

## MODIS 적외 자료를 이용한 동아시아 지역의 총가강수량 산출

박호순\* · 손병주\*\*† · 정의석\*\*

\*공군 제73기상전대, \*\*서울대학교 지구환경과학부

### Estimation of Total Precipitable Water from MODIS Infrared Measurements over East Asia

Ho-Sun Park\*, Byung-Ju Sohn\*\*†, and Eui-Seok Chung\*\*

\*ROKAF 73rd Weather Group, \*\*School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University

**Abstract** : In this study the retrieval algorithms have been developed to retrieve total precipitable water (TPW) from Terra/Aqua Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) infrared measurements using a physical iterative retrieval method and a split-window technique over East Asia. Retrieved results from these algorithms were validated against Defense Meteorological Satellite Program (DMSP) Special Sensor Microwave/Imager (SSM/I) over ocean and radiosonde observation over land and were analyzed for investigating the key factors affecting the accuracy of results and physical processes of retrieval methods.

Atmospheric profiles from Regional Data Assimilation and Prediction System (RDAPS), which produces analysis and prediction field of atmospheric variables over East Asia, were used as first-guess profiles for the physical retrieval algorithm. We used RTTOV-7 radiative transfer model to calculate the upwelling radiance at the top of the atmosphere. For the split-window technique, regression coefficients were obtained by relating the calculated brightness temperature to the paired radiosonde-estimated TPW.

Physically retrieved TPWs were validated against SSM/I and radiosonde observations for 14 cases in August and December 2004 and results showed that the physical method improves the accuracy of TPW with smaller bias in comparison to TPWs of RDAPS data, MODIS products, and TPWs from split-window technique. Although physical iterative retrieval can reduce the bias of first-guess profiles and bring in more accurate TPWs, the retrieved results show the dependency upon initial guess fields. It is thought that the dependency is due to the fact that the water vapor absorption channels used in this study may not reflect moisture features in particular near surface.

**Key Words** : Total Precipitable Water (TPW), MODIS, infrared measurements, physical iterative method, split-window technique.

**요약** : Terra/Aqua MODIS의 적외관측 자료를 이용하여 동아시아 지역에서 물리적 방법과 split-window 방법으로 총가강수량을 산출하는 알고리즘을 개발하였다. 물리적 방법에서는 동아시아 지역에 대한 분석 예측 자료를 생산하는 RDAPS 자료를 알고리즘의 초기 추정치로 사용하였다. 이 과정에서 복사전

접수일(2008년 6월 23일), 수정일(1차 : 2008년 7월 5일, 2차 : 7월 19일), 게재확정일(2008년 7월 30일).

† 교신저자: 손병주(sohn@snu.ac.kr)

달계산을 위해 빠르고 정확도가 높은 RTTOV-7 모델을 이용하였다. Split-window를 이용한 총가강수량 산출에서는 동아시아 지역의 라디오존데 관측자료를 훈련자료로 사용하여 밝기온도를 계산하였고, 이로부터 관측된 밝기온도로부터 총가강수량을 산출할 수 있는 회귀식을 도출하였다.

위의 두 알고리즘을 2004년 8월과 12월의 MODIS 적외선 자료에 적용하여 산출한 결과를 해양에서는 DMSP SSM/I 결과와 육지에서는 라디오존데 관측 결과와 비교하여 검증하였고, 이를 바탕으로 총가강수량의 정확성에 영향을 미치는 요인과 산출과정에 중요한 물리과정을 분석하였다. 비교결과 RDAPS, MODIS, split-window 방법에 비해 물리적 방법을 이용한 총가강수량의 산출 정확성이 높은 것으로 나타났다. 그러나 물리적 방법은 초기 추정치에 따라 산출결과가 상이하게 나타나는 단점을 가지고 있는 것으로 파악되었다. 따라서 TIGR 자료와 같은 기후 평균값을 초기치로 적용함에 있어 주의가 요구된다. 이러한 원인으로 지표 부근의 수증기에 대한 정보 부족 등을 들 수 있다. 이러한 단점에도 불구하고 지표와 지형의 변화가 큰 한반도를 포함한 동아시아 지역에서는 물리적 방법에 의한 총가강수량 산출의 효율성이 큰 것으로 사료된다.

## 1. 서론

대기 중의 물은 상변화와 수증기 수송을 통해 에너지를 수송하며 복사평형을 유지시키는 중요한 역할을 한다. 뿐만 아니라 수증기는 복사적인 측면에서 가장 중요한 온실 기체로서 기후시스템을 열적으로 강제하는 역할을 하고 있다. 따라서 다양한 시공간적 규모에서 관측되는 기후변화의 원인을 규명하고 자연적 또는 인간 활동에 의해 야기되는 기후변화를 예측하기 위해서는 기후시스템의 물 순환 과정에 대한 보다 나은 이해가 요구되며, 이를 위해 정확한 수증기의 관측이 요구된다 (Labraga *et al.*, 2000).

총가강수량(TPW, Total Precipitable Water)은 대기 연직 기둥 내에 존재하는 모든 수증기가 액상으로 변화되었을 때의 차지하는 깊이로서 지역 또는 전지구 기후 현상을 이해하는데 효과적으로 이용되며, 자료동화를 통해 수치예보 모델에 적용됨으로써 예보 향상에 이용되고 있다(Yang *et al.*, 1999). 일반적으로 총가강수량은 라디오존데 또는 위성 관측으로부터 얻어진다. 이중 라디오존데 관측은 대부분 육지에 한정되어 이루어지고 있으며 관측횟수도 제한되어 기후연구 및 일기예보에 이용함에 있어 자료의 시공간적인 한계가 제약으로 작용하고 있다. 따라서 광범위한 영역에 대한 연속적인 관측이 가능한 위성자료의 활용이 필요하다.

위성자료를 이용한 총가강수량의 산출에는 마이크로파 또는 적외선 영역의 관측이 사용된다. 마이크로파 방법은 구름에 대한 투과도가 큰 마이크로파의 성질로 인

해 구름 영역에 관계없이 전지구적인 수증기량 측정에 장점을 가지며 방출율이 낮은 해양에서 비교적 정확한 총수증기량 추정이 가능하다. 그러나 육지에서는 방출율의 급격한 시공간적 변동으로 인해 산출 정확성이 높지 않다(Boukabara *et al.*, 2000). 반면 적외선 방법은 구름이 존재하는 경우 총가강수량 추정이 불가능한 단점이 있지만 맑은 지역을 고려할 경우 라디오존데 관측이나 마이크로파 방법에 비해 해류 분포에 대한 제약이 적고 공간 분해능이 우수한 장점을 지닌다.

위성 관측을 이용한 총가강수량 산출에는 복사전달방정식을 기초로 반복적인 계산을 통해 관측된 복사량에 대응하는 대기 프로파일로부터 총가강수량을 산출하는 물리적 방법과 훈련자료로부터 얻어낸 회귀식을 통해 위성 관측자료로부터 총가강수량을 산출하는 통계적 방법이 활용되고 있다. 물리적 방법의 경우 계산상의 시간적 부담을 갖게 되므로 이를 해소할 수 있는 RTTOV-7 (Saunders *et al.*, 1999)과 같이 빠르고 정확한 복사전달모델의 사용이 필요하다. 반면 통계적 방법은 물리과정의 결여로 인해 지역에 따라 산출식이 달라지기 때문에 지역 특성을 반영하는 산출 알고리즘의 개발이 요구된다.

본 연구에서는 동아시아 지역에서 물리적 방법과 split-window 방법을 사용하여 Terra/Aqua MODIS의 적외선관측 자료로부터 총가강수량을 산출하는 알고리즘을 개발하고자 한다. 개발된 알고리즘을 선정된 사례에 적용하여 총가강수량을 산출하며 그 결과는 타 자료와 비교 검증한다. 해양 지역에서는 자료의 신뢰도가 높

은 타 위성 산출물을 이용하며, 육지 지역에서는 라디오존데 관측 자료를 이용한다. 검증을 통해 산출에 영향을 미치는 요인과 복원과정에 중요한 물리과정에 대해 논의하고자 한다.

## 2. 연구방법

### 1) 이론적 배경

물리적 복원은 위성 관측자료를 기준으로 초기 추정치의 온도와 수증기 프로파일을 재구성하는 과정으로 계산된 복사량이 실제 관측된 복사량과 일치하거나 그 차이가 최소가 될 때까지 프로파일이 변경된다. 이 방법은 복원과정에 복사전달방정식을 통한 물리과정이 포함되어 있고 산출결과의 정확도가 높은 장점을 가진다. 그러나 복사량 모의과정에서 반복적인 계산이 필요하고 산출결과가 초기 추정 프로파일에 좌우되는 문제를 지닌다. 한편 통계적 복원은 훈련자료로부터 얻어진 회귀식을 이용하여 짧은 시간 내에 위성 관측자료에서 대기 프로파일을 직접 산출할 수 있는 장점을 가진다. 그러나 복사전달에 대한 물리과정이 결여되어 있고 회귀식에 따라 산출결과가 상이하게 나타나는 단점을 지닌다. 이와 같이 대기 프로파일 산출에 사용되는 물리적 방법과 통계적 방법은 각기 장단점을 갖고 있다. 이들이 갖는 단점을 해결하기 위해 물리적 방법에는 정확하고 계산 부담이 적은 복사전달모델을 적용하고, 통계적 방법에는 지역 특성을 반영할 수 있는 회귀식을 사용함으로써 보다 정확한 산출결과를 얻을 수 있다.

### 2) 비선형 물리적 방법

역역학적 평형 상태에서 산란이 없다는 가정하에 위성의 채널  $j$ 에서 관측되는 복사휘도  $R(v_j, \theta)$ 는 식 (1)과 같이 표현된다(Ma *et al.*, 1999).

$$R(v_j, \theta) = B(v_j, t_s) \tau(v_j, \theta, p_s) - \int_0^{p_s} B[v_j, t(p)] \left[ \frac{\partial \tau(v_j, \theta, p)}{\partial p} \right] dp \quad (1)$$

식 (1)에서  $v_j$ 와  $\theta$ 는 각각 평균 유효 파수와 위성 천정각을 나타내며,  $B(v_j, t_s)$ 와  $B[v_j, t(p)]$ 는 지표면과 기압  $p$ 인 고도에서의 온도에 해당하는 흑체복사량을 의미한다. 또한  $\tau(v_j, \theta, p_s)$ 와  $\tau(v_j, \theta, p)$ 는 주어진 위성 천정각  $\theta$ 에

대해 각각 지표면 또는 기압  $p$ 인 고도로부터 대기상한까지의 투과율을 나타낸다. Smith *et al.* (1991)의 유도 과정을 따라 식 (1)을 다음과 같이 밝기온도  $t_B$ 의 수치적인 섭동 항으로 근사할 수 있다.

$$\delta t_B(j) = \delta t_s K^t(j) - \sum_{i=1}^{I_s} \delta t(i) K^t(i, j) + \sum_{i=1}^{I_s} \delta q(i) K^q(i, j) \quad (2)$$

식 (2)에서  $\delta$ 는 평균상태 또는 정해진 값으로부터의 상대적인 차이를 나타낸다.  $K^t$ ,  $K^t$ ,  $K^q$ 는 각각 지표면 온도, 대기 온도, 그리고 수증기에 대한 가중함수를 나타내며,  $i$ 와  $j$ 는 기압층과 채널번호를 의미한다. 프로파일  $\mathbf{x}$ 의 변경을 위해 다음과 같이 정의되는 비용함수  $J(\mathbf{x})$ 를 사용한다(Eyre, 1989).

$$J(\mathbf{x}) = (\mathbf{x} - \mathbf{x}_0)^T \mathbf{C}^{-1} (\mathbf{x} - \mathbf{x}_0) + [\mathbf{y}^m - \mathbf{y}(\mathbf{x})]^T \mathbf{E}^{-1} [\mathbf{y}^m - \mathbf{y}(\mathbf{x})] \quad (3)$$

위에서  $\mathbf{x}_0$ 는 초기추정 프로파일,  $\mathbf{C}$ 는 초기추정 오차의 공분산 행렬,  $\mathbf{y}^m$ 은 채널  $m$ 에서 관측된 복사량 벡터, 그리고  $\mathbf{y}(\mathbf{x})$ 는 프로파일  $\mathbf{x}$ 로부터 복사전달방정식을 통해 계산된 복사량 벡터를 나타낸다. 복사량 오차의 공분산 행렬인  $\mathbf{E}$ 는 임의의 관측 오차와 전방모델의 오차를 포함하고 있다. 새로운 프로파일  $\mathbf{x}_{n+1}$ 을 구하기 위해 다음 식 (4a)의 역 Hessian method와 식 (4b)의 Steepest descent method를 사용한다.

$$\mathbf{x}_{n+1} = \mathbf{x}_n - [\nabla^2 J(\mathbf{x}_n)]^{-1} \nabla J(\mathbf{x}_n) \quad (4a)$$

$$\mathbf{x}_{n+1} = \mathbf{x}_n - \gamma^{-1} \nabla J(\mathbf{x}_n) \quad (4b)$$

식 (4)를 가중 평균하여 얻을 수 있는 프로파일  $\mathbf{x}_{n+1}$ 은 다음과 같다.

$$\mathbf{x}_{n+1} = \mathbf{x}_n - [\nabla^2 J(\mathbf{x}_n) + \gamma \mathbf{I}]^{-1} \nabla J(\mathbf{x}_n) \quad (5)$$

식 (4)와 (5)에서  $\nabla$ 는 기울기,  $\gamma$ 는 수렴조절 계수,  $\mathbf{I}$ 는 단위 행렬, 그리고  $\mathbf{x}_n$ 과  $\mathbf{x}_{n+1}$ 은 변경 전후의 프로파일을 나타낸다. 프로파일  $\mathbf{x}_n$ 에 대응하는 비용함수가 최소값을 갖도록 함으로써 다음과 같이 갱신된 프로파일  $\mathbf{x}_{n+1}$ 을 얻을 수 있다(Koenig, 2002).

$$\mathbf{x}_{n+1} = \mathbf{x}_0 + \mathbf{C} \mathbf{K}_n^T (\mathbf{K}_n \mathbf{C} \mathbf{K}_n^T + \mathbf{E})^{-1} [\delta \mathbf{y}_n^m + \mathbf{K}_n (\mathbf{x}_n - \mathbf{x}_0)] \quad (6)$$

식 (6)에서  $\delta \mathbf{y}_n^m$ 은 채널  $m$ 에서 관측된 복사량과 계산된 복사량의 차이를 의미한다. 위 식을 통해 초기 추정치 프로파일을 변경할 때 반복적으로 일정한 밝기온도에 대응하도록 온도와 수증기를 변경해야 한다. 그러나 단위 온도 변화에 의한 밝기온도 차이에 비해 단위 수증기

변화에 의한 밝기온도 차이가 매우 크기 때문에 수치적 관점에서 프로파일 변경과정에 불안정을 야기하여, 그 결과 계산된 밝기온도를 관측된 밝기온도에 수렴시키기 어려울 수 있다. 따라서 프로파일 변경 식에서는 수증기 변화량을 온도 변화량보다 작게 하여 밝기온도 차이가 수렴하도록 한다. 프로파일 수렴의 기준은 식 (7)과 같이 N개 채널들의 RMSE(Root Mean Square Error) 값으로 결정하며, 본 연구에서는 대류권 온도와 수증기 정보와 관련이 있는 6개 MODIS 적외 채널을 사용한다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N (TB_j^{cal} - TB_j^{obs})^2}{N-1}} \quad j = 1, 2, 3, \dots, N \quad (7)$$

위 수렴 기준에 의해 관측된 밝기온도와 계산된 밝기온도 차이가 임계값 이내로 줄어드는 프로파일을 선택하며, 반복적 프로파일 변경 과정 중 RMSE가 가장 낮은 경우에 해당하는 프로파일을 최종적으로 얻게 된다. 식 (8)과 같이 복원된 수증기 프로파일을 연직 적분하여 총가장수량(TPW)을 산출한다.

$$TPW = \frac{1}{2g} \sum_i [(q_i + q_{i+1})(p_i - p_{i+1})] \quad (8)$$

위에서  $g$ 는 중력가속도,  $q_i$ 는  $i$ 층에서의 수증기 혼합비,  $p_i$ 는  $i$ 층에서의 기압을 나타낸다.

### 3) Split-window 방법

통계적 복원 방법인 split-window 방법에서는 대기 창 영역에 위치한 두 채널의 복사량 차이를 이용하여 총가장수량을 산출한다(Saunders, 1967; Anding and Kauth, 1970; McMillin and Crosby, 1984). 적외 영역의 주어진 파장  $\lambda$ 에서 위성이 관측하는 복사량  $L_\lambda$ 는 다음과 같이 지표와 대기에 의한 효과로 표현된다.

$$L_\lambda = B_\lambda(T_s)\tau_0(\lambda) + B_\lambda(T_A)[1 - \tau_0(\lambda)] \quad (9)$$

식 (9)에서  $\tau_0(\lambda)$ 와  $T_s$ 는 각각 지표로부터 위성까지 파장  $\lambda$ 에서의 투과율과 지표의 밝기온도(equivalent blackbody temperature)를 나타낸다.  $T_A$ 는 대기의 평균 밝기온도를 나타내며 다음과 같이 정의된다.

$$B_\lambda(T_A) = \frac{1}{[1 - \tau_0(\lambda)]} \int_{\tau_0}^1 B_\lambda(T) dt \quad (10)$$

10.5~12.5  $\mu\text{m}$  영역에 중심파장을 갖는 두 채널의 복사량  $L_1$ 과  $L_2$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$L_1 = B_1(T_{B1}) = B_1(T_s)\tau_1 + B_1(T_A)(1 - \tau_1) \quad (11a)$$

$$L_2 = B_2(T_{B2}) = B_2(T_s)\tau_2 + B_2(T_A)(1 - \tau_2) \quad (11b)$$

식 (11)에서  $T_B$ 는 밝기온도를 나타낸다. 10.5~12.5  $\mu\text{m}$  파장 영역에서의 주요한 흡수기체는 수증기이기 때문에 두 채널 사이의 투과율의 차이는 수증기 흡수계수의 차이에 기인한다. 한편 특정 파장  $\lambda$ 에서 투과율은 근사적으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\tau_\lambda \approx \exp\left[-\beta_\lambda \frac{TPW}{\mu}\right] \quad (12)$$

식 (12)에서  $\beta$ 는 수증기 흡수계수를 나타내며  $\mu$ 는  $\cos\theta$ 를 의미한다. 플랑크 함수가 지역에 따라 선형적이라 가정하면 식 (11)을 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$T_{B1} - T_A = (T_s - T_A)\tau_1 \quad (13a)$$

$$T_{B2} - T_A = (T_s - T_A)\tau_2 \quad (13b)$$

식 (13)에서  $T_s$ 를 제거하면,

$$\frac{\tau_1}{\tau_2} = \frac{T_{B1} - T_A}{T_{B2} - T_A} \quad (14)$$

위와 같이 투과율의 비율로써 나타낼 수 있다. 투과율을 단일 흡수 기체의 적분의 함수로 가정하여 식 (12)를 이용하면, 두 채널의 투과율의 비율은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\tau_1}{\tau_2} = \exp\left[-(\beta_1 - \beta_2) \frac{TPW}{\mu}\right] \quad (15)$$

식 (14)를 식 (15)에 대입하면 총가장수량  $TPW$ 는 식 (16)과 같이 표현된다.

$$TPW = \frac{\mu}{\beta_2 - \beta_1} \ln\left(\frac{T_{B1} - T_A}{T_{B2} - T_A}\right) \quad (16)$$

총가장수량은 위와 같이 관측된 두 split-window 채널들의 밝기온도, 대기의 평균 밝기온도  $T_A$ , 그리고 수증기 흡수계수를 이용하여 산출할 수 있다. 그러나 정확한 산출을 위해서는 라디오통계 관측자료로부터 지역 특성을 대표할 수 있는  $T_A$ 를 구해야 하고,  $T_A$ 가 수증기 분포에 비해 공간적 변화가 훨씬 작아야 하는 선행조건이 요구된다(Chesters *et al.*, 1983). 또한 식 (16)을 이용한 산출이 정확도를 갖기 위해서는 단일 흡수계수가 밴드의 특징을 정확히 나타낼 수 있을 정도로 좁은 분광 밴드가 요구된다. 그러나 수증기 흡수계수는 정확한 값으로 측정하기 어렵고, 실험실 조건에서 추정된 값도 불확

실성을 내포하고 있는 문제점이 있다(Roberts *et al.*, 1976). 따라서 본 연구에서는  $T_A$ 와 수증기 흡수계수 결정에 따르는 문제를 고려하여, 식 (17)과 같이 훈련자료 내에 split-window 채널의 밝기온도, 위성 천정각, 그리고 총가강수량 자료를 사용하여 회귀계수를 결정한다. 식 (17)에서 총가강수량은 라디오존데의 연직 수증기 프로파일을 적분하여 구하고, 11.0  $\mu\text{m}$ 와 12.0  $\mu\text{m}$ 의 밝기온도는 라디오존데의 대기 프로파일을 입력자료로 복사전달모형을 수행하여 계산한 값을 사용한다.

$$TPW = \alpha + \beta \{ \cos\theta [\ln(TB_{11}) - \ln(TB_{12})] \} \quad (17)$$

회귀분석으로부터 얻어진  $\alpha$ 와  $\beta$ 에 위성 관측자료를 적용하여 총가강수량을 산출한다.

### 3. 자료 및 복사전달모형

#### 1) 자료

##### (1) Terra/Aqua MODIS 자료

MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer)는 98.8분의 궤도 주기를 가지는 극궤도 위성인 Terra와 Aqua에 탑재된 분광계이다. MODIS는 2330×10 km의 관측 폭을 가지며 0.405~14.385  $\mu\text{m}$  파장 범위의 36개 밴드로 구성된다. 관측 직하점을 기준으로 밴드에 따라 250 m (1~2밴드), 500 m (3~7밴드), 1 km (8~36밴드)의 공간 해상도를 가지고 있다(Seemann *et al.*, 2003). 이 중에서 총가강수량 산출에 사용된 6개 밴드(27, 28, 29, 31, 32, 33)의 특징은 Table 1과 같다. Fig. 1은 중위도 여름 표준 대기를 MODTRAN (Moderate Resolution Atmospheric Transmittance and Radiance Code) 복사모델에 입력하여 계산한 밝기온도의 스펙트럼과 6개 채널의 반응

Table 1. The technical specification of six MODIS spectral bands

Primary use	Band	Band width [ $\mu\text{m}$ ]	Spectral radiance [ $\text{W m}^{-2} \mu\text{m}^{-1} \text{sr}^{-1}$ ]	NE $\Delta$ T
Cirrus cloud / water vapor	27	6.535 - 6.895	1.16 (240 K)	0.25 K
	28	7.175 - 7.475	2.18 (250 K)	0.25 K
Cloud properties	29	8.400 - 8.700	9.58 (300 K)	0.05 K
Surface / cloud temperature	31	10.780 - 11.280	9.55 (300 K)	0.05 K
	32	11.770 - 12.270	8.94 (300 K)	0.05 K
Cloud top altitude	33	13.185 - 13.485	4.52 (260 K)	0.25 K

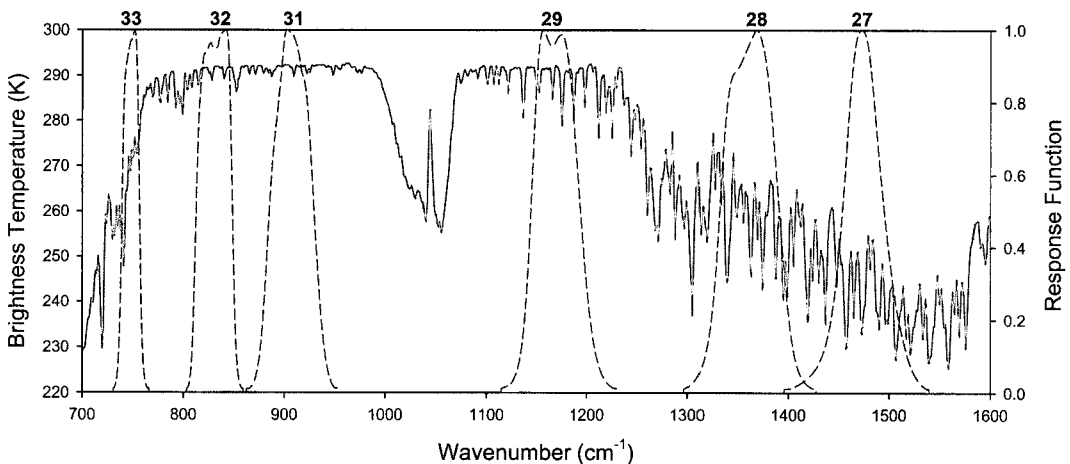


Fig. 1. Nadir-viewing brightness temperature spectrum of Midlatitude Summer Standard Atmosphere simulated by MODTRAN. Dashed lines represent response functions of six MODIS infrared channels.

함수를 나타낸다. MODIS 분광 밴드 중에서 27, 28, 29 밴드는 각각 6.7, 7.3, 8.6  $\mu\text{m}$ 의 중심파장을 갖는 채널로 수증기에 의한 흡수가 강해 주로 대류권 수증기 분포에 대한 정보를 제공한다. 그리고 대기창 영역에 위치한 31과 32 밴드는 11.0  $\mu\text{m}$ 과 12.0  $\mu\text{m}$ 의 중심파장을 가지며, 위성이 관측하는 복사량에 지표의 효과가 대부분을 차지한다. 이 중 12.0  $\mu\text{m}$  밴드에서 수증기에 의한 흡수가 상대적으로 강하게 나타난다. 또한 이산화탄소에 의한 흡수가 강한 13.3  $\mu\text{m}$  채널은 대류권 온도 정보를 가지며 구름 분석에 사용된다(Frey *et al.*, 1999; Li *et al.*, 2001).

Level-2 MODIS 산출물은 FOV (Field-Of-View)가 맑은 지역으로 식별된 경우 NASA GDAAC (Goddard Distributed Active Archive Center)의 기준값 시험을 거쳐 만들어진다. 구름 영역의 탐지에는 14개 채널을 이용하는 Ackerman *et al.* (1998) 알고리즘이 사용된다. MODIS 산출물 중 비교 검증에 위해 GDAAC에서 제공하는 총가강수량 자료(MOD07\_L2)를 이용한다.

## (2) RDAPS 자료

RDAPS (Regional Data Assimilation and Prediction System)는 3개의 등지격자체제를 가진 PSU/NCAR (Pennsylvania State University/National Center for Atmospheric Research)의 중규모 모델인 MM5 (The Fifth-Generation PSU/NCAR Research Mesoscale Model)를 기초로 만들어졌고, 동아시아 및 한반도를 대상으로 분석 예측 자료를 생산하는 시스템이다. 전지구예측모델(GDAPS, Global Data Assimilation and Prediction System) 자료를 경계조건으로 비정역학계(non-hydrostatic)를 이용한 방정식과 자동기상관측장비, 기상레이더 등의 자료를 이용하여 국지화된 영역의 예보를 생산한다. RDAPS는 공간 해상도에 따라 각각 5, 10, 30 km의 분석 예측 자료를 제공한다. 본 연구에서는 물리적 방법의 초기 추정치로 RDAPS 30 km 분석 예측 자료 중 온도와 수증기 프로파일, 지상기압, 그리고 지표면 온도 자료를 사용한다. RDAPS 자료는 시공간적으로 MODIS 관측자료에 대응하도록 재구성한 후, RTTOV-7에서 정의된 43개 기압층의 자료로 만든다. 임의의 연직 고도 또는 공간 격자의 자료가 불완전할 경우, 그 자료를 제외하고 연직 후

은 수평적으로 인접한 자료를 내삽하여 사용하였다. 또한 50 hPa이 RDAPS 모델의 상한이므로 이 고도로부터 0.1 hPa 사이의 층에 대해서는 중위도 여름철 표준 대기 자료를 사용하였다.

## (3) SSM/I 자료

SSM/I (Special Sensor Microwave/Imager)는 DMSP(Defense Meteorological Satellite Program)의 위성에 탑재되어 4개의 주파수(19.35, 22.235, 37.0, 85.5 GHz) 영역에서 7개의 채널로 상향복사량을 측정하는 수동형 마이크로파 복사계 시스템이다. RSS (Remote Sensing System) 알고리즘으로부터 10 m 해상도 풍속, 대기 수증기량, 구름수적량, 그리고 강수량 자료가 산출된다. 이 중 본 연구에서는 해양 지역에서 산출한 총가강수량을 비교 검증하기 위해 대기 수증기량 자료를 사용하였다.

## (4) 라디오존데 자료

라디오존데는 20개 고정된 기압면에서 지위고도, 온도, 노점편차, 풍향, 풍속 등을 관측하며, 관측소에 따라 일일 2회(00, 12 UTC) 또는 4회(00, 06, 12, 18 UTC) 자료를 제공한다. 본 연구에서는 split-window 방법에서 훈련자료를 구성하고 육상 지역에서 산출 알고리즘을 검증하기 위해 라디오존데의 관측자료를 사용하였다. 관측 오차가 있는 경우를 제거하기 위해 Wentz (1995)의 방법을 사용하였다.

## (5) TIGR 자료

TIGR(Thermodynamic Initial Guess Retrieval)은 약 80,000개의 라디오존데 관측자료를 통계적 방법으로 선별한 대기상태에 대한 대표적인 기후자료로 1013 hPa부터 0.05 hPa까지 40개 층의 온도, 수증기, 오존, 그리고 지표면온도와 지상기압 자료로 이루어져 있다. 본 연구에서는 복사전달모델의 계산 정확도를 알아보기 위한 모델의 입력자료로 TIGR-2 자료를 사용하고, 물리적 방법에서 초기 추정치가 산출결과에 미치는 영향을 분석하기 위해 TIGR-2000 자료를 사용한다.

## 2) 복사전달모델

RTTOV-7은 EUMETSAT에서 개발한 복사모델로 위성 천정각, 지표면 온도, 지상기압, 그리고 지표 방출

올과 함께 온도, 수증기, 오존, 그리고 이산화탄소 등의 대기 프로파일이 주어지면 대기상한에서의 복사량을 빠르게 계산한다. 전형적인 전방모델이면서 경도행렬모델인 RTTOV-7은 Jacobian 행렬 연산에 효율성을 지녀 계산상에 장점을 갖는다(Saunders *et al.*, 1999).

본 연구에서는 물리적 방법에서 대기 프로파일에 대응하는 밝기온도를 계산하고, split-window 방법에서 훈련자료의 밝기온도를 계산하기 위해 RTTOV-7을 사용한다. RTTOV-7의 계산 정확도를 확인하기 위해 MODTRAN 복사모델과 계산결과를 비교하였다(Fig. 2). TIGR-2 자료를 입력하여 계산한 밝기온도를 비교하면 6개 채널 모두에서 두 복사전달모델로부터 계산된 밝기온도가 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 RTTOV-7을 통한 전방계산이 정확하다는 것을 의미한다.

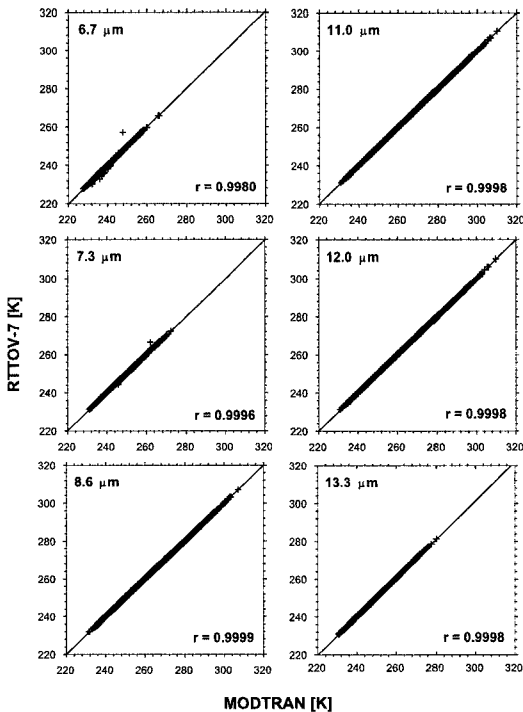


Fig. 2. Comparison of brightness temperatures from RTTOV-7 and MODTRAN simulations for MODIS infrared channels (6.7, 7.3, 8.6, 11.0, 12.0, and 13.3  $\mu\text{m}$ ) using TIGR-2 profiles as inputs.

## 4. 연구결과

### 1) RDAPS와 복원된 밝기온도

한반도를 포함한 동아시아 지역은 계절에 따른 수증기 분포의 차이가 크기 때문에 본 연구에서는 여름과 겨울의 계절적 특성을 대표할 수 있는 2004년 8월과 12월을 사례로 선정하였다. 맑은 영역에 국한하여 MODIS 자료가 제공되므로 다음과 같이 각 달에 대해 구름이 비교적 적은 7일을 선별하여 산출 연구를 수행하였다.

- (a) 2004년 8월 2, 5, 7, 10, 11, 12, 31일
- (b) 2004년 12월 2, 7, 8, 9, 10, 13, 16일

복사전달계산의 입력자료 중 온도와 수증기 프로파일은 RDAPS 모델 자료와 중위도 표준대기를 공간적으로 전처리하여 43개 층 자료로 구성하였다. 추가적인 입력자료인 오존 프로파일은 월별로 구성된 기후 평균 자료를 사용하였다.

Fig. 3는 2004년 8월 7일에 대해 초기 추정치로부터 계산된 밝기온도를 관측된 밝기온도와 비교한 것으로 상당한 오차가 존재하는 것을 알 수 있다. 초기 추정치

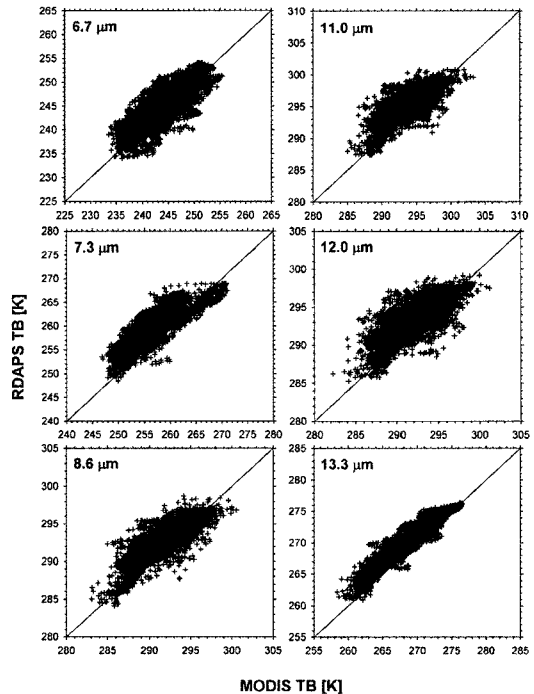


Fig. 3. Scatter plots of calculated brightness temperatures (TBs) from RADAPS versus observed TBs for six MODIS channels on 7 August 2004.

로 계산된 밝기온도는 관측된 밝기온도에 대해 6개 채널에서 0.93 K(6.7  $\mu\text{m}$ )~2.95 K(7.3  $\mu\text{m}$ )의 bias와 0.51 K(8.6  $\mu\text{m}$ )~1.46 K(7.3  $\mu\text{m}$ )의 RMSE를 갖는 것으로 나타났다. 따라서 초기 추정치로 사용된 RDAPS의 수증기 프로파일과 지표면 온도 자료는 관측된 MODIS 밝기온도에 대응하는 대기 상태를 정확히 나타내지 못하는 것으로 판단된다. 그러나 2장에서 기술한 프로파일 변경 과정을 통해 재구성한 프로파일로부터 계산된 밝기온도의 경우에는 0.01~0.5 K의 bias와 0.07~0.2 K의 RMSE를 나타내었다. 이러한 결과는 물리적 방법을 통해 초기 추정 프로파일을 관측된 밝기온도에 상응하는 프로파일로 변경할 수 있음을 보여 준다.

## 2) Split-window 회귀계수 산출

Split-window 방법으로 총가강수량을 산출하기 위해서는 대기창 영역에 위치한 두 채널의 밝기온도와 총가강수량의 훈련자료가 필요하고 이로부터 회귀식을 구성해야 한다. 본 연구에서는 훈련자료를 구성하기 위해 동아시아 지역 22개 라디오존데 관측 사이트에서 관측한 2001년과 2002년 자료를 사용하였다. 정확한 자료를 적용하기 위해 다음과 같은 품질 관리 과정을 수행하였다(Wentz, 1995). 온도와 이슬점 온도가 결측인 총과 지위고도가 음의 값을 나타내는 층을 제거하였고, 상대 습도가 93% 이상인 층을 구름 층이라 가정하여 제외하였다. 이 과정을 통과한 라디오존데 4027개의 기압, 온도, 수증기 연직 프로파일을 이용하였다. 훈련자료에는 MODIS split-window 채널들에 대해 모의된 밝기온도가 필요하므로 복사전달 계산을 위해 RTTOV-7을 사용하였다. 위성 천정각이 큰 경우 자료의 정확도가 낮기 때문에 이러한 경우를 제외하고 14개 위성 천정각(0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 65°)에 대해 밝기온도를 계산한다. 한편 동아시아 지역에서 수증기 분포와 이에 따른 밝기온도는 계절에 따라 다르게 나타난다. 따라서 산출 연구사례인 8월과 12월의 계절 차이를 고려하여 회귀식을 구성해야 한다. 본 연구에서는 14개 위성 천정각에 따른 총가강수량과 밝기온도의 훈련자료로부터 8월과 12월에 적용할 다음의 회귀식을 얻었다. 이를 통해 관측된 MODIS 밝기온도로부터 직접 총가강수량을 산출한다.

$$TPW_i = a_i + b_i \cos\theta_i [\ln(TB_{11i}) - \ln(TB_{12i})] \quad i = 1, 2 \quad (18)$$

$$a_1 = 21.1768, a_2 = 5.4580, b_1 = 5463.192, b_2 = 8402.740$$

위 식에서 TPW는 split-window 방법으로부터 얻게 되는 총가강수량,  $\theta$ 는 위성천정각,  $TB_{11}$ 과  $TB_{12}$ 는 11.0  $\mu\text{m}$ 와 12.0  $\mu\text{m}$ 의 밝기온도, 그리고 첨자  $i$ 는 사례 (8월, 12월)에 따른 값을 의미한다.

## 3) 복원된 총가강수량 검증

동아시아 지역에서 물리적 방법과 split-window 방법으로 2004년 8월과 12월의 사례에 대한 총가강수량을 산출하였다. 초기 추정치 RDAPS의 총가강수량, MODIS 산출물의 총가강수량, 그리고 본 연구의 알고리즘으로 산출한 총가강수량을 타 위성과 라디오존데 관측 자료와 비교하였다. 해양 지역에서는 마이크로파를 이용하는 DMSP 위성의 SSM/I 산출자료로 검증하였고, 육상 지역에서는 라디오존데 관측자료로 검증하였다.

### (1) SSM/I 자료와 비교

본 연구에서 산출한 총가강수량을 비교 검증하기 위해 SSM/I 자료 중에서 F13, F14, F15 위성 관측 자료를 이용하였다. SSM/I 자료는 공간적으로 0.25° × 0.25° 도 격자 간격으로 구성되어 있으므로, RADPS 총가강수량, MODIS 산출 총가강수량, 물리적 방법과 split-window 방법으로 각각 산출한 총가강수량 자료를 SSM/I에 대응하도록 격자화하였다. SSM/I 자료는 극궤도 위성인 DMSP에 탑재된 센서로부터의 값이므로 타 자료들과 시간적으로 일치하는 자료를 선택하는데 있어 제약이 따른다. 따라서 타 자료의 산출 시간을 기준으로 ±6시간 이내의 SSM/I 자료 중 가장 근접한 시간의 대기 수증기량을 비교에 사용하였다.

Fig. 4는 2004년 8월 11일 사례의 산출결과로 해당 사례의 지상기압, RDAPS 총수증기량, MODIS 산출 총가강수량, 물리적 방법과 split-window 방법으로 산출한 총가강수량, SSM/I 산출자료의 대기수증기량 자료의 공간적인 분포를 나타낸다. SSM/I 자료와 비교하여 RDAPS 총가강수량은 음의 bias를 나타낸다. 반면 MODIS의 경우 전반적으로 SSM/I보다 큰 값을 보이고 있다. 따라서 초기 추정치로 사용한 RDAPS 자료와 MODIS 산출 총가강수량은 SSM/I 산출 자료 대비 상당한 오차를 가지는 것으로 보인다. 2004년 8월의 다른



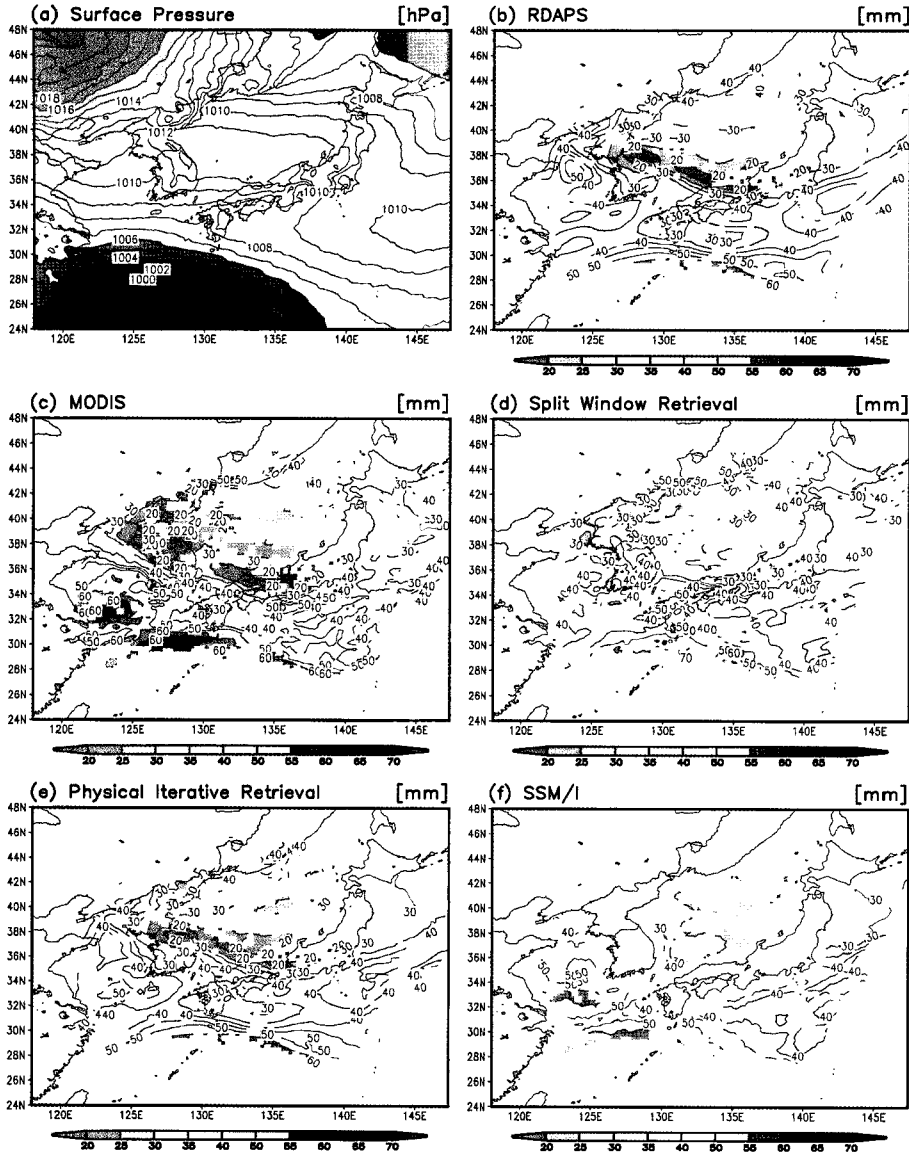


Fig. 4. The distribution of (a) surface pressure, (b) TPW from column-integrated water vapor of RDAPS, (c) operationally produced MODIS TPW from GDAAC, (d) TPW from split-window retrieval, (e) TPW from physical iterative retrieval, (f) SSM/I atmospheric water vapor from RSS products on 11 August 2004. Plots in (b) and (f) are made only if other data are available.

사례를 모두 포함하면 SSM/I 산출 자료와 비교해서 평균적으로 RDAPS는  $-1.92 \text{ kg m}^{-2}$ , MODIS는  $+3.77 \text{ kg m}^{-2}$ 의 오차를 갖는다. 반면 물리적 방법으로 산출한 총가강수량은 공간적인 분포에서 RDAPS와 MODIS에 비해 SSM/I에 가까운 값을 나타낸다(Fig. 4e). 8월 사례에서 물리적 방법으로 산출한 총가강수량은 평균적으로 SSM/I에 대해  $-1.64 \text{ kg m}^{-2}$ 의 오차를 갖는다. MODIS 위성 천정각이  $0^\circ \sim 65^\circ$ 인 경우에 대해 두

split-window 채널의 밝기온도로부터 총가강수량을 산출했다(split-window 방법, Fig. 4d). 대기창 영역에서는  $11 \mu\text{m}$  채널보다  $12 \mu\text{m}$  채널에서 수증기에 의한 흡수가 크게 일어나기 때문에  $11 \mu\text{m}$  채널의 밝기온도가  $12 \mu\text{m}$  채널의 밝기온도보다 큰 경우만을 선택하였다. 그 결과 MODIS 산출물(Fig. 4c)에 비해 SSM/I 자료에 가까운 총수증기량 분포가 얻어졌다. 8월의 전체 사례에서 평균적으로 SSM/I에 비해  $2.56 \text{ kg m}^{-2}$  낮게 산

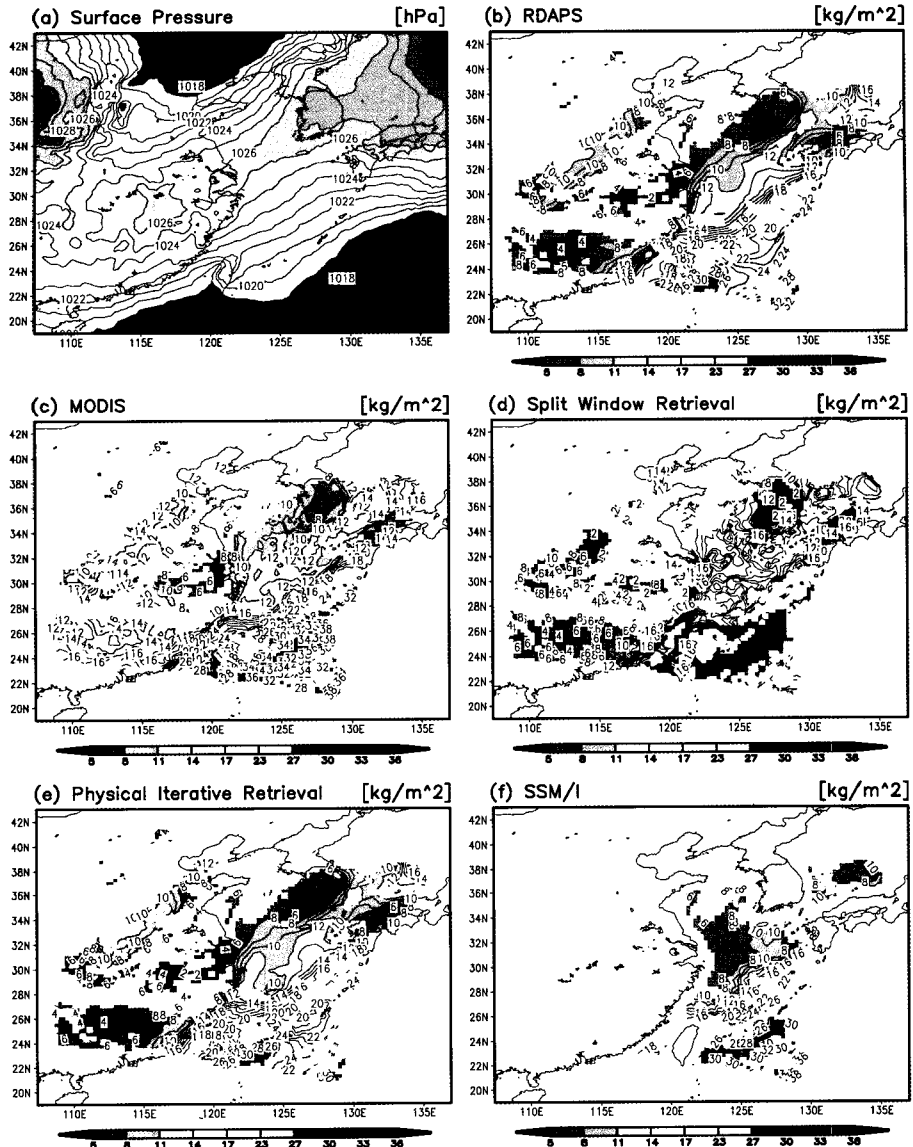


Fig. 5. Same as in Fig. 4 except for December 9, 2004.

출하는 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서 산출에 적용한 알고리즘 중 split-window 방법은 물리적 방법에 비해 SSM/I 자료에 대한 오차가 큰 것으로 파악된다.

Fig. 5는 2004년 12월 9일에 산출한 총가강수량 분포를 나타낸다. MODIS 산출 총가강수량은 대만 동쪽에 해당하는 지역에서  $32\sim 38\text{ kg m}^{-2}$ , 한반도 남서해상에서는  $10\sim 12\text{ kg m}^{-2}$ 로 나타난다. MODIS 산출물은 이들 지역에서 SSM/I 산출 자료가  $26\sim 30\text{ kg m}^{-2}$ ,  $6\sim 10\text{ kg m}^{-2}$ 의 총가강수량을 나타내는 것에 비해 높은 값을 보이고 있다. 전체적으로 SSM/I 산출자료에 대

해 12월 사례에서 RDAPS 자료는  $+1.40\text{ kg m}^{-2}$ , MODIS 산출물은  $+4.28\text{ kg m}^{-2}$ 의 오차를 보인다. 이에 반해 물리적 방법으로 산출한 총가강수량은 SSM/I와 잘 일치하며, 12월 전체 사례에서 SSM/I 자료와 비교하여 평균적으로  $+0.43\text{ kg m}^{-2}$ 의 오차를 갖는다. 그러나 split-window 방법의 산출결과는  $+9.45\text{ kg m}^{-2}$ 의 상당히 큰 오차를 나타내었다.

2004년 8월과 12월 전체 사례의 산출결과를 SSM/I 자료와 비교하여 Fig. 6에 산포도로 제시하였다. SSM/I 자료에 대해 RDAPS는 8월(12월)에  $-1.92\text{ kg}$

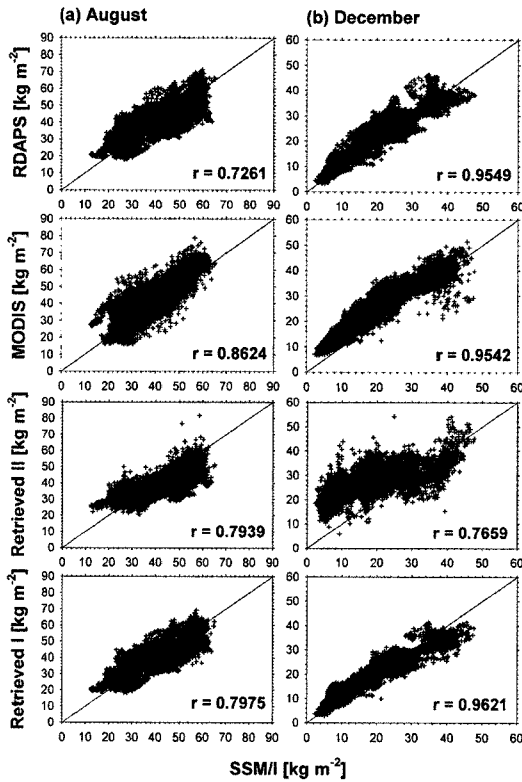


Fig. 6. Scatter plots of TPWs from RDAPS, MODIS, split-window retrieval, and physical iterative retrieval as a function of collocated SSM/I TPWs for (a) August and (b) December 2004. In figures, the notation "I" and "II" represent physical iterative retrieval and split-window retrieval, respectively. And "r" denotes the correlation coefficient.

$m^{-2}(+1.40 \text{ kg m}^{-2})$ , MODIS는  $+3.77 \text{ kg m}^{-2}(+4.28 \text{ kg m}^{-2})$ , split-window 방법은  $-2.56 \text{ kg m}^{-2}(+9.45 \text{ kg m}^{-2})$ , 그리고 물리적 방법은  $-1.64 \text{ kg m}^{-2}(+0.43$

$\text{kg m}^{-2})$ 의 오차를 가진다. Table 2에 정리한 것과 같이 본 연구에서 적용한 사례에서는 물리적 방법으로 산출한 총가강수량이 SSM/I 자료와 비교하여 타 자료에 비해 정확도가 높게 나타난다. Split-window 방법의 산출결과는 8월 사례에서는 MODIS 산출물 보다 SSM/I에 근사한 값을 나타내지만, 12월 사례에서는 상당한 오차를 갖는 것으로 나타났다.

## (2) 라디오존데와 비교

2004년 8월과 12월 사례에서 산출한 총가강수량 중 육상 지역에서의 결과를 라디오존데 관측자료를 이용하여 비교 검증하였다. 공간적으로 라디오존데 자료는 한 관측소의 값을 나타낸다. 그러나 비교하고자 하는 타 자료들은 격자 공간의 값을 의미한다. 이에 타 자료들은 라디오존데 관측소를 기준으로 반경 50 km 내에서 평균하여 비교에 사용하였다. 또한 타 자료와 시간적으로 일치하는 라디오존데 자료를 구성하는데 한계가 있어 본 연구에서는 비교할 타 자료의 시간과 가장 근접한 시간에 관측된 라디오존데 자료를 검증에 이용하였다.

2004년 8월 사례에서 물리적 방법과 split-window 방법으로 산출한 총가강수량을 포함한 네 가지 자료와 라디오존데 관측 자료의 산포도를 상관계수와 함께 Fig. 7(a)에 제시하였다. Fig. 7(b)에는 라디오존데 관측소를 기준으로 일정 반경 내에서 평균한 타 자료의 표준편차를 나타내었다. 2004년 8월 사례에서 라디오존데 관측자료와 비교하여 RDAPS는  $-1.96 \text{ kg m}^{-2}$ , MODIS는  $+3.12 \text{ kg m}^{-2}$ , split-window 방법은  $+3.64 \text{ kg m}^{-2}$ , 그리고 물리적 방법은  $-1.31 \text{ kg m}^{-2}$ 의

Table 2. Statistics of TPW comparison with SSM/I measurements for (a) August and (b) December 2004

(a) August			
TPW	Correlation coefficient	RMSE [ $\text{kg m}^{-2}$ ]	Bias [ $\text{kg m}^{-2}$ ]
RDAPS	0.73	0.13	-1.92
MODIS	0.86	0.01	+3.77
Split-window retrieval	0.79	0.11	-2.56
Physical iterative retrieval	0.80	0.02	-1.64
(b) December			
TPW	Correlation coefficient	RMSE [ $\text{kg m}^{-2}$ ]	Bias [ $\text{kg m}^{-2}$ ]
RDAPS	0.95	0.03	+1.40
MODIS	0.95	0.10	+4.28
Split-window retrieval	0.77	0.11	+9.45
Physical iterative retrieval	0.96	0.01	+0.43

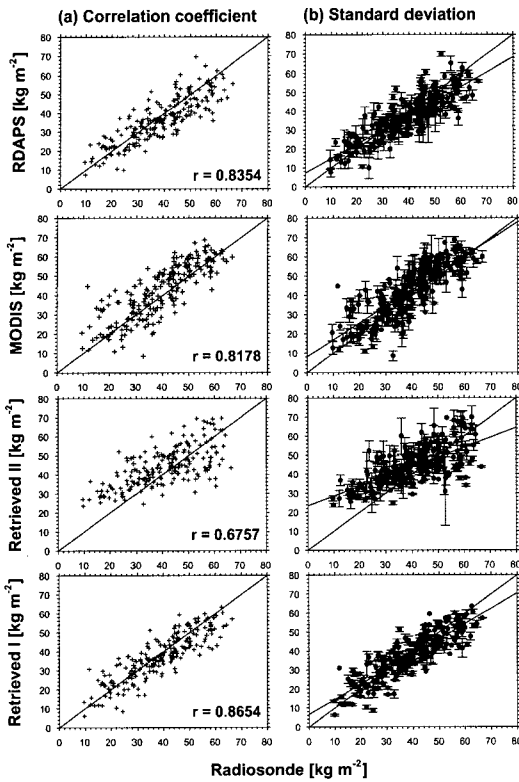


Fig. 7. Scatter plots of TPWs from RDAPS, MODIS, split-window retrieval, and physical iterative retrieval as a function of collocated radiosonde observation over land in August 2004. The notations are same as in Fig. 6. The error bars in the right panels denote the standard deviations of averaged values within 50 km radius of radiosonde stations.

오차를 나타내었다. 2004년 12월 사례에서는 라디오존데 관측자료에 대해 RDAPS는  $+0.12 \text{ kg m}^{-2}$ , MODIS는  $+2.58 \text{ kg m}^{-2}$ , split-window 방법은  $+2.49 \text{ kg}$

$\text{m}^{-2}$ , 그리고 물리적 방법은  $-0.38 \text{ kg m}^{-2}$ 의 오차를 보였다(not shown).

라디오존데 관측자료로 검증한 종합적인 결과를 Table 3에 제시하였다. 물리적 방법으로 산출한 총가강수량은 2004년 8월과 12월 사례에서 타 자료에 비해 라디오존데 관측자료와 잘 일치하는 결과를 보여준다. Split-window 방법으로 산출한 결과는 라디오존데 관측자료에 대해 큰 오차를 나타내고 있다. 특히 12월 사례에서 split-window 방법으로부터 산출된 결과는 총가강수량 분포 특징을 잘 나타내지 못하는 것으로 파악된다. 따라서 물리적 방법을 통해 MODIS 산출 총가강수량보다 높은 정확도를 가지는 총가강수량을 산출할 수 있음을 보여준다.

(3) 초기 추정 프로파일과 회귀 계수의 영향

본 연구에서는 물리적 방법과 split-window 방법으로 동아시아 지역에 대해 총가강수량을 산출하였다. Table 2와 3을 살펴보면 물리적 방법을 통한 총가강수량 산출은 육지와 해양을 포함하여 사례 기간에 대해 MODIS 산출물과 RDAPS 자료의 총가강수량에 비해 정확한 것으로 나타난다.

MODIS 총가강수량은 계산시간을 줄이기 위해 통계적 방법을 사용하는 알고리즘을 적용하여 산출된다. 약 8,400개 이상의 라디오존데 관측의 온도, 수증기, 그리고 오존 자료로 구성되어 있는 NOAA-88b 훈련자료를 사용하여 회귀식을 산출하며, 대기 프로파일에 대응하는 복사량을 구하기 위한 복사전달모델은 PFAAST (Pressure-Layer Fast Algorithm for Atmospheric

Table 3. Statistics of TPW comparison with radiosonde measurements for (a) August and (b) December 2004

(a) August			
TPW	Correlation coefficient	RMSE [ $\text{kg m}^{-2}$ ]	Bias [ $\text{kg m}^{-2}$ ]
RDAPS	0.84	0.97	-1.96
MODIS	0.82	0.86	+3.12
Split-window retrieval	0.68	1.44	+3.64
Physical iterative retrieval	0.87	0.53	-1.31
(b) December			
TPW	Correlation coefficient	RMSE [ $\text{kg m}^{-2}$ ]	Bias [ $\text{kg m}^{-2}$ ]
RDAPS	0.89	0.21	+0.12
MODIS	0.85	0.02	+2.58
Split-window retrieval	0.60	0.55	+2.49
Physical iterative retrieval	0.90	0.27	-0.38

Transmittances)를 사용한다(Menzel *et al.*, 2002). 방대한 훈련자료를 만들기 위해 전방계산 과정이 필요하기 때문에 복사전달모델의 정확성이 회귀계수에 영향을 미치게 된다. 이러한 관점에서 MODIS 산출물은 다음의 이유로 오차를 가질 수 있다. 1) 훈련자료를 얻기 위한 복사전달계산 과정에서 정확한 line-by-line 모델이 아닌 회귀과정에 의해 대기 투과율이 계산되었다. 2) 지역 특성을 대표하기에 부족한 훈련자료가 적용되었다. 3) 훈련자료에 지표 고도, 지표 방출율, 지표면 온도 등의 부정확한 지표 물리량이 포함되었다. 그리고 4) MODIS 센서는 관측 오차 또는 보정 오차에 의한 문제가 있고, 관측 시 구름에 의한 오염 효과가 영향을 미칠 수 있다(Seemann *et al.*, 2003). MODIS 산출 총가강수량의 오차는 위에 언급한 문제에 기인하는 것으로 파악된다. 또한 MODIS 알고리즘에서 자료 산출을 위해 사용하는 전구에 대한 회귀계수는 동아시아 지역의 수증기 분포를 정확히 나타내는데 한계가 있는 것으로 분석된다.

물리적 방법으로 산출한 총가강수량은 SSM/I와 비교하면 8월에  $-1.64 \text{ kg m}^{-2}$ , 12월에  $+0.43 \text{ kg m}^{-2}$ 의 오차를 보이며, 라디오존데와 비교하면 8월에  $-1.31 \text{ kg m}^{-2}$ , 12월에  $-0.38 \text{ kg m}^{-2}$ 의 오차를 보인다. 이와같이 물리적 방법을 통해 초기 추정치가 갖는 오차를 줄여 총가강수량 산출의 정확도를 향상시킬 수 있으나, 이 방법은 산출결과가 초기 추정치에 좌우되는 단점을 갖는 것으로 파악된다. 이에 그 영향을 알아보기 위해 현업 모델 자료가 아닌 기후평균값을 초기 추정치로 사용하여 총가강수량을 산출하였다. 기후평균값은 3장에 소개된 TIGR-2000 자료를 초기 추정치로 적용하였다. RDAPS 모델 자료와 달리 TIGR-2000은 기후 값으로 자료의 수가 적어 모든 위성자료에 대응하는 초기 추정치를 각기 다르게 적용할 수 없다. 이로 인해 위성 관측 격자를 중심으로 일정 범위 내에서는 동일한 TIGR-2000 자료를 초기 추정치로 사용했다. RDAPS 자료를 초기치로 사용한 산출과 비교하기 위해 위에 제시한 기후 값을 초기치로 선정하여 동일한 산출을 수행하였다. Fig. 8은 물리적 방법을 이용한 2004년 8월 2일의 산출 결과 중 라디오존데 자료에 대해 가장 오차가 큰 지점의 초기치에 따른 대기 프로파일을 나타낸다. 이 지점(Kagoshima)은 위도  $31.55^\circ \text{N}$ , 경도  $130.55^\circ \text{E}$ 에 위치

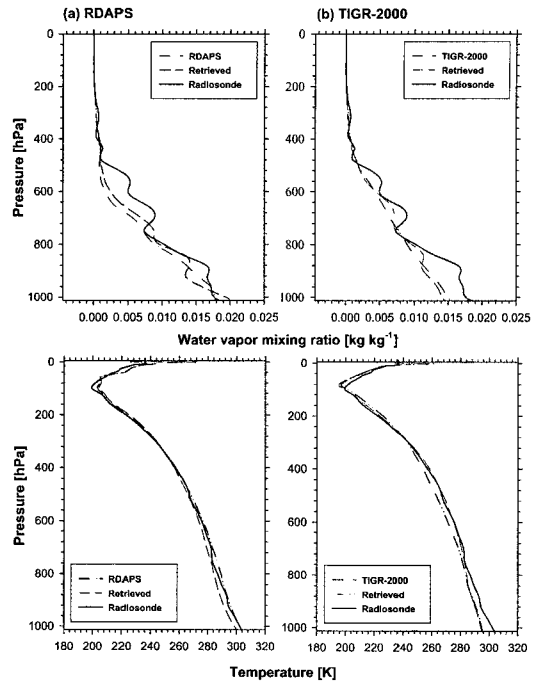


Fig. 8. The vertical distributions of water vapor mixing ratio and temperature at Kagoshima station located at  $31.55^\circ \text{N}$ ,  $130.55^\circ \text{E}$  on August 2, 2004. Two kinds of first-guess profile are used to retrieve profiles of water vapor mixing ratio and temperature: (a) RDAPS, (b) TIGR-2000. Dotted-line, dashed-line, and solid-line represent first-guess profile, retrieved profile, and radiosonde observation, respectively.

한 라디오존데 관측소로 00 UTC에 관측된 총가강수량은  $54.66 \text{ kg m}^{-2}$ 이었다. 그러나 RDAPS를 초기치로 사용한 산출에서, RDAPS 자료와 변경된 프로파일로부터의 총가강수량은  $42.82 \text{ kg m}^{-2}$ 와  $44.13 \text{ kg m}^{-2}$ 로 라디오존데에 대해  $-11.84 \text{ kg m}^{-2}$ 과  $-10.53 \text{ kg m}^{-2}$ 의 오차를 나타내었다. 프로파일 변경 후 수증기 프로파일을 살펴보면, RDAPS를 초기치로 사용한 경우 지표 부근 수증기 자료를 정확히 변경시키지 못하며, 이러한 특징은 초기 추정치를 TIGR-2000으로 사용한 결과에서도 나타난다. 실제 수증기의 대부분은 대류권 하층에 분포하므로 정확한 총가강수량 산출을 위해서는 지표 부근 수증기 정보가 중요하게 작용한다. 이 관점에서 본 연구에서 물리적 방법으로 산출한 총가강수량은 초기 추정치의 영향으로 결과가 좌우되며, 기후 평균값을 초기치로 사용할 경우 주의가 요구된다. 초기 추정치의 영향은 MODIS 수증기 흡수 채널의 특성에서 원인을 찾을 수 있다. 본 연구에 적용한 MODIS 수증기 흡수 채널

은 가중함수의 연직구조에서 대류권 하층 정보를 담고 있으나 지표 부근의 수증기 정보를 충분히 나타내지 못하기 때문이다.

Split-window 방법은 8월에는 SSM/I의 총가강수량 분포를 잘 나타내지만 12월에는 상당한 오차를 나타내었다. 이에 산출에 사용한 회귀식은 사례의 총가강수량 분포를 정확하게 반영치 못한다고 할 수 있고, 따라서 회귀 과정에 대한 분석이 요구된다. 훈련자료에서 고려된 14개 위성 천정각은 실제 MODIS 자료를 대부분 반영하고 있다. 따라서 회귀식의 문제는 split-window 채널의 밝기온도 차이  $\ln(TB_{11}/TB_{12})$ 에 의한 것으로 파악된다. Split-window 두 채널에서 훈련자료에 사용된 밝기온도와 실제 관측된 밝기온도의 산포도를 비교하였다(not shown). 8월의 경우 회귀식 산출에 이용된 훈련자료가 관측된 MODIS 밝기온도의 특징을 잘 나타내고 있다. 반면 12월의 경우에는 훈련자료가 관측된 MODIS split-window에 대한 정보를 대표하지 못하고 있다. 따라서 split-window 방법은 회귀식을 사용해 위성 관측자료로부터 직접 총가강수량을 산출할 수 있으나, 훈련자료로 얻어진 회귀식이 총가강수량 특징을 정확히 표현하지 못하는 단점을 지닌다. 그러므로 지역 특성을 포함한 훈련자료를 구성함으로써 정확도를 향상시킬 수 있을 것으로 생각된다.

## 5. 요약 및 결론

동아시아 지역에 대해 물리적 방법과 split-window 방법으로 총가강수량을 산출하는 알고리즘을 개발하였다. 이 두 알고리즘의 산출결과는 해양 지역에서는 SSM/I 자료를, 육상 지역에서는 라디오존데 자료를 이용하여 비교 검증하였다. 이를 바탕으로 총가강수량의 정확성에 영향을 미치는 요인과 산출과정에 중요한 물리과정을 분석하였다.

물리적 방법에서는 한반도를 포함한 동아시아에 대한 분석 예측 자료를 생산하는 RDAPS 자료를 초기 추정치로 사용하였다. 프로파일 변경의 기준이 되는 관측된 밝기온도는 대류권 정보를 나타내는 6개 MODIS 적외 자료를 사용하였다. 복사전달계산 과정에서는 Jacobian 행렬 계산에 장점을 가지며, 빠르고 정확한

복사량 계산이 가능한 RTTOV-7 모델을 사용하였다. 반복적 프로파일 변경 과정에서는 단위 수증기 변화가 가져오는 밝기온도 변화를 고려하여, 밝기온도가 수렴하도록 온도 변화 대비 수증기 변화를 조절하였다. Split-window 방법에서는 2001년과 2002년의 동아시아 지역의 라디오존데 관측 자료로 훈련자료를 구성하고, 위성자료로 직접 총가강수량을 산출할 수 있는 회귀식을 도출하였다. 훈련자료 중 split-window 채널의 밝기온도는 라디오존데 관측자료를 입력하여 RTTOV-7 모델로 계산하였고 14개 위성 천정각을 고려하였다.

2004년 8월과 12월 중 비교적 맑은 영역이 많은 14일을 사례로 선정하였다. 선정된 사례에서 물리적 방법과 split-window 방법으로 산출한 총가강수량을 비교 검증하기 위해 타 위성자료와 라디오존데 관측자료를 이용하였다. 검증 결과 14일 전체 사례에서 초기 추정치와 MODIS 산출 총가강수량은 SSM/I 자료와 라디오존데 관측자료에 대해 상당한 오차를 나타내었다. 그러므로 MODIS 산출 총가강수량은 동아시아 지역의 수증기 분포 특징을 정확히 나타내지 못하는 것으로 분석된다. 본 연구에 적용한 알고리즘 중 물리적 방법으로 산출한 총가강수량은 초기 추정치의 오차를 줄여 결과의 정확도가 높게 나타났다. 그러나 Split-window 방법을 통한 산출결과는 타 자료에 비해 오차가 큰 것으로 보인다.

비교 검증 결과 물리적 방법으로 산출한 총가강수량은 타 자료에 비해 정확도가 높게 나타나지만 산출결과가 초기 추정치에 좌우되는 단점을 가진다. 이러한 특징은 RDAPS가 아닌 TIGR-2000을 초기 추정치로 적용한 산출결과에서도 나타난다. 따라서 기후평균값을 초기치로 사용할 경우 주의가 요구되며, 초기 추정치 영향의 원인으로 지표 부근 수증기 정보 부족을 들 수 있다. 본 연구에 사용한 수증기 흡수 채널은 대류권 하층의 정보를 가지고 있지만 지표 부근 정보를 충분히 대표하기 어려운 것으로 파악된다. 그러나 이러한 단점에도 불구하고, 지형과 지표의 변화로 하층 대류권에서 방출되는 복사량 차이가 크게 나타나는 한반도를 포함한 동아시아 지역에서는 물리적 방법을 통한 총가강수량 산출이 효율적인 것으로 판단된다. 한편 훈련자료로 얻어진 회귀식을 사용하여 총가강수량을 산출한 split-window 방법에서는 훈련자료의 부족에 기인하여 오차가 크게 나타났다. 이러한 양상은 특히 12월 사례에서 잘 나타나

며, 회귀식이 관측된 밝기온도의 특징을 대표하지 못하는 것으로 분석되었다. 따라서 MODIS split-window 채널의 밝기온도를 대표할 수 있는 훈련자료로부터 회귀식을 도출하면 산출결과의 정확도를 향상시킬 것으로 사료된다.

## 사 사

이 연구는 기상청 기상지진기술개발사업(CATER 2006-2103)의 지원으로 수행되었습니다. 건설적인 의견을 주신 익명의 두 분 심사자께 감사드립니다.

## 참고문헌

- Ackerman, S. A., K. I. Strabala, W. P. Menzel, R. A. Frey, C. C. Moeller, and L. E. Gumley, 1998. Discriminating clear sky from clouds with MODIS, *Journal of Geophysical Research*, 103: 32,141-32,157.
- Anding, D. and R. Kauth, 1970. Estimation of sea surface temperature from space, *Remote Sensing of Environment*, 1: 217-220.
- Boukabara, S. A., J. L. Moncet, R. Lynch, and C. Prigent, 2000. Microwave remote sensing over land: Application to SSM/I, *Proceedings of 10th Conference on Satellite Meteorology and Oceanography*, Long Beach, CA, 9-14 January 2000, pp. 283-286.
- Chesters, D., L. W. Uccellini, and W. D. Robinson, 1983. Low-level water vapor fields from the VISSR Atmospheric Sounder (VAS) "split window" channels, *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 22: 725-743.
- Eyre, J. R., 1989. Inversion of cloudy satellite sounding radiances by nonlinear optimal estimation. I: Theory and simulation for TOVS, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 115: 1001-1026.
- Frey, R. A., B. A. Baum, W. P. Menzel, S. A. Ackerman, C. C. Moeller, and J. D. Spinhirne, 1999. A comparison of cloud top heights computed from airborne lidar and MAS radiance data using CO<sub>2</sub> slicing, *Journal of Geophysical Research*, 104: 24,547-24,555.
- Koenig, M., 2002. Atmospheric instability parameters derived from MSG SEVIRI observations, *EUMETSAT Technical Memorandum No. 9*, 28pp.
- Labraga, J. C., O. Frumento, and M. Lopez, 2000. The atmospheric water vapor cycle in South America and the tropospheric circulation, *Journal of Climate*, 13: 1899-1915.
- Li, J., C. C. Schmidt, J. P. Nelson III, T. J. Schmit, and W. P. Menzel, 2001. Estimation of total atmospheric ozone from GOES sounder radiances with high temporal resolution, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 18: 157-168.
- Ma, X. L., T. J. Schmit, and W. L. Smith, 1999. A nonlinear physical retrieval algorithm - its application to the GOES-8/9 sounder, *Journal of Applied Meteorology*, 38: 501-513.
- McMillin, L. M. and D. S. Crosby, 1984. Theory and validation of the multiple window sea surface temperature technique, *Journal of Geophysical Research*, 89: 3655-3661.
- Menzel, W. P., S. W. Seemann, J. Li, and L. E. Gumley, 2002. MODIS atmospheric profile retrieval algorithm theoretical basis document, EOS Project Science Office, NASA, Goddard Space Flight Center, 39pp.
- Roberts, R. E., J. E. A. Selby, and L. M. Biberman, 1976. Infrared continuum absorption by atmospheric water vapor in the 8-12 micron window, *Applied Optics*, 15: 2085-2090.
- Saunders, P. M., 1967. Aerial measurements of sea surface temperature in the infrared, *Journal of Geophysical Research*, 72: 4109-4117.

- Saunders, R., M. Matricardi, and P. Brunel, 1999. An improved fast radiative transfer model for assimilation of satellite radiance observations, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 125: 1407-1425.
- Seemann, S. W., J. Li, W. P. Menzel, and L. E. Gumley, 2003. Operational retrieval of atmospheric temperature, moisture, and ozone from MODIS infrared radiances, *Journal of Applied Meteorology*, 42: 1072-1091.
- Smith, W. L., H. M. Woolf, and H. E. Revercomb, 1991. Linear simultaneous solution for temperature and observing constituent profiles from radiance spectra, *Applied Optics*, 30: 1117-1123.
- Wentz, F. J., 1995. A well calibrated ocean algorithm for SSM/I, *Remote Sensing Systems Technical Report 101395*, Remote Sensing Systems, Santa Rosa, Ca, 34pp.
- Yang, X., B. H. Sass, G. Elgered, J. M. Johansson, and T. R. Emardson, 1999. A comparison of precipitable water vapor estimates by an NWP simulation and GPS observations, *Journal of Applied Meteorology*, 38: 941-956.