

## 천리안 위성 적외영상 자료를 이용한 태풍강풍반경의 산출

이윤경\* · 권민호

한국해양과학기술원 해양순환·기후연구센터

(접수일: 2015년 8월 10일, 수정일: 2015년 8월 21일, 게재확정일: 2015년 8월 21일)

### An Estimation of the of Tropical Cyclone Size Using COMS Infrared Imagery

Yoon-Kyoung Lee\* and MinHo Kwon

Ocean Circulation and Climate Research Center, Korea Institute of Ocean and Science Technology, Ansan, Korea

(Manuscript received 10 August 2015; revised 21 August 2015; accepted 21 August 2015)

**Abstract** An algorithm to symmetric radius of  $15 \text{ ms}^{-1}$  isotaches of tropical cyclones is suggested using infrared (IR) imagery of geostationary satellite. It is assumed that symmetric tangential winds outside the maximum winds exponentially decrease with the radial distances of the tropical cyclone, which has a clear eye-wall structure. Four parameters for estimation of the tropical cyclone size are center location, maximum sustained wind, radius of the maximum wind, and relaxation coefficient for the decreasing rate with distances of the tropical cyclone. The estimation results are limitedly verified as comparing to surface winds of polar orbiting satellite such as ASCAT data.

**Key words:** Tropical cyclone, infrared satellite imagery, COMS, radius of maximum wind, geostationary satellite

## 1. 서 론

태풍의 크기와 강도는 태풍의 영향을 예측하거나 태풍의 바람 구조를 설명하는 데 중요한 인자이며 이는 태풍에 의한 재해와 관련이 있다. 태풍의 강도는 최대 지속 풍속이나 태풍 중심의 최소 해면기압으로 표현될 수 있으며, 그 자체도 중요하지만 태풍의 진로를 예측하는 데에도 중요하게 활용이 된다(Chan and Kepert, 2010). 태풍의 크기는 중심에서부터 최대 풍속이 나타나는 거리의 평균, 또는 강풍 바람의 평균 반경으로 정의된다(Holland and Merrill, 1984; Merrill, 1984; Demuth et al., 2006). 태풍의 크기를 측정하는 방법은 여러 연구자들에 의해 제안되어 왔다. 많은 연구자나 현업 예보자들은  $15$  또는  $17 \text{ ms}^{-1}$ 의 표층 바람의 평균 반경을 태풍의 크기를 정의하는 방법을

일반적으로 사용한다. Brand (1972)와 Merrill (1984)은 태풍의 중심에서부터 외부폐등압선(outermost-closed surface isobar)까지의 평균 반경을 태풍의 크기로 정의하였고(ROCI, radius of outermost closed isobar), Liu and Chan (1999)에서는 상대와도가  $1 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 으로 감소할 때의 평균 반경을 태풍의 크기로 정의하였다. 그러나 아직까지 모든 연구자들이 공통적으로 받아들이는 태풍 크기의 정의는 없다. 그러나 기상청에서는 태풍의 영향권으로  $15 \text{ ms}^{-1}$ 의 등풍속선(이후 강풍반경)을 많이 사용하므로 강풍반경을 태풍의 크기로 정의하고 태풍의 영향권이라고 고려하였다.

한편, 태풍의 중심에서 최대풍속이 나타나는 곳까지의 거리인 최대풍속반경(radius of maximum wind)은 그 부분에서 최대강수가 나타나기 때문에 예보에 제공되어야 하는 유용한 정보이며, 태풍 진로 및 강도 예측에 있어서도 중요한 매개변수이다(Hsu and Babin, 2012).

태풍은 일생의 대부분을 해상에서 보내기 때문에 직접 관측이 어렵다. 태풍의 직접관측을 위한 항공관측, 드롭존데 등의 해상 관측 자료가 필요하지만 해

\*Corresponding Author: Yoon-Kyoung Lee, Ocean Circulation and Climate Research Center, Korea Institute of Ocean and Science Technology, 787 Haeam-ro, Sangnok-gu, Ansan, Gyeonggi-do 426-744, Korea.  
Phone : +82-31-400-7874, Fax : +82-31-408-5829  
E-mail : yklee77@kiost.ac.kr

상에서의 자료의 불연속성 등으로 자료가 상대적으로 부족하다. 따라서 태풍을 이해하기 위해 위성자료의 이용이 요구되며 이에 대한 연구가 많이 진행되어 왔다. 특히, 정지궤도 위성(geostationary satellite)은 실시간으로 태풍의 중심, 최대풍속, 최소해면기압 등 태풍의 중요한 매개변수를 추정할 수 있는 적외영상 자료를 제공해 준다. 태풍의 최대풍속은 ADT (Advanced Dvorak Technique)에 의해 산출될 수 있다(Olander and Velden, 2007). ADT는 구름의 모양과 태풍의 강도의 관계를 이용하여 적외영상 영상으로부터 태풍의 강도를 개략적으로 추정하는 방법으로 그 정확도는 다소 떨어지는 한계점을 갖고 있으나, 다른 선택적 방법이 거의 없으므로 태풍을 모니터링하고 분석하는 대부분의 기관에서 태풍의 세기를 분석하는 데 이 방법을 주로 사용한다. 태풍의 최대풍속반경도 적외영상 영상으로부터 직접 산출될 수 있다(Kossin et al., 2007; Lajoie and Walsh, 2008; Kwon, 2012). 그러나 태풍의 크기는 태풍이 해상에 있을 때  $15 \text{ ms}^{-1}$  등풍속선까지의 거리와 같은 매개변수를 추정하기가 어렵고 적절한 방법이 알려져 있지 않다. 극궤도 위성(polar orbiting satellite)의 해상풍자료는 강풍반경을 산출하는 데 적절하지만, 일반적으로 위성이 태풍의 경로와 일치하지 않으므로 태풍의 매개변수 추정에 사용할 수 있는 극궤도 위성자료가 많지는 않다. 태풍의 크기를 정의하는 여러 가지 방법 중, 본 연구에서는 태풍의 영향권으로 태풍의 크기를 추정하였다. 적외영상 자료로부터 태풍의 대칭 등풍속선 중  $15 \text{ ms}^{-1}$  등풍속선을 태풍의 크기로 정의하여 이를 산출하는 알고리즘을 제안하고 제한적이기는 하지만 극궤도 위성의 해상풍 자료를 이용하여 이 알고리즘을 검증하고자 한다.

## 2. 자 료

본 연구에서 제안된 강풍반경 알고리즘을 검증하기 위하여 EUMETSAT (the Europe organization for the exploitation of Meteorological Satellites) MetOp-A 위성 상에 장착된 ASCAT (Advanced Scatterometer) 자료가 사용되었다. ASCAT 해상풍자료는 25 km의 수평 해상도를 가지며 3분 간격의 시간해상도를 갖는다. 적외영상자료로 천리안위성 자료가 이용되었다. 천리안 위성은 통신해양기상위성(Communication, Ocean, and Meteorological Satellite; COMS)으로 2010년 6월 국내기술로 개발된 국내 최초의 다목적 정지궤도 위성이다. COMS 위성의 적외영상 자료는 5 km 수평해상도를 가지고 있으며 북동아시아와 서태평양 지역을 포함하고 있다.

태풍 바람구조의 통계적 특성을 파악하기 위하여 YOTC (the Year Of Tropical Convection) 자료가 활용되었다. YOTC 자료는 열대지역 대류활동을 이해하

기 위하여 위성자료와 실관측자료를 모아 전구모형으로 재구성된 고해상도 재분석자료이다(Moncrieff et al., 2012). 기간은 2008년 5월 1일부터 2010년 4월 30일까지 2년이며, 공간 수평해상도는 0.125도로 약 14 km이다. 여기서는 10 m 바람자료를 이용하였다. 태풍 추출을 위해 태풍 경로 자료로 일본의 RSMC (Regional Specialized Meteorological Center)의 최적경로(best track) 자료가 활용되었다. RSMC 최적경로자료는 북서태평양에 대하여 0.1도 간격으로 태풍중심위치, 최대 풍속 등의 자료를 제공한다.

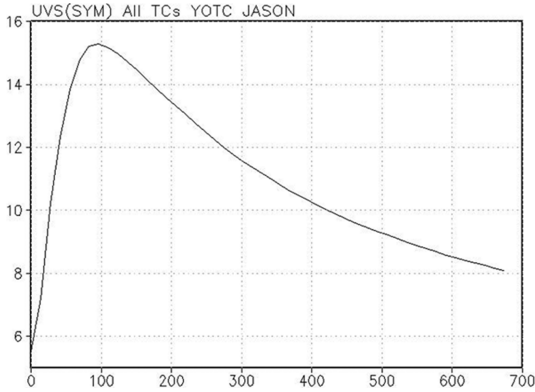
## 3. 적외영상을 이용한 강풍반경 산출 알고리즘

기상청은 태풍의 영향권으로 태풍의  $15 \text{ ms}^{-1}$  등풍속선(이후 강풍반경)을 많이 활용한다. 그러나 바다에서 태풍에 대한 직접 관측자료는 매우 부족하기 때문에 강풍반경을 관측자료로부터 직접 산출하는 것은 매우 어렵다. 그러므로 대부분의 경우에 다른 관측자료로부터 간접적인 방법으로 강풍반경을 추정해야 한다. 태풍의 바람구조를 모니터링하고 예측하는데 주로 위성자료가 많이 활용이 되는데, 특히 적외영상자료를 이용하여 태풍의 바람구조의 개략적인 특징을 알 수 있다. 여기서는 이 적외영상자료를 이용한 강풍반경의 추정법을 제안하고자 한다.

태풍의 수평 바람구조를 파악하기 위하여 YOTC 고해상도 재분석자료가 활용되었다. 제공되는 자료의 기간 2008년 5월부터 2010년 4월까지 북서태평양에서 발생한 열대 저기압에 대하여 RSMC 최적경로에 기반하여 10 m 지상 부근 풍속을 모두 추출하였다. 모두 514 가지의 경우가 추출되어 분석에 활용되었다. 태풍의 수평 지상 근처 바람은 일반적으로 이동방향 오른쪽에서 강하고 왼쪽에서 약한 비대칭적인 구조를 갖지만, 접선방향으로 평균한 대칭 바람구조는 보편적으로 접선바람이 가장 강한 최대풍속반경(radius of the maximum wind)에서부터 지수적으로 감소하는 모습을 갖는다(Fig. 1). 그러므로 강풍반경을 구하기 위해서는 태풍의 최대풍속반경, 그곳에서의 최대풍속 그리고 지수적으로 감소하는 정도 등의 정보가 필요하다. 이 정보를 모두 알 수 있다면 강풍반경  $R_{15}$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_{15} = R_{MAX} - \frac{1}{a} \log \frac{V_{15}}{V_{MAX}}$$

여기서  $R_{MAX}$ 는 최대풍속반경,  $V_{MAX}$ 는 최대풍속반경에서의 태풍의 최대풍속, 그리고  $a$ 는 완화계수(relaxation coefficient)이다. 각 반경의 단위는 km이고, 완화계수의 단위는  $\text{km}^{-1}$ 이며, 최대풍속의 단위는  $\text{ms}^{-1}$ 이다.

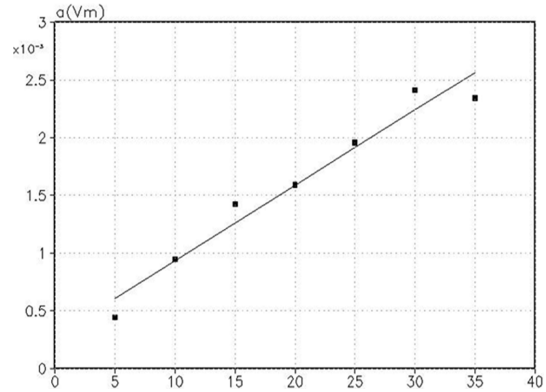


**Fig. 1.** Symmetric components of the averaged 10-m wind speed of the tropical cyclones detected from the YOTC high-resolution reanalysis. Unit is  $\text{ms}^{-1}$ . Horizontal axis is the distance from the center of tropical cyclone. Unit is km.

최대풍속반경은 태풍의 눈의 크기를 이용하는 방법 (Kossin et al., 2007), 태풍의 중심에서 구름 상단 최저온도까지의 거리를 이용하는 방법(Hsu and Babin, 2005; Kwon, 2012)이 있다. 또한 Lajoie and Walsh (2008)는 태풍 눈의 구조에 대한 연구를 기반으로 이 둘을 모두 이용하여 최대풍속반경을 산출하는 방법을 제안하였고,  $h$ 를 구름 구조에 대한 매개변수라고 했을 때, 태풍의 최대풍속반경은 다음과 같다.

$$R_{MAX} = (1 - h)R_{TOP} + hR_{EYE}.$$

여기서  $R_{TOP}$ 은 태풍중심에서 구름 상단 최저온도가 나타나는 곳까지의 거리이고,  $R_{EYE}$ 는 태풍의 눈의 크기이다.  $h$ 는 항공관측, 드랍존데 등의 관측자료를 이용한 결과 평균적으로 약 0.6의 값을 갖는다. Lajoie and Walsh (2008)는  $h$ 를 0.6으로 고정하였을 때 산출된 최대풍속반경과 항공관측 등으로 산출된 최대풍속반경이 매우 유사함을 보였다.  $R_{TOP}$ 은 적외 위성자료로부터 산출된 흑체 밝기온도(blackbody brightness temperature)의 최소값이 나타나는 지점과 태풍의 중심과의 거리를 구하여 산출할 수 있으며,  $R_{EYE}$ , 즉 태풍의 눈의 크기는 태풍 중심 부근의 흑체 밝기온도가 주변보다 높고 구름최저온도가  $-50^{\circ}\text{C}$  이하인 경우에  $-45^{\circ}\text{C}$  등온선과 태풍 중심까지의 평균 거리로 정의될 수 있다. 이에 대한 자세한 방법은 Kossin et al. (2007)에 제시되었다. 태풍 중심부근에 흑체 밝기온도가 주변보다 높다는 것은 태풍의 중심에 온난핵(warm core)이 형성되어 있다는 것을 의미하고, 태풍이 충분히 성장하여 그 눈이 비교적 뚜렷하다는 것을 의미한다. 즉, 위 방법은 태풍의 눈이 뚜렷한 경우에만 산출할 수 있는 한계점이 있다.



**Fig. 2.** Histogram of the relaxation coefficients of the tropical cyclones. Bin size is  $5\text{ms}^{-1}$ . The straight line is fitted to the histogram by the least square method.

태풍의 최대풍속 즉,  $V_{MAX}$ 는 ADT (Advanced Dvorak Technique)에 의해 산출될 수 있다. 또한, ADT에는 태풍의 최대풍속반경에 대한 Kossin et al. (2007)의 산출법이 포함되어 있다.

완화계수는 태풍의 대칭풍속( $V(r)$ )에 대하여 다음과 같이 정의된다.

$$a = \int_{R_{15}}^{R_{MAX}} \ln(V(r)/V_{MAX})dr / \int_{R_{15}}^{R_{MAX}} dr.$$

일반적으로 태풍에 따라 완화계수의 값은 다르다. 평균적인 관점에서 완화계수는 태풍이 강할수록 크고 태풍이 약할수록 작다. 강한 태풍인 경우 평균바람은 태풍 중심으로부터 거리에 따라 지수적으로 더 빨리 감소하고, 약한 태풍인 경우 평균바람은 상대적으로 덜 빨리 감소하기 때문이다. 실제 태풍의 세기 즉 태풍의 최대풍속( $V_{MAX}$ )에 따라 완화계수의 값에 대한 히스토그램을 보면 완화계수는 태풍의 최대풍속에 따라 선형적으로 증가하는 것을 알 수 있다(Fig. 2). 최소자승법을 이용하여 이 히스토그램에 적합된(fitted) 직선은 다음과 같다.

$$a = \alpha + \beta V_{MAX}$$

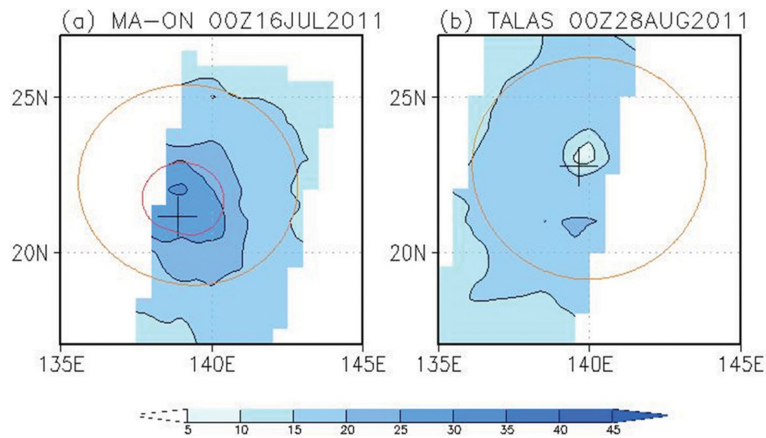
이다. 여기서  $\alpha$ 와  $\beta$ 는 상수로 다음과 같은 값을 얻는다.

$$\alpha = 2.78 \times 10^{-4} \text{ km}^{-1}$$

$$\beta = 6.54 \times 10^{-5} \text{ km}^{-1} \text{ m}^{-1} \text{ s},$$

따라서 적외 위성자료를 활용한 대칭풍속에 대한 태풍의 강풍반경은 다음과 같이 산출될 수 있다.

$$R_{15} = 0.4R_{TOP} + 0.6R_{EYE} - \frac{1}{\alpha + \beta V_{MAX}} \log \frac{V_{15}}{V_{MAX}}.$$



**Fig. 3.** Wind speed from the ASCAT satellite imagery (shaded) and 15 (orange) and 25 (red)  $\text{ms}^{-1}$  isotachs (contours) from the algorithm for the tropical cyclone (a) MA-ON and (b) TALAS cases. Cross marks indicate centers of the tropical cyclones from the RSMC best track dataset. See text for details.

태풍의 비대칭 바람구조는 일반적으로 태풍의 이동에 따라 만들어진 비대칭성을 포함하고 있다. 위성자료의 태풍의 분석시간과 태풍의 중심위치를 이용하여, 전 시간스텝(time step)과 다음 시간스텝의 각각의 태풍의 위치와 시간스텝으로 태풍의 이동속도를 추정할 수 있다. 태풍의 이동속도를 위 강풍바람을 갖는 대칭바람의 수평분포에 일정하게 더해지면 조금 더 현실적인 태풍의 지상 부근 바람 구조를 얻을 수 있다. 이와 같은 방법으로 얻어진 강풍반경을 Fig. 3에 나타내었다. 일반적으로 태풍과 극궤도 위성의 진로가 다르므로 태풍과 극궤도 위성이 동시에 같은 곳을 지나가는 경우는 많지 않다. Figure 3은 극궤도위성의 ASCAT 해상풍 자료가 태풍의 많은 부분을 커버하는 두 가지 경우를 보인다. 태풍 망온(MA-ON)은 강한 태풍이고, 태풍 탈라스(TALAS)는 약한 태풍의 경우이다. 황색선은 알고리즘에 의해 산출된 강풍반경 즉  $15 \text{ ms}^{-1}$  등풍속선을 나타내는데, 그림에서 보이듯이 두 경우 모두 비대칭적인 모양과 잡음(noise)이 있지만, ASCAT 자료의  $15 \text{ ms}^{-1}$  등풍속선과 비교적 잘 일치한다. 적색선은  $R_{15}$ 를 산출하는 식과 같은 방법으로 계산된  $25 \text{ ms}^{-1}$  등풍속선을 나타낸다.

#### 4. 토 의

정지궤도 적외영상을 이용한 간단한 강풍반경 산출 알고리즘을 제안하였다. 강풍반경을 산출하기 위하여 필요한 태풍의 매개변수는 태풍의 중심위치, 태풍의 최대풍속, 태풍의 최대풍속반경, 그리고 완화계수이다. 태풍의 중심위치와 최대풍속은 ADT에 의해 산출될 수 있고, 최대풍속반경은 적외영상의 흑체 밝기온도

로부터 직접 산출될 수 있으며, 완화계수는 최대풍속의 함수이므로 적외영상만으로 태풍의 강풍반경이 산출될 수 있다. 그러나 모든 산출 매개변수는 오차를 갖는데, 이 매개변수들의 오차는 산출된 강풍반경의 오차에 매우 민감하게 영향을 준다. 특히, 중심위치의 오차는 태풍 눈의 크기와 구름최저온도 위치의 오차와 관련이 있으므로 최대풍속 반경의 오차에 크게 영향을 줄 수 있다. 그러므로 강풍반경의 산출 정확도는 필요한 태풍의 매개변수의 산출 정확도에 크게 의존할 수밖에 없다.

본 연구에서 제안된 강풍반경 산출 알고리즘은 몇 가지 한계점을 가지고 있다. 우선 제안된 알고리즘은 태풍이 충분히 성장하여 그 눈이 분명한 태풍에 대해서만 적용이 가능하다는 것이다. 최대풍속반경을 구할 때 이 가정이 필요한데, 향후 태풍의 눈이 뚜렷하지 않은 경우에 최대풍속반경 산출 알고리즘이 개발된다면 이 문제로 해결이 가능하다. 또한, 제안된 알고리즘의 또 다른 문제는 아주 강한 태풍의 경우에는 완화계수 추정이 저평가(underestimate)되어 그 추정 정확도가 떨어질 수 있다는 것이다. 왜냐하면, 빠르게 발달하는 아주 강한 태풍의 경우 중심부근의 완화계수는 주변보다 커질 수 있기 때문이다. 매개변수를 추가하는 등의 완화계수를 추정하는 방법의 개선이 요구된다. 그리고 실제 태풍은 이중나선의 바람 구조를 갖는 경우가 있는데 이 경우에는 강풍반경산출에 매우 큰 오차를 가질 수밖에 없기 때문에 이중나선 구조를 갖는 태풍의 경우에는 이론적인 연구가 필요하다. 한편, 알고리즘을 개발하기 위하여 고해상도 재분석자료를 이용하였는데, 이는 실관측자료가 아니기 때문에, 수평해상도의 제약으로 인해 최대풍속이 저평

가될 수 있으므로 다른 실제 관측자료를 통해 계수의 조정이 필요하다. 본 연구에서는 비교할 수 있는 관측자료의 제약으로 알고리즘의 정확도를 정량적으로 제시할 수 없었지만, 향후 연구에서 항공관측, 드랍존데, 극궤도 위성 자료 등을 모두 활용한 알고리즘의 정량적 검증이 요구된다.

### 감사의 글

본 논문의 질을 향상시키기 위해 조언을 주신 두 분의 심사위원께 감사드립니다. 이 논문은 “기후변화 감시예측 및 국가정책지원강화”(KMIPA 2015-2111)의 지원을 받았습니다.

### REFERENCES

- Brand, S., 1972: Very large and very small typhoons of the Western North Pacific Ocean. *J. Appl. Meteorol.*, **9**, 433-441.
- Chan, J. C. L., and J. D. Kepert, Eds., 2010: Global perspectives on Tropical Cyclones: From Science to Mitigation. World Scientific, 436 pp.
- Demuth, J. D., M. DeMaria, and J. A. Knaff, 2006: Improvement of advanced microwave sounding unit tropical cyclone intensity and size estimation algorithms. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **45**, 1573-1581.
- Holland, G. J., and R. T. Merrill, 1984: On the dynamics of tropical cyclone structural changes. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **110**, 723-745.
- Hsu, S. A., and A. Babin, 2005: Estimating the radius of maximum winds via satellite during hurricane LiLi (2002) over the gulf of Mexico. *Natl. Wea. Assoc. Electron. J.*, 2005-EJ13.
- Kossin, J. P., J. A. Knaff, H. I. Berger, D. C. Herndon, T. A. Cram, C. S. Velden, R. J. Murnane, and J. D. Hawkins, 2007: Estimating hurricane wind structure in the absence of aircraft reconnaissance. *Wea. Forecasting*, **22**, 89-101.
- Kwon, M., 2012: Estimation and statistical characteristics of the radius of maximum wind of tropical cyclones using COMS IR imagery. *Atmosphere*, **22**, 473-481 (in Korean with English abstract).
- Lajoie, F., and K. Walsh, 2008: A technique to determine the radius of maximum wind of a tropical cyclone. *Wea. Forecasting*, **23**, 1007-1015.
- Liu, K. S., and J. C. L. Chan, 1999: Size of tropical cyclones as inferred from ERS-1 and ERS-2 data. *Mon. Wea. Rev.*, **127**, 2992-3001.
- Merrill, R. T., 1984: A comparison of large and small Tropical Cyclones. *Mon. Wea. Rev.*, **112**, 1408-1418.
- Moncrieff, M. W., D. E. Waliser, M. J. Miller, M. A. Shapiro, G. R. Asrar, and J. Caughey, 2012: Multiscale convective organization and the YOTC virtual field campaign. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **93**, 1171-1187.
- Olander, T. L., and C. S. Velden, 2007: The advanced Dvorak technique: Continued development of an objective scheme to estimate tropical cyclone intensity using geostationary infrared satellite imagery. *Wea. Forecasting*, **22**, 287-298.