

2011년 강원 폭설과 GPS 가강수량의 상관성 분석

Correlation Analysis between GPS Precipitable Water Vapor and Heavy Snowfall on Gangwon Province in Early 2011

송동섭¹⁾

Song, Dong Seob

Abstract

In this paper, the GPS precipitable water vapor was retrieved by estimating of GPS signal delay in the troposphere during the progress of heavy snowfall on the Gangwon Province, 2011. For this period, the time series analysis between GPS precipitable water vapor and fresh snow depth was accomplished. The time series and the comparison with the GPS precipitable water vapor and the fresh snow depth indicates that the temporal change of two variations is closely related to the progress of the heavy snowfall. Also, the periodicity of GPS precipitable water vapor using the wavelet transform method was showed a similar cycle of saturated water vapor pressure as the limitation of this study span. The result shows that the decrement of GPS precipitable water vapor was conflicted with the increment of fresh snow depth at two sites, Gangneung and Uljin. The correlation between the GPS precipitable water vapor and the saturated water vapor pressure for the event was showed a positive correlation, compare with the non-heavy snowfall periods.

Keywords : GPS tropospheric delay, Precipitable water vapor, Heavy snowfall, Fresh snow depth

초 록

본 연구에서는 2011년 강원도 영동 지방의 폭설 기간 동안 GPS 위성 신호의 대류권 지연량 추정으로부터 대기 가강수량을 복원하였다. 폭설이 발생하는 기간 동안에 GPS 가강수량과 신적설 발생량과의 상관관계에 대한 분석을 실시하였다. 분석 결과, GPS를 이용하여 복원한 대류권에서의 가강수량 증가가 발생된 이후에 강설량이 증가하는 추세를 나타냈다. 또한 웨이블릿을 이용한 주기 분석에서는 본 연구기간에 한해서 GPS 가강수량의 주기가 포화수증기압의 주기와 유사한 것으로 검출되었다. GPS 가강수량의 감소와 이에 대응하는 신적설량의 증가는 두 연구 지역인 강릉과 울진에서 모두 다르게 증감하는 경향을 나타냈다. 폭설 기간 동안 GPS 가강수량과 포화수증기압의 상관 계수는 강설이 발생하지 않는 기간 동안의 결과와는 달리 양의 상관성을 갖는 것으로 나타났다.

핵심어 : GPS 대류권 지연, 가강수량, 폭설, 신적설

1. 서 론

해마다 겨울철이면 빈번하게 발생하는 영동지역의 폭설현상은 상대적으로 온난한 동해상의 해면을 따라 변질된 기단이 영동 지방의 산악 지형과 교차하면서 형성되는 지형적 요인의 강설 현상으로 알려져 있다(김지언 등, 2005). 1904년부터 우리나라의 근대적 기상 관측이 시작된 이후, 신적설에 대한 관측은 1937년부터 시작되었으며, 현재까지 가장 많은 적설량은 울릉도의 150.9cm(1995년 1

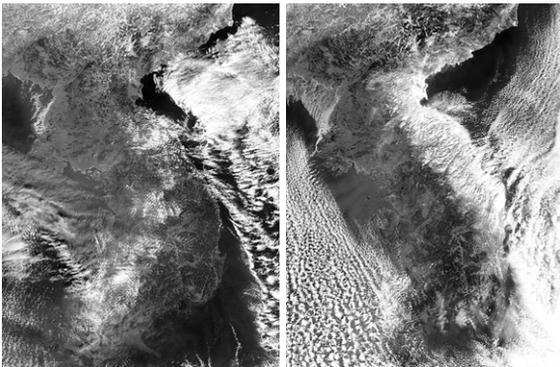
월 20일), 대관령 92cm(1992년 1월 31일), 속초 89.6cm(1969년 2월 20일)의 순으로 기록된 바 있다(차은정, 2010). 지난 2011년 2월 11일부터 12일 사이에 강원도와 근접하고 있는 경북 울진을 포함한 영동 지역에는 기상 관측이래 가장 많은 일최심신적설(maximum depth of snow cover)을 기록하였다. 기상청 보도 자료에 따르면 2011년 2월 11일 하루 동안에 강릉은 77.7cm의 일최심신적설을 보여 2010년 2월 12일의 49.0cm의 극값을 경신하였으며, 동해와 울진 지역도 각각 70.2cm 및 41.0cm로 기록되어 기존의 극값을

1) 중신회원 · 국립강원대학교 건설방재공학과 조교수 · 공학박사(E-mail:sds@kangwon.ac.kr)

경신하였다(기상청, 2011). 2011년 2월 11일의 폭설은 북쪽 상공의 영하 30도 안팎의 찬 공기가 동해안으로 확장하면서 북동기류가 유입되는 기압계가 형성되고, 상대적으로 차가운 공기가 10~13도 분포의 따뜻한 해수면 위를 통과하면서 기온차에 의한 불안정성이 강화되는 전형적인 영동 지방의 폭설 원인에 의한 것이다.



(a) 2011년 2월 11일 폭설 원인



(b) 폭설 전 TerraSat 위성영상(2월 9일) (c) 폭설 후 TerraSat 위성영상(2월 12일)

그림 1. 2011년 2월 영동지역 폭설 원인과 위성영상 비교

대기 중의 물은 위상변화와 수증기 이송 과정을 통하여 에너지를 수송하며 복사평형을 유지하는 중요한 역할을 담당한다. 따라서 다양한 기상 상황에 대한 시공간적 규모에서의 수증기의 정량적 관측은 악기상의 원인을 규명하고 자연적 또는 인위적 원인에 의해 야기되는 기후 변화를 예측하기 위한 물 순환 과정에 대해 보다 빠른 이해를 얻을 수 있다. 수증기 관측 시스템은 적외 센서나 마이크로파 센서가 부착된 인공위성, 대기 관측용 항공기, 습도계 부착 LIDAR(Light Detection And Ranging), 수증기 복사계(Water Vapor Radiometer), 라디오존데, 기상 레이더 등이 있다(송동섭, 2007). 또한 항법 및 공간위치결정에 주로 이용되는 GPS(Global Positioning System) 위성 신호의 대류

권 지연을 이용한 수증기 탐측 방법도 여러 기상 조건에서 시도되고 있다(이재원 등, 2008; Song과 Grejner-Brzezinska, 2009).

대기에 포함된 수증기량에 대하여 단위 면적당 기주에 포함된 수증기량을 액체 깊이(mm)로 환산한 것을 가강수량(precipitable water vapor; PWV)이라고 한다. 가강수량은 대기 중 수분량의 변화를 정량화 할 수 있는 좋은 기상인자이다(유철상 등, 2004). 대부분의 기상관측 요소들이 지상 관측에 의존하는 반면 가강수량은 종단관측을 통해 추정되므로 관측 지역의 수증기량의 공급 및 이동 변화를 파악하는데 의미가 있는 인자이다. 가강수량의 관측에 많이 이용되고 있는 라디오존데는 매우 비싼 관측 비용이 소요됨에 따라 하루에 2회 또는 4회 관측이 일부 지역에서만 행해지고 있다. 이에 비하여 GPS를 이용한 가강수량 정보 획득은 이미 구축되어 있는 GPS 상시관측 시스템을 이용하여 획득한 데이터를 처리하여 매우 저렴한 비용으로 이루어질 수 있다(송동섭, 2009a; Bevis 등, 1992; Rocken 등, 1993; Solbrig, 2000). 본 연구에서는 2011년 2월에 발생한 강원도 영동 지방의 폭설 기간 동안 GPS를 이용한 가강수량의 추정을 수행하고, 기상인자와의 시간적 변화에 따른 가강수량의 변화를 검토하고자 하였다. 또한 폭설은 대기 중에 포함된 대량의 수증기 성분이 응결되어 지상으로 하강하면서 발생되므로, 가강수량과 폭설에 따른 신적설량 발생과의 상관관계에 대한 분석을 실시하였다. 이를 통하여 폭설과 같은 악기상 속에서 GPS 기상 기술의 적용 가능성을 검토하고자 하였다.

2. 이론적 고찰

대기권에서 이루어지는 GPS 위성 신호의 지연 현상은 정밀한 위치 결정과 항법 분야에서 발생하는 오차원 중 하나이다. 대기권 중에서도 대전된 입자들이 모여 있는 전리층과 수증기 성분을 포함하고 있는 대류권에서의 GPS 위성 신호의 지연이 발생된다. 전리층의 경우에는 중성 대기 상태에서 신호의 주파수의 분산 특성으로 인하여 GPS 위성 신호의 두 주파수의 선형 조합을 통하여 소거할 수 있는 것은 잘 알려진 사실이다. GPS 위성 신호의 대기 지연 요인 중에서 전리층 지연의 소거가 이루어지고 난 후에 잔존 지연은 대류권 지연이나 중성 대기에 의한 지연이다. 이러한 잔존 지연은 습윤 입자 속에서 전파의 비분산적 성질에 의해 발생하는 것으로 주파수의 분산 특성을 적용할 수 없다. 대류권에서의 지연은 위성으로부터

송신된 GPS 신호가 지상의 수신기에 도달하는 경로상에 발생하는 지연으로서 지표 기압, 온도 및 수증기 변화량에 민감한 성분이다. 이러한 가정에 근간하여, 중성 대기에 의한 대기 지연은 유체 정역학적 평형 상태에서 발생하는 건조지연(hydrostatic delay)와 수증기와 같은 습윤 성분에 의한 습윤 지연(wet delay)로 구성된다(송동섭 등, 2002). 건조 지연량은 총 지연량에서 95% 정도를 차지하고 있다. 천정 방향에 대한 건조 지연(Zenith Hydrostatic Delay, ZHD)은 GPS 관측 지점의 지표면 기압과 기온을 사용하여 Hopfield 건조 지연 모델, Black 건조 지연 모델, MOPS 모델 및 식 (1)과 같은 Saastamoinen 건조 지연 모델을 이용하여 결정할 수 있다.

$$ZHD = \frac{0.0022767 \left[\frac{m}{hPa} \right] p_0}{1 - 0.00266 \cos 2\varphi - 0.00028 \left[\frac{1}{km} \right] \cdot h} \quad (1)$$

여기서, h : 기준타원체면에서 GPS 안테나까지의 높이, φ : 타원체상의 위도, p_0 : 관측소 기압

GPS 데이터의 정밀 해석 과정에서 산출되는 대류권의 총 지연량(Zenith Total Delay, ZTD)은 이론적으로 건조 지연 모델과 습윤 지연 모델에 의해 계산된 결과이다. 정밀 해석을 통하여 계산된 총 지연량으로부터 GPS 관측소의 위치 정보(타원체고, 위도)와 지상 기상 관측자료(기압, 기온)를 이용한 경험적 건조 지연량을 추정하여 빼주면 되면 실제 천정 습윤 지연량(Zenith Wet Delay, ZWD)을 추정할 수 있다. 이러한 일련의 과정을 통해 구한 실제 천정 습윤 지연량으로부터 식 (2)와 같은 변환식의 적용을 통해 GPS 대류권 지연을 이용한 가강수량의 추정이 이루어진다(송동섭, 2009b; Bevis 등, 1994).

$$PWV = \alpha \times ZWD \quad (2)$$

$$\text{여기서, } \alpha = \left(A + \frac{B}{C + DT} \right)^{-1}$$

무차원 계수인 α 는 위치, 고도, 계절 및 기상에 따라 지역 기후에 의존하여 변동하는 변환 계수이다. 가중 분자 기체(weighted molecule gases) 상수와 굴절 상수(refraction constants)에 의해 계산된 상수값으로 취급할 수 있다(Suparta 등, 2008). C와 D는 선형 회귀 모델을 통하여 구한 가중 평균 기온 모델의 기울기와 상수항이다. T는 해당 관측소의 지표 기온을 의미한다. 본 연구에서는 GPS 위성신호의 실제 습윤 지연량으로부터 가강수량으로 환산하기

위해 필요한 가중 평균 기온 모델과 관련한 C(-12.35)와 D(1.01) 상수는 송동섭(2007)이 제시한 모델을 적용하였다. 이 가중 평균 기온 모델은 우리나라에서 운용중인 라디오존데 관측소 6개소로부터 획득한 평균 기온 관측값과 동일 지역의 지상 기상 관측소로부터 수집한 지상 기온과의 선형 회귀 분석을 통하여 개발된 모델이며, 식 (3)과 같다. GPS 가강수량 복원과 관련한 자료처리 전략과 방법은 송동섭(2007)에 사용된 방법을 이용하였다.

$$T_m = 1.01 \times T - 12.35 \quad (3)$$

여기서, T_m : 가중 평균 기온

3. 연구 대상 지점 및 자료

본 연구에서는 강원도 영동 지역과 인접 지역 중에서 국토지리정보원의 GPS 상시관측소를 운영하고 있는 지점을 대상으로 하였다. 국토지리정보원의 GPS 상시관측소는 좌표 성과가 고시되어 경험적 건조 지연량 계산에 필요한 위치 정보를 이용할 수 있다. 또한 GPS 가강수량의 추정과 적설량과의 관계를 분석하기 위하여 GPS 상시관측소와 인접한 지역의 기상 관측소 중에서 적설량 관측이 이루어지는 지점으로 연구 대상을 결정하였다. 참고로 기상청의 적설량 관측은 기상본청, 지방기상청 및 기상대 등의 유인관측소에서 이루어지고 있다. 이러한 조건을 만족하는 GPS 상시관측소는 강릉(KANR)과 울진(WUL)이며, 적설량 관측을 실시한 인근 자동 기상 관측소(Automated Weather Station, AWS)는 북강릉과 울진 관측소이다. 아울러 분석을 위하여 고려된 기상 인자는 기압, 기온, 강수량, 습도, 풍속 등이다. 기상청 지역별 상세 관측자료 제공 시스템을 검색한 결과, 강릉과 울진 지역의 지상 기상 관측은 매분 이루어지고 있으며, 10분, 30분, 60분 간격으로 선택하여 획득할 수 있다. 본 연구에서는 고려할 기상 인자들에 대하여 10분 간격의 데이터를 이용하였으며, 적설량의 경우에는 매시간 마다 제공하고 있는 관계로 60분 간격의 정규 관측 자료를 활용하였다. GPS 가강수량 추정을 위한 관측 데이터는 2011년 2월 9일부터 2월 12일(UTC 기준)의 4일간 자료를 이용하였다. 추가적으로 자동 기상 관측소에서 제공하고 있는 해면기압을 GPS 관측소 위치에서의 기압으로 환산하기 위한 역해면 경정 과정 방법은 송동섭(2009a)이 제시한 방법을 적용하였다. 표 1은 연구 대상 지점의 GPS 상시관측소와 기상 관측소의 정보를 정리한 것이다.

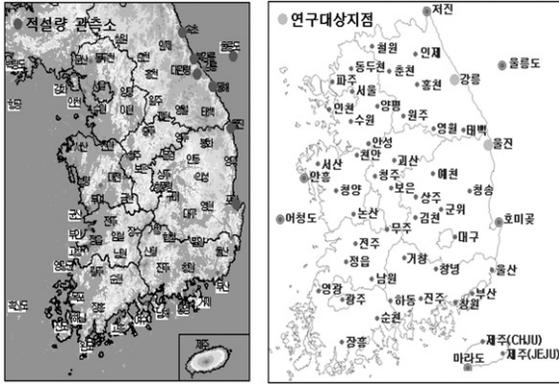


그림 2. 영동지역 적설량 관측소 위치(좌) 및 연구 대상 지점 위치(우)

표 1. 연구 대상 지점의 위치 정보

대상 지점	위도	경도	타원체고(m)	표고(m)
강릉(KANR)	37-46-15.3393	128-52-05.6199	57.040	29,982.5(79.0)
울진(WULJ)	36-59-31.1151	129-24-46.7825	80.737	49,234.9(50.0)

주) 표고 항목에서 괄호 안의 값은 인근 기상관측소의 기압 관측 지점 표고임

4. 폭설과 GPS 가강수량 분석

4.1 폭설 기간 동안 GPS 가강수량의 변화

그림 3과 4는 각각 강릉과 울진 GPS 상시관측소 지점에서 GPS 신호의 대류권 지연량 추정을 통하여 환산한 GPS 가강수량과 2011년 2월 11일에 발생한 폭설과의 분석을 위하여 다양한 기상 인자들과 함께 시계열 그래프를 나타낸 것이다. 고려한 기상 인자는 GPS 가강수량 복원에 필요한 기온과 기압, 적설량, 상대습도 및 포화수증기압이다. 연구 대상 기간 동안 강릉 지점에서는 평균 GPS 가강수량이 9.5mm이며, 최솟값은 5.4mm, 최댓값은 12.4mm(2월 10일 22시)로 나타났다. 한편 울진 지점에서는 최소 3.8mm, 최대 13.3mm(2월 10일 14시30분)의 GPS 가강수량을 기록하였으며, 평균 9.2mm를 나타냈다. 강릉 지역의 적설량은 2011년 2월 10일 20시경부터 0.2cm의 기록을 시작으로 증가하여, 2월 12일 02시에서 03시경에 82cm의 최대 적설량이 관측되었다. 울진 지역의 적설량은 2월 10일 1시경 0.5cm를 기록하기 시작하면서부터 12일 14시경 65.6cm의 관측값을 보이면서 미소하게 감소되는 추세를 보이고 있다. GPS 가강수량과 적설량 사이의 시계열 분석에서 주목할 부분은 대류권내 가강수량의 증가가 진행되고 난 후에 강설량이 증가되는 추세를 나타낸다는 것이다. 우선 강릉 지역에서는 2월 10일 22시를 기준으로 최대

GPS 가강수량을 기록한 후 지속적으로 10mm 이상의 가강수량을 나타내다가 11일 23시경에 60cm 이상의 적설량을 보이는 시점에 유사하게 가강수량이 가파르게 감소하는 패턴을 보이고 있다. 울진 지역에서도 10일 오후 3시경부터 10mm 이상의 GPS 가강수량을 지속적으로 유지하다가 적설량이 23cm 정도에서 50cm로 증가하는 11일 22시부터 12일 02시 사이에 10mm 미만으로 가강수량 수치가 하강하는 경향을 나타내고 있다.

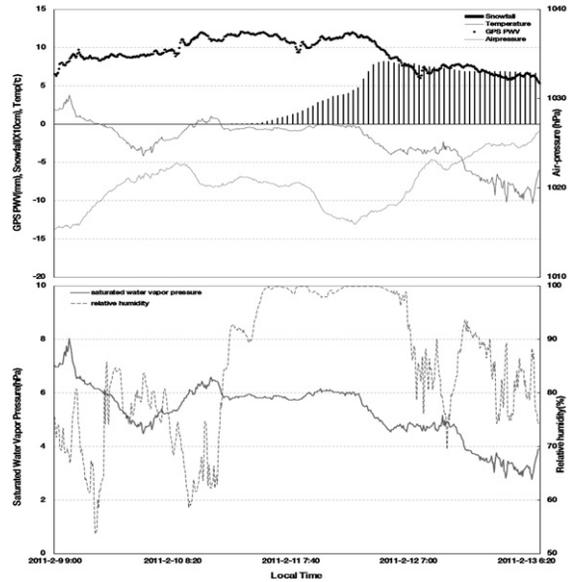


그림 3. GPS 가강수량과 기상인자간의 시계열 그래프(강릉)

GPS 가강수량의 증가가 이루어지고 있는 시점에서 확인해 볼 수 있는 기상 인자의 변화는 상대습도의 변화이다. 상대습도는 현재 포함된 수증기량과 공기가 최대로 포함될 수 있는 수증기량(포화수증기량)의 비율을 퍼센트로 나타낸 것이다. 상대습도는 실제 수증기압과 특정 기온에서의 포화 수증기압과의 비율로써 결정한다. 포화 수증기압(e_s)은 기온(t)에 따라 변화를 반복하며 식 (4)와 같은 Goff-Gratch의 경험 공식을 통하여 구한다. 이 식은 -50℃~50℃의 범위에서 1% 미만의 오차를 가지는 것으로 알려져 있다.

$$e_s = 33.8639[(0.00738t + 0.8072)^{-0.000019} 1.8t + 48 + 0.001316] \quad (4)$$

가강수량은 어떤 두께의 공기층 내에 존재하는 수증기의 총량으로 대상 대기 층 내에서의 평균 기압과 층의 상부 및 하부 면에서의 기온 및 습도 측정값을 이용한 비습

도 등을 측정하여 경험식에 의해 계산할 수도 있다(유철상 등, 2004). 여기서 비습도(specific humidity)는 습윤 공기 단위질량당 수증기의 질량으로 상대습도에 의한 실제 수증기압을 통하여 계산할 수 있다. 즉 상대습도의 변화는 경험식에 의한 가강수량의 결정에 직접적인 영향을 갖게 된다는 것을 의미한다. 그림 3과 4에서 보는 바와 같이 적설량이 시작되는 시점에서부터 GPS 가강수량은 큰 추정값을 지속하고 있으며, 이와 함께 상대습도의 증가도 함께 발생하는 것을 확인할 수 있다. 대기 중에 포함된 수증량은 포화수증기량을 초과할 수 없기 때문에 실제 대기

수증기압이 포화수증기압에 이르게 되면 응결이 시작된다. 따라서 상대습도가 100%에 가까워질수록 실제 수증기압은 포화수증기압과 같은 크기를 유지하게 되면서 수증기량의 증가를 유발하게 되는 것이다. 즉 포화수증기압의 증가와 더불어 늘어난 대기 내 수증기의 크기가 GPS 가강수량으로 검출된 것이라 판단된다. 또한 폭설 발생 이전에 연구 지역의 대기가 액상 포화가 이루어지고 있으며, 기온이 하강함에 따라 폭설이 발생할 수 있는 대량의 수증기량 유입이 이루어진 상태라고 추측할 수 있다. 추가적으로 적설량이 늘어난 이후에 GPS 가강수량이 감소하는 것을 확인할 수 있는데, 이 경우에도 대기 강수량과 관련이 있는 상대습도 또는 포화수증기압이 함께 감소되는 것을 볼 수 있다.

GPS 가강수량과 적설량 및 포화수증기압에 대하여 웨이블릿(wavelet)을 이용한 주기성 분석을 수행하였다. 웨이블릿 분석은 기상 자료와 같은 비정규적인 시계열의 주 변화성분을 탐색하는데 유용한 방법이다(이재준 등, 2010). 웨이블릿 분석에서는 시계열에 대한 연속함수들의 무한 가중합으로 연산을 수행하며, 각 함수들은 공간상에 지역화 된, 즉 한정된 영역에 대한 영이 아닌 값을 가진다. 본 연구에서는 Gaussian에 의해 변조된 점근적으로 영에 근접하는 Morlet 웨이블릿을 적용하였다(Morlet, 1992). 다음 그림 5는 강릉과 울진 지역에서의 GPS 가강수량, 적설량 및 포화수증기압에 대한 주기성 분석 결과를 도시한 것이다. 각 분석 결과의 왼쪽 그래프는 웨이블릿 파워스펙트럼(X축은 시간, Y축은 주기)이며, 우측 그래프는 Global Wavelet Power(GWP)를 보여주고 있다. 파워스펙트

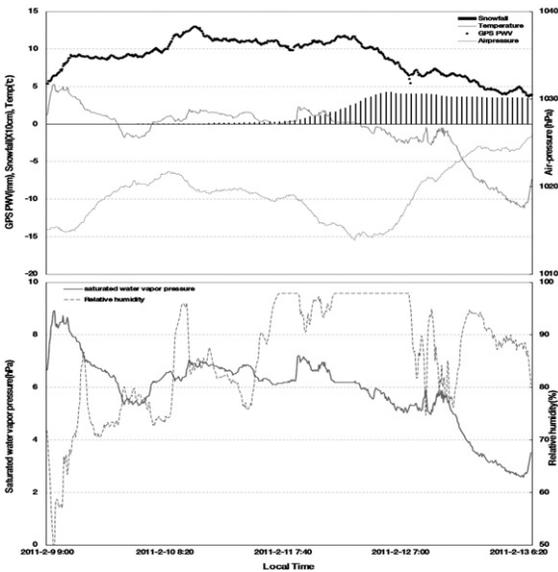


그림 4. GPS 가강수량과 기상인자간의 시계열 그래프(울진)

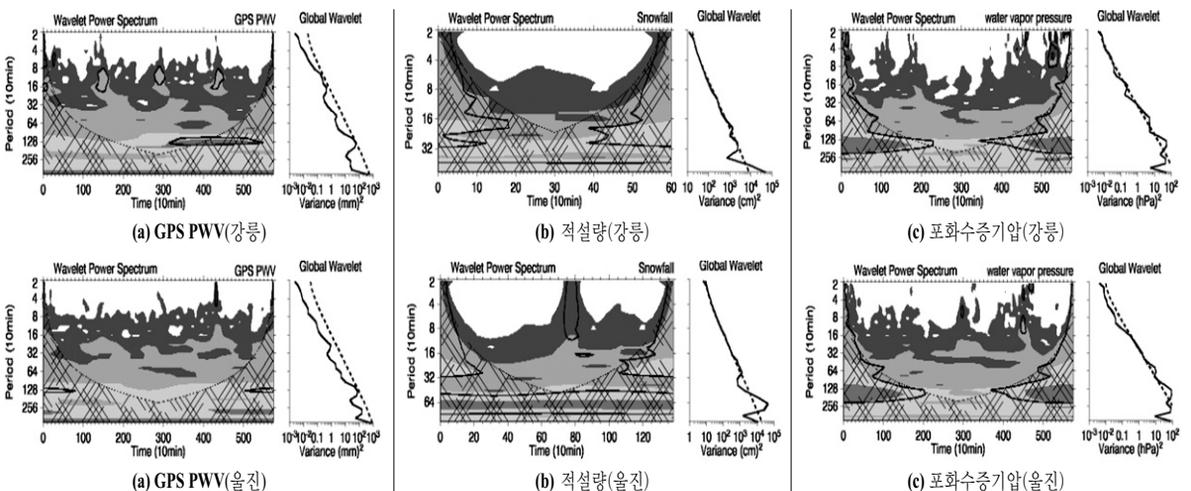


그림 5. GPS 가강수량, 적설량, 포화수증기압의 주기성 분석 결과

럼에서 점선으로 쌓여 있는 부분은 신뢰구간 95%에서 유의한 스펙트럼 영역을 나타내며, GWP의 점선도 95의 신뢰구간을 뜻한다. 다시 말해 신뢰구간은 점선 위의 나타나는 스펙트럼 영역이 유의하다고 할 수 있으며, GWP에서도 강한 강도를 나타내는 부분에서 주기성을 지닌다. 주기성 분석 결과, GPS 가강수량의 경우에는 강릉과 울진에서 약 21시간(1280분)의 주기를 보였으며, 신뢰수준 구간에 거의 근접하는 부분에서 주기가 검출되는 특징을 보였다. 적설량은 강릉에서는 신뢰구간을 벗어나는 지점에서 주기가 나타났으며, 울진에서는 약 10시간(610분)의 주기를 보임으로써 불확실성을 나타냈다. 또한 포화수증기압은 약 23시간(1400분)의 주기가 검출되었으며, 본 연구 사례에 국한해서는 GPS 가강수량의 주기와 유사함을 보이고 있다고 사료된다. 그러나 본 연구의 시계열 기간이 짧고 대상 연구 지역도 작은 관계로 두 인자의 주기의 유사성이 GPS 가강수량과 포화수증기압의 연관과 관련된 발생 주기의 대표성을 가지고 있지는 않다.

4.2 GPS 가강수량과 신적설량

적설량은 눈이 지면으로 하강하여 쌓인 높이를 의미한다. 즉 적설량은 쌓인 기간에 관계없이 관측시 지표면에 쌓여 있는 눈의 높이를 말한다. 기상관측에서 실시하는 적설량 관측은 적설판을 관측 노장에 3개를 설치하는데 적설 상판의 눈을 치우지 않고 계량하는 수치를 적설량이라고 표현한다. 따라서 적설량은 실제 강설이 발생하는 동안에도 지면에 쌓인 눈이 녹으면서 동시에 계측이 이루어지면 줄어드는 경우도 발생한다. GPS 가강수량의 시간적 변화에 따라 적설량의 변동 추이를 보다 면밀하게 분석하기 위해서는 기상 관측 인자 중에서 적설량이 아닌 신적설량을 이용하여야 한다. 신적설(fresh snow depth)은 일정하게 정해진 시간 동안 쌓인 눈의 높이를 의미하며, 관측시 일정 시간의 측정이 지나면 적설판의 눈을 털어버리고 다시 측정하게 된다. 따라서 한 지역에서 발생하는 폭설에 대한 정량적 크기를 과거 기록과 비교하는 경우에는 신적설량을 사용한다. 본 연구에서는 GPS의 신호 지연을 이용한 대류권 가강수량의 변화 추이를 분석하기 위하여 시간별 신적설 정규관측 결과와 비교를 수행하였다.

그림 6과 7은 각각 강릉과 울진에서 폭설이 발생하기 이전인 신적설이 계측되는 2월 10일 20시부터 신적설이 1cm 이하로 하강하여 강설이 멈춘 2월 12일 02시 동안에 발생한 1시간별 관측한 신적설량과 추정된 GPS 가강수량 및 포화수증기압을 나타낸 것이다. 우선 강릉 지역에서는

2월 11일 22시와 23시 및 24시에 각각 10.9cm와 10.2cm 및 9.0cm의 신적설량이 관측되었다. 이 3시간 동안 관측된 신적설의 크기는 2월 11일 하루 동안 기록된 일최심신적설인 77.3cm의 39%에 해당하는 양이다. 이러한 사실은 포화수증기압이 작아 상대습도가 커지는 상대적으로 낮은 기온을 보이는 야간 시간동안 집중 강설이 발생한 전형적인 특징을 보여준다. 이러한 특징은 울진에서도 일치하고 있다. 2월 11일 21시부터 23시에 기록된 신적설량은 5.5cm, 1.3cm, 13.2cm로서 울진지역의 일최심신적설량인 43.9cm의 46.6%에 달하는 20.0cm가 불과 3시간 동안에 발생하였다. 시간 경과에 따라 GPS 가강수량과 신적설량의 증감 추이는 강릉과 울진에서 모두 같은 상관을 지니는 것으로 분석되었다. 앞서 4.1절에서 설명한 바와 같이 강설 발생 이전인 2월 10일 20시 이전부터 연직 대기 수증기량인 가강수량의 증가 추세는 신적설량의 발생과 증가를 위해서 영동 지역에 대한 강수 공급량의 유입을 보이고 있다고 추정된다. 대기 수분량의 증가는 기온 하강으로 인한 수분 응결 과정을 통해 신적설량의 증가 추이를 이끌고 있는 것을 그림 6과 7에서 확인할 수 있다.

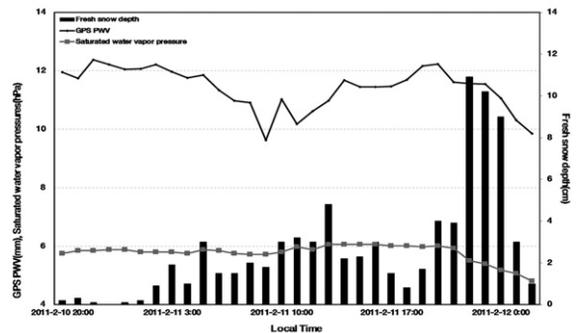


그림 6. 폭설 기간 동안 GPS 가강수량과 신적설량 및 포화수증기압 증감 패턴(강릉)

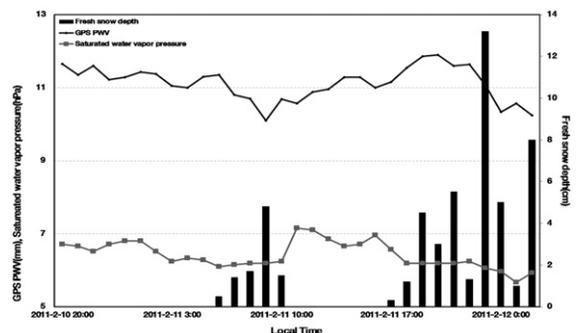
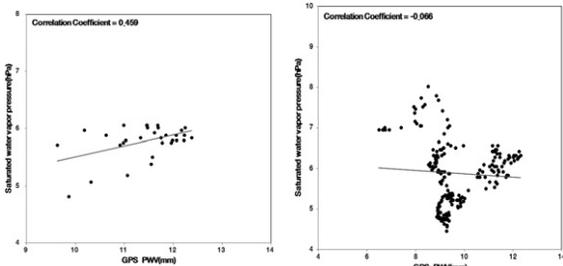
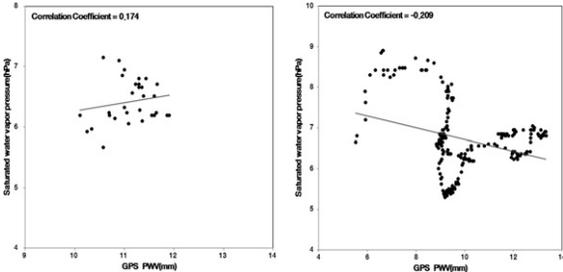


그림 7. 폭설 기간 동안 GPS 가강수량과 신적설량 증감 패턴(울진)



(a)강릉(좌 : 폭설 기간, 우 : 폭설 기간 외)



(b)울진(좌 : 폭설 기간, 우 : 폭설 기간 외)

그림 8. GPS가강수량과 포화수증기압의 상관 그래프

그림 8은 폭설 기간 동안과 폭설 기간을 제외한 기간 동안의 GPS 가강수량과 포화수증기압에 대한 상관 분석을 위한 선형 회귀 관계를 도시한 것이다. 두 인자인 가강수량과 포화수증기압 사이의 상관 계수(correlation coefficient)는 상관 분석에 대한 지표로 나타내며, 인자들의 단위와는 관계없이 두 변수의 관계를 분석하기 위하여 공분산을 표준화한 것이다. 두 변수가 정적 상관인 경우에 각 변수는 같은 부호 방향으로 증가하는 경향을 보이며, 부정적 상관인 경우에는 두 변수의 부호가 서로 반대로 나타난다. GPS 가강수량과 포화수증기압에 대한 상관 분석 결과, 폭설 기간 동안에는 강릉 지역의 상관도는 45.9%, 울진 지역은 17.4%로 나타났다. 이러한 결과는 폭설 기간 동안에는 포화수증기압과 가강수량이 양의 상관관계에 있다는 것을 의미하며, 포화수증기압의 증가에 따라 GPS 가강수량의 증가에 상관이 있음을 보여주고 있다. 폭설 기간을 제외한 기간 동안의 분석에서는 두 지역 모두 음의 상관관계에 있는 것을 그림 8을 통해 확인할 수 있다. 강릉의 경우에는 폭설 기간 동안의 상관계수가 0.459로서 눈이 내리지 않는 기간의 상관 계수인 0.066에 비하여 매우 큰 상관성을 가지고 있는 것으로 나타났다. 피어슨 상관계수의 지표 분석에 따라 폭설 기간 동안 강릉 지역에서는 GPS 가강수량과 포화수증기압이 뚜렷한 양적 선형관계

를 나타내고 있으며, 울진에서는 약한 양적 선형 관계를 보이고 있다. 강설량이 발생하지 않은 기간 동안에는 강릉은 거의 무시될 수 있는 선형 관계이며, 울진에서는 약한 음적 선형관계를 가지고 있는 것을 확인할 수 있다. 전반적으로 데이터 획득에 필요한 연구 기간과 표본 자료가 부족하여 GPS 가강수량과 폭설시 포화수증기압과의 직접적인 상관성을 찾기는 어려운 것으로 사료된다. 추후 폭설 기간 동안 고층대기 기상 관측 기구인 레디오존데로부터 획득한 연직 수증기 정보와 수증기 복사체로부터 획득한 자료를 보강하여 대기 분석 자료의 보강을 통한 상관 분석이 필요하다고 본다.

5. 결론

본 연구에서는 2011년 2월에 발생한 강원도 영동 지방의 폭설 기간 동안 GPS를 이용한 가강수량의 추정을 수행하고, 기상인자와의 시간적 변화에 따른 가강수량의 변화의 분석을 실시하였다. GPS 가강수량은 GPS 관측데이터의 정밀 해석을 통한 대류권에서의 위성 신호 총 지연량을 산출하고, 실제 천정 습윤 지연량을 추출하여 한국의 가중 평균 기온 모델을 이용하여 복원하였다. 또한 폭설이 발생하는 중점 기간 동안에 GPS 가강수량과 신적설 발생량과의 상관관계에 대한 분석을 추가로 실시하였다.

1) 분석 결과, GPS를 이용하여 복원한 대류권에서의 가강수량 증가가 발생된 이후에 강설량의 증가되는 추세를 나타냈다. 특히, 이러한 GPS 가강수량의 증가는 대기 중에 포함된 수증기량과 포화수증기량의 비율에 대한 기상인자인 상대습도와의 밀접한 상관성을 지니고 있는 것으로 확인되었다. 대기 중의 상대습도가 100%에 이르게 될 때 대기는 포화상태에 이르게 되며, 동시에 GPS로 복원한 가강수량이 대기 중에 포함된 수증기의 액상 포화 상태를 검출할 수 있음을 의미한다고 판단된다.

2) 적설량의 증가와 함께 GPS 가강수량의 감소 현상은 대기 중 가강수량과 밀접한 관계가 있는 상대습도가 감소하는 패턴을 보이고 있는 것을 알 수 있었다. 또한 시간 경과에 따라 GPS 가강수량과 신적설량의 증감 추이는 강릉과 울진에서 모두 같은 상관을 지니는 것으로 분석되었다. 대기 수분량의 증가가 기온 하강으로 인한 수분 응결 과정을 통해 강설량의 증가 추이를 이끌고 있는 것을 연구 대상 지역 모두에서 확인할 수 있었다.

3) GPS 가강수량과 현지 기온을 이용하여 구한 포화수증기압에 대한 웨이블릿 방법을 이용하여 구한 주기성 분석에서 두 지역에서 GPS 가강수량은 약 21시간, 포화수증기압은 약 23시간으로 나타났다. 본 연구 기간에 한해서는 GPS 가강수량과 포화수증기압의 주기는 유사한 주기성을 지니고 있는 것으로 검출되었음을 확인할 수 있었다. 그러나 적설량에 대한 웨이블릿 변환 방법에 의한 주기성 분석 결과에서는 특정한 주기가 검출되지 않았다. 폭설에 대한 GPS 가강수량과 포화수증기압 또는 신적설량의 발생 주기의 유사성을 대표하기 위해서는 장기간의 분석 자료나 강설이 장시간 이루어지는 극지방에 대한 연구가 필요하다고 본다.

4) 추가적으로 폭설에 대한 집중 분석 기간 동안의 GPS 가강수량과 신적설량에 대한 분석 결과, 두 인자의 증감 추세는 서로 다르게 나타나고 있는 것으로 확인되었다. 특히, 폭설 기간 동안 GPS 가강수량과 포화수증기압과의 상관관계는 양적 선형관계로서 비 영향 기간 동안과는 서로 상반되는 관계를 보이고 있는 것으로 나타났다. 그러나 영동 폭설 기간 동안의 신적설 발생과 관련한 GPS 가강수량과의 특정한 상관성이 도출되지는 않았다.

참고문헌

기상청 (2011), 기상청 보도자료(2011.02.13).
 김지언, 권태영, 이방용 (2005), 영동대설 사례와 관련된 동해상의 현열속과 잠열속 분포 특성, *Ocean and Polar Research*, 한국해양연구원, Vol. 27, No. 3, pp. 237-250.
 차은정 (2010), 2010년 1월 4일 수도권 대설 현황 및 사회·경제적 의미, *한국방재학회지*, 한국방재학회, 제10권, 제4호, 통권 39호, pp. 6-13.
 송동섭 (2007), GPS 관측데이터 정밀 해석을 통한 가강수량 추정 정확도 향상, 박사학위논문, 성균관대학교, pp. 41-46.
 송동섭 (2009a), 기압의 역해면 경정 보정을 이용한 GPS PWV 복원 능력 개선, *한국측량학회지*, 한국측량학회, 제27권, 제5호, pp. 535-544.
 송동섭 (2009b), 한국의 계절별 특성을 고려한 고정확도 GPS 수증기 추정 모델링, *한국측량학회지*, 한국측량학회, 제27권, 제5호, pp. 565-574.

송동섭, 윤희식, 조재명 (2002), GPS를 이용한 대류권의 수증기량 추정에 관한 연구, *한국측량학회지*, 한국측량학회, 제20권, 제2호, pp. 215-222.
 유철상, 신창건, 윤용남 (2004), 가강수량의 추정 및 분석, *대한토목학회지*, 대한토목학회, 제24권, 제5B호, pp. 413-420.
 이재원, 조정호, 백정호, 박종욱, 박지업 (2008), 정규관측자료와 GPS 연직누적 수증기량을 이용한 안개에 대한 비교연구, *대기*, 한국기상학회, 제18권, 제4호, pp. 417-427.
 이재준, 장주영, 광창재 (2010), 각종 수문인자의 갱년별 특성변화 분석(II) - 변동성, 주기성을 중심으로, *한국수자원학회논문집*, 한국수자원학회, 제43권, 제5호, pp.483-493.
 Bevis, M., S. Businger, T. Herring, C. Rocken, R. Anthes, and R. Ware (1992), GPS meteorology: Remote sensing of atmospheric water vapor using the Global Positioning System, *J. Geophys. Res.*, Vol. 97, pp. 15787-15801.
 Bevis, M., S. Businger, and S. Chiswell (1994), GPS meteorology: Mapping zenith delays onto precipitable water, *J. Appl. Meteorol.*, Vol. 33, No. 3, pp. 379-386.
 Morlet, J. (1982), Wave propagation and sampling theory, *Geophysics*, Vol. 47, pp. 222-236.
 Rocken, C., R. Ware, T. Van Hove, F. Solheim, C. Alber, J. Johnson, M. Bevis, and S. Businger (1993), Sensing atmospheric water vapor with the global positioning system, *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 20 No. 23, pp. 2631-2634.
 Solbrig, P. (2000), *Untersuchungen ber die Nutzung numerischer Wettermodelle zur Wasserdampfbestimmung mit Hilfe des Global Positioning Systems*, Diploma Thesis, Institute of Geodesy and Navigation, University FAF Munich, (In German).
 Song, D. S., and D. A. Grejner-Brzezinska (2009), Remote sensing of atmospheric water vapor variation from GPS measurements during a severe weather event, *Earth, Planets and Space*, Vol. 61, No. 10, pp. 1117-1125.
 Suparta, W., Z. A. Abdul Rashid, M. A. Mohd Ali, B. Yatim, and G. J. Fraser (2008), Observations of Antarctic precipitable water vapor and its response to the solar activity based on GPS sensing, *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, Vol. 70, pp. 1419-1447.