 얻은 GPS PWV의 변화와 실제 강수량과 비교하고, 앞서 획득한 GPS PWV를 이용하여 한반도(남한지역) 지역의 GPS PWV tomograph를 작성하였다. 이 tomograph와 GMS 기상 관측 위성에서 촬영한 태풍 RUSA의 진행 영상을 함께 비교하여 기상예보를 위한 활용가능성을 고찰하였다.

2. 대류권 지연량과 GPS PWV로의 환산

2.1 GPS 데이터 처리와 대류권 지연량 산출

본 연구에서는 태풍 RUSA가 진행하는 약천후 기간동안의 GPS PWV의 측정 정밀도 검증을 위해 우선 연구 대상지역인 제주, 광주, 수원, 대구의 4개 GPS 상시관측소로부터 획득한 GPS데이터를 처리하여 대류권 총 지연량을 산출하였다. GPS 데이터 해석에 사용한 GIPSY/OASIS-II(GOA II) 프로그램에서는 사용 데이터와 모델링 방법의 차이에 따라 여러 가지 데이터 처리방법을 제공하고 있으나 본 연구에서 사용한 비고정점 처리 방법은 이미 계산된 ITRF의 좌표를 사용하지 않고 매일의 좌표계의 변화량을 계산하여 그 날의 좌표계를 형성하고 후에 계산된 좌표들을 Helmert 변환법을 이용하여 이미 계산된 ITRF로 변환하여 좌표를 계산해 낸다(<http://gipsy.jpl.nasa.gov>). 또한, 사용한 정밀 궤도력은 미국의 제트추진연구소(JPL)에서 구축한 FLINN 네트워크를 통해 계산된 정밀 궤도력이다.

GPS 데이터 처리를 통해 산출한 습윤 지연량으로부터 GPS PWV를 도출하기 위해서는 GPS 상시관측소의 정밀 성과(위도와 타원체고)가 필요하다(http://www.csr.utexas.edu/texas_pwv/midterm/gabor/gabor.html). 표 1은 GPS 상시관측소 4개소의 ITRF97 정밀 성과를 나타낸다.

표 1. GPS 상시관측소 ITRF97 정밀 성과

| SITE | Latitude(°) | Longitude(°) | Height(m) |
|----------|-------------|--------------|-----------|
| SUWN(수원) | 37.2755149 | 127.0542394 | 83.867 |
| KWNJ(광주) | 35.1783751 | 126.9102358 | 71.717 |
| TEGN(대구) | 35.9063066 | 128.8019664 | 106.429 |
| CHJU(제주) | 33.5139268 | 126.5298192 | 50.335 |

GPS 위성 신호의 지연량을 계산하기 위해서는 먼저, 연구 기간동안의 일별 AHD(apriori hydrostatic delay)를 산출하는데 AHD는 apriori모델에 의한 천정 방향의 건조지연으로써 표준대기모델을 사용할 경우에는 관측소 표고에만 관계가 있고 시간과는 무관하다(http://www.csr.utexas.edu/texas_pwv/midterm/gabor/gabor.html). AHD를 산출한 후, apriori모델에 대한 맵핑 함수로 산출되는 AWD(Apriori Wet Delay)는 임의로 0.1m로 고정되어 있다. 총 지연량인 Total Zenith Delay(TZD)를 산출하기 위해 가장 중요한 습윤지연에 관계된 ZDC(Zenith Delay Correction)의 경우는 apriori모델에 대한 보정항으로서 시간에 따라 변화하는 양이며, 최소자승법으로 얻어지는 값이다. GPS데이터는 1시간 간격으로 처리하여 총 지연량을 산출하였다. 본 연구에서 적용된 Neill(1996) 맵핑 함수 중 건조 맵핑 함수는 연속 분수함수식을 이용하여 경사 방향의 지연량을 천정방향으로 투영하게 된다(Brunner, Tregoning, 1994). Neill 맵핑 함수에서 사용되는 평균 계수와 보정 계수는 지면관계상 참고문헌으로 대체한다(Eissfeller, Hein, Seeber, 2001). 대부분의 표준 대류권 지연 모델은 습윤 지연요소 및 정역학적 기체 평형 상태(건조 지연)에 기초한다. 이를 위한 접근은 단지 기체의 정역학적인 성분의 측정을 통해서도 충분히 구할 수 있다(Schueler, Hein, Eissfeller, 1996). 이를 통해 1시간별 PWV를 산출 산출하기 위해서 지상 관측소에서 측정된 기압과 기온 데이터를 이용해야 한다. 부분적인 건조 지연량(Zenith Hydrostatic Delay)은 Gunter(1993)가 제시하였다. 정역학적 평형 방정식을 사용하여 건조 지연량을 얻게 된다. 본 연구에서는 많은 과학자들이 사용하고 있는 Saastamoinen 건조 모델식을 통해 건조 지연량을 산정하였는데 이 모델식은 관측소의 기압 데이터와 정밀 해석을 통해 구한 GPS상시관측소의 위도와 타원체고를 이용하게 된다(http://www.csr.utexas.edu/texas_pwv/midterm/gabor/gabor.html)

2.2 GPS PWV로의 환산

기상 관측소에서 관측한 GPS 상시관측소 지역의 기압 데이터와 정밀 해석을 통한 GPS상시 관측소의 위도와 타원체고를 이용하여 건조지연량을 산출하였다. 이 건조지연량을 총 지연량(TZD)에서 빼주게 되면 실제 습윤지연량(ZWD)을 얻게 된다. 실제 강수량과의 비교를 위해 여기서 구한 습윤지연량을 GPS PWV로 환산하게 된다(Tregoning, 1998).

$$PWV = \Pi \times ZWD \quad (1)$$

여기서, 습윤지연량을 GPS PWV로 환산하기 위한 Π 는 참고문헌으로 대신한다(Tregoning, 1998).

이상의 과정을 통해 산출한 GPS PWV와 기상청에서 협조를 받은 1시간별 실제 강수량을 비교한 결과를 그림 1에서 그림 4에 나타내었다.

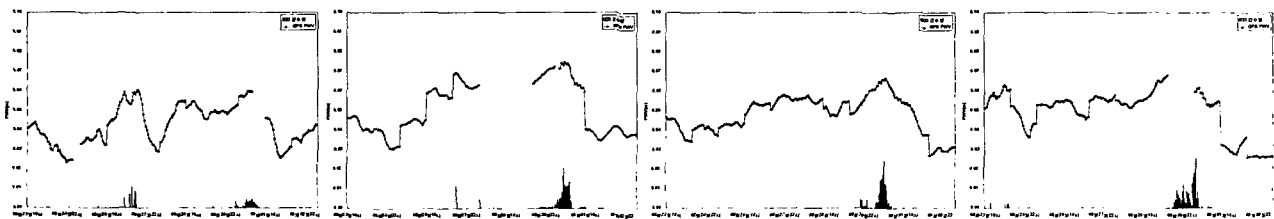


그림 1. GPS PWV와 강수량 비교(수원)

그림 2. GPS PWV와 강수량 비교(광주)

그림 3. GPS PWV와 강수량 비교(대구)

그림 4. GPS PWV와 강수량 비교(제주)

위의 그림에서 보는 바와 같이 GPS데이터를 정밀 해석하여 대류권의 총 지연량을 산출한 결과를 바탕으로 기상데이터를 이용하여 산출한 GPS PWV가 정점을 나타낼 때마다 실제 강수량이 발생하는 결과를 보였다. 이는 GPS PWV의 변화를 추이하면 실제 강수량의 발생정도를 예측할 수 있음을 보여준다. 이러한 GPS PWV의 산출 이론을 토대로 현재 미국의 NOAA/FSL에서는 서버에서 언급한 바와 같이 거의 실시간으로 PWV의 분포도를 제공하고 있다.

3. 악천후시 GPS PWV의 측정 정밀도 검증

3.1 Radio-sonde 데이터 처리

기상청에서 사용하는 radio-sonde 장비는 1,680MHz대의 주파수를 사용하는 것으로써 자동 추적 radio-theodolite를 사용하므로 기압센서의 정확도가 $\pm 1\text{hPa}$ 로써 비교적 정확하고 악천후에도 관측이 가능하다. 측정고도는 약 35km 정도이다. 이 데이터에는 각 측정 지점에 대한 번호와 기압, 고도, 온도, 노점온도, 풍향, 풍속등의 내용을 가지고 있다(<http://www.kma.go.kr/kma15/2001.7/open1.htm>)

Radio-sonde 데이터처리에 관한 이론은 지면관계상 참고문헌으로 대신한다(송동섭, 윤희식, 조재명, 2002).

3.2 악천후시 GPS PWV의 측정 정밀도 검증

태풍 RUSA가 한반도를 진행하는 악천후 기간동안 GPS PWV의 측정 정밀도를 검증하기 위해 GPS 상시관측소와 밀접한 지역인 오산, 광주, 포항, 제주지역의 radio-sonde데이터를 기상청에서 협조 받아 동일 연구기간동안 데이터를 처리하였다. Radio-sonde는 평소에 12시간에 한번씩 관측을 실시하다가 악천후시에는 6시간에 한번씩 하루 4번 관측을 실시하고 있다. Radio-sonde에서 구한 PWV와 GPS PWV를 비교하여 그림 5에서 그림 8로 나타내었다. GPS PWV가 없는 부분은 GPS 데이터가 없는 기간이다.

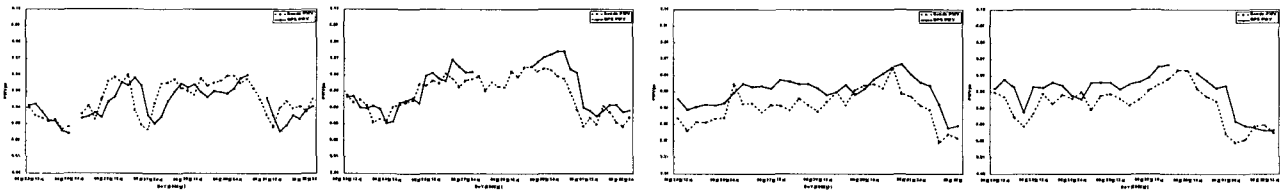


그림 5. PWV의 비교(수원) 그림 6. PWV의 비교(광주) 그림 7. PWV의 비교(대구) 그림 8. PWV의 비교(제주)

위의 결과에서처럼 radio-sonde에서 획득한 PWV와 GPS를 통해 얻은 PWV가 서로 일치하는 경향을 보이고 있다. 두 관측에서 얻은 PWV 비교에 있어서 GPS 관측시간과 radio-sonde 관측시간과의 정확한 시각 동기화(Time Synchronization)가 이루어지지 않아 매시간마다 정점이 일치되지 않는 것을 알 수 있으며, 또한 radio-sonde 관측시 태풍 RUSA의 영향으로 인해 대류권의 순간적인 강수량의 증가로 인해 두 관측에 의한 PWV의 차이가 생길 가능성이 있다. 그림 9에서 그림 12는 두 측정방법에 의해 관측된 PWV의 통계결과이다.

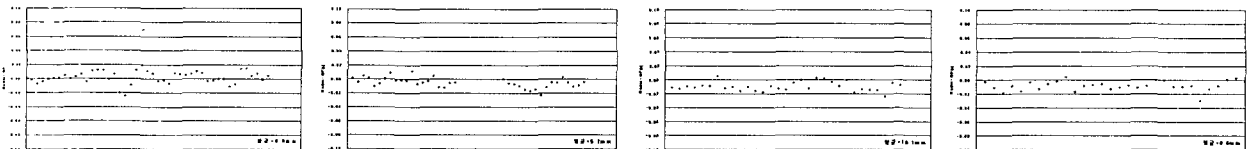


그림 9. PWV의 차이(수원) 그림 10. PWV의 차이(광주) 그림 11. PWV의 차이(대구) 그림 12. PWV의 차이(제주)

수원 지역에서는 평균 6.942mm(표준편차= $\pm 0.005\text{mm}$), 광주에서는 평균 5.670mm(표준편차= $\pm 0.005\text{mm}$), 대구에서는 평균 10.093mm(표준편차= $\pm 0.004\text{mm}$), 제주에서는 평균 8.605mm(표준편차= $\pm 0.008\text{mm}$)의 차이를 보이고 있다. 이러한 차이가 나는 이유는 우선 GPS 데이터로부터 PWV를 산출하기 위해 사용된 기상 관측소의 위치와 GPS 상시관측소가 각기 다른 곳에 위치하고 있기 때문이라고 판단된다. 또한, 오산 radio-sonde 관측위치와 수원 GPS 상시관측소의 위치는 대략 10km, 대구 지역인 경우 radio-sonde 관측이 이루어진 포항과 약 70km가 떨어져 있는 점을 감안한다면 두 관측이 같은 기상환경속에서 계산되지 못했음을 알 수 있다. 특히, 제주 지역의 경우 GPS 상시관측소와 radio-sonde 관측소간의 표고차가 340m정도임을 감안하면 고도차에 의한 영향도 무시할 수가 없다. 이밖에도 GPS PWV를 산출하기 위해 사용한 평균온도 공식은 우리나라의 기후특성과 다를 수 있는 북미 대륙의 기상관측으로 결정된 식을 사용하였기 때문에 산출된 GPS PWV의 정밀도에 한계가 있을 수 있고, GPS PWV는 천정방향에 대해 산출한 결과이나 radio-sonde는 바람에 의해 영향을 받는다는 점을 감안할 때 천정방향에 일치하지 않는 궤적을 통해 계산된 값이기 때문에 두 관측에 있어서 편향을 보이고 있다. 앞으로 우리나라에 적용할 수 있는 평균 온도식의 결정에 관한 연구가 수반되고, 고층 기상 관측에 보다 월등한 장비인 Water Vapor Radiometer의 도입이 이루어진다면 악천후시에도 보다 정밀한 GPS PWV의 산출이 이루어질 수 있을 것으로 보인다.

4. 악천후시 GPS PWV Tomograph 작성

4.1 GPS 관측망 구성 및 태풍 RUSA

태풍 RUSA가 영향을 끼쳤던 2002년 8월 23일부터 9월 3일까지 국립지리원에서 운용중인 서울, 원주, 서산, 상주, 전주, 청주, 대구, 울진, 진주 상시관측소 9개소와 한국천문연구원의 대전, 목포, 속초, 제주 상시관측소 4개소를 이용한 총 13개소의 GPS 상시관측소 데이터를 이용하여 GPS PWV의 tomograph를 작성에 사용하였다. 표 2는 각 상시관측소의 ITRF97 정밀 성과를 나타낸다. 2002년 8월 23일 9시에 북위 16.5°, 동경 161.0°인 괌섬 동북동쪽 약 1,800km 부근 해상에서 발생한 태풍 RUSA는 9월 1일 16시 30분에 강원도 속초 북동쪽 130km 부근 해상에서 그 세력을 다할 때까지 한반도에 막대한 피해를 입혔다. 최저 중심 기압이 950hPa, 중심 최대 풍속이 41m/s로써 태풍 강도로는 强颱風으로 기록되었다. 그림 13은 GPS 상시관측소 13개소의 위치와 태풍 RUSA의 이동 경로를 표시한 것으로 기상청에서 관측한 기록을 토대로 일시별로 나타내었다.

표 2. GPS 상시관측소 ITRF97 정밀 성과

| SITE | Latitude(°) | Longitude(°) | Height(m) | SITE | Latitude(°) | Longitude(°) | Height(m) |
|----------|-------------|--------------|-----------|----------|-------------|--------------|-----------|
| SOUL(서울) | 37.6296938 | 127.0797239 | 59.162 | WULJ(울진) | 36.9919765 | 129.4129944 | 80.756 |
| WNJU(원주) | 37.3372072 | 127.9470875 | 180.244 | JNJ(진주) | 35.1730872 | 128.0496733 | 122.032 |
| SEOS(서산) | 36.7764093 | 126.4942017 | 52.292 | DAEJ(대전) | 36.3994295 | 127.3744768 | 116.849 |
| SNJU(상주) | 36.3791646 | 128.1444764 | 111.656 | MKPO(목포) | 34.8163519 | 126.3814067 | 64.376 |
| JUNJ(전주) | 35.8434521 | 127.1351242 | 77.199 | SKCH(속초) | 38.2509640 | 128.5647485 | 46.043 |
| CNJU(청주) | 36.6268948 | 127.4612254 | 93.535 | JEJU(제주) | 33.2883446 | 126.4621738 | 430.204 |
| TEGN(대구) | 35.9063066 | 128.8019664 | 106.429 | | | | |

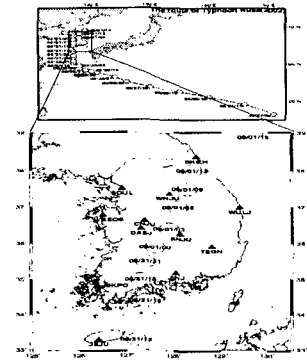


그림 13. 태풍 RUSA의 이동 경로

4.2 태풍 RUSA의 진행에 따른 GPS PWV와 실제 강수량 비교

그림 14부터 그림 26은 GPS 상시관측소 13개소 GPS 데이터를 1시간 간격으로 처리하여 획득한 PWV와 실제 강수량을 1시간별로 시계열 분석(Time Series)한 것이다.

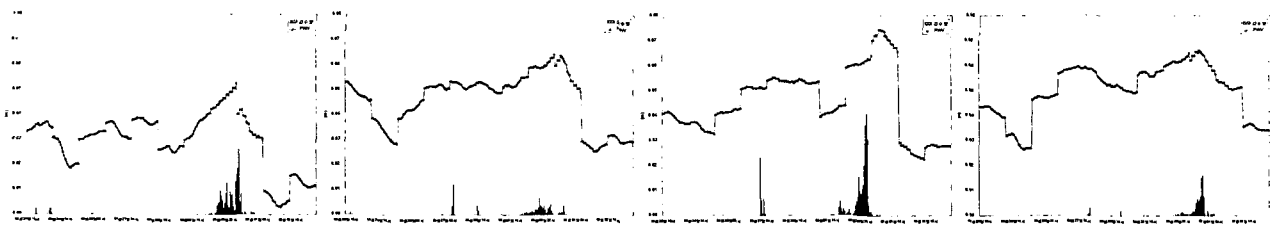


그림 14. PWV와 실제 강수량 비교(제주)

그림 15. PWV와 실제 강수량 비교(목포)

그림 16. PWV와 실제 강수량 비교(진주)

그림 17. PWV와 실제 강수량 비교(전주)

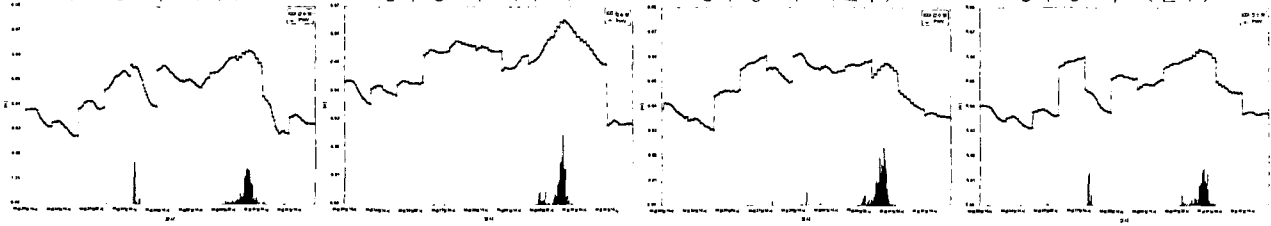


그림 18. PWV와 실제 강수량 비교(대전)

그림 19. PWV와 실제 강수량 비교(대구)

그림 20. PWV와 실제 강수량 비교(상주)

그림 21. PWV와 실제 강수량 비교(청주)

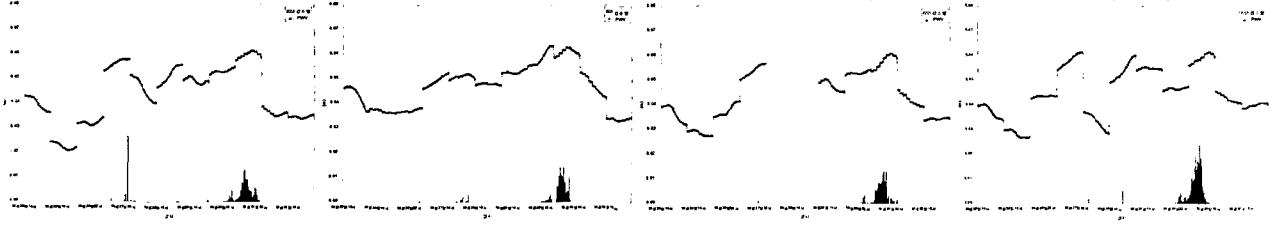
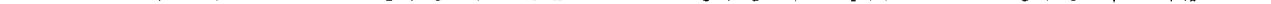


그림 22. PWV와 실제 강수량 비교(서산)

그림 23. PWV와 실제 강수량 비교(울진)

그림 24. PWV와 실제 강수량 비교(원주)

그림 25. PWV와 실제 강수량 비교(서울)



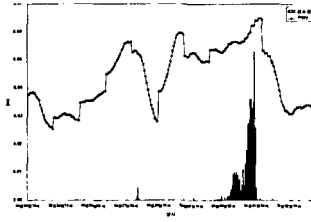


그림 26. PWV와 실제 강수량 비교(속초)

시계열 분석한 결과들을 보면 앞선 GPS PWV의 정밀도 검증에서와 같이 GPS PWV가 정점을 이루는 시점마다 실제 강수량이 발생하는 경향을 보이고 있다. 특히, 태풍 RUSA가 지나가는 8월 31일에서 9월 1일 사이에 많은 강수량을 나타내고 있으며, 이와 비슷한 시간에 GPS PWV도 각 지역별로 정점을 나타내고 있다.

4.3 GPS PWV Tomograph 작성

GPS 관측자료를 1시간별로 처리하여 얻은 PWV를 이용하여 1분 간격으로 격자를 작성하고 tomograph를 제작하였다. Tomograph 작성에 사용된 프로그램은 GMT(Generic Mapping Tools)이다. GPS PWV가 평균 0.04m에서 0.06m인 점을 고려하여 GPS PWV의 축척자의 최저값을 0.03m, 최대값을 0.07m로 하여 작성하였다. 작성한 tomograph와 GMS 위성에서 관측한 태풍 RUSA의 영상을 함께 비교하였다. 다음의 그림들은 각 시간대별 태풍 RUSA의 GMA 위성 영상과 tomograph를 비교한 것이다.



그림 27. RUSA GMS 영상(8월 31일 03시)

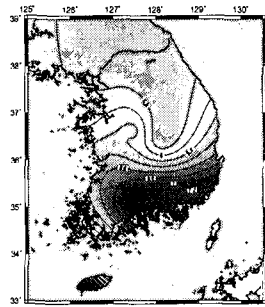


그림 28. Tomograph (8월 31일 15시)

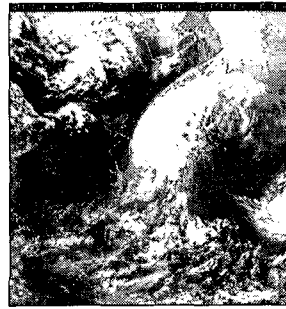


그림 29. RUSA GMS 영상(8월 31일 15시)

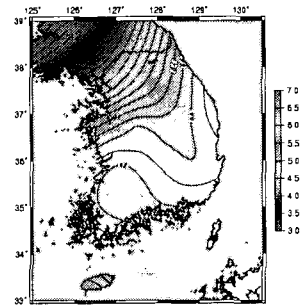


그림 30. Tomograph (8월 31일 03시)

그림 31과 그림 32는 9월 1일 03시경으로 태풍 RUSA가 강원도 지역에 가장 많은 피해를 주었던 시기이다. 이때에는 속초 상시관측소 지역이 0.0640m의 PWV를 보였으나 진주 상시관측소 지역이 0.0688m의 가장 큰 값을 보이며 진주지역을 정점으로 PWV의 분포도가 작성되었다. 이 시기에는 전반적으로 한반도 남한 전체에 GPS PWV가 0.055m 이상으로 산출되었으며 실제 강수량 데이터를 통해서 볼 때 한반도 전역에 집중 호우가 지속적으로 내렸다.

2002년 9월 1일 15시경에는 PWV tomograph에서 보이는 것과 같이 한반도 전역의 PWV값이 감소됨을 알 수 있다. 그러나, 대구 지역이 0.0562m로 비교적 큰 PWV를 나타내는데 이는 15호 태풍 RUSA의 잔존 세력과 그림 33에서 보이고 있는 우측의 16호 태풍 SHINLACU의 접근으로 영향을 받은 것으로 보인다.

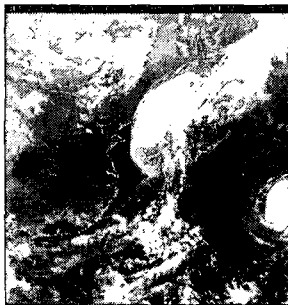


그림 31. RUSA GMS 영상(9월 1일 03시)

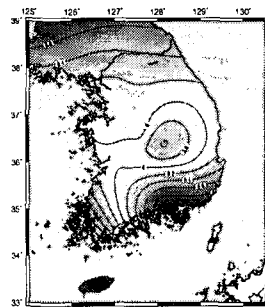


그림 32. Tomograph (9월 1일 03시)



그림 33. RUSA GMS 영상(9월 1일 15시)

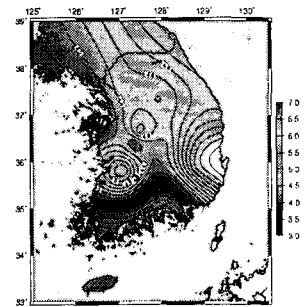


그림 34. Tomograph(9월 1일 15시)

5. 결론

본 연구에서는 GPS/Meteorology 기술을 이용하여 GPS PWV 산출에 있어서 악천후시의 측정 정밀도 검증을 위해 2002년 8월말 한반도에 막대한 피해를 입힌 태풍 RUSA의 진행기간동안을 연구기간으로 선정하여 국내 GPS상시관측소 수원, 광주, 대구, 제주의 GPS 관측데이터를 이용하여 PWV를 산출하였다. 산출된 GPS PWV의 정밀도 검증을 위해서 국내 유일의 고층 기상 관측 기구인 radio-sonde 관측장비의 측정 데이터를 이용한 radio-sonde PWV와 비교·검증을 실시하였다. 또한, 태풍 RUSA의 진행에 따라 GPS PWV의 tomograph를 작성하여 태풍 RUSA를 촬영한 GMS영상과 비교하였다. 그 결과로서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) GPS 관측데이터를 정밀 해석하여 대류권의 총 지연량을 산출한 결과를 바탕으로 기상데이터를 이용하여 PWV를 10^{-6} 의 해석정밀도로써 산출할 수 있었다. 또한, GPS PWV가 정점을 나타낼 때마다 실제 강수량이 발생하는 결과를 보였다. 이는 GPS 관측 데이터를 이용하여 PWV의 변화량을 추정하면 실제 강수량의 발생정도를 예측할 수 있음을 의미한다.

2) 악천후 기간동안 GPS PWV의 정밀도를 radio-sonde 데이터를 이용하여 비교·검증을 실시한 결과 수원에서 평균 6.942mm(Std.=±0.005mm), 광주에서 평균 5.670mm(Std.=±0.005mm), 대구에서 평균 10.093mm(Std.=±0.004mm), 제주에서 8.605mm(Std.=±0.008mm)의 차이를 보였다. 이러한 차이는 GPS PWV를 계산하기 위해 사용된 기상데이터를 측정하는 표면 기상관측소의 위치와 GPS 상시관측소 지점간의 공간적 위치의 차이에 기인한 것으로 보이며, 검증에 이용된 고층 기상 관측 지점과의 위치가 달라 같은 기상 환경속에서 측정되어지지 않은 것이 원인으로 보인다. 그러나, 이러한 공간적 이격으로 인한 원인에도 불구하고 GPS PWV의 양이 40mm에서 70mm인 점을 감안한다면 악천후시에도 GPS 위성 신호를 이용한 PWV의 산출 정밀도가 높다고 할 수 있다.

3) GPS PWV의 측정 정밀도 향상을 위해 편향을 줄일 수 있는 방법은 GPS 상시관측소에 인접한 지점에 표면 기상 관측 기구(기온·기압계등)를 설치하여 공간상 동일한 지점에서의 기상 관측값을 이용하도록 하는 것이다. 이러한 하드웨어적 구성이 이루어진다면 현재 기 구축된 전국의 GPS 상시관측소의 데이터를 실시간으로 수집·해석을 실시한다면 미국의 NOAA의 예와 같이 한반도의 GPS PWV tomograph의 작성이 가능하게 되며, 기상 예보를 위한 수치모델의 한 예로써 충분히 이용될 수 있을 것이다.

4) 태풍 RUSA가 진행하는 동안 GPS 상시관측소 13개소 데이터를 처리하여 얻은 GPS PWV를 이용하여 남한 부분의 tomograph를 작성한 결과 기상 관측 위성인 GMS 영상에서 보여주는 태풍 RUSA의 진행에 따라 PWV의 변화도 작성이 가능하였다. 이러한 기술을 응용하여 GPS PWV와 실제 강수량의 상관관계에 대한 연구가 이루어지고, 앞서 설명한 결론 3)에서와 같이 현재 운용중인 국내 GPS 상시관측소의 통합 network를 구축하여 거의 실시간적인 GPS PWV를 해석을 통해 더욱 조밀한 tomograph를 작성한 뒤 internet GIS등을 통해 사용자에게 제공된다면 매우 좋은 기상 결과를 제공할 수 있으리라 판단된다.

참고문헌

1. 송동섭, 윤홍식, 조재명(2002), "GPS를 이용한 대류권의 수증기량 추정에 관한 연구", **한국측량학회지**, 제20권, 제2호
2. B. Eissfeller, G. W. Hein, G. Seeber(2001), "On Ground-Based GPS Tropospheric Delay Estimation"
3. Benge D.Scott, "Development of a Low-Cost GPS-Based Time-Space-Positioning Information(TSPI) System", Naval Air Warfare Center Weapons Division(NAWCWPNS)
4. 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, 15, 787-15, 801.
5. Fritz K. Brunner and Paul Tregoning(1994), "TROPOSPHERIC PROPAGATION EFFECTS IN GPS HEIGHT RESULTS USING METEOROLOGICAL OBSERVATIONS", **Aust.J.Geod.Photogram.Surv.**, No. 60, June, pp.49-65
6. Paul Tregoning(1998), "Accuracy of absolute precipitable water vapor estimates from GPS observations", **Journal of Geophysical Research**, 103, 28, 701-28, 7109
7. Torben Schuele, Guenter W. Hein and Bernd Eissfeller,(1996) "Tropospheric Delay Prediction in Wide Area Augmentation Systems Using Numerical Weather Fields", **IFEN**
8. Yuei-An Liou and Cheng-Yung Huang(2000), "GPS observation of PW during the passage of a typhoon", **Earth Planets Space**, 52, pp.709-712
9. URL, 기상청, <http://www.kma.go.kr>
10. URL, 기상청, <http://www.kma.go.kr/kma15/2001.7/open1.htm>
11. URL, 중앙재해대책본부, <http://n4000-01.mogaha.go.kr/>
12. URL, Gipsy-Oasis Home Page, <http://gipsy.jpl.nasa.gov/>
13. URL, Meteorological Research Institute(JMA), <http://www.mri-jma.go.jp/>
14. URL, NOAA/FSL Ground-Based GPS Integrated Precipitable Water Vapor Demonstration Network(GPS-IPW), <http://www-dd.fsi.noaa.gov/gps.html>
15. URL, Real Time Atmospheric Water Vapor from GPS using CORS and FSL sites, http://www.ae.utexas.edu/courses/ase389p_gps/projects99/whitlock/
16. URL, Remote Sensing of Water Vapor From GPS Receivers, http://www.csr.utexas.edu/texas_pwv/midterm/gabor/gabor.html