



가강수량
(TPW: Total Precipitable Water)
알고리즘 기술 분석서
(TPW-v1.0)

NMSC/SCI/ATBD/TPW, Issue 1, rev.0
2012.12.12

REPORT SIGNATURE TABLE

Function	Name	Signature	Date
Prepared by			
Reviewed by			
Authorised by			

DOCUMENT CHANGE RECORD

Version	Date	Pages	Changes
v.1.0		p.20-22	Fig. 11, Fig. 12

차 례

1. 개요
2. 배경 및 목적
3. 알고리즘
 - 3.1 이론적인 배경 및 근거
 - 3.2 산출방법
 - 3.3 산출과정
 - 3.4 검증
 - 3.4.1 검증방법
 - 3.4.2 검증자료
 - 3.4.3 시공간일치방법
 - 3.4.4 검증결과분석
4. 산출결과 해석방법
5. 문제점 및 개선 가능성
6. 참고문헌

List of Tables

Table 1 : The algorithm coefficients of modified SWLR method for COMS

Table 2 : Specific module descriptions of the TPW calculation program.

Table 3 : Detailed input and output data for the TPW algorithm.

Table 4 : Specific descriptions of quality check in the TPW calculation module.

List of Figures

- Figure 1 : Spectral response functions of the split-window channels for GOES-9 (solid line) and COMS (dash-dot line) with simulated brightness temperature spectrum.
- Figure 2 : Weighting functions of the split-window channels for COMS at nadir viewing angle. Black and red solid lines represent IR1 and IR2 channel, respectively.
- Figure 3 : The theoretical sensitivity of TPW amount, retrieved by SWLR method, with respect to the BT of Split-Window channels.
- Figure 4 : The sensitivity of TPW retrieval according to the effective air temperature. Blue and red solid lines represent, respectively, reference TPW amount and variation of TPW amount corresponding to effective air temperature.
- Figure 5 : The sensitivity of TPW, calculated using the improved algorithm, according to the variation of split-window channel BT, satellite zenith angle, WV channel brightness temperature, and surface temperature. (a) For satellite zenith angle and BT, (b) for WV channel brightness temperature and BT, (c) for surface temperature and BT, and (d) satellite zenith angle and surface temperature. Error bar stands for a standard deviation.
- Figure 6 : Schematic diagram of the sequential procedure for TPW retrieval.
- Figure 7 : Flowchart of the TPW retrieval procedure.
- Figure 8 : The program structure of TPW modules in CMDPS.
- Figure 9 : Specific elements of TPW module components.
- Figure 10 : The geophysical locations of upper-air station within the COMS FOV used in the validation.
- Figure 11 : Comparison of inferred TPW from COMS with the radiosonde sounding from January to November in 2007. The dash-dot line shows a 1-to-1 correspondence.
- Figure 12 : TPW imagery for COMS measured at 0033 UTC on November 1, 2008.

List of Acronyms

AOD	Aerosol Optical Depth
CMDPS	COMS Meteorological Data Processing System
COMS	Communication, Ocean, and Meteorological Satellite
ECMWF	European Centre for Medium range Weather Forecast
GMS	Geostationary Meteorological Satellite
GOES	Geostationary Operational Environmental Satellite
GTS	Global Telecommunication System
IR	Infrared
LST	Land Surface Temperature
MI	Meteorological Imager
MSG	Meteosat Second Generation
SRF	Spectral Response Function
RTM	Radiative Transfer Model
RTTOV	Fast Radiative Transfer for TOVS
SEVIRI	Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager
SST	Sea Surface Temperature
SWLR	Split-Window Logarithm Ratio
TIGR	Thermodynamic Initial Guess Retrieval
TPW	Total Precipitable Water
VAS	VISSR Atmospheric Sounder
VISSR	Visible Infrared Spin-Scan Radiometer
WV	Water Vapor

1. 개요

대류권의 수증기 분포는 일기와 기후에 영향을 미치는 중요한 매개변수 중 하나이다. 그러나 라디오존데나 기상레이더와 같은 지상 관측만으로는 전지구적 규모의 수증기장 분석에 시/공간적인 제약이 따른다. 따라서 이러한 지상관측의 한계를 보완하고, 보다 광범위한 영역에 대한 지속적인 관측을 수행할 수 있는 인공위성을 이용함으로써 수증기장 분석의 정확도를 향상시킬 수 있다. 최근 이러한 이점을 지닌 인공위성 관측 자료를 예보에 활용함으로써, 지상관측만으로는 세밀하고 지속적인 관측이 어려웠던 해양지역이나 사막지역에 대한 준실시간 관측이 가능하게 되었으며, 이와 더불어 가강수량(Total Precipitable Water; TPW)과 같은 중요한 수증기 정보의 전지구적 규모에 대한 수집 및 분석이 가능하게 되었다.

TPW란 대류권 하부의 대기층에 포함되어있는 수증기가 전부 응결된다고 가정할 경우, 그 대기층에 포함된 수증기의 양을 깊이 (mm) 단위로 나타낸 것이다. TPW는 대기 중의 에너지 전달에 핵심적인 역할을 하는 변수 중 하나이기 때문에 장·단기 기후변화 및 일기예보에 대단히 중요한 요소이며 (Reber and Swope, 1972; Tomasi, 1981), 전 지구적인 기후 시스템에 결정적인 영향을 미치는 온실기체 중 하나인 동시에 구름과 에어로졸의 형성, 그리고 대류권 하부의 화학조성에도 깊이 관여하고 있다. 또한, TPW는 악기상의 발달 가능성을 나타내는 주요 대기지표로 사용되고 있다 (Barnes and Lilly, 1975; Fuelberg et al., 1986). 이는 TPW가 급격히 증가하는 지역에서 상승기류와 난류가 강하게 발달할 경우 뇌우의 발달 가능성이 증가하기 때문이다 (Petersen et al., 1984; Robinson et al., 1986). 이러한 이유로 인하여 TPW는 현업예보에 중요한 보조 자료로 사용되고 있으며, 수치예보모델과 기후모델의 복사전달 계산에 중요한 변수로 사용되고 있다.

2. 배경 및 목적

여러 선행연구 (Chesters et al., 1983, 1987; Jedlovec, 1990; Kleespies and McMillin, 1990; Guillory et al., 1993; Andersen, 1996)를 통하여 위성의 split-window (IR1과 IR2) 채널 관측 자료를 이용한 TPW 산출 알고리즘들이 제안된 바 있다. 이들이 제안한 알고리즘들은 기본적으로 대기 중에 포함된 수증기량에 따른 두 채널의 민감도 차이 (회도온도 차이)를 이용한다는 공통점이 있으며, Chesters et al. (1983)은 위성의 split-window 채널 관측 자료를 이용하여 TPW를 산출할 수 있는 근본적인 방법과 배경 이론을 제시하였다.

Chesters et al. (1983, 1987)은 GOES (Geostationary Operational Environmental

Satellite)의 VAS (VISSR Atmospheric Sounder)로 측정된 split-window 채널의 휘도 온도 자료를 이용하여 TPW를 산출하는 SWLR (Split-Window Logarithm Ratio) 알고리즘을 개발하였다. 이들이 제안한 방법은 split-window 채널의 휘도온도 비를 대기 중에 포함된 수증기량에 따른 투과함수로 모수화하여 이를 정량화하는 것이다. 비록, 이들이 제안한 방법으로 산출한 TPW의 정확도는 알고리즘 계수를 결정하기 위해 사용한 TIGR (Thermodynamic Initial Guess Retrieval) 자료와 RTM (Radiative Transfer Model)의 정확도에 의존하는 경향이 있다. 그러나 이들이 개발한 알고리즘은 인접한 두 split-window 채널의 관측 자료만을 사용하여 TPW를 산출할 수 있다는 장점이 있으며, 알고리즘이 비교적 간단하여 TPW 산출이 용이하고, 산출 시간이 빠르다는 장점이 있다.

SWLR 알고리즘은 현업활용에 대한 이러한 장점들로 인하여 여러 위성의 자료처리시스템에 적용되어 개선된 TPW 산출 알고리즘 개발에 대한 이론적인 근거를 제공한 바 있다. SWLR 알고리즘은 과거 GMS-5 (Geostationary Meteorological Satellite-5)의 TPW 산출 알고리즘에 응용되어 현업에 활용된 바 있으며 (MSC, 1997), 최근에는 MSG (Meteosat Second Generation) 위성의 SEVIRI (Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager)로 측정된 split-window 채널 자료의 자료처리시스템에 응용되어 현업 예보 및 수치예보에 활용되고 있다 (Fernandez and Manso, 2007). 본 연구에서는 이들이 제안한 SWLR 방법의 소개와 이를 수정/응용하여 개발한 TPW 산출 알고리즘에 대해 자세히 논의하였으며, 이 알고리즘을 이용한 TPW 산출과정 및 검증방법을 기술하였다.

3. 알고리즘

3.1. 이론적인 배경 및 근거(Theoretical Background)

위성의 split-window (IR1과 IR2) 채널 관측 자료를 이용하여 TPW를 산출하는 알고리즘은 대기 중에 포함된 수증기량에 따른 두 채널의 휘도온도 변화, 즉, 수증기에 의한 대기의 방출도 변화를 이용한 것이다. 이는 대기 중의 수증기량에 따른 두 채널의 민감도 차이를 이용한 것으로써, IR2 채널이 IR1 채널보다 상대적으로 수증기량에 더 민감한 반응 특성을 가진다. Chesters et al. (1983, 1987)은 대류권 하부 (1000 ~ 600 hPa)의 TPW를 산출하기 위해서 대기를 균질한 평형대기로 가정하고, 대기 중에 포함된 TPW에 따른 대기의 투과도를

$$\tau_{\lambda} = \exp \left[- \left(\kappa_{\lambda} + \alpha_{\lambda} \text{TPW} + \beta_{\lambda} \text{TPW}^2 \right) \sec \theta \right] \quad (1)$$

와 같이 모수화 하였다. 여기서, 아래첨자 λ 는 각각의 split-window 채널을 의미하며, θ

는 위성의 천정각이다. 그리고 α ($g\ cm^{-2}$)⁻¹, β ($g\ cm^{-2}$)⁻², κ (*const.*)는 각각 수증기에 의한 차등 흡수계수이다. 위 식으로 모수화 된 TPW에 의한 대기의 투과도를 이용하여 위성에서 관측한 휘도온도는 다음과 같이 간단한 형태의 선형 복사전달 방정식으로 정의할 수 있다.

$$T_{\lambda}^* = T_{sfc}\tau_{\lambda} + T_{air}(1-\tau_{\lambda}) \quad (2)$$

여기서, T_{sfc} 와 T_{air} 는 각각 지면온도와 1000 ~ 600 hPa 사이의 대기층에 대한 평균 유효대기온도이다. 그리고 T_{λ}^* 는 위성에서 관측한 각 split-window 채널의 휘도온도이다. 위 식을 투과도에 대하여 정리하면

$$\tau_{\lambda} = \frac{T_{\lambda}^* - T_{air}}{T_{sfc} - T_{air}} \quad (3)$$

와 같고, 각각의 split-window 채널에 대한 투과도 (식 1)를 위 식에 대입하여 이들 채널에 대한 투과도의 비를 계산하면

$$\begin{aligned} \frac{\tau_{11}}{\tau_{12}} &= \frac{T_{11}^* - T_{air}}{T_{12}^* - T_{air}} \\ &= \exp[-(\Delta\kappa + \Delta\alpha\ TPW + \Delta\beta\ TPW^2)\sec\theta] \end{aligned} \quad (4)$$

와 같다. 여기서, $\Delta\alpha = \alpha_{12} - \alpha_{11}$, $\Delta\beta = \beta_{12} - \beta_{11}$, $\Delta\kappa = \kappa_{12} - \kappa_{11}$ 를 나타낸다. 위 식에서 알 수 있는 바와 같이, 두 split-window 채널의 투과도 비를 고려함으로써, 지표에 의한 기여향이 제거됨을 알 수 있다 (식 3의 우변 참조). 또한, Chesters et al. (1987)이 지적한 바와 같이, 위 식에서 $\Delta\beta$ 는 다른 차등 흡수계수들에 비해 상대적으로 작은 값이므로 무시할 수 있다. 따라서 위 식을 TPW에 대하여 다시 정리하면

$$TPW = \frac{1}{\Delta\alpha} \left\{ \cos\theta \ln \left(\frac{T_{11}^* - T_{air}}{T_{12}^* - T_{air}} \right) - \Delta\kappa \right\} \quad (5)$$

와 같다 (Chesters et al., 1987).

그러나 위와 같이 정의된 산출식에서 지표에 의한 기여향이 제거되었다 하더라도, 실제 위성에서 관측된 split-window 채널의 휘도온도는 이에 의한 기여를 여전히 포함하고 있으므로 (3.2절 1) 참조), 위의 식으로 산출된 TPW의 정확도는 지표면의 상태 (방

출도 및 온도)에 크게 의존한다 (Sobrinho et al., 1999; Andersen, 1996; Kleespies and McMillin, 1990).

따라서 TPW 산출 정확도의 향상을 위해서는 split-window 채널에 대한 지표면의 영향을 산출식에 반드시 고려해 주어야 한다. 이를 위해서 Chesters et al. (1987)이 대기 중의 TPW를 모수화하기 위해 제안한 식 (1)을

$$\tau_{\lambda} = \exp \left[-(\kappa_{\lambda} + \alpha_{\lambda} \text{TPW} + C^{\dagger}) \sec \theta \right] \quad (6)$$

와 같이 수정할 수 있다. 여기서, $C^{\dagger}$ 는 지표면의 영향을 포함하는 기여항으로써, 본 연구에서는 이를 경험적으로 결정하였다. 이들의 기여를 고려한 TPW 산출식은

$$\begin{aligned} \text{TPW} = & C_1 + C_2 \cos \theta \ln \left(\frac{T_{11}^* - T_{\text{air}}}{T_{12}^* - T_{\text{air}}} \right) \\ & + \cos \theta \{ C_3 (T_{11}^* - T_{12}^*) + C_4 (T_{11}^* - T_{6.7}^*) \} \\ & + C_5 T_{\text{sfc}} \\ & + C_6 (T_{11}^* - T_{12}^*) + C_7 (T_{11}^* - T_{6.7}^*) \end{aligned} \quad (7)$$

와 같이 다항식 형태로 정의할 수 있다. 여기서, C_i 는 각각 알고리즘 계수이다. 위 식에서 알 수 있는 바와 같이, Chesters et al. (1987)이 제안한 TPW 산출식 (식 5)과 달리 지표면온도의 보정항이 산출식에 포함되어 있음을 알 수 있다. 또한 위 산출식은 split-window 채널의 휘도온도뿐만 아니라 WV 채널의 휘도온도를 이용하여 각 채널의 bias를 보정하는 항이 포함되어 있음을 알 수 있다. 이들 보정항 들에 대한 산출 민감도는 다음절에서 자세히 논의하였다.

3.2. 산출방법(Methodology)

1) Split-window 채널의 특성

Fig. 1은 GOES-9과 COMS (Multi-functional Transport Satellite-1 Replacement)의 split-window 채널에 대한 SRF (Spectral Response Function)를 모의 휘도온도와 함께 나타낸 것이다. GOES-9에 대한 각 채널의 SRF는 실선으로 나타내었으며, COMS의 경우는 점선으로 나타내었다.

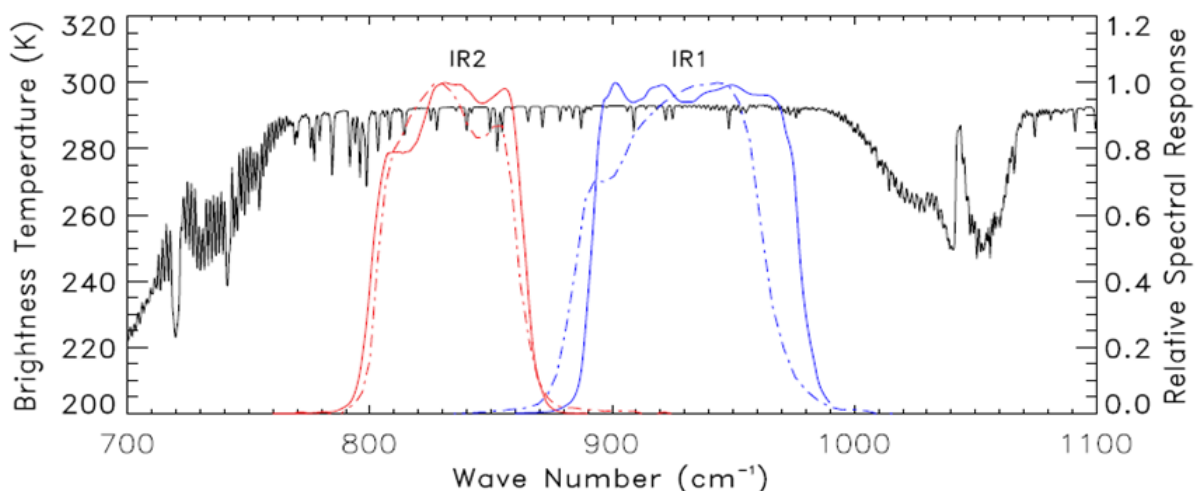


Fig. 1. Spectral response functions of the split-window channels for GOES-9 (solid line) and COMS (dash-dot line) with simulated brightness temperature spectrum.

그림에서 알 수 있는 바와 같이, GOES-9과 COMS의 split-window 채널에 대한 SRF는 거의 유사한 형태를 가지고 있다. 이들 채널은 약 $9.6 \mu\text{m}$ (1040 cm^{-1}) 부근의 O_3 흡수대보다 긴 파장대 (약 $10 \sim 14 \mu\text{m}$)의 대기의 창 영역에 위치하고 있으며, 동일한 분광범위의 폭을 가지는 IR2 채널보다 IR1 채널의 SRF 모양이 다소 더 크다는 것(이상적임)을 알 수 있다. 이는 $12.5 \mu\text{m}$ 부근에 위치한 CO_2 흡수대의 영향을 최소화하기 위한 것이며, 채널 파장범위의 특성상 IR2 채널 ($11.5 \sim 12.5 \mu\text{m}$; $800 \sim 870 \text{ cm}^{-1}$)이 IR1 채널 ($10.5 \sim 11.5 \mu\text{m}$; $870 \sim 950 \text{ cm}^{-1}$) 보다 수증기에 더 민감한 반응을 보인다. 이러한 split-window 채널의 특성은 이들 각 채널의 가중함수에서도 쉽게 확인할 수 있다.

Fig. 2는 COMS의 split-window 채널에 대한 가중함수를 나타낸 것이다. 이 그림에서 알 수 있는 바와 같이, IR2 채널 (빨간색)이 IR1 채널 (검은색)에 비하여 대기에 의한 기여도가 다소 더 크며, 두 split-window 채널에서 관측되는 휘도온도의 대부분은 대류권 하부의 $1000 \sim 500 \text{ hPa}$ 사이에 분포하는 대기에 의한 기여이다. 또한, 위의 3.1절에서 언급한 바와 같이, split-window 채널에서 관측되는 휘도온도의 상당 부분은 지표에 의한 기여임을 알 수 있다.

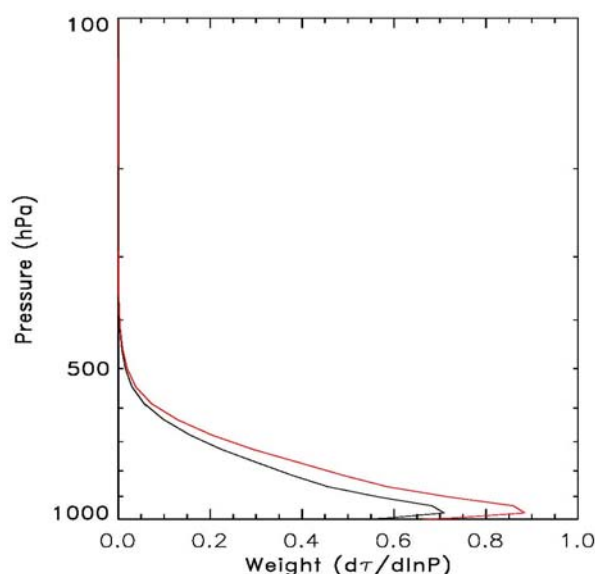


Fig. 2. Weighting functions of the split-window channels for COMS at nadir viewing angle. Black and red solid lines represent IR1 and IR2 channel, respectively.

2) SWLR 방법의 TPW 산출 민감도

SWLR 방법 (식 5 참조)으로 산출한 TPW의 민감도를 조사하기 위하여 split-window 채널의 BTD (Brightness Temperature Difference)에 따른 TPW 산출 경향을 계산하였다. 이를 위해서 IR1 채널의 휘도온도는 285.0 K의 상수를 가정하였으며, IR2 채널의 휘도온도는 서서히 감소함을 가정하여 BTD가 점차 증가함을 가정하였다. 알고리즘 계수인 수증기 차등흡수계수 $\Delta\alpha$ 와 $\Delta\kappa$ 및 유효대기온도는 TIGR (Thermodynamic Initial Guess Retrieval) 자료 (Chevallier, 2001)를 이용하여 RTTOV (Radiative Transfer for TIROS Operational Vertical Sounder; Saunders et al., 1999)로 모의한 휘도온도 자료로 결정하였다.

Fig. 3은 이와 같은 방법으로 계산한 이론적인 TPW의 산출 민감도를 나타낸 것이다. 이 결과에 따르면, TPW는 split-window 채널의 BTD에 따라 이론적으로 양의 선형관계를 가진다. 그러나 위성에서 관측된 IR1 채널과 IR2 채널의 휘도온도는 그 분광범위의 특성상 (3.2절 1) 참조) 대기 중의 수증기뿐만 아니라, 지표의 방출도와 지표 부근의 에어로솔에도 민감하게 반응한다. Sobrino et al. (1999)과 Andersen (1996)은 split-window 채널에 유입되는 지표의 영향으로 인하여 이들 채널자료를 이용한 TPW 산출 정확도에 오차가 증가함을 지적하였다. 또한, Justice et al. (1991)은 AOD (Aerosol Optical Depth)와 TPW 산출 정확도에 상관관계가 있음을 지적한 바 있다. 이로 인하여 위성 관측 자료를 이용하여 산출한 TPW는 이들에 의한 심각한 오차를 유

발할 수 있으며, 안정적인 산출 정확도를 확보하기 위해서는 이들에 의한 영향을 보정할 필요성이 있는 것으로 사료된다.

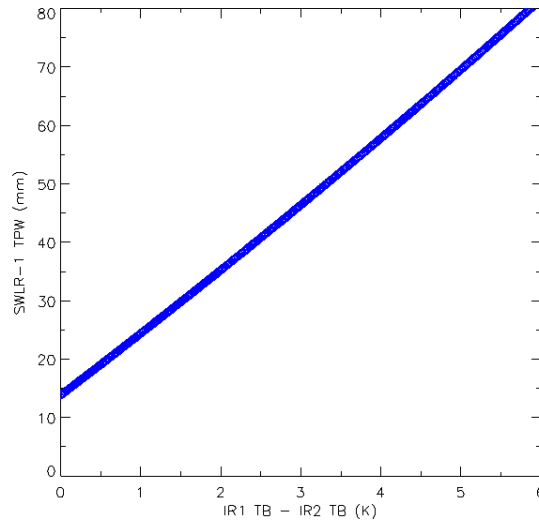


Fig. 3. The theoretical sensitivity of TPW amount, retrieved by SWLR method, with respect to the BTD of Split-Window channels.

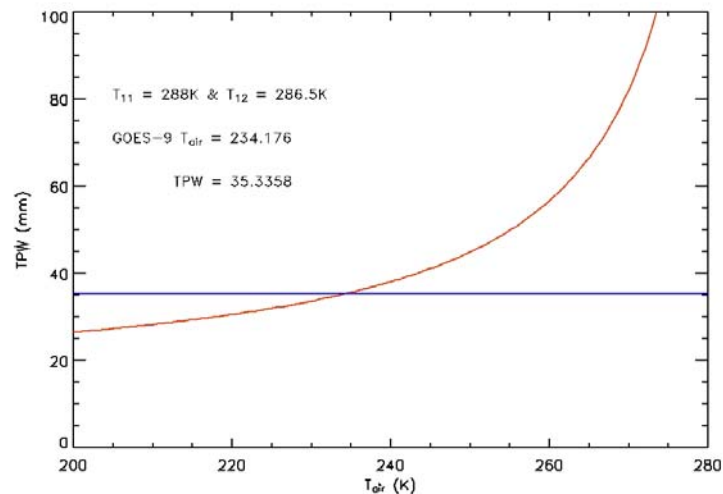


Fig. 4. The sensitivity of TPW retrieval according to the effective air temperature. Blue and red solid lines represent, respectively, reference TPW amount and variation of TPW amount corresponding to effective air temperature.

Fig. 4는 평균 유효대기온도에 대한 이론적인 TPW 산출물의 민감도를 나타낸 것이다. IR1 채널과 IR2 채널의 휘도온도는 각각 288.0 K와 286.5 K로 가정하였으며, GOES-9에 대한 수증기 차등 흡수계수 ($\Delta\alpha = 0.013$, $\Delta\kappa = -0.016$)를 이용하였다. 평균 유효대기온도가 234.2 K일 때 산출한 TPW(=35.3 mm)를 기준으로 하였으며, 이는 그

림에 파란색 실선으로 나타내었다. 그리고 평균 유효대기온도의 변화에 따른 TPW 산출 결과는 빨간색 실선으로 나타내었다. Fig. 4의 결과에 따르면, 대류권 하부의 평균 유효 대기온도가 기준온도 (=234.2 K) 이하 (이상)인 경우는 산출된 TPW가 기준 TPW보다 과소 (과대) 산출되는 경향이 있다. 특히, 평균 유효대기온도가 기준온도보다 20 K 이상 높을 경우 그 오차는 지수함수적으로 증가한다. 이와 같이, 평균 유효대기온도의 정확도는 SWLR 알고리즘으로 산출한 TPW의 정확도에 영향을 미치는 가장 중요한 변수임을 알 수 있다. 그러나 평균 유효대기온도는 위성관측만으로 정확하게 측정할 수 없으며, Chesters et al. (1987) 역시 이를 경험적으로 결정하는 방법을 제시하였다. 이러한 평균 유효대기온도에 따른 문제들은 이미 여러 선행연구들에서도 지적된 바 있으며, Kleespies and McMillin (1990)과 Jedlovec (1990) 등은 불확실한 평균 유효대기온도에 대한 정보를 배제한 새로운 형태의 알고리즘을 제안한 바 있다.

3) 개선된 방법의 TPW 산출 민감도

위의 3.1절에서 언급한 바와 같이, 개선된 알고리즘은 SWLR 방법과 달리 지면온도를 산출에 이용함으로써, 시/공간의 함수인 지면 방출도를 계산에 적용하여 산출 정확도의 향상을 도모하였다. 결과적으로, 기존 SWLR 알고리즘이 시/공간적으로 고정된 단일 알고리즘 계수를 사용함으로써 발생되던 지역에 따른 산출 정확도 편차, 주/야간 및 계절에 따른 산출 정확도 차이 등이 대폭 개선되었다. 이와 더불어, 개선된 알고리즘은 지면에 의한 영향뿐 아니라 부가적인 기여항들을 고려함으로써, 기존 SWLR 방법의 고질적인 문제였던 평균 유효대기온도에 따른 민감도 역시 감소되는 결과를 나타내었다.

Fig. 5는 개선된 알고리즘의 TPW 산출 민감도를 나타낸 것으로써, Figs. 5a와 d는 각각 위성 천정각 변화와 split-window 채널의 BTD 변화 및 지면온도 변화에 따른 민감도를 나타낸 것이며, Figs. 5b와 c는 각각 BTD 변화와 WV 채널 휘도온도 변화 및 지면온도 변화에 따른 민감도를 나타낸 것이다. 민감도 계산을 위해서 식 (7)로 정의된 TPW 산출식을 이용했으며, COMS에 대한 각각의 알고리즘 계수는 Table 1에 정리하였다. 개선된 알고리즘으로 산출된 TPW는 SWLR과 마찬가지로 BTD 변화에 양의 선형관계를 가진다(Figs. 5a-c).

Table 1. The algorithm coefficients of modified SWLR method for COMS.

Coefficient	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	T _{air}
Value	-266.29	-68.33	-0.10	12.98	1.02	0.44	-0.22	267.58

Fig. 5a에 나타낸 바와 같이, BTD가 증가할수록 위성 천정각에 따른 오차는 증가하는 경향이 있으며, 위성 천정각이 작을수록 BTD 변화에 더욱 민감한 경향이 있다. 그러

나 WV 채널의 휘도온도와 지면온도 변화에 따른 오차의 경우는 BTD에 관계없이 일정한 경향을 가지며, BTD 변화에 따른 오차 역시 WV 채널의 휘도온도와 지면온도에 관계없이 일정한 경향을 가진다(Figs. 5b와 c). 특히, BTD가 작은 경우 (TPW가 작은 경우)는 위성 천정각과 WV 채널 휘도온도의 정확도보다 지면온도의 정확도에 가장 민감하게 반응함을 알 수 있으며, BTD가 증가할수록 TPW의 민감도는 지면온도보다는 위성 천정각의 정확도에 의존함을 알 수 있다 (Fig. 5d). 그러나 위성 관측자료에서 위성 천정각의 오차는 거의 무시할 수 있는 수준이므로, 개선된 알고리즘으로 산출된 TPW의 정확도는 지면온도의 정확도에 의존한다고 할 수 있다.

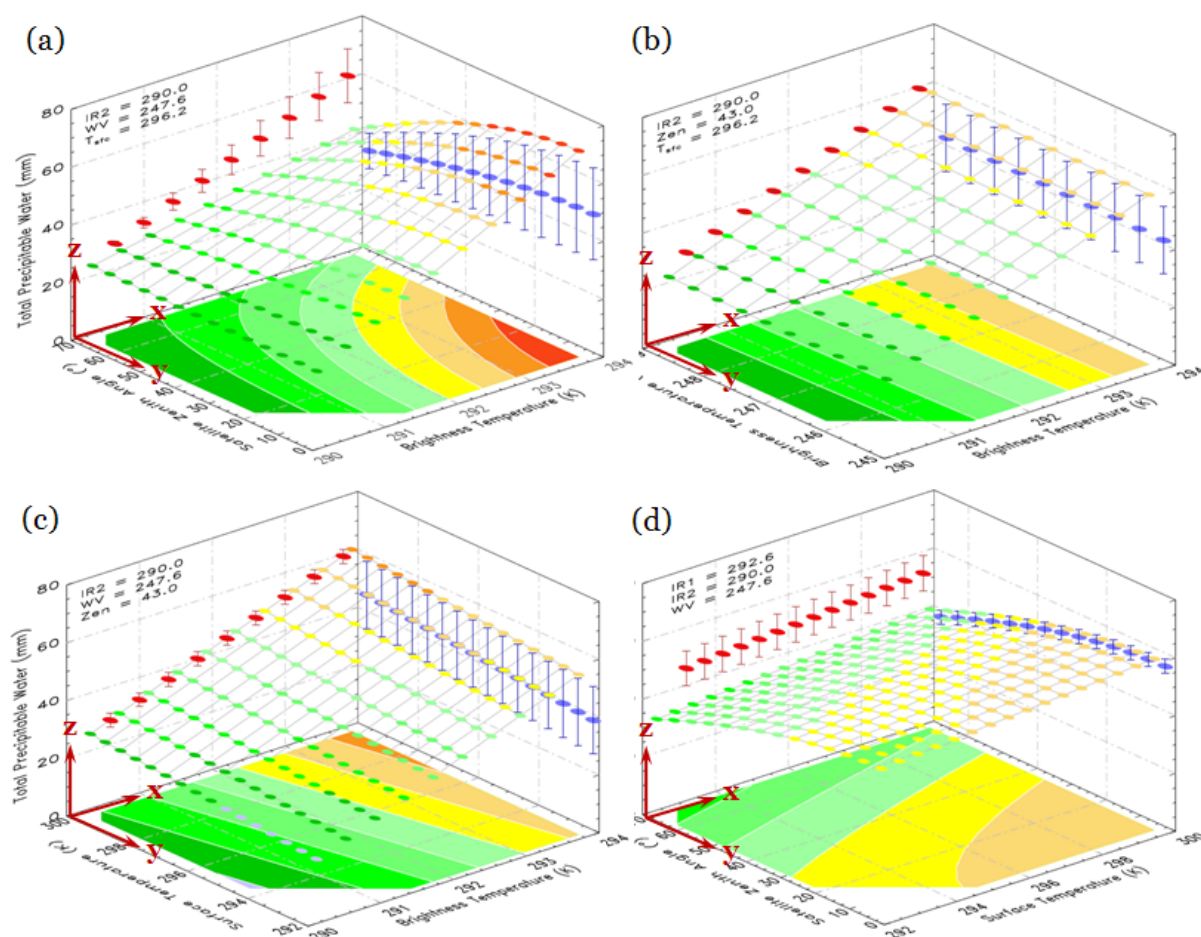


Fig. 5. The sensitivity of TPW, calculated using the improved algorithm, according to the variation of split-window channel BT, satellite zenith angle, WV channel brightness temperature, and surface temperature. (a) For satellite zenith angle and BT, (b) for WV channel brightness temperature and BT, (c) for surface temperature and BT, and (d) satellite zenith angle and surface temperature. Error bar stands for a standard deviation.

3.3. 산출과정

3.3.1. 알고리즘 흐름도

CMDPS (COMS Meteorological Data Processing System)의 TPW 산출모듈에서는 위의 3.1절에서 소개한 SWLR 방법을 개선한 알고리즘을 이용하여 TPW를 산출하며, 시간에 따른 각각의 입력 자료와 알고리즘의 실행과정은 Fig. 6에 간략하게 나타내었다. Fig. 6에 나타낸 바와 같이, 알고리즘 실행을 위한 입력 자료는 split-window 채널과 WV 채널의 L1b 휘도온도, 구름탐지 결과, LST (Land Surface Temperature)와 SST (Sea Surface Temperature) 산출결과, 위성천정각, 위/경도 정보, 알고리즘 계수, 알고리즘 천정값(threshold value) 등으로 구성되며, 이들 자료를 이용한 TPW 산출 흐름도는 Fig. 7에 나타낸 바와 같다.

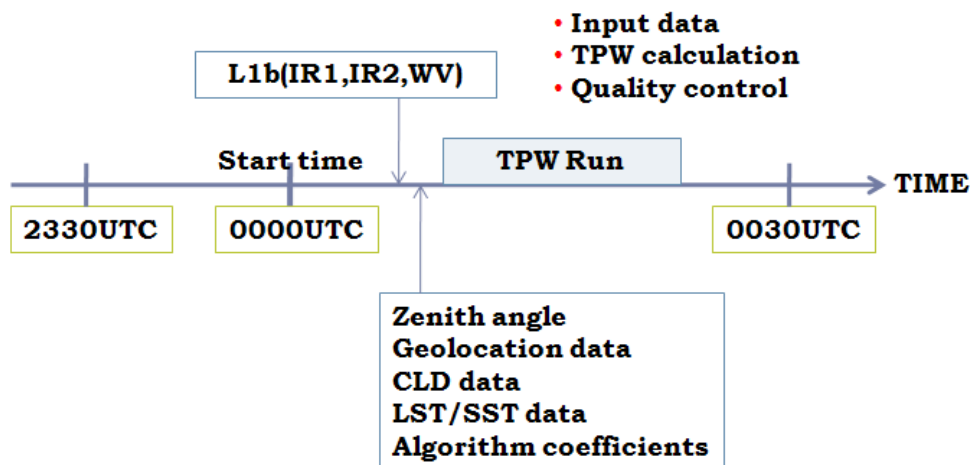


Fig. 6. Schematic diagram of the sequential procedure for TPW retrieval.

TPW 산출과정은 크게 품질검사 (Quality Control; QC)과정과 계산과정으로 분류할 수 있으며, 알고리즘 흐름에 따른 각각의 산출과정은

- ① 구름탐지 결과를 이용하여 구름/청천으로 판정된 화소를 선정한다. 청천으로 판정된 화소만을 선별하여 다음 계산 과정을 수행한다.
- ② 청천으로 판정된 개별 화소에 대한 각각의 split-window 채널의 휘도온도가 허용범위를 만족하는지 검사하여 다음 계산 과정을 수행한다.
- ③ Spilt-window 채널의 BTD가 TPW 산출이 가능한 허용범위를 만족하는지 검사하여 다음 계산 과정을 수행한다.

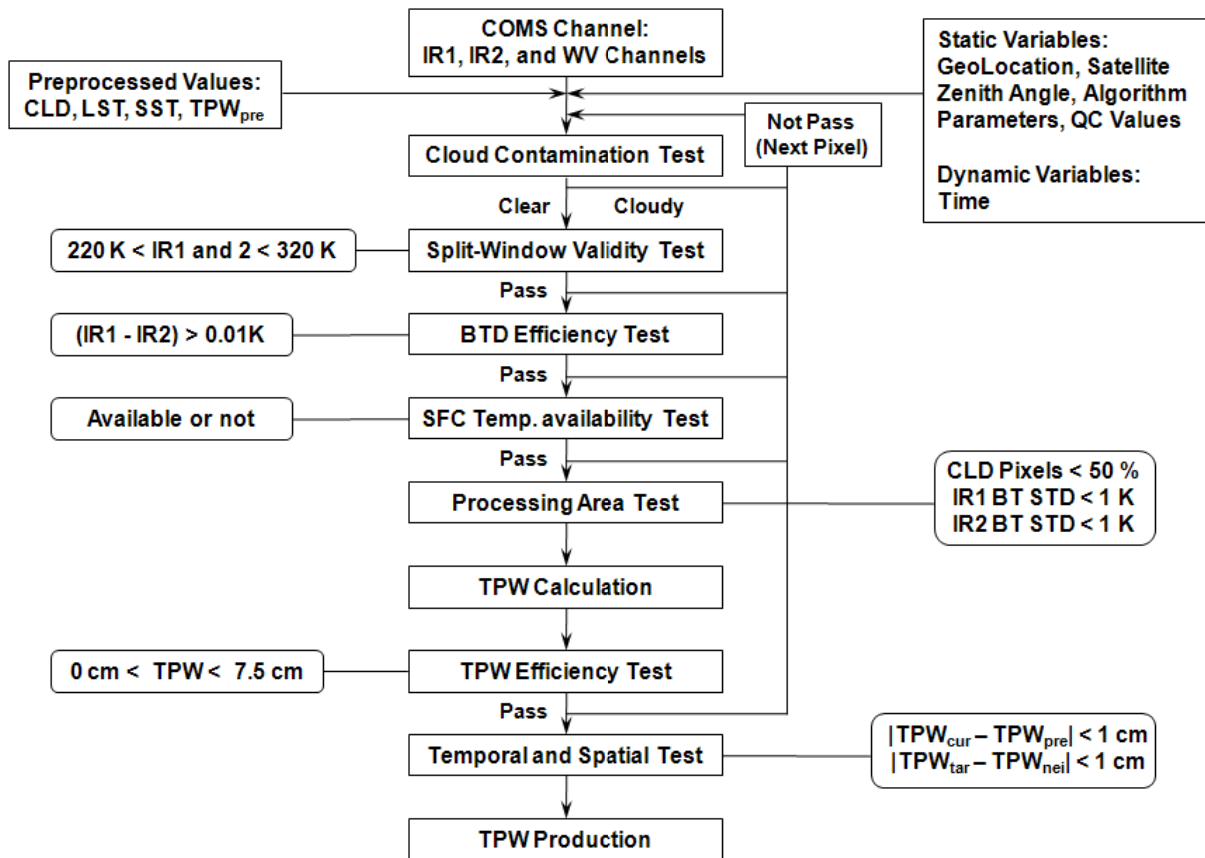


Fig. 7. Flowchart of the TPW retrieval procedure.

- ④ 타겟 화소에 대한 지면온도 산출결과의 사용 가능성 여부를 검사하여 다음 계산 과정을 수행한다.
 - ⑤ 타겟 화소를 기준으로 하여 가장 가까운 주변 화소들 (9×9 화소)에 대한 구름 유입 비율 검사와 각각의 split-window 채널 휘도온도에 대한 균질성 검사를 수행한다. 이 검사에 대한 결과는 TPW 산출에는 영향을 미치지 않으나, 검증 프로그램에서 중요한 변수로 사용된다.
 - ⑥ 타겟 화소에 대한 TPW 계산을 수행한다.
 - ⑦ 산출된 TPW에 대한 품질검사를 수행하며 상세 내용은 다음과 같다.
 - 가. 산출된 TPW의 산출범위 적합성 검사를 수행한다.
 - 나. 타겟 화소에 대한 시간 연속성 검사를 수행한다. 이전 시간에 산출된 TPW 자료와 비교하여 허용범위를 만족하는지 검사한다.
 - 다. 타겟 화소에 대한 공간 연속성 검사를 수행한다. 타겟 화소와 인접한 주변 화소들에서 산출된 TPW와 비교하여 허용범위를 만족하는지 검사한다.
 - ⑧ 개별 화소에 대한 TPW 산출자료와 품질검사 결과자료를 저장한다.
- 와 같이 요약할 수 있다.

3.3.2. 모듈구성

1) 상세 모듈구성

TPW 산출 모듈은 1개의 주프로그램 (main program)과 7개의 모듈 (module)로 구성되어 있으며, 각 모듈의 이름과 이에 대한 구성도는 다음의 Fig. 8에 나타내었다.

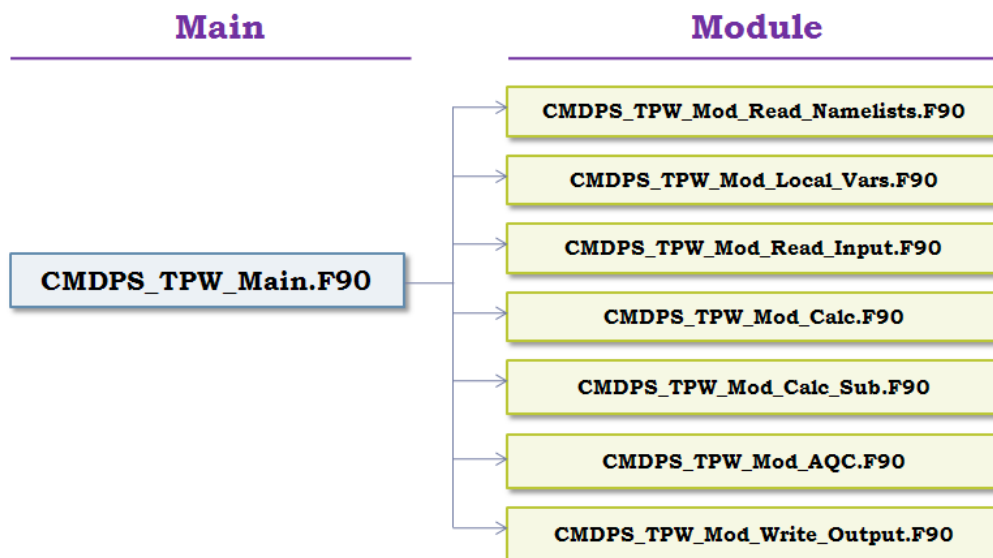


Fig. 8. The program structure of TPW modules in CMDPS.

공통모듈 (share module)을 포함한 전체 TPW 산출 프로그램에 대한 모듈 구성도는 Fig. 9와 같다. 산출모듈의 부프로그램 (subroutine)은 크게 정적자료 및 동적자료를 입력하는 모듈 (static and dynamic inputs), TPW 및 품질검사 정보를 산출하는 모듈, 산출된 정보를 저장하는 모듈로 구성되어 있으며, 공통모듈을 포함한 여러 부프로그램들은 하나의 주프로그램 내에서 알고리즘 흐름 (Fig. 7 참조)에 따라 입력과 계산 및 저장 과정을 수행한다. 각 모듈의 기능은

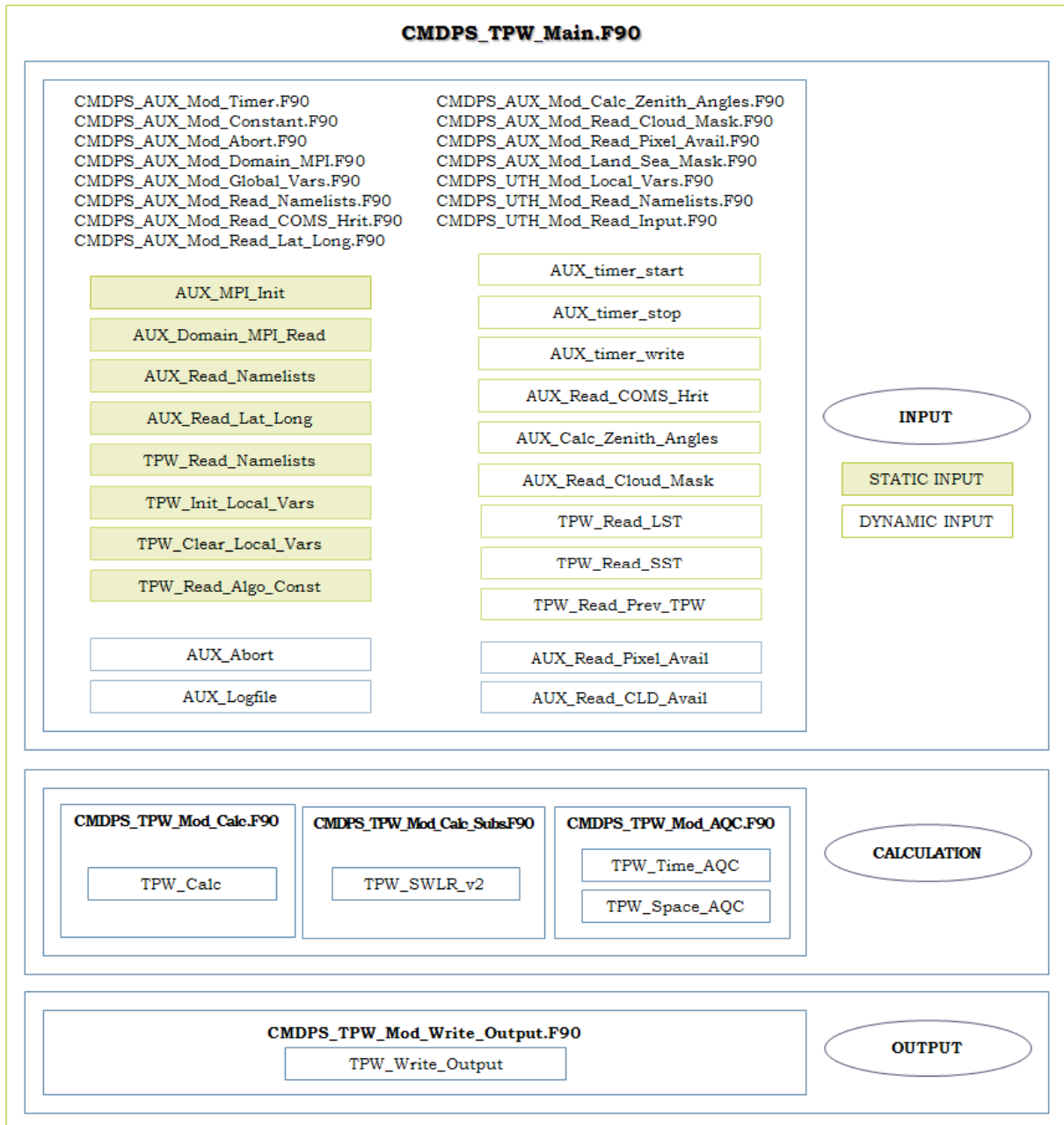


Fig. 9. Specific elements of TPW module components.

① CMDPS_TPW_Main

TPW 산출 프로그램의 주프로그램으로서, 공통모듈을 포함한 여러 부프로그램들을 호출한다.

② CMDPS_TPW_Read_Namelist

TPW 산출을 위한 주요 알고리즘 천정값들을 정의하고, 이를 namelist 파일로부터

입력받는다.

③ CMDPS_TPW_Mod_Local_Vars

TPW 산출에 사용되는 각 지역변수들의 배열을 할당하고 할당된 변수들을 초기화한다. 또한, TPW_Clear_Local_Vars는 이미 사용된 이들 변수를 메모리에서 제거한다.

④ CMDPS_TPW_Mod_Read_Input

TPW_Read_Algo_Const는 TPW 산출에 필요한 알고리즘 상수를 입력하고, TPW_Read_LST 및 TPW_Read_SST는 각각 CMDPS에서 산출된 LST와 SST 결과를 입력한다. 또한, UTH_Read_Prev_TPW는 CMDPS_TPW_Mod_AQC 모듈에서 이용할 전시간의 TPW 산출자료를 입력한다.

⑤ CMDPS_TPW_Mod_Calc

이 모듈은 TPW를 계산하는 주모듈로써, CMDPS_TPW_Mod_Read_Input 모듈에서 입력된 알고리즘 계수 및 LST와 SST 자료를 이용하여 TPW를 산출한다. 또한, 1×1 화소 구름유입 검사, split-window 채널 휘도온도 유효성 검사 및 산출물 유효성 검사와 같은 주요 품질검사를 수행한다(3.3.2절의 3) 참조).

⑥ CMDPS_TPW_MOD_Calc_Subs

이 모듈은 TPW를 계산하는 TPW_SWLR_v2로 구성되어 있으며, CMDPS_TPW_Mod_Calc에서 입력된 전역변수와 CMDPS_TPW_Read_Input 모듈에서 입력된 지역변수 자료를 사용한다.

⑦ CMDPS_TPW_Mod_AQC

TPW_Time_AQC와 TPW_Space_AQC 프로그램으로 구성되어 있으며, TPW 산출물의 시/공간 연속성 검사를 수행한다.

⑧ CMDPS_TPW_Write_Output

산출된 TPW와 품질검사 결과를 저장한다.

와 같으며, Table 2에 이를 간략하게 정리하였다.

Table 2. Specific module descriptions of the TPW calculation program.

Module	Subroutine & Function		Contents
CMDPS_TPW_Mod_Read_Namelist	Sub	TPW_Read_Namelist	알고리즘 천정값 입력
CMDPS_TPW_Mod_Local_Vars	Sub	TPW_Init_Local_Vars	지역변수의 배열 선언 및 초기화
		TPW_Clear_Local_Vars	할당된 변수 배열 해제
CMDPS_TPW_Mod_Read_Input	Sub	TPW_Read_Algo_Const	알고리즘 상수 입력
		TPW_Read_LST	지표면 온도 자료 입력
		TPW_Read_SST	해수면 온도 자료 입력
		TPW_Read_Prev_TPW	전 시간의 TPW 산출물 입력
CMDPS_TPW_Mod_Calc	Sub	TPW_Calc	변수 호출 및 계산
CMDPS_TPW_Mod_Calc_Sub	Fun	TPW_SWLR_v2	화소별 TPW 산출 및 QC
CMDPS_TPW_Mod_AQC	Sub	TPW_Time_AQC	산출물 시간 연속성 검사
		TPW_Space_AQC	산출물 공간 연속성 검사
CMDPS_TPW_Mod_Write_Output	Sub	TPW_Write_Output	산출자료 저장

2) 상세 입출력 자료

TPW 산출에 필요한 입력 자료는 정적입력 자료와 동적입력 자료로 구분할 수 있다. 정적입력 자료는 알고리즘 계수, 위성 천정각, 알고리즘 천정값 자료가 있으며, 이들은 각각의 외부 파일로부터 입력된다. 알고리즘 천정값은 UNI_coef_namelist.nml로부터 입력되며, 알고리즘 계수는 Algorithm_Con.DAT 파일에 저장되어 있다. 이들 파일에 저장된 알고리즘 계수 및 천정값은 사용자의 필요에 따라 수정하여 TPW 모듈에 적용할 수 있다. 동적입력 자료는 split-window 채널 및 WV 채널의 휘도온도, 화소별 구름정보 및 지표면 온도 (SST와 LST), 위성 관측시간, 이전 시간 관측으로 산출된 UTH 자료로 구성된다. 이들 동적입력 자료는 정적입력 자료와 달리 산출 모듈이 실행될 때 마다 새로운 자료들로 갱신된다. 최종 산출물은 개별적인 화소에 대한 TPW 산출자료와 품질정보로 구성된다. 품질정보는 개별적인 품질검사에 대한 결과로서 10 진수 형태로 TPW 산출물과 동일한 파일에 저장된다. TPW 산출 모듈의 상세 입출력 자료에 대한 내용은 Table 3에 간략하게 정리하였다.

3) 품질검사

품질검사는 크게 두 부분으로 구성된다. 개별 화소 (1×1 화소)에 대한 품질검사와 검증영역 (9×9 화소)에 대한 품질검사, 검증영역에 대한 품질검사는 구름 유입량 검사와 휘도온도 균질성 검사로 구성되며, 이들 검사에 대한 결과는 개별 화소에 대한 산출물의 생산에는 직접적인 영향을 미치지 않으나, 차후 산출물의 검증에 중요한 정보를 포

함한다. 반면, 개별 화소에 대한 품질검사는 산출에 직접적인 영향을 미치는 구름유입 검사 및 휘도온도 유효성 검사, 지면온도 가용성 검사, 산출물 유효성 검사로 구성되며, 산출에는 영향을 미치지 않으나 산출물의 품질정보만을 제공하는 시/공간 연속성 검사로 구성된다. 이들 품질검사에 대한 내용은 Table 4에 간략히 정리하였다.

Table 3. Detailed input and output data for the TPW algorithm.

INPUT DATA								
Parameter	Mnemonic	Units	Min	Max	Prec	Acc	Res	Source
IR1 channel BT	ir1	K	220	320	0.1	0.1	1×1	L1b
IR2 channel BT	ir2	K	220	320	0.1	0.1	1×1	L1b
WV channel BT	wv	K	170	300	0.1	0.1	1×1	L1b
Satellite Zenith Angle	sat_zen	deg	0	90	0.1	0.1	1×1	L1b
Previously Producted TPW	prev_tpw	mm	0	75	0.1	0.1	1×1	L1b
Scenes type	mask	-	0	1	1	1	1×1	L2b
Land Surface Temperature	lst	K	-	-	0.1	0.1	1×1	L2b
Sea Surface Temperature	sst	°C	-	-	0.1	0.1	1×1	L2b
Land/Sea Mask	lsmask	-	0	2	1	1	1×1	L2b
BT Lower Threshold	tb_min	K	220	-	1	1	1×1	Setup Parameter
BT Upper Threshold	tb_max	K	-	320	1	1	1×1	Setup Parameter
BT Difference Threshold	tb_diff	K	-	0.01	-	-	1×1	Setup Parameter
Rate of Clear Pixel	clear_pix	%	-	50	-	-	1×1	Setup Parameter
Stddev of IR1 BT	ir1_std	K	-	1	-	-	9×9	Setup Parameter
Stddev of IR2 BT	ir2_std	K	-	1	-	-	9×9	Setup Parameter
Temporal Continuity Test	tpw_time	mm	-	10	-	-	1×1	Setup Parameter
Spacial Continuity Test	tpw_space	mm	-	10	-	-	1×1	Setup Parameter
Processing segment size	proc_size_tpw	pixel	-	9	-	-	9×9	Setup Parameter
TPW Lower Threshold	tpw_min	mm	0	-	1	1	1×1	Setup Parameter
TPW Upper Threshold	tpw_max	mm	-	75	1	1	1×1	Setup Parameter
Algorithm coefficient	coef	-	-	-	-	-	1×1	Setup Parameter
Logic Operation Unit	use_prev_tpw	-	-	-	-	-	-	Setup Parameter
OUTPUT DATA								
Parameter	Mnemonic	Units	Min	Max	Prec	Acc	Res	To.
TPW	tpw	mm	0	75	0.1	0.1	1×1	-
Quality Flag	tpw_flag	-	0	512	1	1	1×1	-
Number of Clear Pixel	cel_count	pixel	0	81	1	1	1×1	-

Table 4. Specific descriptions of quality check in the TPW calculation module.

Bit	Contents	Availability	Criterion
0	–	가능	모든 검사를 통과한 경우
1	구름유입 검사	불가	구름이 유입된 경우
2	SW 채널 휘도온도 유효성 검사	불가	SW 채널의 휘도온도가 유효범위 ($220K < T_b < 320K$)를 벗어난 경우
4	SW 채널 휘도온도차 검사	불가	IR1 채널과 IR2 채널의 휘도온도 차가 $0.01K$ 이상인 경우
8	지면온도 가용성 검사	불가	지면온도(LST, SST)가 정상적으로 산출되지 않은 경우
16	산출물 유효성 검사	불가	산출물이 유효범위 ($0mm < TPW < 75mm$)를 벗어난 경우
32	공간 연속성 검사	가능	해당 화소 주위의 산출물과의 차가 $10mm$ 이상인 경우
64	시간 연속성 검사	가능	동일한 화소에 대한 전 시간 산출물과의 차가 $10mm$ 이상인 경우
128	구름 유입량 검사 [†]	가능	9×9 화소의 구름 유입량이 50% 이상인 경우
256	IR1 채널 휘도온도 균질성 검사 [†]	가능	구름을 제외한 9×9 화소에 대한 IR1 채널 휘도온도의 표준편차가 $1K$ 이상인 경우
512	IR2 채널 휘도온도 균질성 검사 [†]	가능	구름을 제외한 9×9 화소에 대한 IR2 채널 휘도온도의 표준편차가 $1K$ 이상인 경우

[†] quality control for processing area to use in the validation modules

3.4. 검증

3.4.1. 검증 방법

자료처리시스템에서 산출된 TPW는 지상관측 자료와 비교하여 산출물의 정확도를 검증하게 된다. 검증에 사용하는 지상관측 자료는 라디오존데 sounding 자료를 기본으로 하며, 지상관측 자료와 위성관측으로 산출된 자료와의 타당한 비교를 위해서 1×1 화소로 산출된 TPW 자료를 9×9 화소 (~ 36 km FOV at nadir)로 평균하였다. 위의 3.3절에서 언급한 바와 같이, TPW 산출물을 9×9 화소로 평균하는 과정에서 전체 화소에 대한 구름 유입 비율 검사 결과와 split-window 채널의 휘도온도 균질성 검사 결과를 이용하게 되며, 이들 검사를 정상적으로 통과한 자료만을 비교·검증에 사용하였다.

라디오존데 sounding 자료를 이용하여 TPW를 계산하기 위해서 다음의 식을 사용하여 층별 대기의 포화수증기압과 수증기압을 계산할 수 있다 (Vedel, 2003).

$$e_s(T) = 611.21 \times \exp \left[17.502 \times \frac{T - 273.16}{T - 32.19} \right] \quad (8)$$

$$e_s(T_d) = 611.21 \times \exp \left[17.502 \times \frac{T_d - 273.16}{T_d - 32.19} \right] \quad (9)$$

여기서, $e_s(T)$ 와 $e_s(T_d)$ 는 각각 층별 대기의 포화수증기압과 수증기압을 나타내며, T 와 T_d 는 각각 라디오존데로 관측한 층별 대기의 온도와 노점온도를 나타낸다. 위식으로 계산한 층별 포화수증기압과 수증기압을 이용하여 각각의 대기층에 대한 상대습도 (%)는

$$r = \frac{e_s(T_d)}{e_s(T)} \times 100 \quad (10)$$

와 같이 계산할 수 있으며, 비습 q (kg kg^{-1})는 다음의 식으로 계산할 수 있다.

$$q = \text{eps} \times \left\{ \frac{r \times e_s(T) \times 10^2}{p - r \times e_s(T) \times (1 - \text{eps}) \times 10^2} \right\} \quad (11)$$

여기서, $\text{eps} = 0.622$ 는 건조공기와 수증기의 분자량비이다. 위 식으로 계산한 비습을 이용하여 TPW (g m^{-2} ; mm)는

$$\text{TPW} = -\frac{1}{g} \int_{p_0}^{p_{\text{TOA}}} \bar{q} \, dp \quad (12)$$

와 같이 정의된다. 여기서, $g = 9.8 \, \text{m sec}^{-2}$ 는 중력가속도이다.

3.4.2 검증자료

자료처리시스템에서 산출된 TPW의 정확도를 비교·검증하기 위해서 GTS (Global Telecommunication System) 자료를 Ground Truth 자료로 이용하였다. Fig. 10은 COMS의 FOV (Field of View) 내에 위치하는 약 530개의 고층기상 관측소를 나타낸 것으로, 이들 고층기상 관측소에서 관측한 sounding 자료 (0000, 0600, 1200, 1800 UTC)를 검증에 이용하였다.

전문 형태로 보고되는 GTS 자료의 특성으로 인하여 양질의 자료만을 선별하여 검증에 활용하기 위해서 sounding 자료에 대한 품질검사를 선행하였다. 이를 위하여 Knabb and

Fuelberg (1997)가 제안한 다음과 같은 품질검사 방법을 이용하여 검증 자료를 선별하였다: 1) GTS에 정상적으로 보고된 sounding 자료가 20개 층 이상 포함된 고층관측소 자료, 2) 온도 프로파일이 100 hPa 이하의 고도까지 보고된 자료, 3) 수증기 (i.e., 이슬점 온도) 프로파일이 250 hPa 이하의 고도까지 보고된 자료, 4) 수증기량이 약 93 % 이하 (i.e., dew-point depression > 1)인 층으로만 구성된 보고 자료, 5) 관측소의 지상기압이 1000 hPa 이상인 자료, 6) 보고 자료에 심각한 오류가 포함되지 않은 자료. 이러한 6 단계의 품질검사 과정을 통과한 라디오존데 sounding 자료를 이용하여 식 (8) ~ (11)의 과정으로 TPW를 계산하고, 이를 검증에 활용하였다.

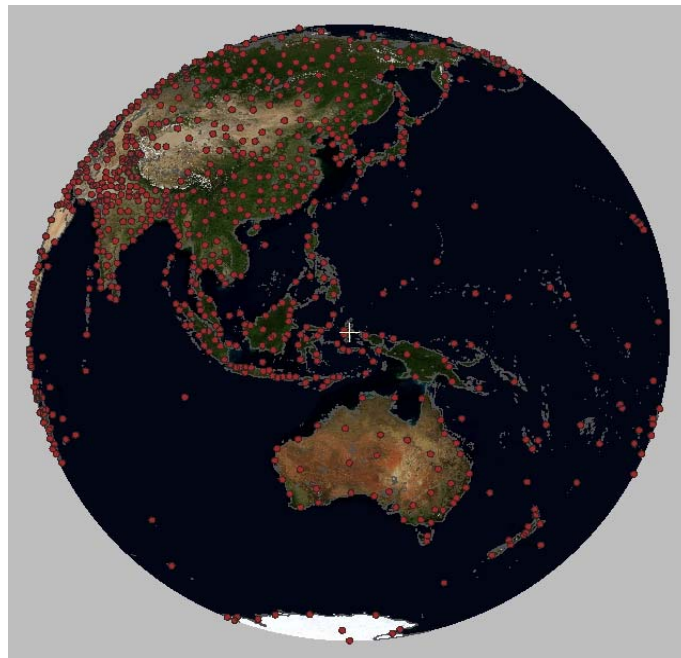


Fig. 10. The geophysical locations of upper-air station within the COMS FOV used in the validation.

3.4.3. 시공간일치방법

각각의 고층기상 관측소에서 0000, 0600, 1200, 1800 UTC에 관측된 자료가 GTS에 보고되며, 이들 자료가 관측된 시간과 가장 근접한 시간 (± 30 분 이내)에 자료처리시스템에서 산출된 TPW 자료와 비교·검증을 수행하게 된다. 또한, 지상관측 자료와 위성산출 자료의 공간적 일치를 위해서 고층기상 관측소의 위치 (위/경도)와 가장 근접한 위치에 해당하는 위성영상 화소를 타겟으로 하여, 타겟 화소를 중심으로 9×9 화소 평균된 TPW 산출물을 검증에 이용한다.

3.4.4. 검증결과분석

TPW 산출자료는 시·공간 일치자료를 이용하여 다음의 식으로 정의되는 RMSE (root-mean square error), Bias 및 상관계수 R을 계산함으로써, 정량적으로 비교할 수 있다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (E_i - O_i)^2} \quad (13)$$

$$Bias = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (E_i - O_i) \quad (14)$$

$$R = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (E_i - \bar{E})(O_i - \bar{O})}{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (E_i - \bar{E})^2} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2}} \quad (15)$$

여기서, E_i 와 O_i 는 각각 추정량과 실제량을 나타내는 것으로써, 자료처리시스템에서 산출된 TPW는 추정량에 해당하며, 실제량은 Ground Truth 자료, 즉 라디오존데에서 관측한 TPW이다.

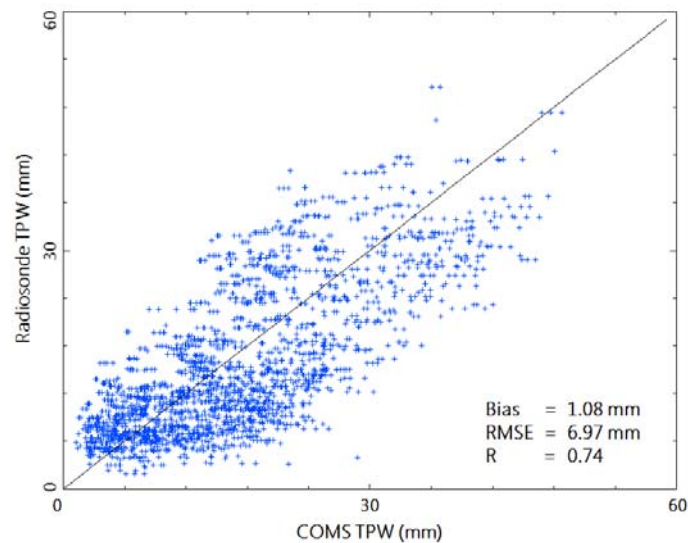


Fig. 11. Comparison of inferred TPW from COMS with the radiosonde sounding from January to November in 2007. The dash-dot line shows a 1-to-1 correspondence.

Fig. 11은 TPW 산출자료를 지상 관측자료와 비교한 결과를 나타낸 것으로써, 전구영역에 대하여 COMS가 정상적으로 운영된 2011년 4월부터 11월까지 11개월의 기간 동안 관측한 COMS MI 자료를 이용하였다. Fig. 11에 나타난 바와 같이, TPW 산출물의 비교/검증 결과, RMSE와 상관계수는 각각 6.97mm와 0.74로 나타났다. 이는 참고 정확도인 RMSE 7mm를 만족하는 결과이지만, MSG 위성에 대한 Fernandez and Manso (2007)의 선행연구결과에 비해서는 다소 낮은 정확도를 보인다. 그러나 본 연구에서 개발한 알고리즘은 이들이 제안한 알고리즘과 달리 제한된 채널자료 (IR1 and 2, WV 채널)만을 이용하여 TPW를 산출한 것으로써, 현업운용을 위한 효율성이 더 높다. TPW는 입력 보조자료인 LST에 민감하게 생산되므로, 앞으로 LST의 정확도가 개선되면 TPW의 정확도가 좀 더 향상될 수 있다.

4. 산출결과 및 해석방법

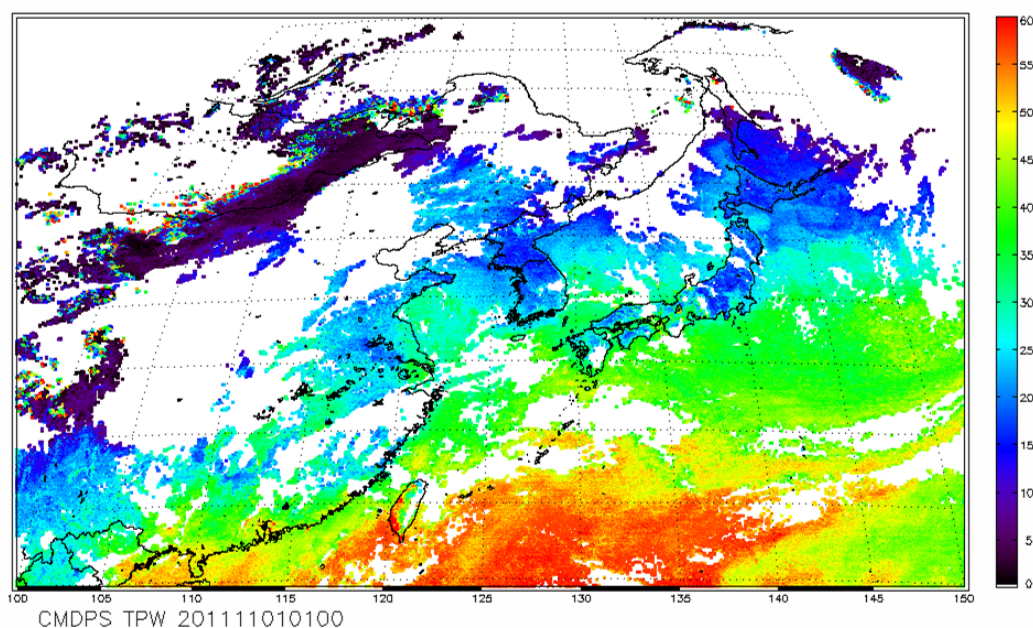


Fig. 12. TPW imagery for COMS measured at 0100 UTC on November 1, 2011.

CMDPS에 적용된 TPW 산출 모듈의 실행 결과를 검사하기 위해 COMS에서 관측한 MI(Meteorological Imager) 자료를 이용하여 TPW를 산출하였다. 수행 사례일은 2011년 11월 1일 0100 UTC이며, 모듈에서 산출된 TPW의 결과는 Fig. 12에 나타내었다. Fig. 12에 나타난 바와 같이, TPW 산출 영역은 COMS의 FOV에 해당하는 영역 중 동아시아 지역이며, 흰색으로 나타난 화소들은 구름탐지 모듈의 선행 결과를 이용하여 구

름으로 판정된 화소들과 품질검사를 정상적으로 통과하지 못한 화소들이다. 이들 화소의 95 % 이상은 구름으로 판정된 화소들이며, TPW 산출 영역과 정확도는 구름탐지 모듈의 선행 결과에 크게 의존한다. 그림에서 색지수 (Color Index)가 붉은색을 나타낼수록 TPW 양이 높음을 의미하고, 푸른색을 나타낼수록 TPW 양이 낮음을 의미한다. 따라서 Fig. 12의 사례에 대해서는 적도 영역은 다른 지역에 비해 TPW 양이 다소 높음 (45 ~ 60 mm)을 알 수 있고, 위도가 높아질수록 TPW 양이 점차 낮아짐을 알 수 있다. 특히, 한반도 지역과 만주 지역은 TPW가 약 15 mm 이하로 대기가 건조한 상태임을 알 수 있다.

5. 문제점 및 개선 가능성

CMDPS TPW 초기 알고리즘에서 제기되었던 산출물의 정확도 문제는 현업 운영을 위한 최적화 작업을 통해 상당부분 개선되었다. 초기의 TPW 산출 모듈에 적용된 알고리즘 계수는 CMDPS 시험운영 중 결정된 전구 영역의 계수이다. 따라서 정상운영 이후 CMDPS의 지면온도 자료(LST/SST)를 이용하여 월 별로 재 산출된 알고리즘 계수를 적용하였으며, 이에 따라 산출 정확도가 향상되었다. TPW는 육지/해상에 따라 지표면 방출도에 큰 차이가 있으므로, 산출 정확도의 향상을 위해서는 TPW 산출 영역을 육지/해양 영역으로 구분할 필요가 있으며, 이를 위해서는 알고리즘 계수 및 TPW 산출식의 미세 조정에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

6. 참고문헌

- Andersen, H. S., 1996: Estimation of precipitable water vapour from NOAA -AVHRR data during the Hapex Sahel experiment. *Int. J. Rem. Sensing*, **17**, 2783-2801.
- Barnes, S. L., and D. K. Lilly, 1975: Covariance analysis of severe storm environments. Preprints, *Ninth Conf. on Severe Local Storms*, Norman, Amer. Meteor. Soc., 301-306.
- Chesters, D., L. W. Uccellini, and W. D. Robinson, 1983: Low-level water vapor fields from the VISSR Atmospheric Sounder (VAS) "split window" channels. *J. Climate Appl. Meteor.*, **22**, 725-743.
- _____, D. R. Wayne and L. W. Uccellini, 1987: Optimized retrievals of precipitable water from the VAS "Split Window". *J. Climate Appl. Meteor.*, **26**, 1059-1066.
- Chevallier, F., 2001: *Sampled database of 60-level atmospheric profiles from*

- the ECMWF analyses*. EUMETSAT/ECMWF SAF programme, Research Report No. 4, 27 pp.
- Fernandez, P., and M. Manso, 2007: *Software user manual for the PGE06 v2.0 (TPW–Total Precipitable Water) of the SAFNWC / MSG: Scientific part*. SAF/NWC/IOP/INM/SCI/SUM/07, 23 pp.
- Fuelberg, H. E., Y. L. Lin, and H. Chang, 1986: A moisture analysis of the meso–b scale thunderstorm environment during AVE–SESAMEV (20–21 May 1979). *Mon. Wea. Rev.*, **114**, 534–545.
- Guillory, A. R., G. J. Jedlovec and H. E. Fuelberg, 1993: A Technique for deriving Column–integrated water content using VAS Split–Window data. *J. Appl. Meteor.*, **32**, 1226–1241.
- Jedlovec, G. J., 1990: Precipitable water estimation from high–resolution split window radiance measurements. *J. Appl. Meteor.*, **29**, 863–876.
- Justice, C. O., T. F. Eck, D. Tanre, and B. N. Holben, 1991: The effect of water vapor on the normalized difference vegetation index derived for the Sahelian region from NOAA AVHRR data. *Int. J. Rem. Sensing*, **12**, 1165–1187.
- Knabb, R. D., and H. E. Fuelberg, 1997: A comparison of the first–guess dependence of precipitable water estimates from three techniques using GOES data. *J. Appl. Meteor.*, **36**, 417–427.
- Kleespies, T. J., and L. M. Mcmillin, 1990: Retrieval of Precipitable Water from Observations in the Split–Window over varying Surface Temperatures. *J. Appl. Meteor.*, **29**, 851–862.
- MSC, 1997: *The GMS user's guide*. Meteorological Satellite Center, Tokyo, 190 pp.
- Petersen, R. A., L. W. Uccellini, A. Mostek, and D. A. Keyser, 1984: Delineating mid– and low–level water vapor patterns in preconvective environments using VAS moisture channels. *Mon. Wea. Rev.*, **112**, 2178–2198.
- Reber, E. E., and J. R. Swope, 1972: On the correlation of the total precipitable water in a vertical column and absolute humidity at the surface. *J. Appl. Meteor.*, **11**, 1322–1325.
- Robinson, W. D., D. Chesters, and L. W. Uccellini, 1986: Optimized retrievals of precipitable water fields from combinations of VAS satellite and conventional surface observations. *J. Geophys. Res.*, **91**, 5305–5318.
- Saunders, R. W., M. Matricardi, and P. Bruel, 1999: An improved fast radiative transfer model for assimilation of satellite radiances observations. *Quart. J.*

- Roy. Meteor. Soc.*, **125**, 1407–1425.
- Sobrino, J. A., N. Raissouni, J. Simarro, F. Nerry, and F. Petitcolin, 1999: Atmospheric water vapor content over land surfaces derived from the AVHRR data: Application to the Iberian peninsula. *IEEE Trans. Geosci. Rem. Sensing*, **37**, 1425–1434.
- Tomasi, C., 1981: Determination of the total precipitable water by varying the intercept in Reitan's relationship. *J. Appl. Meteor.*, **20**, 1058–1069.
- Vedel, H., 2003: Radiosonde data specification document. Danish Meteor. Ins.. [Available at <http://web.dmi.dk/pub/tough/deliverables/d58.html>]