천리안 위성 적외 영상 자료를 이용한 태풍의 최대풍속반경 산출 및 통계적 특성

권민호*

한국해양과학기술원 해양순환기후연구부

(접수: 2012년 10월 16일, 수정: 2012년 11월 29일, 게재확정일: 2012년 12월 2일)

Estimation and Statistical Characteristics of the Radius of Maximum Wind of Tropical Cyclones using COMS IR Imagery

MinHo Kwon*

*Ocean Circulation and Climate Research Division, Korea Institute of Ocean Science & Technology,
Gyeonggi-do 726-744, Korea*

(Received: 16 October 2012, Revised: 29 November 2012, Accepted: 2 December 2012)

Abstract The objective methods estimating the radius of maximum wind (RMW) of tropical cyclones (TCs) are discussed using infraed (IR) imagery of geostationary satellite, and an alternative method is suggested that can estimate RMW in the TCs having eyes using IR imagery. The RMW-estimating methods are based on the characteristic structure of the eyewall of a tropical cyclone. RMW is dependent upon the radius of the eye and the distance from the center to the top of the most developed convective cloud. In order to test these methods, blackbody brightness temperature of Korean geostationary satellite, COMS (Communication, Ocean, and Meteorological Satellite) IR imagery are utilized in this study. The estimated RMWs are compared with surface winds of ASCAT (Advanced Scatterometer) of a polar orbiting satellite.

Key words: Radius of maximum wind, tropical cyclone, blackbody brightness temperature, COMS, ASCAT

1. 서 론

우리나라는 매년 북서태평양에서 발생하는 태풍 중 2~3개 정도로부터 직·간접적인 영향을 받는다. 또한, 태풍에 의한 자연재해의 피해는 해마다 증가하고 있어, 태풍에 대한 이해 및 예측시스템 개선의 필요성은 점점 부각되고 있다. 특히, 태풍의 영향을 받는 계절에는 태풍의 지속적인 감시가 필수적인데, 관측망의 제약으로 해양에 있는 태풍을 감시하기 위해서는 위성 관측자료의 활용이 매우 중요하다.

*Corresponding Author: MinHo Kwon, Korea Institute of Ocean Science & Technology, 787, Haeanro, Ansan 426-744, Korea.

Phone : +82-31-400-7761, Fax : +82-31-408-5829

E-mail : mhkwon@kiost.ac

태풍의 최대풍속반경 (radius of maximum wind; 이후 RMW)은 태풍 중심에서 최대풍속을 가지는 곳까지의 거리이다. RMW 부근에서 최대 강수가 나타나며, RMW를 이용해서 태풍의 최대강도를 추정할 수도 있다. 기상청에서 제공되는 태풍정보는 태풍중심위치, 강도, 중심기압, 중심최대풍속, 강풍반경, 그리고 이동 속도 및 방향 등으로 RMW는 현재 현업에서 제공되지 않지만, 대기역학과 태풍 예측에 있어 중요한 매개변수이다 (Hsu and Babin, 2002). 특히, 태풍 감시 기간 중에 폭풍해일이나 파랑을 보다 정확히 예측하기 위해서는 정확한 해상풍 산출이 필수적인데, 이 해상풍 산출에 입력변수로 태풍 중심기압, RMW, 주변기압 분포 등의 태풍 매개변수가 이용된다 (강시완 등, 2002).

위성 자료를 이용하여 태풍 주변의 지상풍을 측정 또는 추정하는 방법들이 많이 알려져 있다. SSM/I (the Special Sensor Microwave Imager)는 구름이 없는 경우에만 사용가능하며, 태풍의 중심부에 구름이 있거나 태풍의 눈 벽 (eyewall) 부근에서는 이용되기가 어렵다 (Goodberlet *et al.*, 1989). 정지궤도위성자료에 구름추적법을 활용하여 바람을 추정하는 방법도 태풍 중심에서 떨어져 있는 경우에만 유용하다 (Velden *et al.*, 2005). 극궤도위성에서 마이크로파를 이용한 Advanced Scatterometer (ASCAT) 등의 장비는 지상 부근의 해상풍을 고해상도로 제공해줄 수 있지만, 자료가 위성궤적을 따라서만 존재하기 때문에 태풍경로와 위성궤적이 일치할 때만 자료를 활용할 수 있다.

저층 약 3 km 고도의 바람은 관측적 관계를 이용하여 지상풍으로 변환할 수 있기 때문에 약 3 km 고도를 비행하는 항공기를 이용하여 태풍내부의 직접적인 바람 관측이 가능하다 (Franklin *et al.*, 2003). 항공기 관측을 이용하여 미국 국립 허리케인 센터 (U.S. National Hurricane Center)는 태풍의 최대풍속과 RMW를 산출하였으나, 이런 항공 관측자료는 북대서양에서 매우 제한적으로만 가용하다.

하경자 등 (1997)은 정지기상위성의 적외영상 자료를 활용하여 최고 높은 대류운의 위치로 태풍의 RMW를 가정한 RMW 산출방법을 제안하였다. 그러나 직접 관측자료의 부족으로 산출된 RMW를 종관자료와 선형풍관계를 이용하여 검증하였다. Hsu and Babin (2005)은 태풍눈에서 최고온도와 구름의 최저온도가 나타나는 곳까지의 거리를 이용하여 태풍의 RMW를 산출하는 방법을 제안하였다. 이 방법은 간단하고 효율적이지만, 2002년 허리케인 Lili 케이스에 대해서만 분석되어 추가적인 검증이 필요하다. Kossin *et al.* (2007)은 이 항공기 관측을 활용하여 태풍 눈의 크기와 RMW의 관계를 조사하여 RMW의 산출 방법을 제안하였다. 이 방법은 위성영상을 이용한 태풍분석 소프트웨어인 ADT (Advanced Dvorak Technique) 시스템에서 RMW를 산출하는 데 활용되고 있다 (Olander and Velden, 2007). Lajoie and Walsh (2008)는 태풍 눈의 크기와 태풍 중심에서 구름상단 최저온도가 나타나는 곳까지의 거리를 이용하여 RMW를 산출하는 알고리즘을 제안하였다. 그들은 항공관측, 드랍존데, 부이 등의 자료를 활용하여 그 방법이 높은 정확도로 RMW를 산출할 수 있음을 증명하였다.

이와 같이 RMW에 대한 연구가 많이 진행되고 있음에도 불구하고, 북서태평양에서 발생하는 태풍에 대한 RMW 연구는 항공 관측자료 등의 부족으로 인해 제한적으로 이루어지고 있다. 또한, RMW의 중요성에도 불구하고, 위성자료를 이용한 태풍의 강풍반경 연구 (예, 박준동 등, 2008)에 비하여 국내의 RMW에

대한 연구는 부족하다. 한편, 2010년 6월 국내기술로 개발된 최초의 정지궤도 위성 천리안위성이 발사되었다. 천리안위성은 동경 128.2도에 위치하면서 통신해양기상위성 (Communication, Ocean, and Meteorological Satellite; COMS)으로 통신, 해양관측, 기상관측의 다목적 역할을 수행한다. 본 연구에서는 COMS의 고해상도 적외영상을 이용하여 북서태평양에서 발생하는 태풍에 대하여 Kossin *et al.* (2007)과 Lajoie and Walsh (2008)이 제안한 기존 RMW 산출 방법을 적용하고, 그 특성을 비교해 보고자 한다. 또한, 제한적이기는 하지만 극궤도 위성의 ASCAT 자료를 활용하여 COMS 자료에 의해 산출된 RMW를 검증해 보고자 한다.

2. 자 료

COMS의 적외영상은 수평해상도 4 km로 제공된다. 한반도를 중심으로 한 COMS의 영역은 북동아시아는 물론 서태평양 지역을 포함한다 (Fig. 1). 자료는 2011년 4월부터 현재까지 제공된다. 본 연구에서는 COMS 적외영상으로부터 추출된 6시간 간격의 밝기온도 (blackbody brightness temperature; 이후 TBB) 자료가 이용되었다. 사용된 자료의 기간은 2011년 5월 1일부터 2011년 12월 31일까지이다.

COMS 위성자료로부터 산출된 RMW를 검증하기 위하여 유럽의 EUMETSAT (the European organization for the Exploitation of Meteorological Satellites)에서 운영되는 극궤도 위성 MetOp에 장착된 ASCAT의 자료를 활용하였다. 수평해상도는 25 km이고 시간해상도는 3분이며 사용된 자료의 기간은 2011년 5월 1일부터 9월 22일까지이다.

한편, 태풍경로는 일본 기상청의 RSMC (the Regional Specialized Meteorological Center) 최적경로 (best track) 자료가 이용되었다. RSMC 최적경로 자료는 북서태

COMS Coverage of TBB

Fig. 1. Spatial coverage of blackbody brightness temperature (TBB) image in COMS (Communication, Ocean, and Meteorological Satellite).

TC Tracks in 2011, RSMC

Fig. 2. Tracks of 21 tropical cyclones in 2011 from RSMC (Regional Specialized Meteorological Center) best track dataset. Colors indicate maximum sustained wind speed. Gray color indicates no information about wind speed.

평양에서 발생하는 태풍에 대하여 0.1도 간격의 태풍 중심위치, 태풍 중심기압, 태풍 최대 풍속 등을 제공한다. 본 연구에서는 2011년에 북서태평양에서 발생한 태풍의 최적경로를 이용하였다 (Fig. 2). 북서태평양 지역에서 2011년 4월에는 태풍이 발생하지 않았고, 5월부터 12월까지 21개의 태풍이 발생하였는데, 이 중

태풍의 눈이 분명한 경우만 분석에 이용되었다.

3. 최대풍속 반경의 산출

Kossin *et al.* (2007)은 태풍 눈의 크기 (R_{Eye})를 이용하여 다음과 같이 RMW를 산출하였다.

$$RMW_{est} = a_0 + a_1 R_{Eye}$$

여기서 $a_0 = 2.8068$ 이고, $a_1 = 0.8361$ 이다. 이 회귀식은 전체 RMW 변동성의 60%를 설명한다. 태풍 눈의 크기 R_{Eye} 는 다음과 같이 산출된다. 우선, 태풍의 눈이 뚜렷이 발달하는 태풍은 강한 경도풍과 온도풍관계에 의해 그 중심에 온핵 (warm core)이 존재하므로 태풍중심의 TBB는 주변보다 높아야 한다. 그리고 영하 45°C 등온선을 태풍 눈의 벽으로 정의할 수 있다 (Kossin *et al.*, 2007). 특히, 태풍 눈 벽에서 TBB가 영하 50°C 이하인 경우 태풍중심으로부터 동서남북 네 방향의 영하 45°C 가 되는 곳까지의 거리를 평균한 것을 R_{Eye} 로 정의한다. 이 방법은 태풍이 눈이 뚜렷할 때만 산출 가능하기 때문에 기상청에서 현업으로 운영되는 ADT 태풍분석 시스템에 이 알고리즘이 포함되어 있지만 RMW의 산출결과를 데이터베이스화되

Fig. 3. TBB of COMS at (a) 6 UTC 26 May 2011 and (b) 18 UTC 31 August 2011. Unit is $^{\circ}\text{C}$. Green dotted contours indicate -45°C isotherms. Black and red circles are the estimated eye sizes and RMWs of TCs, respectively. (c) and (d) are axis symmetric components of (a) and (b). Horizontal axis is the distance from center of tropical cyclone. Unit is km. Blue dotted lines indicate the distance corresponding to -45°C of TBB.

어 있지 않다.

Lajoie and Walsh (2008)는 Jorgensen (1984)의 태풍 눈의 구조에 대한 연구를 기반으로 태풍 눈의 크기와 구름 상단 최저온도를 이용하여 RMW를 산출하는 방법을 다음과 같이 제안하였다.

$$RMW_{est} = [(1 - h) R_{Top} + h R_{Eye}]$$

여기서 R_{Top} 는 구름 상단 최저온도이다. 매개변수 h 는 R_{Top} 에서 구름 상단 높이에 대한 최대풍속이 나타나는 높이에 대한 비율이다. 보편적으로 h 는 0에서 1 사이의 값을 가지므로, 위식에서 산출된 RMW는 가중계수 h 에 대한 R_{Top} 과 R_{Eye} 의 가중평균을 의미한다. 한편, h 는 변수이지만, 항공관측, 드랍존데 등의 관측자료를 이용한 결과 평균적으로 약 0.6의 값을 가진다. 그리고 Lajoie and Walsh (2008)는 h 를 0.6으로 고정하여도 산출된 RMW와 관측 RMW가 매우 유사함을 보였다. 그러나 이 방법 역시 태풍의 눈이 뚜렷할 때만 이용될 수 있다.

Fig. 3(a)와 3(b)는 태풍 SONGDA와 TALAS의 특정 시각의 TBB를 보인다. 태풍 SONGDA에서 2011년 5월 26일 6 UTC의 TBB를 보면 태풍의 눈이 잘 발달한 모습을 보인다. 여기서 연두색 점선은 영하 45°C 등온선을 의미한다. 이를 태풍 중심에서부터 4 km 간격으로 거리에 따라 모든 픽셀의 TBB를 평균한 것이 Fig. 3(c)이다. 위경도좌표계에서 거리는 구면에 대

한 하버사인공식 (Haversine formula)을 이용하였다. Fig. 3(c)의 축대칭 TBB에서 태풍중심에서 영하 45°C가 되는 곳까지의 거리가 눈의 크기이다. Fig. 3(a)에서 태풍의 눈이 흑색원으로 표시되었다. 이를 Lajoie and Walsh (2008)의 공식에 적용하여 RMW를 산출하였으며, Fig. 3(a)에서 RMW는 적색원으로 나타내었다. 관측에서는 종종 큰 태풍의 눈이 나타난다. Fig. 3(b)는 태풍 TALAS에서 2011년 8월 31일 18 UTC의 TBB를 보이는데, 이 때 태풍중심에서 영하 45°C 등온선까지의 거리 즉, 태풍 눈의 크기는 160.9 km이고, RMW는 194.2 km이다. 또한, 축대칭 TBB의 곡선이 강한 태풍인 SONGDA에 비하여 완만한 곡선을 갖는다.

4. 천리안 위성자료에서 산출된 RMW의 특성

2011년에 북서태평양 지역에서는 21개의 태풍이 발생하였다. 이들 중 눈이 분명한 114개의 경우가 객관적으로 선택이 되었다. 태풍 눈이 분명한 경우만 선택되었기 때문에 CDO (central dense overcast) 패턴, 쉬어 (shear) 패턴, 그리고 굽은밴드 (curved band) 패턴 등은 제외되었다. 태풍 눈이 분명한 경우를 선택하는 객관적 방법은 Kossin *et al.* (2007)에 의해 제시된 방법과 같다. 그러나 본 연구에서는 그 방법을 조금 수정하여 사용하였다. 그들은 동서남북 네 방향에 대하여 눈의 크기를 산출하고 이를 평균한 것을 태풍

Fig. 4. Same as Fig. 3 except for (a) weak, (b) moderate, and (c) strong tropical cyclones. See text for details.

눈의 크기로 정의하였으나, 여기서는 360도 모든 방향의 TBB 정보를 이용하여 최대칭 TBB를 산출하고 이를 이용하여 태풍 눈의 크기를 산출하였다. 자료의 특성상 태풍 눈의 크기에 대한 이상점 (outlier)들이 많이 생기는데, 4개의 정보만 이용하면 이상점으로 인해 평균 눈의 크기가 적절하지 않게 산출될 수 있다. 그렇지만, 360도 모든 방향의 TBB 정보를 이용하면, 상대적으로 이상점에 민감하지 않는 눈의 크기를 산출할 수 있다.

TBB의 일반적인 특징을 살펴보기 위하여 합성도를 이용하였다. 태풍은 그 세기에 따라서 특징이 크게 변하기 때문에 태풍을 세기에 따라서 3가지로 나누었다. 태풍의 최대풍속이 30 m s^{-1} 미만인 경우를 약한 태풍, 30 m s^{-1} 에서 45 m s^{-1} 까지를 중간 태풍, 45 m s^{-1} 이상인 경우를 강한 태풍이라고 하였다. 앞에서 선택된 114개 전체 경우에서 약한 태풍은 44개, 중간 태풍은 49개, 강한 태풍은 21개가 선택되었다. 이 구분에 따라 평균된 TBB를 구하였다. 약한 태풍, 중간태풍, 그리고 강한 태풍의 RMW는 각각 64.2 km, 60.4 km, 그리고 36.6 km로 태풍 세기에 따라서 RMW가 줄어드는 특징을 보인다. 또한, 태풍 눈의 크기도 각각 43.0 km, 28.7 km, 그리고 18.3 km로 태풍 세기

에 따라서 줄어드는 특징을 잘 만족한다 (Kuo, 1959). 약한 태풍의 경우 영하 45°C 등온선으로 판단할 수 있는 태풍 눈의 수평적인 구조는 동심원을 이루지 않는다. 반면에, 중간 태풍은 그 눈이 동심원에 가까운 구조를 가지며, 강한 태풍의 경우는 태풍 눈이 동심원적인 구조를 가지고 있음을 알 수 있다 (Fig. 4).

태풍 눈이 잘 발달한 경우에 대하여 태풍 매개변수의 관계를 살펴보기 위하여 Fig. 5에 분산도를 도시하였다. 여기에 사용된 매개변수는 태풍에서 최저 TBB (T_{Min}), 태풍 최대풍속 (V_{Max} ; maximum sustained wind), 태풍 눈의 크기 (R_{Eye}), 태풍 중심에서 최저 TBB가 나타나는 곳까지의 거리 (R_{Top}), 그리고 산출된 RMW이다. 평균적인 관점에서 V_{Max} 에 따라 RMW는 감소하는 경향이 있다. 그러나 개별 이벤트에 대하여 V_{Max} 와 매개변수 R_{Eye} , R_{Top} , 그리고 RMW와의 상관성은 유의하지 않다. 피어슨 (Pearson) 상관계수는 각각 $-0.15 - 0.04$, 그리고 0.10 이다. 반면, T_{Min} 과 V_{Max} 는 음의 상관관계를 가지며, 상관계수는 -0.59 이다 (Fig. 5(a)).

R_{Eye} 와 R_{Top} 는 상관계수 0.81 로 비례하는 경향을 갖는다 (Fig. 5(b)). 태풍의 구조에서 R_{Eye} 는 R_{Top} 보다 작으며 서로 비례하는 관계를 가져야 하는 것을 잘 만족한다 (Jorgensen, 1984). Lajoie and Walsh (2008)의

Fig. 5. Scatter diagrams of (a) minimum cloud top temperature and maximum sustained wind, (b) eye size and radius of minimum cloud top temperature, (c) eye size and estimated RMW, and (d) radius of minimum cloud top temperature and estimated RMW of the tropical cyclone having a clear eye. Red and blue lines indicate regression lines and their 95% confidence limits, respectively. Units of minimum cloud top temperature and maximum sustained wind are $^{\circ}\text{C}$ and m s^{-1} , respectively. Units of other radii are km.

방법에 의해 산출된 RMW는 R_{Eye} 와 R_{Top} 에 의존한다. 두 매개변수의 관련성 때문에 둘 중 하나와 RMW의 상관관계 역시 높다 (Fig. 5(c)와 5(d)). R_{Eye} 와 RMW의 상관계수는 0.94로 R_{Eye} 의 변동성은 RMW의 전체 변동성에 약 88%를 설명한다. 또한 R_{Top} 의 변동성은 전체 RMW 변동성에 약 90%를 설명한다. 특히, R_{Eye} 의 변동성을 제거한 RMW와 R_{Top} 의 부분상관계수 (partial correlation coefficient)는 0.94인데, 이는 RMW를 산출하는 데 R_{Top} 만 있어도 충분하다는 것을 의미한다. Fig. 5(d)에서 보이듯이 R_{Top} 와 RMW의 회귀직선에 대한 95% 신뢰대 (confidence band)가 좁으므로 선택적으로 다음과 같이 RMW를 산출할 수도 있다.

$$RMW_{est} = a_0 + a_1 R_{Top}$$

여기서 추정값 $a_0 = -5.64$ 이고, $a_1 = 0.69$ 이다. 단위는 km이다. Hsu and Babin (2005)는 RMW와 R_{Top} 을 함께 두었는데, 그들의 방법은 RMW를 고평가 (overestimate) 한다. Lajoie and Walsh (2008)도 항공관측, 드랍존데 등의 자료를 토대로 이러한 점을 지적하였다.

편의상, R_{Eye} 에 의해서 추정된 RMW (Kossin *et al.*, 2007)를 RMW1, R_{Eye} 와 R_{Top} 에 의해서 추정된 RMW (Lajoie and Walsh, 2008)를 RMW2, R_{Top} 에 의해서 추정된 RMW를 RMW3라고 하면, RMW1, RMW2, 그리고, RMW3의 표준편차는 각각 36.0 km, 52.0 km, 그리고 49.4 km이다. 이러한 차이는 R_{Eye} 의 변동성이 R_{Top} 의 변동성보다 작기 때문에 나타난다. RMW1과 RMW2는 평균값에 편이 (bias)를 가지고 있다 (Fig. 6(a)). 즉, RMW1이 RMW2보다 평균적으로 약 27.2 km 작다.

Fig. 6. Histograms of (a) RMW1 minus RMW2, (b) RMW3 minus RMW2. RMW1 is the estimated RMW by eye size only, RMW2 is the estimated RMW by eye size and radius of minimum cloud top temperature. and RMW3 is the estimated RMW by radius of minimum cloud top temperature. Unit is km. See text for details.

또한, RMW1이 RMW2보다 큰 경우는 없었다. 그러나 두 RMW의 차이에 대한 표준편차는 약 21.2 km로 비교적 작다. 한편, RMW2와 RMW3의 차이는 95% 신뢰수준에서 30 km 미만이다 (Fig. 6(b)).

5. 산출된 RMW와 ASCAT 위성 자료의 비교

앞 절에서 제시된 RMW 산출방법을 검증하기 위하여 유럽의 EUMETSAT에서 운영되는 극궤도 위성 MetOp에 장착된 ASCAT의 자료를 활용하였다. 이 자료는 지상 바람의 세기와 방향을 높은 정확도로 제공해주나 일반적으로 태풍이 지나가는 경로와 극궤도 위성인 MetOp의 경로가 일치하지 않는다는 단점이 있다. 2011년 북서태평양에서 발생한 태풍이 발달 및 이동할 때, MetOp의 궤도도 북서태평양 및 북동아시아 지역을 지나가는 경우는 20개이다. 이 중 태풍 중심으로부터 풍속을 산출할 수 있게 ASCAT 영역이 태풍 중심을 포함하는 경우는 3개이다. MetOp의 궤적에 존재하는 태풍 MA-ON, MUIFA, TALAS의 특정 시각에 대한 ASCAT 지상바람풍속과 그 때의 COMS TBB를 Fig. 7에 나타내었다. ASCAT은 공간적으로 태풍의 일부지역만 제공이 되며, ASCAT의 분해능은 25 km이므로, 태풍중심으로부터 거리에 따른 풍속의 세밀한 구조를 알기 어렵다. 그렇지만, 비대칭적인 풍속의 수평분포와 태풍중심으로부터 거리에 따라 줄어드는 풍속의 정도를 알 수 있다. 태풍 MA-ON과 MUIFA의 경우 태풍 중심으로부터 거리에 따라 풍속이 빠른 속도로 감소하고, 태풍 TALAS는 상대적으로 천천히 감소하는 것을 보인다 (Fig. 7(a), 7(b)와 7(c)). 태풍 MA-ON과 MUIFA는 각각 최저 중심기압 935 hPa, 930 hPa인 강한 태풍이고, 태풍 TALAS는 최저 중심기압이 970 hPa인 중형급의 세기를 가진다.

이들 태풍 눈의 크기, R_{Top} , 세 가지 방법에 의한 RMW, ASCAT에서의 RMW를 Table 1에 나타내었다. 세 가지 방법에 의한 RMW는 모든 경우에 대하여 어느 정도 차이를 보이며, RMW1은 다소 저평가 (underestimate)되는 경향이 있다. ASCAT 자료에서 보이는 그 태풍들의 RMW는 각각 40 km, 40 km, 140 km이다. 태풍이 눈이 잘 발달된 MA-ON과 MUIFA에서 산출된 RMW2 및 RMW3는 ASCAT의 RMW는 비교적 유사한 값을 가진다. 그러나 태풍 TALAS에서 산출된 모든 RMW는 ASCAT의 RMW에 비하여 모두 작다. 이 경우에는 RMW를 산출하는 방법들이 상당한 오차를 갖는다. 한편, RMW2와 RMW3를 산출하는 데 R_{Top} 이 이용되는데, COMS TBB값을 이용하여 산출된 태풍 TALAS의 R_{Top} 의 값은 약 100 km이다. 만약 R_{Top} 을 산출하는 데 TBB의 두 번째 국지 최소 (local minimum)를 이용하면, 그때의 R_{Top} 은 약 218 km

Fig. 7. Surface wind speed of MetOp/ASCAT at (a) 0 UTC 16 July 2011, (b) 12 UTC 2 August 2011, and (c) 0 UTC 28 August 2011. Unit is m s^{-1} . Below panels are of TBB maps of COMS for (a), (b), and (c). Green dotted contours indicate -45°C isotherms. Red circles are the estimated RMWs of tropical cyclones.

Table 1. Radius of minimum cloud top temperature (R_{Top}), eye size (R_{Eye}), estimated RMW by COMS, and RMW ($\text{RMW}_{\text{ASCAT}}$) of MetOp/ASCAT at 0 UTC 16 July 2011, 12 UTC 2 August 2011, and 0 UTC August 2011. $\text{RMW}_{1\text{est}}$, $\text{RMW}_{2\text{est}}$, and $\text{RMW}_{3\text{est}}$ indicate estimated RMWs using R_{Eye} , R_{Eye} and R_{Top} , and R_{Top} , respectively. Unit is km.

	MA-ON 00Z16JUL	MUIFA 12Z02AUG	TALAS 00Z28AUG
R_{Top}	56	64	100
R_{Eye}	4.8	10.6	84.7
$\text{RMW}_{1\text{est}}$	6.8	11.7	73.6
$\text{RMW}_{2\text{est}}$	25.3	31.9	90.8
$\text{RMW}_{3\text{est}}$	33.0	38.5	63.4
$\text{RMW}_{\text{ASCAT}}$	40	40	140

인데, 이 값을 이용해 산출된 RMW_2 와 RMW_3 는 각각 138.0과 144.5 km이다. 이 값은 ASCAT의 RMW인 140 km와 잘 일치한다.

6. 결론 및 제언

천리안 적외 영상자료를 활용한 RMW가 산출되고 그 통계적 특성이 분석되었다. 분석 결과에 따르면, 개별 TBB를 이용한 RMW는 태풍강도와 통계적으로 유의한 관련이 없지만, 평균 TBB를 이용한 RMW는 태풍강도에 따라 감소하는 경향이 있다. 또한, 평균

TBB를 이용한 R_{Eye} 도 태풍강도에 따라 감소하는 경향을 보인다.

RMW를 산출하는 데 중요한 매개변수는 R_{Eye} 와 R_{Top} 이다. Kossin *et al.* (2007)은 R_{Eye} 를 이용해서 RMW를 산출하였고, Lajoie and Walsh (2008)은 R_{Eye} 와 R_{Top} 를 모두 이용하여 RMW를 산출하였다. 본 연구에서 산출된 R_{Top} 은 R_{Eye} 보다 항상 크며 이 둘의 상관계수가 0.81로 매우 높다. 또한, Lajoie and Walsh (2008)의 방법에 의한 RMW와 R_{Top} 의 상관계수가 0.95이고, R_{Eye} 의 변동성을 제거한 RMW와 R_{Top} 의 부분상관계수가 0.94로 매우 높으므로 본 연구에서는 R_{Top} 만 이용

하여 RMW를 산출하는 선택적인 방법이 제안되었다. 이를 정리하면, 다음과 같다.

$$RMW_{es} = a + b R_{Top} + c R_{Eye}$$

Kossin *et al.* (2007)의 방법에서 $a = 2.8068$, $b = 0$, 그리고, $c = 0.8361$ 이고, Lajoie and Walsh (2008)의 방법은 $a = 0$, $b = 0.4$, 그리고 $c = 0.6$ 이며, 본 연구에서 제안된 방법은 $a = -5.64$, $b = 0.69$, 그리고 $c = 0$ 이다. RMW를 산출하는데 첫 번째 방법은 두 번째 방법에 비하여 항상 저평가하며, 두 번째 방법과 세 번째 방법에 의한 RMW의 차이는 95% 신뢰수준에서 30 km 미만이다. 한편, 두 번째 방법이 두 매개변수를 이용하였지만, Kossin *et al.* (2007)과 Lajoie and Walsh (2008)에 의해서 제시된 RMW 산출 방법들의 정확도는 서로 비슷하다고 Lajoie and Walsh (2008)에서도 언급하였으며, 본 연구에서 제시된 방법도 여러 방법에 의해 산출된 RMW를 비교해 보았을 때, 다른 두 방법과 그 정확도가 비슷할 것으로 판단된다. 또한, ASCAT 자료의 표본수 때문에 통계적으로 어느 방법이 더 정확하다고 판단할 근거는 없다. 그러므로 산출된 RMW가 정량적으로 검증되기 위해서는 더 많은 관측 자료의 확보가 필요하다.

위의 RMW 산출 방법들은 기본적으로 태풍의 눈이 뚜렷할 때에만 적용할 수 있다. 세 번째 방법은 태풍의 눈이 있어도 그 눈의 크기를 추정하기 어려운 경우에도 확장 사용할 수 있을 것으로 기대되지만, 관측자료와의 검증은 추가적으로 이루어져야 한다. 한편, RMW 산출은 태풍의 등풍속선이 중심 부근에서 동심원으로 이루어졌다고 가정하고 산출되는데, 실제 태풍은 비대칭성으로 인해 이심률을 가진 타원형이 될 수 있으며 (Montgomery and Kallenbach, 1997), 태풍 중심에서부터 거리에 따른 TBB의 분포는 비대칭성이 크다. 이러한 비대칭성이 RMW 산출에 어떻게 영향을 주는지에 대해서는 검토가 필요하다. 또한, 강한 태풍에 대하여 TBB의 수평 경도는 상대적으로 크지만, 태풍의 눈이 잘 발달되지 않은 약한 태풍은 TBB의 수평 경도가 상대적으로 작다. R_{Top} 의 오차는 RMW 산출에 직접적으로 영향을 미치므로, R_{Top} 의 산출에 주의하여야 한다. RMW의 산출은 객관적으로 이루어지므로, 보다 개연성 있는 R_{Top} 을 산출하는 알고리즘의 추가 연구가 필요하다. 한편, 발달하는 태풍은 주로 연직적으로 순압구조를 가지고 있더라도 연직 바람속도가 강한 태풍이 많이 관측이 된다. 만약 수평적으로 연직 바람속도가 크게 변하지 않는다고 가정하면, 연직 바람속도가 RMW 산출값에 민감하게 영향을 미치지 않을 수 있다. 그러나 일반적으로 연직 바람속도가 있는 경우에 대해서 RMW 산출에 대한

추가 연구가 필요하다.

북서태평양에서 발생하는 태풍의 RMW에 대한 연구는 위성 자료 외의 해상 관측망이 적어 북대서양에 비하여 상대적으로 부족하다. RMW에 대한 추가적인 연구가 이루어지기 위해서는 위성관측은 물론 항공관측, 드랍존데관측, 부이 및 선박관측 등의 관측자료의 확대가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 2012 국가기상위성센터 용역사업 “위성 자료의 예보 및 응용 기술 개발”의 지원으로 이루어졌습니다. 그리고 자료를 제공해주신 (주)지아이소프트의 홍성은 이사님과 국가기상위성센터의 정성래 연구관님과 심재면 연구관님께 깊이 감사드립니다.

참고문헌

- 강시완, 전기천, 박광순, 방경훈, 2002: 해상풍 관측자료에 근거한 태풍 해상풍모형간의 상호비교. *한국해양학회지*, **7(3)**, 100-107.
- 박준동, 손은하, 김윤재, 김금란, 박종서, 2008: 위성마이크로파와 적외선에서 자료를 이용한 태풍 강풍반경 산출 및 검증. *2008년도 한국기상학회 가을학술대회 논문집*, 274-275.
- 하경자, 김기영, 여미현, 1997: GMS TBB를 이용한 태풍 최대 풍속 반경의 추정. *한국기상학회지*, **33(4)**, 677-690.
- Franklin, J. L., M. L. Black, and K. Valde, 2003: GPS dropwindsonde wind profiles in hurricanes and their operational significance. *Wea. Forecasting*, **18**, 32-44.
- Goodberlet, M. A., C. T. Swift, and J. C. Wilkerson, 1989: Remote sensing of ocean surface winds with the Special Sensor Microwave/Imager. *J. Geophys. Res.*, **94**, 14 547-14 555.
- Hsu, S. A. and A. Babin, 2005: Estimating the radius of maximum wind via satellite during Hurricane Lili (2002) over the Gulf of Mexico. *Natl. Wea. Assoc. Electron. J.*, 2005-EJ3.
- Jorgensen, D. P., 1984: Mesoscale and convective-scale characteristics of mature hurricanes. Part II: Inner-core structure of Hurricane Allen (1980). *J. Atmos. Sci.*, **41**, 1287-1311.
- 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.

- Kuo, H. L., 1959: Dynamics of convective vortices and eye formation. *The Atmosphere and Sea in Motion. B. Bolin, Ed., Rockefeller Inst. Press*, 413-424.
- Lajoie, F. and K. Walsh, 2008: A technique to determine the radius of maximum wind of a tropical cyclone. *Wea. forecasting*, **23**, 1007-1015.
- Montgomery, M. T. and R. J. Kallenbach, 1997: A theory for vortex Rossby-waves and its application to spiral bands and intensity changes in hurricanes. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **123**, 435-465.
- 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.
- Velden, C. S. and Coauthors, 2005: Recent innovations in deriving tropospheric winds from meteorological satellites. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **86**, 205-223.