정지기상위성자료를 이용한 중규모 바람장 산출 알고리즘 최적화

김소명¹⁾ · 박정현²⁾ · 오미림^{1)*} · 조희제²⁾ · 손은하³⁾

¹⁾국립기상연구소 지구환경시스템연구과

²⁾서울대학교 지구환경과학부

³⁾국가기상위성센터 위성분석과

(접수: 2011년 9월 2일, 수정: 2011년 12월 19일, 게재확정일: 2011년 12월 21일)

Optimization of Mesoscale Atmospheric Motion Vector Algorithm Using Geostationary Meteorological Satellite Data

Somyoung Kim¹⁾, Jeong-Hyun Park²⁾, Mi-Lim Ou^{1)*}, Heeje Cho²⁾, and Eun-Ha Sohn³⁾

¹⁾Global Environment System Research Lab., National Institute of Meteorological Research, Seoul, Korea

²⁾School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University, Seoul, Korea

³⁾Satellite Analysis Division, National Meteorological Satellite Center, Jincheon, Korea

(Received: 2 September 2011, Revised: 19 December 2011, Accepted: 21 December 2011)

Abstract The Atmospheric motion vectors (AMVs) derived using infrared (IR) channel imagery of geostationary satellites have been utilized widely for real-time weather analysis and data assimilation into global numerical prediction model. As the horizontal resolution of sensors on-board satellites gets higher, it becomes possible to identify atmospheric motions induced by convective clouds (meso- β and meso- γ scales). The National Institute of Meteorological Research (NIMR) developed the high resolution visible (HRV) AMV algorithm to detect mesoscale atmospheric motions including ageostrophic flows. To retrieve atmospheric motions smaller than meso- β scale effectively, the target size is reduced and the visible channel imagery of geostationary satellite with 1 km resolution is used. For the accurate AMVs, optimal conditions are decided by investigating sensitivity of algorithm to target selection and correction method of height assignment. The results show that the optimal conditions are target size of 32 km $\times$ 32 km, the grid interval as same as target size, and the optimal target selection method. The HRV AMVs derived with these conditions depict more effectively tropical cyclone OMAIS than IR AMVs and the mean speed of HRV AMVs in OMAIS is slightly faster than that of IR AMVs. Optimized mesoscale AMVs are derived for 6 months (Feb. 2010-Jun. 2010) and validated with radiosonde observations, which indicates NIMR's HRV AMV algorithm can retrieve successfully mesoscale atmospheric motions.

Keywords: Mesoscale atmospheric motion vector, target size, grid interval, target selection method, low level correction

*Corresponding Author: Mi-Lim Ou, Global Environment System Research Lab., National Institute of Meteorological Research, 45 Gisaengcheong-gil, Dongjak-gu, Seoul 156-720, Korea
Phone : +82-070-7850-6703, Fax : +82-2-841-2787
E-mail: milim@korea.kr

1. 서 론

위성바람장 (Atmospheric Motion Vector, AMV)은 기상 위성의 관측 영상으로부터 산출되는 바람정보로서 직접 관측이 어려운 저위도 및 해양 등을 포함한

전 지구 영역에 대해 공백 없이 실시간 바람정보를 제공한다. 위성바람장은 현업에서 실시간 기상 분석 및 수치예보모델의 자료동화를 통해 예측성능 향상에 기여하고 있으며, 기후분야 등 다양한 기상 응용 분야에서 활용되고 있다 (Velden *et al.*, 2005; Negri *et al.*, 2010). 대부분의 기상위성 운영기관들은 중관 규모 위성바람장을 산출하기 위하여 15~60분 간격의 위성 영상과 한 변의 길이가 약 60~100 km인 정사각형의 표적 크기를 이용하여 바람장을 산출한다 (Borde *et al.*, 2010; Oyama, 2010; Bedka and Mecikalski, 2005).

최근 국제바람워크숍 (International Winds Workshop, IWW)에서는 보다 상세한 위성바람장 산출을 위하여 짧은 시간 간격의 영상과 작은 표적의 필요성이 제기된 바 있다 (Forsythe and Saunders, 2008). 위성바람장의 시·공간 해상도를 높임으로써 바람장의 정확도 향상뿐 아니라 자료의 활용 가치를 높일 수 있을 것이다. meso- β (20~200 km) 이하의 중규모바람은 비지균풍으로, 질량 분포를 통해 유추할 수 없으므로 이를 위성을 통해 직접 관측한다면 국지성 호우의 실태 분석 등 다양한 분야에 활용될 수 있다 (Velden *et al.*, 2005; Negri *et al.*, 2010). 따라서 위성바람장이 중규모 대기현상을 바르게 탐지하기 위하여 산출 해상도의 증가와 함께 표적의 크기 또한 충분히 작아져야 한다.

최근 위성바람장 산출 기관에서 중규모 바람장 산출 및 이의 활용연구가 활발히 진행되고 있다. UW-CIMSS (University of Wisconsin-Madison Cooperative Institute for Meteorological Satellite Studies)에 GOES-12 (Geostationary Operational Environmental Satellites-12)로부터 관측되는 적외채널 (10.7 μm)과 수증기채널 (6.75 μm) 영상 (4 km 해상도)을 이용하여 표적크기 20 km의 중규모 바람장을 산출하였고, 가시채널 (0.65 μm) 영상 (1 km 해상도)으로부터 표적크기 5 km의 중규모 바람장을 산출하였다 (Bedka and Mecikalski, 2005). EUMETSAT (European Organization for the Exploitation of Meteorological Satellites)에서는 MSG (Meteosat Second Generation)로부터 관측되는 적외채널 (10.8 μm)과 수증기채널 (6.2 μm) 영상 (3 km 해상도)을 이용하여 표적 크기 48 km의 중규모 위성바람장을 산출하고, 가시채널 (0.8 μm) 영상 (1 km 해상도)을 이용하여 표적 크기 24 km의 중규모 바람장을 산출하였다. 또한, 15분 간격의 일반 관측 모드에 비해 좁은 영역을 보다 짧은 시간 간격으로 관측하는 고속 스캔 모드 (rapid scan)의 5~10분 간격 영상을 이용하여 중규모 바람장을 산출하는 알고리즘을 개발하였고 라디오존데로부터 관측된 바람자료와의 검증 결과, 가시채널 중규모 위성 바람장의 정확도가 특히 높게 나타났다 (Carranza *et al.*, 2010; Garcia Pereda, 2010). 일본 기상청 기상위성센터에서는 MTSAT-2의 rapid scan

모드로 관측되는 4분, 7분과 일반모드 15분 간격의 영상으로부터 중규모 바람장을 산출하였고, 수치예보 모델의 자료동화를 통해 태풍 이동 경로 예측 성능을 향상시킨 바 있다 (Oyama, 2010; Yamashita, 2010).

위성바람장의 정확도는 바람장 산출 과정에서 벡터 추적 및 고도할당 방법에 의한 영향을 크게 받으며, 그와 관련한 주요 인자에 민감하게 반응한다 (Genkova *et al.*, 2010). 벡터추적은 연속된 위성영상들을 이용하여 영상간 상관도가 가장 높은 영역을 찾고 그 변위를 계산하는 과정으로, 추적에 쓰이는 표적의 크기와 표적간 간격, 표적의 중심위치를 결정하는 방법 등이 주요한 변수이다. 국립기상연구소 (National Institute of Meteorological Research, NIMR)는 최근 정지기상위성의 고해상도 가시채널을 이용하여 중규모 바람장 산출 알고리즘을 구축하였다. 중규모 대기 흐름을 반영한 밀도 높은 바람장을 산출함과 동시에 정확한 벡터의 생산을 위하여 알고리즘 내 주요 인자에 대한 민감도 실험을 통하여 알고리즘을 최적화하였다.

본 연구에서 중규모 위성바람장 산출을 위해 사용된 자료에 대하여 2절에서 설명하였으며, 3장에서는 알고리즘에 대하여 기술하였다. 중규모 위성바람장 산출 알고리즘의 최적화를 위해 수행한 민감도 실험 결과는 4장에서, 최적화된 알고리즘에 의해 산출된 중규모 위성바람장의 특성 분석과 검증 결과를 5장에서, 마지막으로 6장에서 요약과 결론을 기술하였다.

2. 자 료

본 연구에서는 일본의 정지궤도 기상위성 MTSAT-1R (Multi-functional Transport Satellite-1 Replacement) 자료를 이용하였다. MTSAT-1R에 탑재된 센서 JAMI (Japanese Advanced Meteorological Imager)는 4 km의 공간 해상도를 갖는 4개의 적외채널과 1 km의 공간 해상도를 갖는 1개의 가시채널을 갖고 있다. 본 연구에서 중규모 위성바람장 산출에 이용된 자료는 공간 해상도가 높은 0.65 μm 의 가시채널 영상이다. 표적추적을 위한 추적영역 결정과 바람벡터의 고도할당을 위하여 수치모델 자료가 활용되며, 기상청에서 2010년 5월부터 현업 운영중인 UM (Unified Model) 전구모델의 6시간 예보장을 이용하였다. 산출 알고리즘의 최적화를 위한 민감도 실험은 겨울철과 여름철을 대표하여 2010년 2월과 6월 자료를 이용하였다. 이로부터 결정된 최적 조건을 적용하여 2010년 1월부터 6월까지 중규모 위성바람장을 산출하고 검증하였다.

3. 중규모 위성바람장 산출 알고리즘 구축

기상청에서 운영중인 중관규모 위성바람장 산출 알

Fig. 1. Comparison of visible AMVs (4 km, blue colors) and high resolution visible AMVs (1 km, red colors) at 2315 UTC 24th May 2010 ($QI \geq 0.5$) for (a) all level, (b) high level (c) middle level (d) low level. Only 50% of all vectors are displayed.

고리즘은 4 km 해상도의 적외채널 ($10.8 \mu\text{m}$), 수증기 채널 ($6.75 \mu\text{m}$) 및 단파적외채널 ($3.75 \mu\text{m}$)과 1 km 해상도의 가시채널 ($0.65 \mu\text{m}$)을 4 km 해상도로 낮춘 위성 영상을 이용한다. 그러나 중규모 위성바람장은 중규모 현상을 표현할 수 있도록 표적의 크기와 영상간 시간간격이 결정되어야 하며, 고해상도의 위성관측자료가 사용되어야 한다. 국립기상연구소는 중규모 바람장 산출을 위하여 1 km 공간해상도와 15분 간격의 가시채널 영상을 이용하여, 약 1.1 ms^{-1} 의 관측 정밀도를 갖는 중규모 바람장을 산출할 수 있는 알고리즘을 구축하였다.

Fig. 1은 고해상도 가시채널을 이용하여 산출된 중규모 위성바람장과 4 km로 해상도를 낮춘 가시채널 중규모 위성바람장의 분포를 비교한 그림으로, 중규모 바람장은 빨간색으로, 중규모 바람장은 파란색으로 나타났다. 바람장 산출을 위하여 중규모의 경우는 24 km, 중규모의 경우는 96 km의 표적크기를 사용하였으며, 두 경우 모두 15분 간격의 위성 영상을 이용하였다. 그림에서 보는 바와 같이 중규모와 중규모 위성바람장은 전 층에서 유사한 흐름을 보이고 있으나, 중규모 위성바람장이 중규모 위성바람장보다 약 세 배 이상 많은 벡터를 산출하며, 중규모

Fig. 2. Flow chart of NIMR mesoscale AMV algorithm using 1km high resolution visible imagery.

모 위성바람장이 표현하지 못한 중규모 흐름을 보다 상세히 탐지하였다.

국립기상연구소 중규모 위성바람장 산출 알고리즘은 표적 선정, 고도할당, 벡터 추적, 품질 정보 생산의 4단계로 구성된다 (Fig. 2). 단계별 상세한 설명은 다음과 같다.

3.1. 표적 선정

표적은 일정한 시간 간격의 연속된 영상들을 비교하여 변위를 추적하기 위해 알고리즘 내에서 정의되는 단위영역이다. 국립기상연구소의 위성바람장 산출 알고리즘은 가로와 세로의 길이가 동일한 정사각형 표적을 사용한다. 표적의 크기가 변함에 따라 관측되는 바람의 시·공간 규모가 달라질 수 있으므로 표적의 크기는 벡터의 산출 해상도와 고도할당 시 적용하는 화소 비율 등 알고리즘 내 다른 산출 과정과의

일관성이 유지되도록 선정되었다.

화소별 구름 분석 자료를 이용하여 표적 내 구름 화소가 10% 이상인 경우를 구름표적으로, 그 이하인 경우를 청천표적으로 분류한다. 수증기채널 영상은 구름표적과 청천표적 모두에서 벡터가 산출되는 반면, 적외채널과 가시채널 영상은 구름표적에서만 바람장 산출이 가능하다. 따라서, 1 km 고해상도 가시채널 영상을 사용하는 중규모 위성바람장은 구름 화소가 10% 이상인 구름표적에서만 바람 벡터를 산출한다.

3.2. 고도할당

고도할당은 벡터의 정확한 고도를 결정함으로써 위성바람장의 정확도를 좌우하는 중요한 과정이다. 위성바람장의 고도할당을 위해 전 채널에서 공통적으로 이용되는 방법은 EBBT (Equivalent Black-Body Temperature) 방법이다 (Fritz and Winston, 1962). EBBT 방

법은 표적의 대표 휘도온도와 복사 모의를 통해 계산된 적외채널 휘도온도의 연직 프로파일을 비교하여 표적의 고도를 찾는다. 모의된 휘도온도의 연직 프로파일로부터 표적의 대표 휘도온도와 차이가 가장 작은 두 고도를 찾고, 이를 기준으로 연직 내삽하여 표적의 고도를 결정한다. 표적의 대표 온도는 표적 내 화소의 휘도온도가 낮은 순으로 나열하여 낮은 쪽 15%에 속하는 온도들의 평균으로 정의되며, 가시채널 위성바람장의 고도할당을 위하여 적외채널의 휘도온도가 사용된다. 표적 내 모든 구름 화소를 사용하지 않는 것은 공간상관계수를 이용한 벡터 계산 과정에서 상대적으로 온도가 낮은 상층의 움직임을 반영하기 때문이다.

적외채널 휘도 온도를 모의하기 위하여 RTTOV-9 (Radiative Transfer for TOVS) 복사전달모델을 사용한다 (Saunders *et al.*, 1999). RTTOV-9는 1013.3 hPa - 0.1 hPa 사이 43개의 등압면을 기준으로 UM의 온도와 습도 프로파일을 연직적으로 내 · 외삽한 초기 입력 자료를 이용하여 적분을 수행한다. 이 때 UM의 수평 격자점에서 각 등압면의 방출률이 1인 광학적으로 두꺼운 구름이 존재한다고 가정하여 적외채널 휘도 온도를 복사 모의한다. 수치 모델과 복사 전달 모델 자료는 위성바람장의 산출 시각과 각 표적의 위치를 고려하여 내삽된다.

3.3. 벡터 추적

벡터 추적을 위하여 연속되는 두 개의 위성 영상을 이용하여 변위를 계산하고, 이를 영상 간의 시간 차이로 나누어 바람 벡터를 산출한다. 이 때 표적의 이동을 추적하기 위해 교차상관 방법을 이용한다 (Merrill *et al.*, 1991). 교차상관 방법은 첫 번째 영상의 표적과 공간상관계수가 가장 높은 영역을 두 번째 영상에서 찾아 표적과 일치하는 영역으로 정의한다.

두 번째 영상에서 표적을 추적하기 위해 공간상관계수를 계산하는 영역을 추적 영역이라고 하는데, 추적 영역의 크기는 위성바람장이 관측할 수 있는 최대 풍속을 결정한다. 추적 영역이 작아짐에 따라 강한 바람이 부는 경우 잘못된 벡터를 산출하게 되고, 추적 영역이 커짐에 따라 실제 변위와 무관한 위치에서 최대 공간상관계수가 나타날 확률이 증가하여 벡터 산출 안정성이 저하된다. 이와 같은 문제점을 해소하기 위해 고정된 추적 영역 대신 표적의 이동위치를 예상하여 동적으로 결정하였다.

표적의 위치가 결정되고 고도가 할당되면 수치 모델의 바람 자료를 이용하여 표적의 이동 위치를 예상할 수 있다. 추적 영역의 중심을 예상 위치로 이동하면, 작은 크기의 추적 영역에서 큰 풍속의 바람을 관측할 수 있고, 작은 풍속의 바람을 지나치게 큰 영역

에서 추적하여 발생하는 추적 오류가 감소한다. 그러나 추적 영역을 지나치게 작게 설정하면 위성바람장이 전반적으로 수치 모델의 바람 예측과 유사해질 수 있으므로 주의해야 한다. 또한 고도 할당 알고리즘에서 고도를 잘못 추정할 경우에도 잘못된 예상 위치에서 벡터 추적이 이루어져 오류가 발생할 수 있다. 본 연구의 알고리즘은 수치 모델 바람의 풍속이 20 ms^{-1} 이상이면 추적 영역의 중심을 이동하고, 추적 영역의 크기는 동서류, 남북류 모두 $\pm 30 \text{ ms}^{-1}$ 의 관측 범위를 갖도록 설정되었다.

국립기상연구소의 중규모 위성바람장 산출 알고리즘은 안정적인 벡터 산출을 위해 15분 간격으로 관측된 연속적인 세 개의 영상으로부터 두 개의 벡터를 계산하고, 이를 평균하여 최종 벡터를 산출한다. 이 때 두 번째 영상의 구름 분석을 통해 표적이 결정되고 첫 번째와 세 번째 영상과의 비교를 통해 벡터 추적이 이루어진다. 산출된 두 벡터의 일관성은 최종 벡터의 품질을 결정하는 데에도 사용된다.

3.4. 품질 관리

선정된 표적에 고도가 할당되고, 표적 추적을 통해 벡터가 계산되면 품질검사를 통해 최종 바람 벡터를 산출한다. 품질검사 결과는 총 다섯 가지 검사를 통하여 QI (Quality Index)로 산출된다 (Holmlund, 1998). QI 산출을 위해 연속된 3개의 위성 영상에서 산출된 두 개의 벡터 간의 풍향 일관성, 풍속 일관성, 벡터 일관성 및 두 벡터의 단순 평균으로 계산되는 최종 벡터의 공간 균질성, 그리고 수치 모델 바람 자료와의 일관성 검사를 수행한다. 각각의 검사 결과는 0에서 1사이의 값으로 나타나며 높을수록 양질의 벡터를 의미한다. 최종적인 품질 정보 QI는 이들의 가중 평균으로 결정되며, 이 때 공간 균질성에 대한 가중값은 2, 나머지 요소들에 대한 가중값은 1로 부여된다.

4. 중규모 위성바람장 최적 산출을 위한 민감도 실험

중규모 위성바람장 산출 알고리즘을 최적화하기 위해 위성바람장의 산출 정확도에 영향을 미치는 주요 인자들에 대하여 민감도 실험을 수행하였다. 본 연구에서 민감도 실험 대상은 표적 선정 방법과 고도할당 보정 방법으로, 표적 선정 방법에는 표적 크기 및 격자 간격, 표적의 중심위치 결정 방법이 포함된다.

4.1. 표적 크기 및 격자 간격

표적 크기는 관측하고자 하는 기상 현상의 규모뿐 아니라 산출 정확도에도 영향을 미친다 (Jedlovec and Atkinson, 1996; Hillger and Vonder Haar, 1988). 표적

Fig. 3. Results of the target size sensitivity tests. The number of collocated vectors (bars), Vector-RMSEs (solid lines), and Speed-BIASes (dashed lines) in HRV AMVs ($QI \geq 0.85$) according to grid sizes. The HRV AMVs for all level (100-1000 hPa; blue) and Low level (700-1000 hPa; red). These results are extracted for (a) February and (b) June 2010.

크기의 변화에 따라 표적에 포함되는 화소의 수가 달라지고, 이것은 표적이 갖는 정보량을 의미한다. 표적

의 크기가 중규모 대기 현상을 포착할 수 있을 만큼 작아져야 하지만, 표적 추적이 가능할 정도의 충분한 정보량을 갖지 못하면 벡터의 산출 오차가 오히려 증가한다. 따라서, 중규모 위성바람장의 산출을 위해 오차를 고려한 적절한 표적크기 결정이 필요하다. 이를 위하여 96~24 km의 다양한 크기의 표적에 대하여 2010년 2월과 6월의 위성바람장을 산출하고, 라디오존데 관측 바람자료와 비교·검증하였다 (Fig. 3). 가시채널은 적외채널과 비교하여 지표와 하층운의 구별이 보다 뚜렷하여 하층 바람 산출에 높은 정확도를 가지고 활용되고 있다 (Ottenbacher *et al.*, 1997). Fig. 3의 민감도 실험 결과는 전체 층 (100~1000 hPa)과 하층 (700~1000 hPa)에 대해 각각 나타내었다.

그림에서 전체 층의 벡터-RMSE와 풍속-BIAS는 표적의 크기가 감소함에 따라 증가하는 경향을 보이며 이와 같은 검증 값의 변화 경향은 2월과 6월 모두 유사하게 나타난다. 2월에 하층 벡터 수가 전체 층의 벡터 수에서 차지하는 비율은 평균 77%였으나 6월에는 약 25%로 급격히 감소한다. 이는 여름철에 상층까지 발달하는 대류운 등 상층운의 비율이 증가하기 때문이다.

하층에서 각 기간에 대하여 표적 크기에 따른 검증 값의 변화 경향은 유사하게 나타나며, 표적 크기가 작아질수록 풍속-BIAS는 16% (표적 크기 32 km까지는 23%) 감소하고, 벡터-RMSE는 21% (표적 크기 32 km까지는 14%) 증가하였다. $QI \geq 0.85$ 일 때 산출되는 벡터의 수는 표적의 크기가 줄어들어 따라 증가하여 표적 크기 32 km로 작아지면 최대가 되는데, 이는 표적 크기가 96 km일 때 산출되는 벡터 수의 3배에 해당한다. 그러나 표적 크기 32 km를 기준으로 그 보다 작아지면 벡터 수가 오히려 감소한다. 이는 공간상관계수를 이용하여 벡터를 추적할 때 지나치게 작은 표적은 충분한 양의 정보를 포함하지 못하거나, 표적 내 구름 영상이 과도하게 균질하여 벡터 추적에 불리하기 때문이다 (Jedlovec and Atkinson 1996; Merrill *et*

Table 1. Results of the grid size sensitivity tests. The number of collocated vectors, Vector-RMSEs, and Speed-BIASes in HRV AMVs ($QI \geq 0.85$) according to grid sizes for February and June 2010. The grid sizes are selected as same as target sizes (T) or half of target sizes.

		Target Size (km)					
		96	80	64	48	32	24
Number of Collocated Vectors	Grid = T	1057	1609	2404	3594	5117	4934
	Grid = T/2	7139	9966	14593	21242	28688	27395
Vector-RMSE	Grid = T	5.51	5.43	5.52	5.71	5.94	6.41
	Grid = T/2	5.57	5.60	5.59	5.74	5.90	6.28
Speed-BIAS	Grid = T	1.20	1.42	1.35	1.41	1.53	1.75
	Grid = T/2	1.02	1.12	1.21	1.29	1.35	1.49

al., 1991). 6월에 산출된 벡터 수는 2월의 절반 수준으로 차이가 있으나 표적 크기에 따른 정확도의 변화 경향은 유사하다. 따라서 32 km 크기를 갖는 표적에서 비교적 오차가 작고 고품질 벡터수의 획득이 가능하여 최적 표적 크기 조건으로 결정하였다.

격자 간격 또한 중규모 위성바람장 산출시 고려되어야 할 인자이다. 격자 간격의 변화가 중규모 위성바람장의 품질에 미치는 영향을 평가하기 위해 격자 간격이 표적 크기와 동일한 기존의 경우와, 표적 크기의 절반인 경우에 대하여 조사하였다. 실험기간은 각각 2010년 2월과 6월이며, 이를 라디오존데 관측과 비교·검증하였다 (Table 1). 격자 간격이 반으로 작아짐에 따라 고품질의 벡터 수가 5배로 증가하고 풍속-BIAS가 약 9.5% 감소하여 긍정적인 결과를 보인다. 이는 표적의 중심위치를 등간격으로 이동하면서 두 영상간의 상관성이 높은 표적을 추적할 경우에 격자 간격이 작을수록 벡터 추적이 적절한 패턴이 포함될 가능성이 높기 때문이다. 한편 격자 간격이 절반으로 작아지면 중규모 위성바람장 계산 시간은 약 5배 증가하고, 가까운 격자에서 유사한 벡터들이 다수 산출될 수 있다. 따라서 격자 간격을 결정할 때에는 산출 벡터의 정확도와 시스템 환경에서의 계산비용을 고려하여야 한다. 본 연구에서는 입력 영상의 모든 화

소를 벡터 산출에 이용하도록 하고, 가까운 격자에서 필요 이상의 유사한 벡터들을 산출하지 않도록 최적 격자 간격을 표적 크기와 동일한 크기로 결정하였다.

4.2. 표적 중심위치 선정 방법

앞선 민감도 실험에서는 표적의 중심위치를 결정하기 위하여 등간격 표적 선정 방법 (regular target method)이 사용되었다. 이는 일정한 간격의 격자를 이동하며 표적을 선정하는 방식이다. 이러한 방법을 사용할 때 격자 간격은 위성바람장의 산출 해상도가 되며 격자 간격이 충분히 조밀하다면 특징적인 구름 화소를 갖는 적절한 표적을 포착해 낼 가능성이 높아진다. 적절한 표적을 포착하지 못하는 경우, 보다 많은 고품질의 벡터를 획득하기 위하여 최적의 표적 중심위치 선정 방법 (optimal target method)을 사용할 수 있다 (EUMETSAT, 2009). 이 방법은 등간격으로 결정된 표적의 위치에서 주변 화소들을 조사하여 특징적인 구름화소를 최대한 많이 포함하도록 중심위치를 재선정하는 방법이다. 표적의 중심위치를 재선정하는 과정은 표적 내 밝기 온도의 표준편차를 조사하여, 표적이 구름 경계와 같은 불규칙한 패턴을 최대한 포함하도록 중심위치를 결정한다 (Fig. 4).

표적의 중심위치를 결정하는 방법들에 대한 민감도를 조사하기 위해 각각의 방법을 적용하여 중규모 위성바람장을 생산하고, 라디오존데 바람장과 비교 검증하였다 (Table 2). 최적 표적 선정 방법을 적용한 결과, 풍속-BIAS와 벡터-RMSE가 각각 10%와 2% 감소했다. $QI \geq 0.85$ 인 벡터 수도 최적 표적 선정 방법을 적용할 경우 약 35% 증가한다. 따라서 최적 표적 중심위치 선정 방법을 적용하는 경우, 동일 격자 간격으로 표적 위치를 결정할 때보다 효과적인 표적 추적이 가능하며 정확도와 품질이 높은 벡터들을 다수 생산할 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 4. Schematic diagrams for the method to determine target position.

4.3. 하층 고도할당 보정 방법

본 연구에서 산출되는 위성바람장의 고도는 모든 채널 위성바람장의 고도할당에 공통적으로 이용되는

Table 2. Same as Table. 1 but for the method to determine target locations.

		Target Size (km)					
		96	80	64	48	32	24
Number of Collocated Vectors	Regular	1057	1609	2404	3594	5117	4934
	Optimal	1579	2244	3160	4740	5896	6155
Vector-RMSE	Regular	5.51	5.43	5.52	5.71	5.94	6.41
	Optimal	5.56	5.51	5.40	5.61	5.82	6.34
Speed-BIAS	Regular	1.20	1.42	1.35	1.41	1.53	1.75
	Optimal	1.07	1.23	1.28	1.43	1.46	1.60

EBBT 방법으로 결정되었다 (Fritz and Winston, 1962). EBBT 방법은 위성에서 관측된 적외채널 휘도 온도를 이용하여 표적의 대표온도를 결정하고 이를 복사 모델에 의해 모의된 연직 휘도 온도 자료를 비교하여 표적의 고도를 할당하는 방법이다.

중규모 위성바람장 산출을 위해 이용된 1 km 해상도의 가시채널 영상은 태양광이 있는 주간에만 반사광으로 관측되며 특히 하층운, 안개, 적설, 해빙 등 하층의 기상현상을 식별하는데 효과적이다. 가시채널에서의 하층운과 해수면의 반사도 차이는 적외채널에서의 하층운과 해수면의 온도 차이에 비해 훨씬 뚜렷하게 나타나므로, 가시채널이 하층운의 추적에 보다 효과적으로 이용된다 (Ottenbacher *et al.*, 1997). 본 절에서는 가시채널 위성바람장의 고도할당 정확도를 높이기 위해 몇 가지 하층 고도할당 보정 방법들에 대한 민감도 실험을 수행하였다. 하층 고도할당 보정을 위해 운저 (Cloud base)나 역전층을 이용하는 방법이

있으며, 운저보정 방법에 대한 민감도 실험은 국립기상연구소에서 적용 중인 Le Marshall *et al.* (1993)의 경험식과 EUMETSAT의 경험식을 대상으로 한다.

운저보정 방법은 하층운이 구름 최하층의 이동 속도로 움직인다는 사실 (Hasler *et al.*, 1979)을 이용하여 EBBT 방법으로 할당된 고도가 650 hPa 보다 낮은 층일 경우, 벡터의 고도를 구름층의 최하층으로 보정하는 방법이다. 이 때 운저 고도는 (1)의 경험식 (이하 Marshall 경험식)을 통해 결정된다 (Le Marshall *et al.*, 1993).

$$T_{base} = T_{EBBT} + \sqrt{2}\sigma_T \quad (1)$$

T_{base} 는 운저 온도이며, T_{EBBT} 는 표적의 평균 온도, σ_T 는 표적의 온도 표준 편차이다. 이 경험식에 의해 표적이 포함하는 화소들의 불균질한 정도에 따라 고도가 보정된다. 표적이 균질할수록 표준편차가 0에 가까워지고, 운저 고도는 EBBT 방법으로 할당된 고도

Fig. 5. Results of sensitivity test to Low Level Correction (LLC) methods; (a) no LLC method (b) Inversion Height Correction method, (c) Marshall Cloud Base Correction (CBC) method, and (d) EUMETSAT CBC method. HRV AMVs ($QI \geq 0.85$) are derived for February and June 2010 and compared with radiosonde wind observations below 650 hPa.

와 동일한 값을 갖게 된다.

EUMETSAT에서는 Marshall 경험식을 바탕으로 수정된 식 (2) (이하 EUMETSAT 경험식)을 이용하여 운저 고도를 계산한다 (EUMETSAT, 2009).

$$T_{base}(EUMETSAT) = T_{EBBT} + K \cdot \left[\frac{1 + \tanh \frac{(P_{EBBT} - P_{ebpt})}{P_{sc}}}{2} \right] \cdot \sigma_T \quad (2)$$

이 식에서 K 는 보정계수이고, P_{EBBT} 는 표적에 할당된 고도, P_{ebpt} 는 운저 기압의 경계값, P_{sc} 는 규모계수이다. EUMETSAT의 운저보정식은 기존 운저보정식

의 $\sqrt{2}$ 대신 $K \cdot \left[1 + \tanh \frac{(P_{EBBT} - P_{ebpt})}{P_{sc}} / 2 \right]$ 를 표적의

온도 표준편차에 곱한 값으로 고도를 보정한다. 이 식에 사용된 계수들은 모두 경험적으로 결정된 값들로 K 는 1.4, P_{ebpt} 는 650 hPa, P_{sc} 는 10을 대입한다. 표적에 할당된 고도가 677 hPa 이상이 되면 $\tanh$ 의 값이 0.99 이상이 되어 온도 표준편차에 곱해지는 값은 K 에 가까워진다.

역전층 보정은 복사 모의된 연직 프로파일에서 하부 역전층이 존재할 경우에 수행하며 운저의 속도로 이동하는 하층운은 주로 하부 역전층의 높이에서 발생함을 근거로 한다 (EUMETSAT, 2009). 역전층 보정은 표적에서 EBBT 방법으로 할당된 고도가 하부 역전층보다 하층에 존재할 경우, 할당된 고도를 역전층의 높이로 보정한다.

민감도 실험은 EBBT 방법으로 고도할당을 한 후 보정하지 않을 경우 (No LLC)를 비교 대상으로 하여 역전층 보정만 적용할 경우 (IHC), 역전층 보정 및 Marshall의 운저보정을 적용할 경우 (Marshall CBC), 그리고 역전층 보정 및 EUMETSAT 운저보정 방법을 적용할 경우 (EUMETSAT CBC)에 대해 수행하였다. Fig. 5는 각 경우에 대하여 위성바람장을 2010년 2월과 6월 두 달간, 보정이 적용되는 650 hPa 보다 하층의 위성바람장과 라디오존데 관측의 풍속을 비교하였다. 역전층 보정과 운저보정들은 보정을 하지 않은 경우의 벡터-RMSE, 4.25 ms⁻¹와 비교하여 IHC, Marshall CBC, EUMETSAT CBC의 경우 4.14 ms⁻¹(-3%), 4.00 ms⁻¹(-6%), 4.01 ms⁻¹(-6%)로 약간의 감소 효과를 보였으나, 풍속-BIAS는 0.56 ms⁻¹에서 0.61 ms⁻¹(+9%), 1.34 ms⁻¹(+139%), 1.35 ms⁻¹(+141%)로 증가하는 경향을 나타냈다.

그림에서 보정을 하지 않은 경우에 양의 오차를 갖는 벡터 (선 위쪽)들과 음의 오차를 갖는 벡터 (선 아래쪽)들이 상쇄되어 평균 풍속-BIAS가 비교적 작았으

Fig. 6. Comparison of visible channel (a) synoptic AMVs and (b) mesoscale AMVs for tropical cyclone OMAIS, 2315 UTC 23th March 2010 ($QI \geq 0.5$). The color of AMVs indicates the individual vector's height and only 50% of all vectors are displayed.

나, 보정 후 음의 오차를 갖는 벡터들이 감소하면서 평균 풍속-BIAS가 증가한 것으로 보인다. 하층 고도 할당 보정 방법들은 산출 벡터수를 14~60% 증가시켰는데 그림에서 일 대 일 선을 중심으로 산출 밀도가 높아진 것에 비추어 보아 풍속-BIAS의 절대값이 작은 벡터가 증가했음을 알 수 있다. 특히 역전층 보정 방법만 적용한 경우에 비해 운저보정까지 적용할 때 그 효과가 두드러진다. 두 운저보정 방법의 적용시 상관계수, 풍속-BIAS, 벡터-RMSE는 유사하지만, EU 운저보정식을 적용할 경우 산출 벡터수가 증가한다. 따라서 운저보정에 대한 최적 조건은 역전층 보정과 EUMETSAT 운저보정 방법을 동시에 사용하는 것으로 결정하였다.

Table 3. Validation results for NIMR and EUMETSAT mesoscale AMVs. The number of collocated vectors (NC), mean speed of radiosonde (SPD), mean vector difference (MVD), vector-RMSE (RMSE), and speed bias (BIAS) is shown (EUMETSAT data available at http://www.nwcsaf.org/scidocs/Documentation/SAF-NWC-CDOP-INM-SCI-PUM-09_v3.1.pdf).

	NIMR (Jan2010-Jun2010)	NWCSAF (Jul2009-Jun2010)
ALL level		
NC	43328 (100%)	82408 (100%)
SPD (m s^{-1})	16.99	19.18
MVD (NMVD)	4.88 (0.29)	5.95 (0.31)
RMSE (NRMSE)	6.25 (0.37)	7.48 (0.39)
BIAS (NBIAS)	1.31 (0.08)	-2.11 (-0.11)
High level		
NC	20644 (48%)	49252 (60%)
SPD (m s^{-1})	24.84	24.04
MVD (NMVD)	5.87 (0.24)	6.73 (0.28)
RMSE (NRMSE)	7.27 (0.29)	8.41 (0.35)
BIAS (NBIAS)	1.48 (0.06)	-2.64 (-0.11)
Middle level		
NC	5444 (13%)	18338 (18%)
SPD (m s^{-1})	14.69	13.55
MVD (NMVD)	5.59 (0.38)	5.28 (0.39)
RMSE (NRMSE)	7.28 (0.50)	6.50 (0.48)
BIAS (NBIAS)	1.54 (0.10)	-1.63 (-0.12)
Low level		
NC	17240 (40%)	14818 (18%)
SPD (m s^{-1})	8.32	9.98
MVD (NMVD)	3.48 (0.42)	4.29 (0.43)
RMSE (NRMSE)	4.26 (0.51)	5.09 (0.51)
BIAS (NBIAS)	1.04 (0.13)	-1.00 (-0.10)

5. 중규모 위성바람장 산출 및 검증 결과

4장에서는 민감도 실험을 통하여 표적 선정 시 표적 크기는 32 km로, 격자 간격은 표적 크기와 같은 32 km로, 최적 표적 위치 선정 방법을 이용하도록 최적 조건을 결정하였다. 고도할당 보정은 EBBT 방법으로 할당된 고도를 역전층 보정과 EUMETSAT 운저 보정식을 이용하여 하층바람장의 고도를 보정하도록 하였다. 본 장에서는 최적화된 알고리즘을 통해 중규모 위성바람장을 산출하고, 표적 크기가 96 km인 중

관규모 위성바람장과 특성을 비교하였다. 또한 2010년 1월부터 6월까지 6개월간 중규모 위성바람장을 산출하여 라디오존데 바람 관측 자료와 검증하고, 이를 EUMETSAT에서 산출된 중규모 위성바람장의 검증 결과와 비교하였다.

5.1. 종관규모 위성바람장과의 비교

최적화된 알고리즘을 통해 산출된 중규모 위성바람장의 특성을 파악하기 위해 종관규모 위성바람장과 비교 분석하였다. 이를 위해 2010년 3월 23일 2315 UTC의 필리핀 동쪽의 서태평양 상에 발생한 태풍 오마이스 사례를 선정하고 위성바람장을 산출하였다. Fig. 6은 사례일의 중규모 위성바람장과 종관규모 위성바람장의 분포 그림으로 품질 계수가 0.5 이상인 벡터만 표출하였다.

그림에서 중규모 위성바람장이 종관규모 위성바람장에 비하여 고품질의 벡터가 2배 이상 많이 산출되어 태풍 주변의 대기의 흐름을 보다 뚜렷하게 표출하고 있다. 또한 각 벡터들의 풍향이 저기압 흐름의 곡률을 보다 세밀하게 표현한다. 이는 중규모 바람장 산출에 이용된 고해상도 가시채널 영상의 해상도가 종관규모 바람장 산출에 이용된 영상에 비해 4배 높기 때문이다. 이러한 차이가 고해상도 가시채널 영상을 이용한 위성바람장이 중규모 대기 운동의 관측을 충분히 가능하도록 한다. 사례에서 중규모 바람장의 평균 풍속은 8.63 ms^{-1} 로 종관규모 8.30 ms^{-1} 에 비해 약 4% 강하게 표현되며 이와 같은 풍속의 차이는 보다 정밀한 태풍 강도 분석에 활용될 수 있다.

5.2. 라디오존데와의 비교 검증

최적화된 고해상도 가시채널 위성바람장 산출 알고리즘을 통하여 계산된 중규모 위성바람장의 정확도를 평가하기 위하여 라디오존데의 바람자료와 비교 검증을 수행하였다. 이를 위해 CGMS (Coordination Group for Meteorological Satellite) 권고 사항에 따라 QI 의 하한 경계값으로 0.85가 적용되었다. 검증 반경은 수평 150 km, 연직 25 hPa로, 라디오존데 풍속과 30 ms^{-1} 이상 차이 나지 않으며, 풍향이 90° 이상 차이가 나지 않는 벡터들만 검증 대상에 포함하였다. 중요한 검증 지수로 벡터-RMSE와 풍속-BIAS, 위성바람장과 라디오존데 바람장의 평균 차이를 나타내는 MVD (Mean Vector Difference)가 계산되었다 (Nieman *et al.*, 1997). 검증을 위해 이용한 자료의 기간은 2010년 1월부터 6월까지 6개월이다.

Table 1은 본 연구에서 최적화시킨 국립기상연구소의 고해상도 가시채널 위성바람장 산출 알고리즘으로부터 생산된 중규모 위성바람장과 대표적인 위성바람장 산출 기관인 EUMETSAT의 중규모 위성바람장의

검증 결과를 비교한 것이다. EUMETSAT에서는 MSG 위성으로부터 2009년 7월 - 2010년 6월의 일 년간 산출된 중규모 위성바람장을 라디오존데 자료와 비교 검증한 결과를 공개하였다 (NWCSAF, 2011). 통계적으로 계산된 검증지수는 계절적으로 변하는 풍계의 특성을 반영하므로 분석 기간이 다른 검증 지수를 서로 비교하기 위하여 검증지수를 라디오존데 평균 풍속으로 나누어 표준화 (Normalize)하여 NMVD, 벡터-NRMSE, 풍속-NBIAS를 계산하였다..

전체 층에서 산출된 $QI \geq 0.85$ 인 벡터 수는 국립기상연구소와 EUMETSAT 각각 43328개와 82408개로 검증에 이용된 자료의 기간과 비례한다. 그러나 전 층에 대한 하층 벡터 수의 비율은 각각 40%와 18%로 NWCSAF에 비해 하층 벡터 수가 차지하는 비율이 약 두 배 높다. 검증에 이용된 라디오존데 관측 바람의 평균 속력은 전체 층에서 각각 16.99 ms^{-1} 와 19.18 ms^{-1} 로 국립기상연구소의 알고리즘이 2.19 ms^{-1} 느리게 나타난다. 이와 같은 차이는 검증 기간과 관측 위성의 차이 및 바람장의 지역별 기상학적 특성 차이에서 기인할 수 있다.

두 기관에서 산출된 검증값 NMVD, 벡터-NRMSE, 풍속-NBIAS 사이의 차이가 크지 않으며, 중층의 NRMSE와 하층의 NBIAS 외 다른 항목에서는 국립기상연구소의 중규모 바람장이 다소 나은 값을 보였다. 이러한 결과는 국립기상연구소의 최적화된 고해상도 가시채널 위성바람장 산출 알고리즘이 중규모 위성바람장을 EUMETSAT과 통계적으로 유사한 정확도의 바람장을 산출함을 증명한다.

6. 요약 및 결론

본 연구에서는 중규모 위성바람장을 산출하기 위하여 해상도가 1 km인 가시채널 위성 자료를 이용하는 위성바람장 산출 알고리즘을 구축하고, 민감도 실험을 통하여 최적화하였다. 더불어 이로부터 산출된 중규모 위성바람장의 특성을 중관규모 위성바람장과 비교·분석하고, 라디오존데 관측 자료를 이용하여 검증하였다.

고해상도 가시채널 위성바람장의 최적화 연구를 위해 바람장의 정확도에 주요한 영향을 주는 인자인 표적 선정방법과 고도할당 보정방법에 대한 민감도가 조사되었다. 그 결과로부터 최적 표적 크기는 32 km, 격자 간격은 표적 크기와 같은 32 km로 선정되었다. 표적의 위치결정은 일반적인 등간격 격자 (regular target method)를 이용하는 것보다 최적 중심위치 선정 방법 (optimal target method)을 적용할 때, 보다 밀도 높은 바람장 산출 및 산출바람장의 정확도 개선 결과를 보였다. 이는 본 알고리즘 내에서 공간상관계수를 이용

하여 벡터를 추적할 때 특징적인 구름 화소들이 최대한 포함되도록 중심위치를 선정하는 것이 등간격 격자를 이용하는 경우에 비해 효과적임을 보인다.

하층 고도할당 보정 방법의 민감도 실험 결과, 하층 고도할당 보정 방법들이 속력-Bias를 증가시키는 것으로 보인다. 그러나 실제로는 하층은 보정이 음의 속력-Bias를 갖는 벡터를 감소시켰으며, 이에 따라 속력-BIAS가 증가하는 것으로 보이는데 비해 하층은 보정을 하지 않은 경우 음의 속력-BIAS를 갖는 벡터들이 양의 속력-BIAS를 갖는 벡터들을 상쇄시키는 효과를 보였다. 민감도 실험 결과 EUMETSAT 운저보정식을 적용하는 경우 속력-BIAS의 절대값이 작은 영역에서 가장 많은 벡터가 산출되며, 따라서 이를 적용하도록 최적화되었다.

민감도 실험을 통해 최적화된 고해상도 가시채널 위성바람장 알고리즘으로부터 산출된 중규모 위성바람장의 검증을 위하여 2010년 1월부터 6월까지의 자료를 이용하여 라디오존데 관측 자료와 비교하였다. 태풍 오마이스 사례에 대한 분석 결과, 중규모 위성바람장은 중관규모 위성바람장에 비해 태풍의 구조를 보다 상세히 묘사하며, 하층에서 평균 풍속이 다소 빠르게 산출되는 경향을 보인다. 이와 같은 차이는 수치 모델의 초기장에 영향을 주어 특히 고해상도의 중규모 모델의 예보 성능에 기여할 것으로 예상된다 (Yamashita *et al.*, 2010). 분석기간 동안의 하층 바람장의 속도-NBIAS는 0.13으로 존데 바람보다 약간 빠르지만 대표적인 위성바람장 산출기관의 중규모 위성바람장과 비슷한 정확도를 갖고 산출됨을 알 수 있었다. 이러한 연구결과는 국립기상연구소에서 개발하여 최적화된 고해상도 가시채널 위성바람장 알고리즘이 중규모 바람장을 성공적으로 산출함을 보여준다.

중규모 위성바람장은 국지성 호우를 동반하는 강한 대류현상의 실시간 분석은 물론 고해상도 중규모 모델의 초기장으로 이용되어 예보 능력의 향상에 큰 도움이 될 것으로 기대된다. 고해상도 가시채널 위성바람장 산출 알고리즘을 이용한 중규모 바람장의 효과적인 활용 과 지속적인 개발을 위하여 향후 우리나라 독자 기상위성인 천리안의 관측 자료를 기반으로 한 중규모 위성바람장 산출 알고리즘의 구축을 준비하고 있으며, 더불어 고도할당 정확도 개선과 품질관리에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 연구는 국립기상연구소 지구환경시스템연구과의 주요사업 "관측 기술 지원 및 활용 연구" 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

- Bedka, K. M. and J. R. Mecikalski, 2005: Application of satellite-derived atmospheric motion vectors for estimating mesoscale flows. *Appl. Meteor.*, **44**, 1761-1772.
- Borde, R., G. Dew, A. De Smet, and J. B. Gustaffson, 2010: Improvements to EUMETSAT AMVs. *Proc. 10th Int. Winds Workshop*, Tokyo, Japan, EUM P.56, ISSN 1023-0416.
- Carranza M., De Smet, A., Gustafsson, J., 2010: Atmospheric motion vectors derived from MSG rapid scanning service data at EUMETSAT. *Proc. 10th Int. Winds Workshop*, Tokyo, Japan, EUM P.56, ISSN 1023-0416.
- EUMETSAT, 2009: MSG Meteorological products extraction facility algorithm specification documents., v5.
- Forsythe, M. and Saunders, R., 2008: AMV monitoring: results from the 3rd NWP SAF analysis, *Proc. 9th Int. Winds Workshop*, Annapolis, Maryland, USA, EUM 51, ISSN 1023-0416.
- Fritz, S. and J. S. Winston, 1962: Synoptic use of radiation measurements from satellite TIROS-II. *Mon. Wea. Rev.*, **90**, 1-9
- Garca Pereda, J., 2010: New developments in the high resolution winds product (HRW), at the satellite application facility on support to nowcasting & very short range forecasting (NWCSAF). *Proc. 10th Int. Winds Workshop*, Tokyo, Japan, EUM P.56, ISSN 1023-0416.
- Genkova, I., R. Borde, J. Schmetz, C. Velden, K. Holmlund, M. Forsythe, J. Daniels, N. Bormann, and P. Bauer, 2010: Global Atmospheric Motion Vector inter-comparison study. *Proc. 10th Int. Winds Workshop*, Tokyo, Japan, EUM P.56, ISSN 1023-0416.
- Hasler, A. F., Skillman, W. C., Shenk, W. E., and Steranka, J., 1979: In Situ Aircraft Verification of the Quality of Satellite Cloud Winds over Oceanic Regions. *J. appl. Met.*, **18**, 1481-1489
- Hillger, D. W., and T. H. Vonder Haar, 1988: Estimating noise levels of remotely sensed measurements from satellites using spatial structure analysis. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **5**, 206 - 214.
- Holmlund, K., 1998: The utilization of statistical properties of satellite-derived atmospheric motion vectors to derive quality indicators. *Wea. Forecasting*, **13**, 1093-1104.
- Jedlovec, G. J., and R. J. Atkinson, 1996: Quality and control of water vapor winds. *Proc. 8th Conf. on Satellite Meteorology and Oceanography*, Atlanta, GA, *Amer. Meteor. Soc.*, 5-8.
- Le Marshall, J., N. Pescod, A. Khaw, and G. Allen, 1993: The real-time generation and application of cloud-drift winds in the Australian region. *Aust. Met. Mag.*, **42**, 89-103
- Merrill, R. T., W. P. Menzel, W. Baker, J. Lynch, and E. Legg, 1991: A report on the recent demonstration of NOAA's upgraded capability to derive satellite cloud motion winds. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **72**, 372-376.
- Negri, R. G., Machado, L. A. T., and Borde R., 2010: A tool to detect inner cloud top dynamics of deep convective system. *Proc. 10th Int. Winds Workshop*, Tokyo, Japan, EUM P.56, ISSN 1023-0416.
- Nieman, S. J., W. P. Menzel, C. M. Hayden, D. Gray, S. Warzong, C. S. Velden, and J. Daniels, 1997: Fully automated cloud-drift winds in NESDIS operations. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **78**, 1121-1133.
- NWCSAF, 2011: Product User Manual for "High Resolution Winds" (HRW-PGE09 v3.1) (available at http://www.nwcsaf.org/scidocs/Documentation/SAF-NWC-CDOP-INM-SCI-PUM-09_v3.1.pdf).
- Ottenbacher, A., M. Tomassini, K. Holmlund, and J. Schmetz, 1997: Low-level cloud motion winds from Meteosat high-resolution visible imagery. *Wea. Forecasting*, **12**, 175-184.
- Oyama, R., 2010: Recent upgrades of and activities for atmospheric motion vectors at JMA/MS. *Proc. 10th Int. Winds Workshop*, Tokyo, Japan, EUM P.56, ISSN 1023-0416.
- Saunders R. W., M. Matricardi, and P. Brunel, 1999: An improved fast radiative transfer model for assimilation of satellite radiance observations. *Quart. J. Royal Meteorol. Soc.*, **125**, 1407-1425.
- Velden, C. S., J. Daniels, D. Stettner, D. Santek, J. Key, J. Dunion, K. Holmlund, G. Deniel, W. Bresky, and P. Menzel, 2005: Recent innovations in deriving tropospheric winds from meteorological satellites. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **86**, 205-223.
- Yamashita, K., 2010: Observing system experiments of MTSAT-2 rapid scan atmospheric motion vector for T-PARC2008 using the JMA operational NWP system. *Proc. 10th Int. Winds Workshop*, Tokyo, Japan, EUM P.56, ISSN 1023-0416.