

MODIS 적외 자료를 이용한 한반도 지역의 대기 안정도 지수 산출

박성희* · 손병주*[†] · 정의석* · M. Koenig**

*서울대학교 지구환경과학부, **EUMETSAT, Germany

Estimating Stability Indices from the MODIS Infrared Measurements over the Korean Peninsula

Sung-Hee Park*, B. J. Sohn*[†], Eui-Seok Chung*, and Marianne Koenig**

*School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University, Seoul, Korea

**EUMETSAT, Darmstadt, Germany

Abstract : An algorithm was developed to estimate stability indices (SI) over the Korean peninsula using Terra Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) infrared brightness temperatures (TBs). The SI is defined as the stability of the atmosphere in the hydrostatic equilibrium with respect to the vertical displacements and is used as an index for the potential severe storm development. Using atmosphere temperature and moisture profiles from Regional Data Assimilation and Prediction System (RDAPS) as initial guess data for a nonlinear physical relaxation method, K index (KI), KO index (KO), lifted index (LI), and maximum buoyancy (MB) were estimated. A fast radiative transfer model, RTTOV-7, is utilized for reducing the computational burden related to the physical relaxation method.

The estimated TBs from the radiative transfer simulation are in good agreement with observed MODIS TBs. To test usefulness for the short-term forecast of severe storms, the algorithm is applied to the rapidly developed convective storms. Compared with the SIs from the RDAPS forecasts and NASA products, the MODIS SI obtained in this research predicts the instability better over the pre-convection areas. Thus, it is expected that the nowcasting and short-term forecast can be improved by utilizing the algorithms developed in this study.

Key Words : stability index, convective storm forecast, MODIS data.

요약 : Terra 위성에 탑재된 MODIS 적외채널의 밝기온도 자료를 이용하여 한반도 지역에 대해 안정도 지수를 산출하는 알고리즘을 개발하였다. 안정도 지수는 정역학 평형 상태에서 연직 변위에 대한 대기의 안정도로 정의되며, 대류성 폭풍우의 가능성을 나타내는 지수로 사용된다. RDAPS의 온도와 습도 연직분포 자료를 비선형 물리적 방법에 필요한 초기 추정 자료로 사용하여 KI, KO, LI, MB 지수를 산출하였고, RTTOV-7을 이용하여 물리적 복원 방법에 요구되는 긴 계산 시간을 단축하였다.

복사전달 모의를 통해 추정된 밝기온도는 관측값과 잘 일치하는 것으로 나타났다. 단기 예보에 대한 유용성을 살펴보기 위해 안정도 지수 산출 알고리즘을 급격히 발달하는 대류성 폭풍우 사례에 적용하였다.

RDAPS로부터 계산된 안정도 지수와 NASA에서 산출한 안정도 지수에 비해 대류운의 발달이 예상되는 지역을 보다 정확하게 예측하는 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서 개발된 알고리즘을 사용하여 순간 예보와 단기 예보를 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

1. 서론

한반도에서 장마 이후 하계 집중호우는 태풍을 제외하면 종관 패턴과 관련이 적은 대류운과 연관된 산발적인 소나기 형태의 강수를 보인다. 이러한 대류운은 강한 일사나 지형적인 원인으로 대기가 불안정하게 되어 발생하는 대기현상으로, 시간과 공간규모가 작아 예보에 어려움이 따른다. 따라서 대류운의 발생 가능성을 나타내는 대기 불안정도 지수(또는 안정도 지수)의 산출은 대류성 강우 및 폭풍예보에 많은 도움을 준다.

국내에서의 예보 목적의 안정도 지수 생산은 주로 라디오존데 관측에 의존한다(신도식, 박운호, 2004). 그러나 우리나라의 라디오존데 관측이 종관규모에서 일 2회 이루어지고 있는 현실을 고려할 때, 갑자기 발생하는 대류운에 의한 강수의 특성을 예측하는데 있어 라디오존데 자료에 근거한 안정도 지수의 활용은 효율성이 낮아 보인다. 즉, 라디오존데 관측으로부터 산출된 안정도 지수는 급격히 발달하는 대류 활동을 예측하는데 시공간 해상도의 한계로 효율적인 예보에 제약이 있다(Dostalek and Schmit, 2001).

한편, 위성 자료는 연직 해상도가 낮은 단점이 있으나, 수평 해상도가 뛰어나고 해양을 포함한 광범위한 영역의 관측이 가능하다는 장점이 있어 위성 자료를 이용한 대기 안정도 지수 산출에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있다. 위성 자료를 이용한 안정도 지수의 산출은 접근 방식에 따라 물리적 방법과 통계적 방법으로 나눌 수 있다. 물리적 방법은 위성 관측 값으로부터 대기 상태를 추정하고 이로부터 안정도를 계산하는 방법으로 산출에 시간이 많이 소모되고 계산 결과가 초기 추정치의 질에 좌우된다는 단점이 있으나, 물리적인 해석이 가능하고 비교적 정확한 결과를 산출할 수 있다는 장점이 있다. 한편 통계적 방법은 관측 값과 대기 안정도 지수의 통계적 관계를 이용하는 방법으로 계산이 빠르고 사용의 간편성이 뛰어나나, 물리적 의미가 뒤떨어지고 지역에 따라 다른 결과를 유발하는 단점을 가지고 있다.

물리적 방법을 사용한 다양한 연구가 있다. Smith *et*

al.(1985)과 Hayden(1988)이 GOES (Geostationary Operational Environmental Satellite) - VAS (Visible Infrared Spin Scan Radiometer Atmospheric Sounder)에서 온도와 습도의 프로파일을 추정하여 안정도 지수를 계산하였다. Menzel *et al.* (1998)은 GOES-8/9 자료에서 온도와 습도의 프로파일을 구한 결과가 National Centers for Environmental Prediction (NCEP) 단기 지역예상 모델보다 더 정확함을 밝혀 활용 가능성을 입증하였다. 그리고 Ma *et al.* (1999)은 GOES 관측 자료에서 수증기 복원을 선형적인 방법과 비선형적인 방법으로 각각 계산하여 1년간 비교한 결과, 비선형적인 물리적 방법으로 프로파일을 변경하는 것이 더 정확함을 밝혔다. 최근 Meteosat-8 SEVIRI (Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager)자료를 사용하여 안정도 지수를 실시간으로 산출한 연구가 있다(Koenig, 2002).

한편 Lee *et al.*(1983)은 위성관측 복사량과 지상 관측 자료 사이의 통계적 관계로부터 수증기량을 산출하였고, Rao and Fuelberg(1997)는 GOES-8 복사량에서 안정도 지수를 산출하였다. 또한 Seemann *et al.* (2003)은 MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer)자료에서 안정도 지수를 현업적으로 산출하는 방법을 연구하여, 전 지구 영역에 대해 안정도 지수를 산출하여 제공하고 있다. 그러나 이러한 통계적 방법에 근거한 방법은 선형 회귀 계수 산출이 전 지구를 대상으로 이루어지기 때문에 우리나라에 적용가능성 여부는 확실치 않으며, 정확성 여부는 연구의 대상이 되고 있다.

본 연구의 목적은 한반도 부근에서의 안정도 산출을 위해 MODIS 전구 안정도 지수 산출치(Seemann *et al.*, 2003)의 통계적 방법의 활용보다는, Koenig(2002)의 물리적 방법을 MODIS 적외자료에 적용함으로써 그 정확도를 높이는 알고리즘을 개발하는데 있다. 이를 위해 한반도 주변의 영역(31.0°N ~ 43.0°N, 120.0°E ~ 132.0°E)에서 MODIS 적외채널의 밝기온도 자료로부터 온도와 습도의 연직분포를 추정 후, 안정도 지수를

산출한다. 이 연구에서 개발된 알고리즘을 대류운에 의한 강수 사례에 적용하여 산출된 안정도 지수가 단기 예보에 얼마나 유용한 지 살펴보았으며 결과를 NASA에서 공급하고 있는 MODIS 안정도 지수와 비교하여 기존의 자료와의 정확성을 비교하였다.

2. 이론적 배경

1) 대기의 온도와 습도 프로파일 복원

SI의 계산은 온도와 습도의 연직분포를 필요로 하므로 MODIS 위성 관측치로부터 온도와 습도의 프로파일 추정이 전제된다. 즉, 안정도 지수는 위성관측자료에서 복원된 프로파일로부터 계산된다. 이 연구에서는 k개의 다중 채널 관측 밝기온도 자료로부터 온도와 습도의 복원을 위해 아래의 식으로 나타내는 Ma *et al.*(1999)의 비선형적인 물리적 방법을 이용하였다.

$$x_{n+1} = x_0 + (C^{-1} + K_n^T E^{-1} K_n + \gamma_n I)^{-1} \times \{K_n^T E^{-1} [\delta y_n^m + K_n(x_n - x_0)] + \gamma_n(x_n - x_0)\} \quad (1)$$

식 (1)에서 x_n 은 온도와 습도의 프로파일의 추정을 위해 수렴과정을 되풀이 하는 반복 횟수를 나타낸다. 따라서 x_0 는 초기 추정 프로파일, x_{n+1} 은 이전 프로파일 x_n 에서 갱신된 프로파일을 의미한다. δy_n^m 은 위성에서 관측한 밝기 온도와 복사전달 모델에 의해 계산된 밝기 온도와의 차이이며, γ_n 은 이 식의 수렴속도를 조절하는 경험적인 계수이다. 가중 함수 행렬인 K_n 은 온도와 습도의 프로파일 변화에 대한 대기 상한에서의 복사량의 변화를 나타낸 것으로 다음과 같이 정의된다.

$$K_n(m, i) = \frac{\delta TB^m(m)}{\delta x_n(i)} \quad (2)$$

$$= \frac{TB^m(m, x_n) - TB^m(m, x_n(\text{perturbed in level } i))}{x_n(i) - x_n(i, \text{perturbed in level } i)}$$

식 (2)에서 m 은 채널 수, i 는 프로파일 벡터인 x_n 의 요소이다.

앞의 (1)식은 미분형태인 가중 행렬 함수 K 를 포함하므로, 만일 k 개의 채널에 n 개의 대기층을 고려한다면 K 행렬 계산을 위해 전방 모델 (forward model)을 $k \times (2n+1)$ 번 계산해야 하기 때문에 계산량이 방대해지는 단점이 있다. 계산시간을 단축하기 위해 Rapid Transmittance

for TOVS (RTTOV) Version 7의 복사모델을 사용하였다(Saunders *et al.*, 1999).

2) 안정도 지수

예보에 많이 사용되는 대기의 불안정의 정도를 나타내는 안정도 지수는 다음의 Lifted Index (LI), K-Index (KI), KO Index (KO), Maximum Buoyancy (MB) 등이 있으며 다음의 식들로 표현된다.

$$LI = T^{500} - T^{sfc-500} \quad (3)$$

$$KI = (T^{850} - T^{500}) + T_d^{850} - (T^{700} - T_d^{700}) \quad (4)$$

$$KO = 0.5 \times (\Theta_e^{500} + \Theta_e^{700} - \Theta_e^{850} - \Theta_e^{1000}) \quad (5)$$

$$MB = \Theta_e^{\max. \text{ between surface and 850}} - \Theta_e^{\min. \text{ between 700 and 300}} \quad (6)$$

식 (3)-(6)에서 T , T_d , Θ_e 는 각각 온도, 이슬점온도, 상당온위를 나타내며, 아래첨자로 표시된 수는 기압면을 나타낸다. $T^{sfc-500}$ 는 공기궤가 지상으로부터 단열적으로 500 hPa까지 상승하였을 때 나타나는 온도이며, $\Theta_e^{\max. \text{ between surface and 850}}$ 는 지상과 850 hPa 사이에서 갖는 최대 상당 온위를 $\Theta_e^{\min. \text{ between 700 and 300}}$ 는 700 hPa과 300 hPa 사이에서 갖는 최소 상당 온위를 나타낸다 (Kitzmler and McGovern, 1989; Koenig, 2002).

식 (3)의 LI는 500 hPa의 실제 기온과 지표 공기가 500 hPa까지 단열상승했을 때 나타나는 기온의 차로 표현되며 낮을수록 불안정하다. 식 (4)의 KI는 연직 기온 감률과 대기하층에서의 수증기의 양으로 표현되는 지수로, 850 hPa과 500 hPa의 기온 차가 클수록 불안정하며 하층의 수증기 양이 많을수록 불안정함을 의미한다. 그러나 850 hPa 이하의 정보는 나타내지 못하는 단점이 있다. 식 (5)의 KO는 1000 hPa까지의 정보를 포함하나 지상기압이 1000 hPa 보다 낮은 지역에서는 계산할 수 없는 단점이 있다. 식 (6)의 MB는 부력을 나타내는 정도로 두 층의 비교를 통해 불안정 지수를 산출하고 있다.

3. 자료와 방법

이 연구에서는 프로파일의 복원을 위해 3개의 수증기 채널을 가진 MODIS 관측 자료를 사용하였고, 초기 자료로는 10 km의 수평 해상도를 갖는 RDAPS 자료를 사용하였다.

MODIS는 705 km의 고도를 갖는 극 궤도 위성인 Terra 위성에 탑재되어 동일 지역을 하루에 두 번 이상 관측한다. 가시광, 적외선 파장인 0.405 ~ 14.385 μm 의 영역에 총 36개의 밴드에서 관측이 이루어진다. 이 중 이 연구에서 사용한 6개의 적외 채널로, 3개의 수증기 채널, 2개의 분할 창역 채널, 1개의 CO₂ 채널을 포함하며 자세한 특징은 Table 1에서 찾을 수 있다. 총 36개의 채널에 대한 반응함수와 밝기 온도의 분포를 Fig. 1에 제시하였다. 이 연구에서는 NASA GDAAC (Goddard Distributed Active Archive Center)의 Level 2 MOD07 중 밝기 온도와 센서의 천정각 자료를 사용하였다. MOD07의 밝기온도 자료는 구름 분석을 통해 맑은 대기에서만 안정도 지수의 계산이 이루어졌다.

안정도 지수 산출을 위해서는 MODIS 6개 적외채널 밝기온도의 모의가 필요하며, 이를 위해 복사전달 모델

과 입력자료가 필요하다. 입력자료인 초기치로서 기상청에서 생산한 수치예보 자료인 지역 예측 모델(RDAPS) 결과를 사용하였다. 한 시간 간격으로 산출되는 RDAPS 자료는 10 km의 공간 해상도를 갖고 있으며 25 기압면에서의 온도와 습도 자료를 비롯하여 지상 기압, 지표면 온도, 지표고도를 포함하고 있다.

RTTOV-7 복사전달 모델 수행을 위한 입력자료는 그 층이 43개의 기압고도로 고정되어 있어 RDAPS 프로파일을 다음과 같은 식으로 내삽하여 사용하였다.

$$T_{rtt}(l) = T_{nwp}(k) + \{T_{nwp}(k+1) - T_{nwp}(k)\} \times \frac{\ln P_{rtt}(l) - \ln P_{nwp}(k)}{\ln P_{nwp}(k+1) - \ln P_{nwp}(k)} \quad (7)$$

$$Q_{rtt}(l) = Q_{nwp}(k) + \{Q_{nwp}(k+1) - Q_{nwp}(k)\} \times \frac{P_{rtt}(l) - P_{nwp}(k)}{P_{nwp}(k+1) - P_{nwp}(k)} \quad (8)$$

Table 1. Characteristics of MODIS six infrared channels used in this study.

| Primary atmosphere application | Band | Bandwidth (μm at 50% response) | T_{typical} (K) | Radiance at T_{typical} ($\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\text{m}^{-1}$) | NE Δ T(K) Specification |
|--------------------------------|------|--|--------------------------|--|--------------------------------|
| Moisture profile | 27 | 6.535-6.895 | 240 | 1.16 | 0.25 |
| | 28 | 7.175-7.475 | 250 | 2.18 | 0.25 |
| | 29 | 8.400-8.700 | 300 | 9.58 | 0.05 |
| Surface temperature | 31 | 10.780-11.280 | 300 | 9.55 | 0.05 |
| | 32 | 11.770-12.270 | 300 | 8.94 | 0.05 |
| Temperature profile | 33 | 13.185-13.485 | 260 | 4.52 | 0.25 |

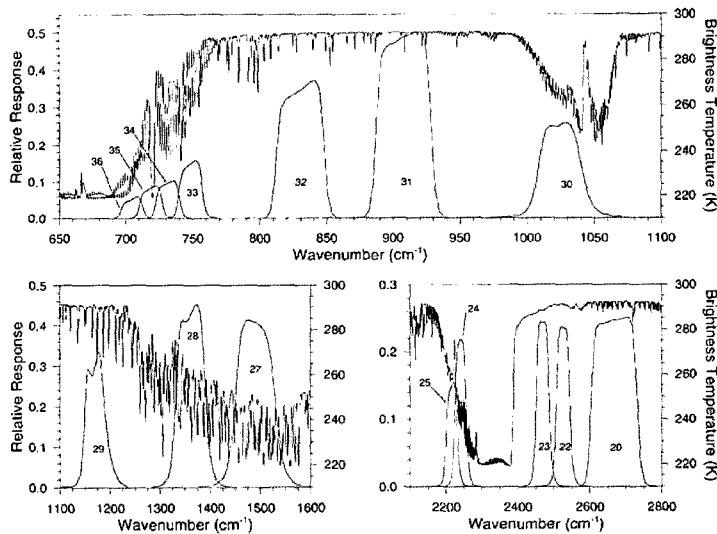


Fig. 1. MODIS infrared spectral response functions and nadir-viewing brightness temperatures spectrum of the standard atmosphere (adapted from Menzel *et al.*, 2002).

여기서 k 는 각각 43과 25개의 층을 나타내며, T_m , Q_m 는 RTTOV에 입력될 온도와 습도의 프로파일을, T_{mvp} , Q_{mvp} 는 수치예보 자료의 온도와 습도의 프로파일을 나타낸다. P_m , P_{mvp} 는 43층과 25층의 기압고도를 나타낸다.

한편, RDAPS 자료의 최상층은 50 hPa이므로 그 이상의 고도에서는 McClatchey et al.(1972) 여름철 표준 대기의 온도와 습도 값을 이용하였다. 또한 RDAPS의 최하층 기압은 시그마 레벨 1의 해면 기압이다. 그러나 밝기 온도는 실제 지면에서부터 대기 상단까지의 복사량으로 계산되므로, RDAPS에 사용된 고도 정보를 이용하여 지상 기압으로 변환하였다.

안정도 지수 산출과정을 Fig. 2에 도식적으로 나타내었다. 온도와 습도의 프로파일, 지상기압자료, 오존 기후자료, 지표면 온도 자료를 입력 자료로 복사모델인 RTTOV-7을 수행하여 대기 상한에서의 밝기 온도 ($T_{B_{cal}}$)를 채널 별로 계산하였다. 계산된 밝기 온도는 채널 별로 위성에서 관측된 밝기 온도($T_{B_{obs}}$)와 비교하여 그 차이가 기준치를 만족할 때까지 (1)식을 이용하여 RTTOV 복사전달 계산을 반복한다. 수렴의 여부를 결정하는 값은 식 (9)의 RMSE를 이용하였으며, 경험적인 값 0.7을 선택하였다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (T_{B_{cal}}^i - T_{B_{obs}}^i)^2}{N}} \quad i: \text{channels} \quad (9)$$

추정된 온도와 습도 프로파일은 아래와 같은 다양한 안정도 지수 산출에 활용되었으며 이들의 안정도 지수가 한반도에서 발생한 폭풍과 어떠한 관련이 있는지 조사하였다.

4. 결과

1) 밝기 온도 모의

복사전달 계산의 정확성과 계산치의 초기입력자료에 의 의존의 정도를 조사하기 위해 2003년 10월 27일 0300UTC의 RDAPS 온도와 습도 자료를 사용하여 MODIS 채널 밝기 온도를 모의하였다(Fig. 3). 모의한 밝기온도를 비교하기 위해서 2003년 10월 27일 0250 UTC로부터 0255UTC까지 한반도 부근에서 관측된 MODIS 밝기온도 자료를 사용하였다. Fig. 3은 RDAPS 자료를 사용했을 경우 이 연구에서 이용하고 있는 6개 채널 모두에서 계산값과 관측값이 선형적인

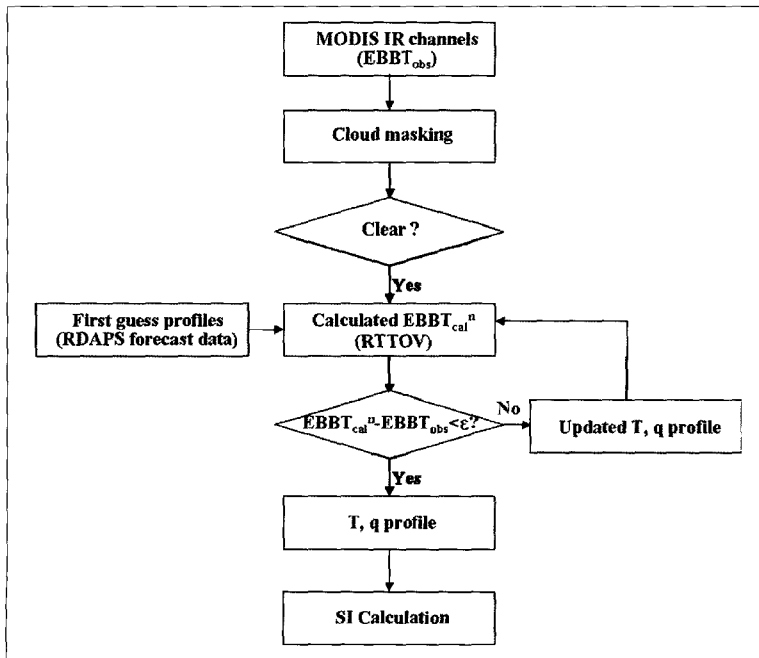


Fig. 2. Flowchart of stability index calculation.

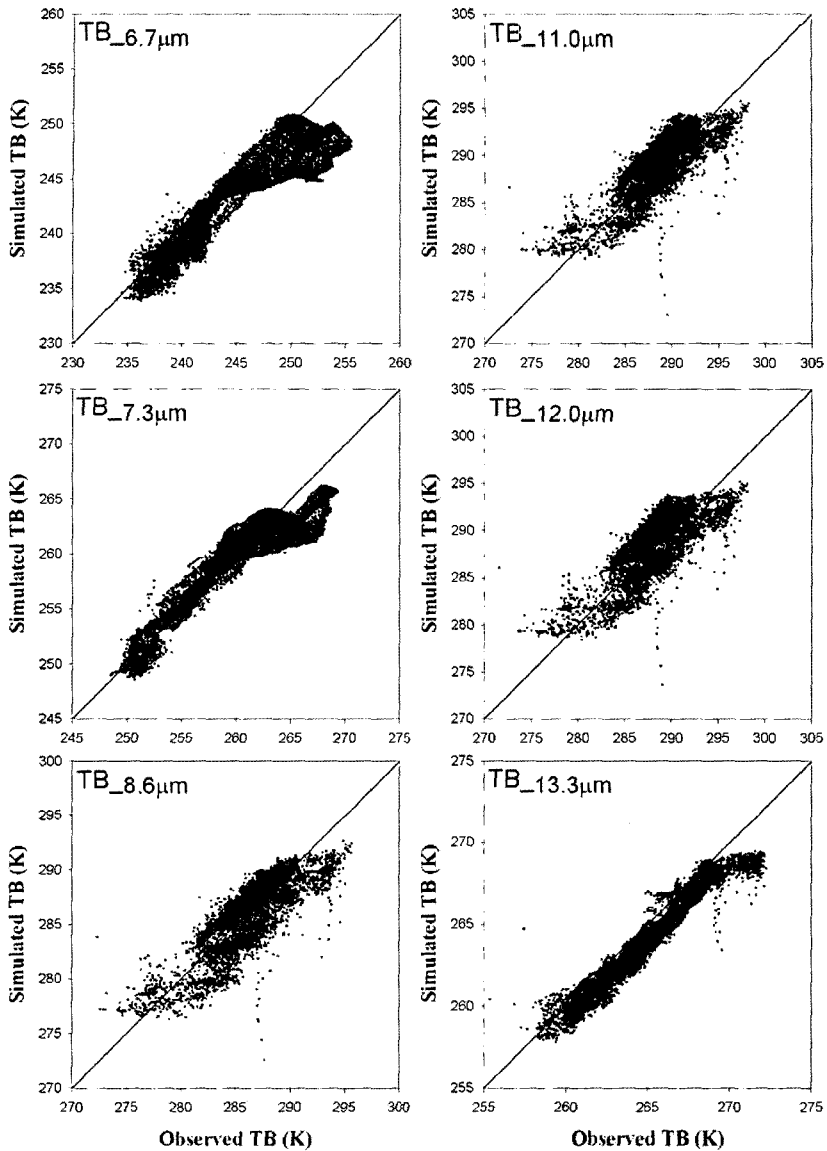


Fig. 3. Comparison between observed and simulated brightness temperatures for six MODIS channels.

관계를 보이고 있지만 큰 편차가 존재함을 나타낸다. 특히 상층 수증기의 영향을 받는 6.7 μm 채널의 경우 그 편차가 가장 커서 RDAPS 상층 수증기량이 실제와는 다름을 시사하고 있다. 채널 별 RMSE는 1.2 ~ 2.8 K 구간에 있으며 6개 채널에 대한 자세한 통계치는 Table 2에 제시하였다.

Fig. 4는 한반도 부근에서 2003년 10월 28일 0300UTC 경 11 μm 대기 창 영역에서 RDAPS 자료를 입력하여 얻은 밝기 온도와 MODIS에서 관측한 밝기

온도의 분포를 나타낸다. Fig. 4b에서 밝기 온도가 없는 북서쪽의 흰 영역은 구름이며 동쪽의 흰 영역은 천정각이 60도 이상으로 계산에서 제외하였기 때문이다. 비교

Table 2. Statistics of calculated brightness temperatures vs. observed brightness temperatures.

| Central wavelength (μm) | 6.7 | 7.3 | 8.6 | 11.0 | 12.0 | 13.3 |
|--------------------------------------|------|------|------|-------|-------|------|
| RMSE | 2.80 | 1.97 | 1.70 | 1.82 | 1.97 | 1.20 |
| BIAS | 1.75 | 0.67 | 0.14 | -0.55 | -0.42 | 0.96 |

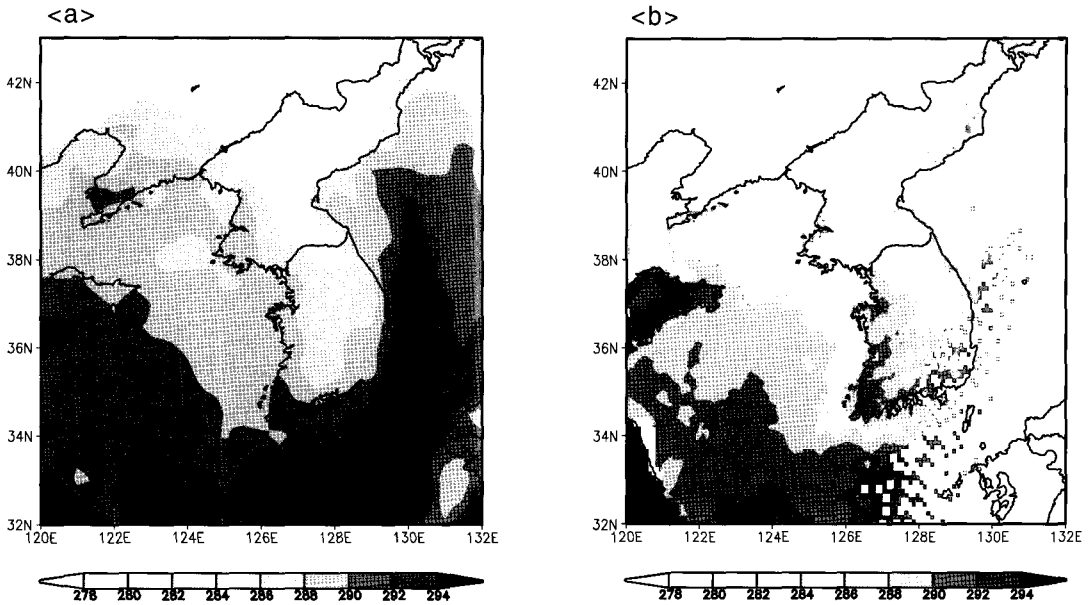


Fig. 4. Simulated (a) and observed (b) MODIS 11 μm channel brightness temperatures at 0300UTC 28 Oct. 2003.

의 결과는 대부분의 관측 영역에서 RDAPS 밝기온도가 MODIS 밝기온도보다 0~1 K 정도 높았으며, 육지에서 그 차이가 더 크게 나타남을 보이고 있다. 이러한 결과는 파장대가 지표면 온도의 영향을 많이 받는 대기층 영역이므로, 지표온도와 방출을 계산이 산악을 포함한 복잡한 지형에서 에러의 정도가 큼을 알 수 있다.

Fig. 5는 관측된 밝기 온도와 계산된 밝기 온도의 차이가 기준 값을 만족하지 못한 화소에 대해, (1)식을 사용하여 프로파일을 변경하여 밝기 온도를 계산하는 작업을 반복한 후, 수렴 기준치를 만족하는 밝기 온도와 관측된 밝기 온도의 값을 비교한 것이다. Fig. 4와 비교하여 이 알고리즘으로 계산한 밝기 온도가 MODIS 관측 값에 거의 접근하고 있음을 보이고 있다. 채널 별 RMSE는 약 0.3 ~ 0.9로 RDAPS 자료를 사용하여 계산한 밝기 온도와 비교하여 일치의 정도가 크게 개선되었음을 알 수 있다. 자세한 통계 결과는 Table 3에 제시하였다.

2) 대류성 강우 사례 분석

알고리즘에서 얻은 안정도 지수의 타당성을 검증하기 위해 한반도에서 발생했던 소나성 강우의 경우를 사례로 선택하여 비교분석하였다.

Table 3. Statistics of calculated brightness temperatures vs. observed brightness temperatures.

| Central wavelength (μm) | 6.7 | 7.3 | 8.6 | 11.0 | 12.0 | 13.3 |
|--------------------------------------|------|-------|------|-------|-------|------|
| RMSE | 0.29 | 0.31 | 0.41 | 0.39 | 0.42 | 0.89 |
| BIAS | 0.10 | -0.16 | 0.21 | -0.29 | -0.18 | 0.85 |

(1) 한랭전선에서 발생한 대류성

2003년 10월 27일 밤과 10월 28일 새벽에 걸쳐 한랭전선이 우리나라를 통과함에 따라 낙뢰를 동반한 소나성 강우를 일으켰던 폭풍을 사례로 선택하였다. 이 사례는 한랭전선의 움직임에 따른 불안정 지역을 쉽게 파악할 수 있어서 분석이 용이하고, 구름이 위치한 영역의 폭이 좁아 맑은 영역에서만 복원이 가능한 안정도 지수의 계산에 유리했다.

Fig. 6은 10월 28일 새벽 3시의 GOES (Geostationary Operational Environmental Satellite) 적외영상(왼쪽)과 지상 일기도(오른쪽)를 나타낸다. 위성영상을 분석하면 구름의 축이 북서쪽에서 남동쪽으로 이동하면서 우리나라를 통과하고 있으며, 주로 구름대의 끝부분인 남서 해안부근에서 강한 적란운이 발달하는 것을 볼 수 있었다. 한편 제시하지는 않았지만 기상청 AWS에서 관

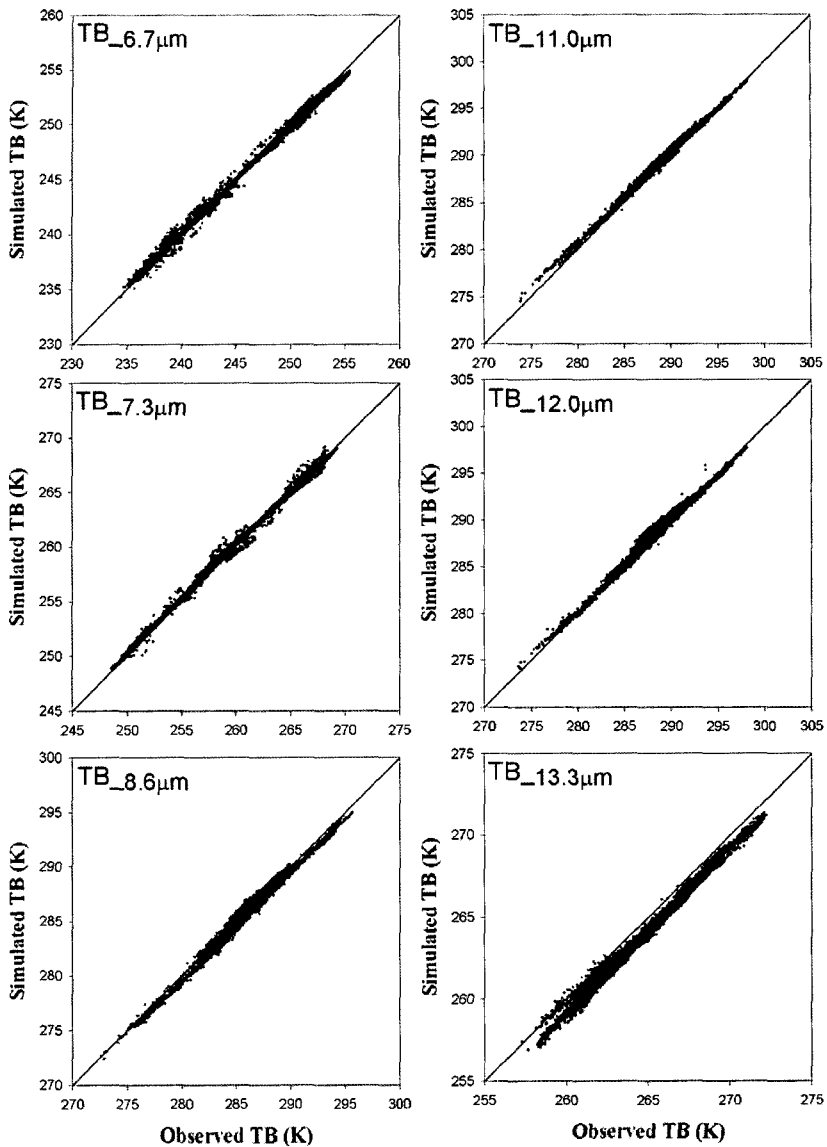


Fig. 5. Comparison between observed and simulated brightness temperatures of MODIS channels after updating profiles.

측한 1시간 누적 강수량과 레이더 반사도 영상과 비교할 때 이 구름대가 통과함에 따라 폭이 좁고 강도가 큰 소낙성의 강우대가 낙뢰와 함께 존재했음을 알 수 있었다. 지상 일기도는 저기압 중심이 함경도에 위치하고 있었으며 중심으로부터 남동쪽으로 기압골이 형성되었음을 보여준다.

북서쪽에서부터 시작한 강수대는 27일 밤 12시경부터 남동진하였으며, 특히 흑산도와 진도 부근에서 강한

강수를 보였다. 이와 관련하여 기상청은 27일에는 강수 확률 30-40%로 밤 한때 비를, 28일에는 흐리고 한때 비(30-40%)은 후 갬을 예보하였으며, 중부지방을 중심으로 천둥과 번개를 동반한 폭풍이 있을 것이라는 예보를 하였다. 그러나 전라도와 경상도 지방은 강수확률 20-30%로 흐리고 한때 비가 조금 오는 곳으로 예보하였으나, 전라도 지방 해안지역에서 시간당 20 mm 이상의 강한 소낙성 강수의 예보는 없었다.

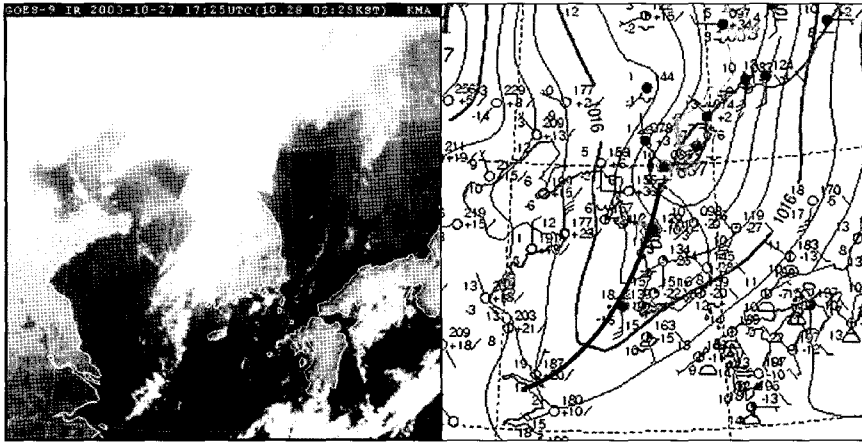


Fig. 6. GOES infrared image (left) and surface weather chart (right) at 1800UTC 27 Oct 2003.

라디오존데 관측치에 나타난 이 사례의 불안정도를 살펴보기 위해 라디오존데 사이트에서 KI를 계산하여 Fig. 7에 나타내었다. KI는 불안정 지수 15 이상에서 값이 클수록 불안정도가 커짐을 의미하는데, 라디오존데 자료에서는 백령도와 고산에서만 구름이 발생했을 시각에 불안정 지수 15 이상으로 나타났다. 그러나 그 크기가 경계치 부근의 값으로 예보에 크게 도움을 준 것으로는 판단할 수 없었다.

안정도 지수 계산을 위한 RDAPS 자료의 활용성을 살펴보기 위해 계산한 안정도 지수를 Fig. 8에 제시하였다. 이 그림에서 색이 진할수록 불안정한 지역을 나타낸다. RDAPS 수치예보 자료는 일반적으로 그 불안정의 경향은 잘 나타내었으나, 남서 해안지역에서 불안정도가 크게 나타난 현상은 표출하지 못하고 있음을 알 수 있다.

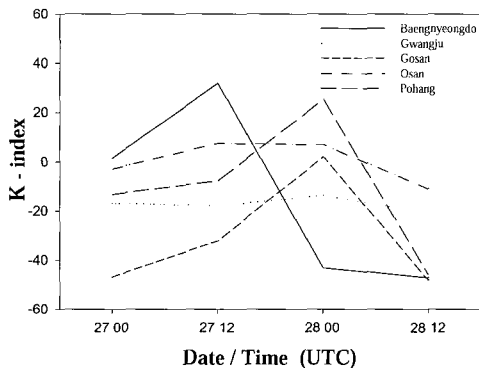


Fig. 7. K-index from radiosonde data.

통계적 방법에 근거한 대기 안정도 지수 산출 자료의 정확도를 살펴보기 위해 MODIS 안정도 지수 산출과 관측시간이 일치하는 2003년 10월 27일 0300UTC GOES 적외 영상과 지상일기도, GDAAC (Goddard Distributed Active Archive Center)에서 제공하는 MODIS LI와 KI를 Fig. 9에 제시하였다. 위성 영상은 0300UTC에 구름 밴드가 만주에서 발해만에 걸쳐 위치하고, 북한에는 낮은 하층운이 존재하고 있음을 보여준다. 같은 시각의 지상 일기도 분석으로부터 구름이 위치한 곳에 기압골이 존재하고 있음을 알 수 있다.

GDAAC에서 산출한 MODIS LI와 KI는 전 지구를 대상으로 MODIS 자료로 산출된 자료이다(Seemann et al., 2003). GDAAC MODIS 알고리즘은 통계적 회귀 방법을 사용하고 있으며 이때 필요한 선형 계수의 산출을 위해 전지구 라디오존데 관측 값을 입력자료로 한 복사전달계산에서 얻은 밝기온도자료를 훈련자료로 사용하였다. GDAAC의 KI와 LI의 영상에서 안정도 지수가 계산되지 않은 영역은 흰색으로, 안정도 지수가 계산된 지역은 옅은 회색부터 검은색까지 불안정을 나타낼수록 검게 나타내었다. Fig. 9의 GDAAC LI와 KI는 구름 주변에서 약한 불안정을 보여주고 있으나 기타 강수 지역에서는 불안정을 거의 나타내고 못하고 있다. 이러한 비정확성은 알고리즘에 사용하고 있는 회귀 계수가 전 지구를 대상으로 얻어진 것이어서 한반도 주변과 같은 국지지역에 적용하였을 경우 그 물리적 특성이 정확하게 기술되지 못하는 것에 기인하는 것으로 판단된다.

Fig. 10은 이 연구에서 개발된 알고리즘으로 RDAPS

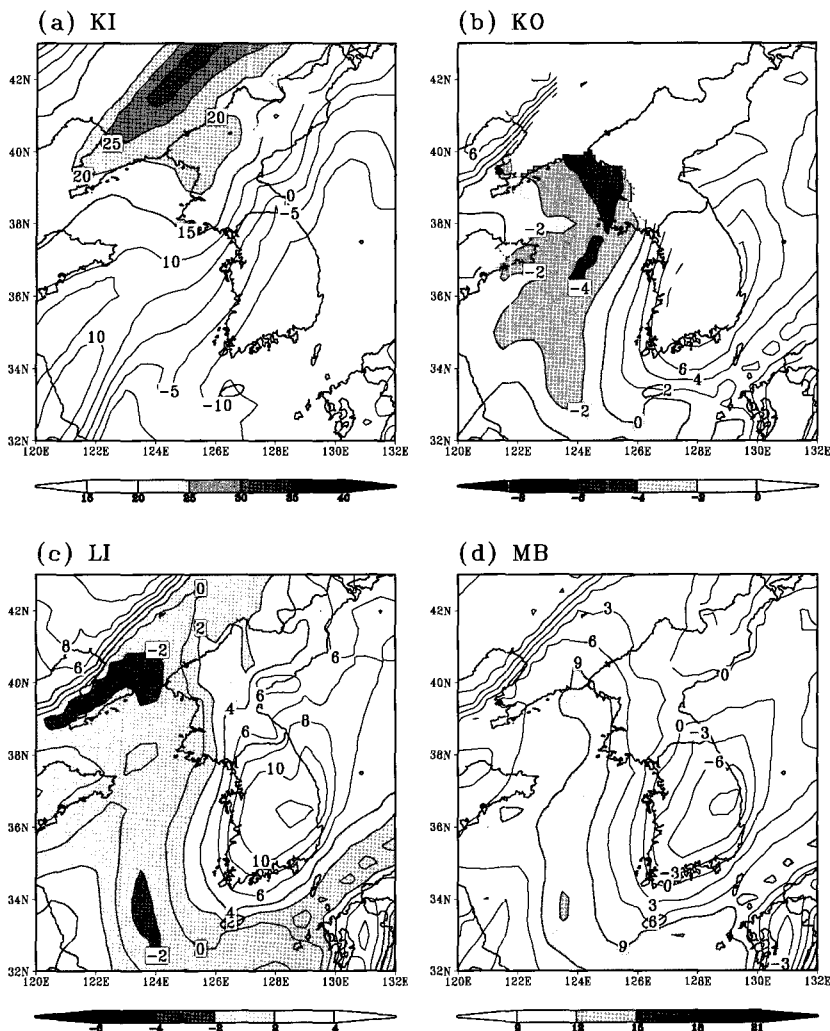


Fig. 8. Geographical distributions of stability indices from RDAPS data at 0300UTC 27 October 2003: (a) KI, (b) KO, (c) LI, (d) MB

초기 값을 활용하여 MODIS 밝기 온도에 수렴시켰을 경우에 얻어진 온도와 습도의 연직분포자료로부터 얻어진 안정도 지수를 나타낸다. 이 그림에서 검은색을 나타낼수록 불안정한 지역을 의미한다. 분석 결과 구름의 가장자리에서만 불안정을 나타내고 있는 KI를 제외한 KO, LI, MB는 강한 대류활동을 예측할 수 있는 불안정 영역이 우리나라 서해에 위치하고 있음을 보여준다. 이 결과는 제한적인 관측 자료를 사용한 라디오존데 불안정 지수, RDAPS에 근거한 불안정 지수, 통계적 방법에 근거한 GDACC 불안정 지수와 비교하여 이 연구에서 개발한 알고리즘이 한반도 지역에서의 안정도 지수산출

에서 그 정확성을 크게 향상시키고 있음을 보인다.

(2) 태풍 전면에 형성된 대류운

두 번째 사례로 2004년 7월 31일 제10호 태풍 남테우른의 전면에 형성된 대류운에 의해 소낙성 강수를 보인 폭풍을 선택하였다. 태풍이 북상함에 따라 동반된 습윤역이 북쪽으로 확장되면서 우리나라에 불안정이 형성되어 대류운이 발생한 사례이다.

Fig. 11에 2004년 7월 31일 오후 3시의 위성영상과 지상 일기도를 나타내었다. 왼쪽의 위성 영상을 보면 대류운이 우리나라 내륙에서 북북동-남남서 방향으로 발

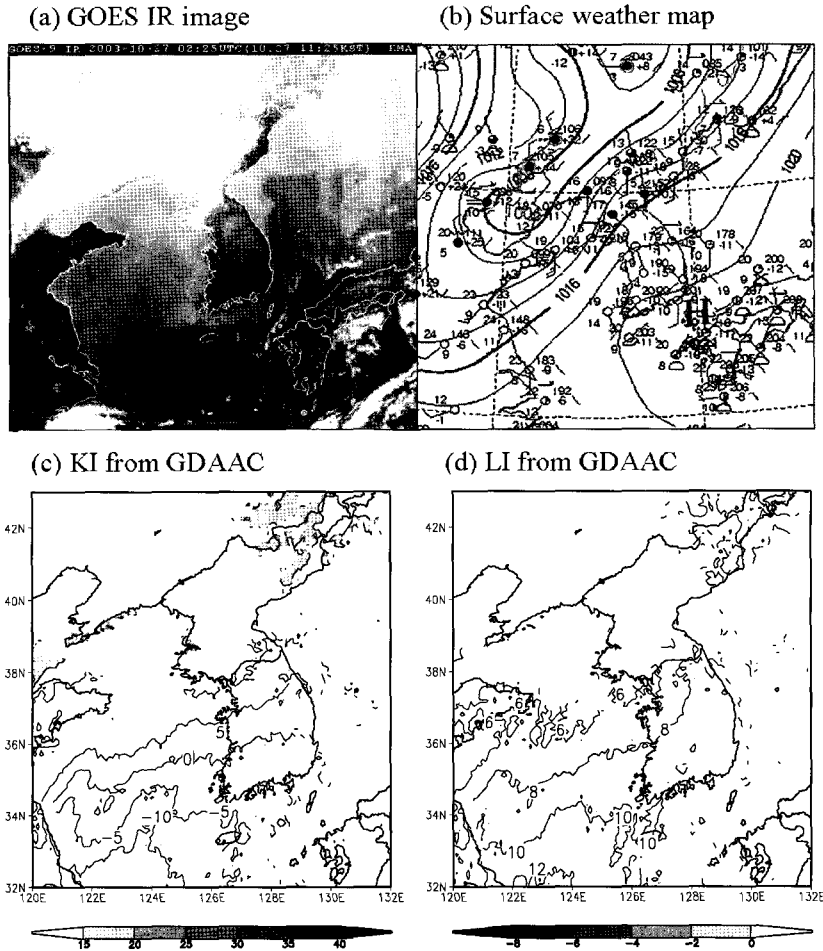


Fig. 9. GOES infrared image (a), surface weather map from KMA (b), lifted index from GDAAC (c), and K index from GDAAC (d) at 0300UTC 27 October 2003.

달하고 있음이 분석된다. 오른쪽의 지상 일기도는 중심 기압이 975 hPa인 태풍이 일본 남쪽(33.0° N, 133.4° E)에 중심을 두고 북서진 하고 있으며, 우리나라 내륙으로 기압골이 형성되어 있음을 보여준다. 이 날 기상청의 AWS 1시간 누적 강수량은 오후 1시 이후에 전북 내륙 지방을 시작으로 밤까지 우리나라에 산발적인 강수가 있었다고 보고하고 있다(제시하지 않았음). 이날 새벽 5시 기상청은 중부지방에 약한 구름이 끼고, 강원 영동지방과 남부지방은 구름 조금, 오후 한때 구름이 많을 것으로 예보하고 있다. 그러나 강수확률은 10~20%로 예보함으로써 소낙성 강수의 가능성을 예측하지 못했다.

Fig. 12에 0200UTC의 GOES 가시 영상과 NASA GDAAC에서 통계적 방법으로 계산하여 제공한 KI를

제시하였다. 위성 영상은 한반도 영역이 기단의 차이로 발생한 구름과 남쪽의 태풍 사이에서 비교적 맑은 구역에 속해 있음을 보이고 있다. 한편 KI가 태풍 주변과 한반도 동쪽 강원도 지방을 중심으로 40이상을 보여 이 지방에 강한 잠재 대류불안정이 존재하고 있으며, 그 외 대부분의 영역도 25이상의 지수를 보여 대기가 불안정함을 나타내고 있다.

Fig. 13은 RDAPS 온습도 자료를 사용하여 계산한 KI와 이 연구에서 개발한 알고리즘을 이용하여 MODIS 밝기 온도 자료로 부터 계산한 KI를 나타낸다. 왼쪽의 RDAPS 프로파일에서 산출된 KI는 우리나라 북쪽에 위치한 기단과의 차이에 의한 불안정 지역과 일본 주변의 태풍과 관련한 지역이 가장 불안정한 지역으로 나타나

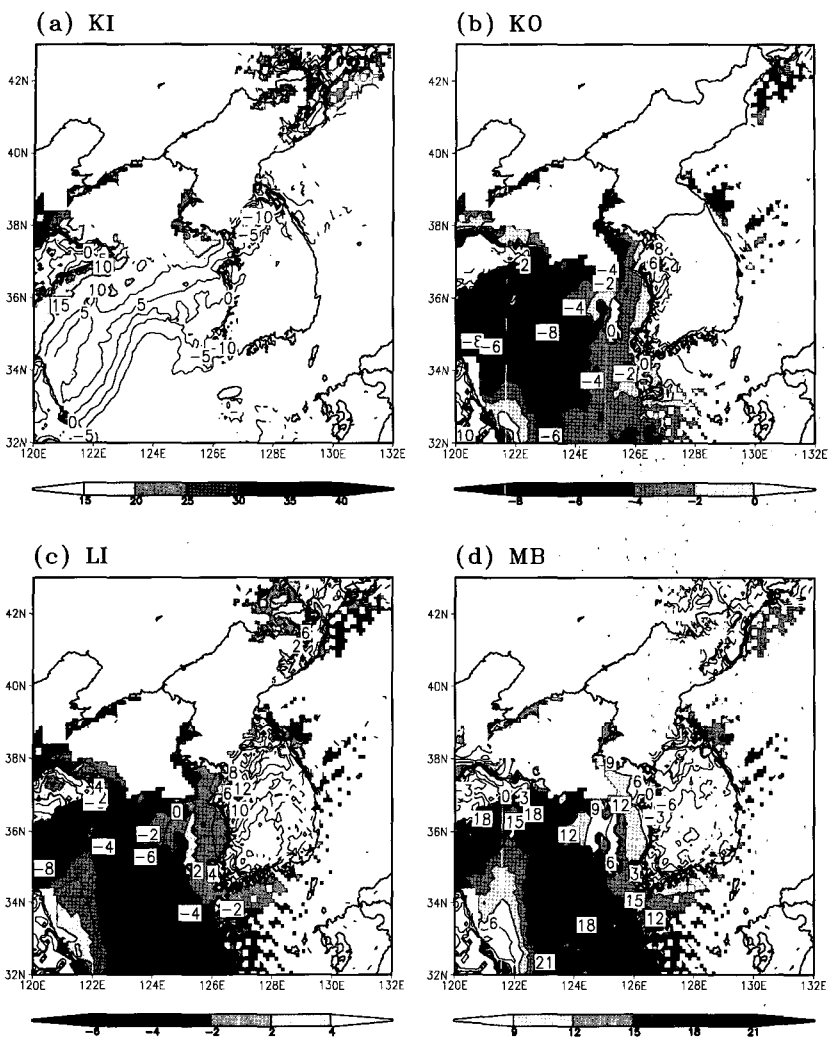


Fig. 10. Geographical distributions of stability indices from MODIS data at 0300UTC 27 October 2003: (a) KI, (b) KO, (c) LI, (d) MB

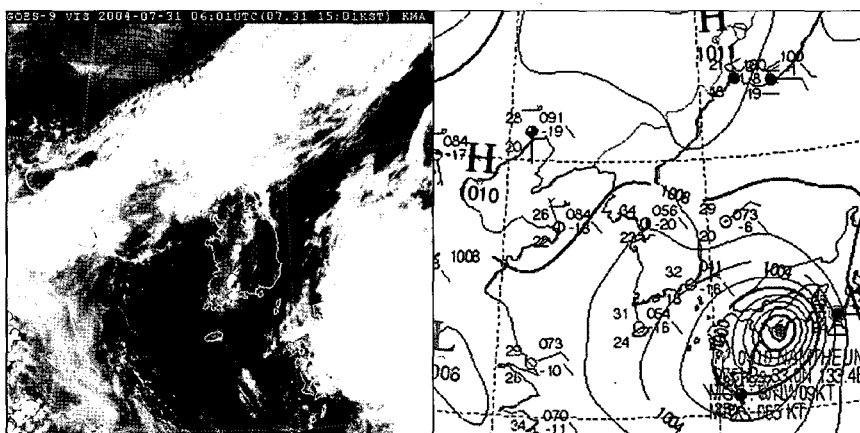


Fig. 11. GOES visible image (left) and surface weather chart (right) at 0600 UTC 31 July 2004.

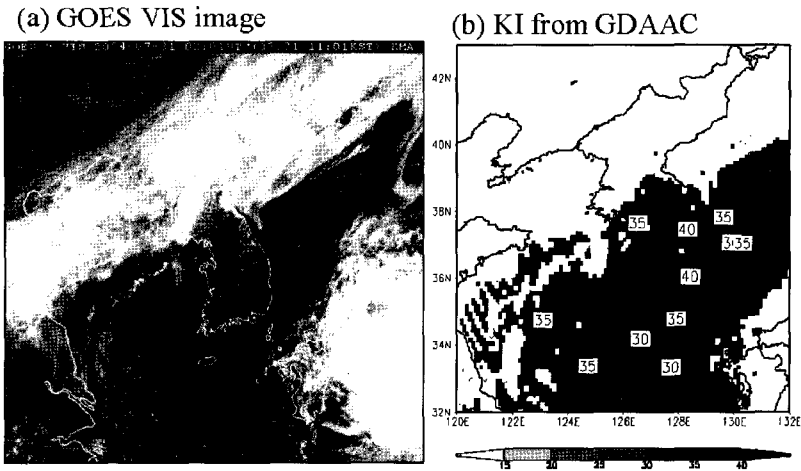


Fig. 12. GOES visible image (a) and K index from GDAAC (b) at 0200 UTC 31 July 2004.

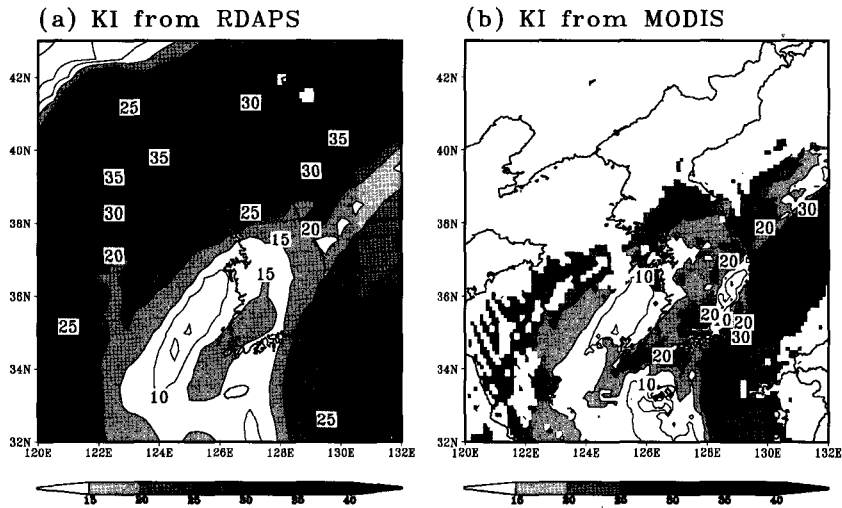


Fig. 13. K indices from RDAPS (a), and from retrieved MODIS profiles (b) at 0200UTC 31 July 2004.

고 있으며, 우리나라 남서지방에는 불안정 지수가 15~20으로 약한 불안정이 존재하는 것으로 분석된다. 그러나 MODIS 밝기 온도 자료로부터 추정된 KI는 우리나라 남서 지방에는 불안정 지수가 20~30으로 대류 불안정이 존재하는 것으로 분석되었다. 이러한 MODIS 결과는 Fig. 11의 GOES 가시 영상에서 나타난 대류운이 발생한 지역과 일치하고 있다. 따라서 개발된 알고리즘에서 산출된 KI는 비록 제한된 사례 연구에 해당하지만 NASA GDAAC의 통계적 방법으로 계산한 MODIS 불안정 지수나 우리나라 수치예보자료 결과인 RDAPS

불안정 지수보다 그 정확도가 우월한 것으로 판단된다.

5. 요약 및 결론

본 연구에서는 온도와 습도의 연직분포를 연속하여 갱신하면서 매번 복사전달계산을 통해 MODIS 6개 채널파장에서 얻어진 밝기온도를 MODIS 관측 밝기온도에 수렴시키는 방법으로 얻어진 최종 프로파일로부터 대기 안정도를 산출하는 알고리즘을 개발하였다. 이때

초기치로서 10km의 수평 해상도를 갖는 RDAPS 자료를 이용하였고, 복사모델로는 RTTOV-7 모델을 사용하였다.

RDAPS 자료만을 사용하여 복사전달 계산을 통해 얻은 밝기 온도는 관측치와 비교하여 RMSE가 1.2~2.8의 분포를 보였으나, 알고리즘을 통해 MODIS 관측자료에 수렴시킨 후 모의한 밝기 온도의 RMSE는 0.3~0.9로 그 정확도가 현저하게 증가하는 결과를 얻을 수 있었다.

사례 분석을 통하여 개발된 알고리즘의 효용성을 살펴보았다. 전선상에서 나타나는 돌발적인 강수 현상과 접근하는 태풍의 전면에서 나타나는 대류성 강우 현상에 대해 개발된 알고리즘을 적용하여 안정도 지수를 산출하였으며, 결과를 RDAPS 자료, 라디오존데 관측결과, NASA GDAAC 안정도 생산결과와 비교하였다. 기상청의 예보는 이 두 경우 모두에서 돌발적인 강수예보를 내지 못했다. GOES 정지위성 이미지 분포, AWS 누적강수량 자료, 지표일기도 분석자료를 토대로 돌발 강우현상을 각 안정도 자료로부터 예상되는 결과와 비교하였다. 비교결과 이 연구에서 얻은 안정도 지수는 타 자료에 비해 돌발 강우를 예측할 수 있을 정도로 판단되었으며, 이를 통해 돌발적인 강수현상을 포함한 단시간 예보에 유용하게 활용될 수 있음을 보이고 있다. 즉, 위성 자료에서 복원된 안정도 지수는 맑은 영역에서만 가능함에도 불구하고, 한랭전선에 동반된 대류운이나 태풍 전면에서 형성된 대류운의 사례뿐만 아니라, 우리나라 여름철에 국지적으로 나타나 수시간만에 사라지는 소낙성 강수의 사례 등을 비롯하여 작은 규모의 현상에 대한 예보에 유용할 것으로 판단된다.

사 사

이 연구는 기상연구소 지원 '통신해양기상위성 1호 기상자료처리 시스템 개발사업'의 일환으로 이루어졌다.

참고문헌

신도식, 박운호, 2004. 장마 후 집중호우 메커니즘 분석과 예보 가이던스 개발. 2004년도 가을 학술대

회 초록, 한국기상학회, 326-327.

Dostalek, J. F. and T. J. Schmit, 2001. Total precipitable water measurements from GOES sounder derived product imagery. *Wea. Forecasting*, 16: 573-587.

Hayden, C. M., 1988. GOES-VAS simultaneous temperature-moisture retrieval algorithm. *J. Appl. Meteor.*, 27: 705-733.

Kitzmilller, D. H. and W. E. McGovern, 1989. VAS retrievals as a source of information for convective weather forecasts: An objective assessment and comparison with other sources of upper-air observations. *Mon. Wea. Rev.*, 117: 2095-2109.

Koenig, M., 2002. Atmospheric instability parameters derived from MSG SEVIRI observations. *EUMETSAT Tech. Memo.*, 9: 27.

Lee, T.-H., D. Chesters, and A. Mostek, 1983. The impact of conventional surface data upon VAS regression retrievals in the lower tropopause. *J. Climate Appl. Meteor.*, 22: 1853-1874.

Ma, X. L., T. J. Schmit, and W. L. Smith, 1999. A nonlinear physical retrieval algorithm-its application to the GOES-8/9 sounder. *J. Appl. Meteor.*, 38: 501-513.

McClatchey, R. A., R. W. Fenn, J. E. A. Selby, F. E. Volz, and J. S. Garing, 1972. Optical properties of the atmosphere. 3rd ed. AFCRL-72-0497, AD 753075. Air Force Geophysical Laboratory, L.G. Hanscom Field, Massachusetts, 108 pp.

Menzel, W. P., F. C. Holt, T. J. Schmit, R. M. Aune, A. J. Schreiner, G. S. Wade, and D. G. Gray, 1998. Application of GOES-8/9 soundings to weather forecasting and nowcasting. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 79: 2059-2078.

Rao, P. A. and H. E. Fuelberg, 1997. Diagnosing convective instability from GOES-8 radiances. *J. Appl. Meteor.*, 36: 350-364.

- Saunders, R., M. Matricard, and P. Brunel, 1999. An improved fast radiative transfer model for assimilation of satellite radiance observations. *Q. J. R. Met. Soc.*, 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. *J. Appl. Meteor.*, 42: 1072-1091.
- Smith, W. L., H. M. Woolf, and A. J. Schreiner, 1985. Simultaneous retrieval of surface atmospheric parameters: A physical and analytically direct approach. *Advances in Remote Sensing Retrieval Methods*, A. Deepak, H. E. Fleming, and M. T. Chahine, Eds., A. Deepak publishing, 221-232.

