

태풍정보로부터 큰바람 (34 kt) 및 싹쓸바람 (64 kt) 반경 산출 알고리즘

원성희² · 권혁조^{1,*} · 이우정² · 정관영² · 강기룡² · 김백조³

¹공주대학교 대기과학과/태풍연구센터

²국립기상연구소 태풍황사연구팀

³국립기상연구소 정책연구팀

(2007년 10월 8일 접수; 2008년 1월 31일 승인)

Algorithm for Estimation of the Radius of Gale/Hurricane Wind from the TC Advisory

Seong-Hee Won², H. Joe Kwon^{1,*}, Woo-Jeong Lee²,
Kwan-Young Chung², Ki-Ryong Kang² and Baek-Jo Kim³

¹Typhoon Research Center/Kongju National University

²Typhoon and Asian Dust Research Laboratory/National Institute
of Meteorological Research

³Policy Research Laboratory/National Institute of Meteorological Research

(Manuscript received 8 October 2007; in final form 31 January 2008)

Abstract

KMA (Korea Meteorological Society) and RSMC (Regional Specialized Meteorological Center) Tokyo - Typhoon Center issue 15/30 m/s radii in the TC (tropical cyclone) advisory for the information on the TC size. Meanwhile, JTWC (Joint Typhoon Warning Center) and NHC (National Hurricane Center) issue 34/64 kt wind radii. According to the Beaufort wind force scale, 34 kt and 64 kt correspond to the 'gale' and 'hurricane'. A need to identify the range of the gale/hurricane wind from the TC bulletin of RSMC Tokyo or KMA that contains only 15/30 m/s radii motivates this study. An algorithm for estimating the radius of gale/hurricane wind is developed by utilizing Holland's empirical formula on TC's wind-pressure relationship.

Key words: radius of gale/hurricane winds, Holland empirical formula, tropical cyclone, typhoon

1. 서 론

태풍의 현재 위치 및 강도는 태풍을 예보하는 데 있어서 매우 중요한 정보이며, 태풍 피해에 밀접한 관계를 가지고 있다. 그러나 최근 10년간, 대형태풍에 의한 피해액이 증가하여 총 태풍 피해액의 큰 비중을 차지함

에 따라 태풍의 위험반경이 어느 정도의 크기인지 정확히 파악하는 것도 다른 정보 못지않게 중요시 되고 있다. 태풍에 의한 피해는 태풍의 중심에 국한되는 것이 아니라 태풍의 규모에 따라 중심으로부터 멀리 떨어져 있는 지역에도 영향을 미칠 수 있으며, 피해액 역시 태풍의 규모에 크게 좌우된다. 또한, 다가오는 태풍의 영향권 안에 들것인가에 대한 정보는 사전 악기상 예보 차원에서 예보경로와 함께 중요한 자료가 되고 있다.

태풍의 구조적 특성은 첫째, 중심기압이나 중심 부근의 최대풍속을 말하는 강도와, 둘째, 태풍의 크기로 표현된다. 이 두 요소는 서로 독립적이다. 미국의 태풍 관련 기관인 합동태풍경보센터 (Joint Typhoon Warning Center: JTWC)나 미국 국립허리케인센터 (National

*Corresponding Author: H. Joe Kwon, Department of Atmospheric Sciences, Kongju National University, Kongju, Chungnam, 314-701, Korea.
Phone: +82-41-850-8527, fax: +82-41-856-8527
E-mail: hjkwon@kongju.ac.kr

Hurricane Center: NHC)에서는 크기에 대한 정보로서 34 kt 반경의 정보를 발표한다. 그 이유는 허리케인이 육지에 상륙하는 시점을 허리케인의 중심이 아닌 34 kt 반경이 육지에 닿은 시각을 말하는 것으로 그만큼 34 kt 바람 범위가 중요하기 때문이다. 따라서 34 kt, 64 kt가 미치는 범위를 시간적으로 연결한 바람길 (wind swath)을 공식 정보로 제공하기도 한다 (<http://www.nhc.noaa.gov>). 세계기상기구 산하 태풍위원회에서는 최대 풍속 기준으로 34 kt 이상 48 kt 미만의 열대 저기압을 열대폭풍 (TS: Tropical Storm), 48 kt 이상 64 kt 미만의 열대저기압을 심한열대폭풍 (STS: Severe Tropical Storm), 64 kt 이상의 열대저기압을 태풍 (TY: Typhoon)이라고 명명하는 것을 권고한다. 우리나라도 그 권고에 따라 그 각각을 약, 중, 강한 태풍이라고 표현하며 일본 기상청에서도 비슷한 기준을 정해서 태풍정보를 발표하고 있다. 반면, 풍속 반경 분석에 있어서는 우리 기상청과 RSMC (Regional Specialized Meteorological Center) Tokyo에서 모두 34 kt 반경 대신 30 kt 반경을 제공하고 있으며 특히 우리 기상청은 풍랑 주의보의 발표 기준으로 사용하기 위해서 강풍반경 (15 m/s)과 폭풍반경 (25 m/s)으로 풍속 반경을 발표하고 있다.

보퍼트 풍력 등급에 의하면 (태풍백서, 1996) 12 단계의 등급 중에서 등급 8을 큰바람 (34 - 40 kt), 등급 10을 노대바람 (48 - 55 kt), 등급 12를 짙은바람 (64 kt 이상)으로 정의하고 있다. 영어로는 각각 gale, storm, hurricane에 해당된다. 최대풍속에 따른 태풍의 등급인 TS (Tropical Storm), STS (Severe Tropical Storm), TY (TYphoon)은 보퍼트 풍력등급 중 8-9, 10-11, 12 이상에 해당하는 것이다. 태풍의 범위를 나타내는데 있어서 TS 급 (34 kt) 이상의 바람, 혹은 TY 급 (64 kt) 이상의 바람이 미쳤던 범위를 정확히 알 필요가 있음에도 불구하고 전술한 바와 같이 RSMC Tokyo나 우리 기상청에서는 관례상 15 m/s, 25 m/s의 범위만을 제공한다. 본 연구의 목적은 기존의 태풍정보, 즉, 15 m/s 반경, 25 m/s 반경과 당시의 최대풍속, 중심 기압 등의 태풍정보를 활용해서 큰바람과 짙은바람이 불었던 범위를 추정하는 알고리즘을 제시하려는 것이다. 이로써 미국 허리케인센터나 TSR (<http://TropicalStormRisk.com>)에서 제공하는 것과 같은 바람길 제작에 활용할 수 있게 될 것이다.

태풍 주변의 풍속의 변화를 반경에 따른 함수로 표현하는데 있어서 Holland의 경험식을 (Holland 1980) 사용하였다. Holland 바람 분포식은 지속적으로 개선

되어 왔으며 (Willoughby 등 2006, Xie 등 2006, Knaff & Zehr 2007, Kossin 등 2007), 태풍 주변의 축대칭 바람장의 구성과 관련된 많은 연구사례에서 사용된바 있다 (Kurihara 등 1995, Kwon 등 2002).

이 연구에서는 Holland의 경험식을 이용해서 이미 발표된 태풍 정보로부터 34 kt 반경과 64 kt 반경을 (이하 각각 r_{34} , r_{64} 로 부름) 추정하는 알고리즘을 제시하고자 한다. 어느 시각의 r_{34} 와 r_{64} 를 추정하는데 있어서 중심기압, 최대풍속, 30 kt 반경, 50 kt 반경이 사용되었으며, 주변기압으로 정의된 p_n 이 필요하다. 이 값은 태풍 중심으로부터 무한대로 떨어진 지점의 기압을 나타내며 정확한 값이 정해져있지는 않다. 파라미터 조정과정에서 형태에 따라 p_n 값을 조정했다. 연구방법에서는 Holland 바람분포의 형태를 결정짓는 상수, A와 B의 값을 발표된 태풍정보에 맞추어 구하고 이 인자들을 태풍정보에 근접하도록 조정하는 과정을 소개할 것이다. 비대칭인 태풍에 대해서도 각 방향별로 다른 장·단반경 값에 따라 A, B 값을 조정하는 과정들을 거친다. 이렇게 구한 r_{34} 와 r_{64} 는 미국의 국립허리케인센터에서 제공되는 콘텐츠 중 하나인 34 kt/64 kt 바람 영향 범위를 복서태평양 태풍 자료를 이용하여 재구성하는 데 있어서 필수적 요소가 된다.

2장에서는 연구방법을 기술하고, 3장에서는 조정과정을 거쳐 얻은 태풍 반경의 결과들을 정리하며, 4장에서는 연구에 대한 결론을 기술하겠다. 본 연구의 결과는 태풍연구센터에 소개되었다 (<http://www.typhoon.or.kr>).

2. 연구방법

2.1 Holland 경험식

태풍 정보를 통해서 반경에 따른 바람장의 변화를 계산하기 위해서 Holland의 식을 이용했다. Holland는 여러 사례를 통해서 태풍 중심으로부터 반경에 따른 지상기압의 변화에 대해서 다음과 같은 경험식을 얻었다.

$$A = r^B \ln\left(\frac{p_n - p_c}{p - p_c}\right) \quad (1)$$

여기서 A, B는 태풍 바람의 구조를 결정하는 상수이다. B는 반경에 따른 바람분포의 경사를 결정하는 상수이며 최대풍에 의해 결정된다. A는 최대풍의 위치를 나타낸다. p_c 는 태풍의 중심기압, p_n 은 태풍 외곽의 기압, r 은

태풍 중심으로부터의 거리이다. p_n 은 태풍 중심으로부터 무한대로 떨어진 지점의 기압을 나타내며, 정확한 값이 정의되어있지는 않다. p_n 에 따라 바람분포의 형태가 바뀌기 때문에 태풍정보와 비교해서 상이할 경우 p_n 을 조정할 수 있다.

이런 관계의 파라미터들을 이용해서 선형풍과 경도풍 식을 아래와 같이 나타낼 수 있다. 태풍의 중심부근 바람은 선형풍 관계에 있고, 태풍 외곽은 경도풍 관계에 있다고 보고 다음 두 식을 이용하여 바람장을 계산해낸다. 태풍 중심으로부터 최대풍 반경의 1.2배 되는 지점보다 안쪽은 선형풍으로 구한 바람을 적용했고, 최대풍속 반경의 1.2배되는 지점부터 2.5배 되는 지점까지는 거리에 따른 차등함수를 주어 외곽으로 갈수록 경도풍을 따르도록 했다.

$$V_g = [AB(p_n - p_c) \exp(-A/r^B) / (\rho r^B + r^2 f^2 / 4)]^{1/2} - rf/2 \quad (2)$$

$$V_c = [AB(p_n - p_c) \exp(-A/r^B) / \rho r^B]^{1/2} \quad (3)$$

여기서 f 는 코리올리 상수이고, ρ 는 밀도(1.15 kg/m³)이다. 최대풍 반경, r_m 에서, $\frac{dV_c}{dr} = 0$ 이 되므로, $r_m = A^{1/B}$ 의 관계를 얻을 수 있고, 이를 선형풍 방정식에 대입하면

$$B = \frac{\rho e}{p_n - p_c} V_m^2 \quad (4)$$

를 구할 수 있다. 이렇게 최대풍 (V_m)과 중심기압 (p_c)를 이용해서 B 값을 계산했다.

변수 A 는 최대풍 반경 (r_m)을 구하기 위한 변수로써 만약 r_m 을 알고 있다면 구할 필요가 없지만, 태풍 발표 기관에서 이 정보를 발표하지 않으므로, A 를 계산해야 한다. 그러나 명시적으로 구할 수 없기 때문에 경도풍 공식에서 30 kt 반경을 대입해서 근사해를 얻는다. TS 급 이상의 태풍에서 30 kt바람 반경은 충분히 외곽에 위치할 것으로 보고, 경도풍 관계식에 30 kt 반경과 풍속 값에는 30 kt를 대입한 후, 이 식을 가지고 다음과 같은 반복법을 통해서 A 를 근사적으로 얻었다.

$$A^{n+1} = A^n - \frac{f(A^n)}{f'(A^n)} \quad (5)$$

$$f(A) = \left(\frac{AB(p_n - p_c) e^{-\frac{A}{r^B}}}{\rho r^B} + \frac{r^2 f^2}{4} \right)^{1/2} - \frac{rf}{2} - V_{gr} \quad (6)$$

$$f'(A) = 1/2 \left(\frac{AB(p_n - p_c) e^{-\frac{A}{r^B}}}{\rho r^B} + \frac{r^2 f^2}{4} \right)^{-1/2} \frac{B(p_n - p_c)}{\rho r^B} e^{-\frac{A}{r^B}} \left(1 - \frac{A}{r^B} \right) \quad (7)$$

이 방법을 통해서 수렴하는 A 값을 찾는다. 그러나 A 값이 제대로 수렴하지 않을 경우에는 조정이 필요한데, 이런 경우에는 50 kt 반경을 이용해서 r_m 을 정했다. p_n 값은 태풍의 주변 기압값으로 본 연구에서는 1000 hPa를 기본으로 사용했고, 바람 구조에 따라 p_n 값을 조정하여 태풍 정보와 근접한 형태가 나타내도록 노력했다. Holland 식을 적용해서 얻은 바람장의 모습을 Fig.1에 나타내었다. 실선이 계산해낸 태풍의 바람장으로, 중심으로부터 최대풍 반경의 1.2배되는 지점까지는 선형풍을, 최대풍 반경의 2.5배되는 지점보다 바깥 부분은 경도풍을 따른다.

2.2 파라미터 보정

태풍 정보를 이용해서 A, B 가 구해지면 이를 이용해

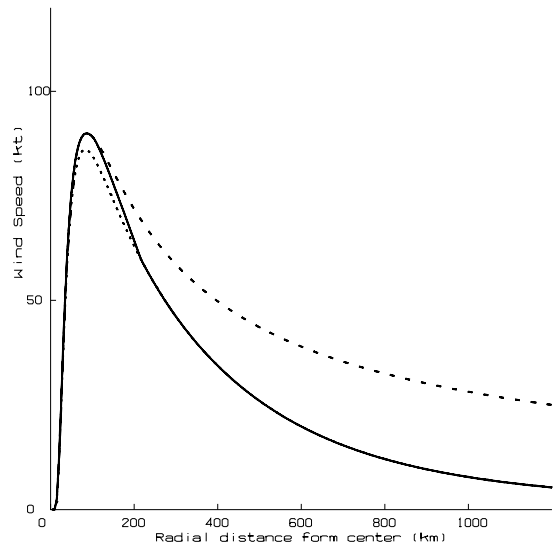


Fig. 1. Holland profiles (heavy dotted line - Cyclotrophic wind, dotted line - Gradient wind, solid line- Typhoon wind profile)

서, 거리에 따른 바람 구조를 구할 수 있다. 그러나 Holland 식을 일률적으로 적용하기에는 몇 가지 추가 조건이 필요했다. 첫 번째로 p_n 값을 p_c 와 V_{max} 에 따라 적절하게 바꿔줄 필요가 있었다. p_n 은 태풍의 주변 기압을 나타내는 값으로 태풍으로부터 무한대 외각의 값을 말한다. p_n 과 p_c 의 비로 B값이 정해지고, B값에 따라서 바람 분포 함수의 기울기가 결정된다. p_n 과 p_c 를 이용해서 계산된 B값에 의해 구해진 바람분포는 관측된 V_{max} 와 비교하여 상이할 수 있다. 이런 문제가 있을 경우에는 p_n 값을 수정하여 관측된 값에 근접하도록 다시 계산해 내야한다. 또한 A가 제대로 수렴되지 않을 경우가 발생할 수 있는데, 이러한 문제 때문에 Holland 식에 적절한 조정이 필요하다. 조정과정은 크게, 두 가지로 나뉜다. 첫째는 계산된 A값이 적절한지 확인하여 r_m 을 수정하고, 두 번째는 바람 분포에서 얻은 r_{34} 와 r_{64} 가 태풍 기관에서 발표한 정보와 비교해서 적절한지 체크해서 바람 분포 함수의 기울기를 조정한다. 이때, 함수의 기울기는 p_n 값과 B값을 변화시켜서 조정한다.

Fig. 2는 p_c 와 B값이 일정할 때 p_n 에 따른 바람 분포 함수의 변화를 나타내고 있다. p_n 이 클수록 p_n-p_c 의 값이 커지기 때문에 풍속의 값이 커지는 것을 볼 수 있다. 그러나 p_n 은 B값 계산에도 쓰이기 때문에 p_n 에 따라 B도 함께 변화시켜 그려보면 또 다른 형태가 나타난다. Fig. 3을 보면 p_n 에 따른 B값이 재계산 될 경우, p_n 에 따른 변화는 바람 분포 함수의 높이는 그대로이고, 기울기만 변한다. 이는 B에 따라서 바람분포가 변화하기 때

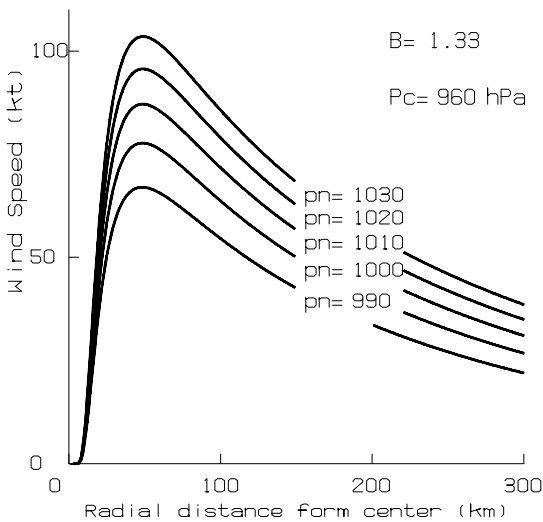


Fig. 2. The effect of varying the parameter p_n on the gradient wind profile with fixed B and p_c .

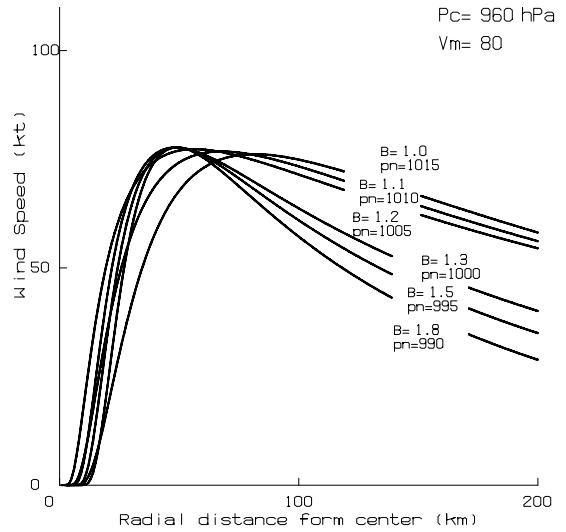


Fig. 3. The effect of varying the parameter p_n on the gradient wind profile with B decrease.

문인데, B값이 작아질수록 기울기가 완만해지고, r_{34} 는 커지게 된다. 그러나 B값이 작아질수록 바람 분포 함수의 최대값 위치는 중심쪽으로 이동하기 때문에, B값이 1보다 작아질 경우 결과적으로 강풍 반경이 줄어들 수도 있다. p_n 이 증가하고 이에 따라 B값이 감소하되 1보다 작아지지 않을 경우 바람 분포 함수는 오른쪽으로 이동했고, 강풍 반경은 커지게 된다. 반면 p_n 은 고정되어 있을 경우, B 값만 변화시키면 Fig. 4와 같이 된다. B 값이 작아지면 기울기는 완만해지고 최대풍과 최대풍

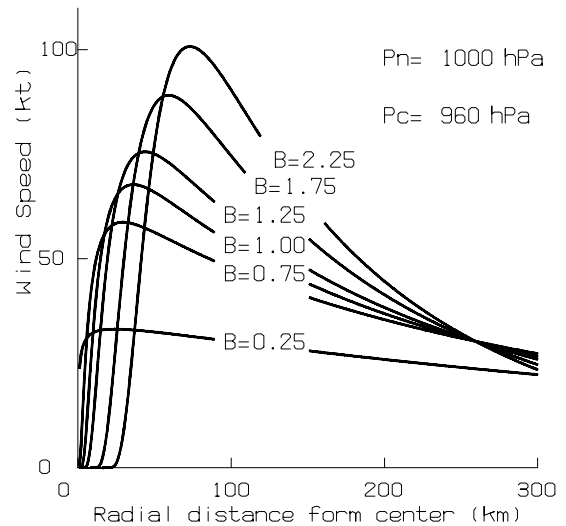


Fig. 4. The effect of varying the parameter B on the gradient wind profile.

반경이 작아진다.

결과적으로 p_n 이 커지면 바람 분포 함수는 커지지만, B값은 작아진다. B값이 1이하로 작아지면 최대풍 반경이 중심 쪽으로 이동하기 때문에 r34, r64는 반대로 중심 쪽으로 이동함으로써, 반대로 반경은 작아지게 된다. 따라서 본 연구에서 B값의 하한 값을 1로 보았다. Holland (1980)의 경우 하한 값을 1로, 상한 값을 2.5로 정했고, Jakobsen & Madsen (2004)는 B의 유용 범위를 1이상, 2이하로 보았다.

태풍 정보에서 주어진 r30, r50 값을 토대로 바람 구조가 너무 넓은 태풍으로 나오거나, 정보보다 반경이 작은 태풍으로 계산됐을 경우에는 p_n 과 B값을 조정했다. 예를 들어 바람 분포에서 r34가 태풍 전문의 r30보다 클 경우에는 바람 분포의 기울기를 작게 하기 위해서 p_n 값을 늘리고, 때에 따라서는 B값도 늘렸다. 그러나 여기서 주의할 점은 기울기를 완만하게 하기 위해서 p_n 값을 늘리면, B값이 작아진다는 것이다. 그러나 이때 B값이 1이하로 작아지면 최대풍 반경이 중심 쪽으로 이동하고, 결과적으로 강풍 반경이 작아진다는 것이다. B의 하한 값을 1로 정해놓고 더 이상 B값이 변하지 않게 하고 p_n 을 계속 늘릴 경우에는 최대풍의 값만 증가하는 결과를 낳을 수도 있다.

Fig. 5에 p_n 값을 조정함으로써 얻은 결과를 보였다. 사례는 2006년 9월 15일 00UTC의 SHANSHAN(0613)이다. 이때, 중심기압은 945 hPa였고 최대풍은 90 kt였다. p_n 과 B값은 각각 1000과 1.221이었다. 굵은

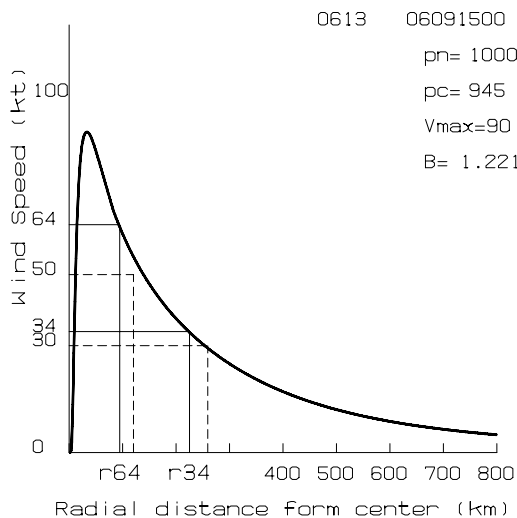


Fig. 5. Wind profile obtained by Holland's formula of SHANSHAN(0613) on 15 September 2006.

실선이 계산으로 얻은 바람 분포이다. 점선으로 표시된 30 kt, 50 kt 반경은 RSMC 태풍 전문으로부터 얻은 정보이고, 실선의 반경 표시는 바람 분포 내에서 34 kt, 64 kt되는 지점을 나타낸 것이다. 점선으로 된 반경 표시가 곡선과 맞닿았을 때 정확한 바람 분포가 된다. 또한 구한 r34, r64가 전문에 나와 있는 30 kt 반경과 비교해 적절히 위치해야 한다.

3. 결과

3.1 계산된 풍속 변화가 완만한 사례 1

위에서 설명한 방법에 따라 4개의 태풍 사례에 대한 풍속 반경을 구해보았다. 사용한 태풍 정보는 RSMC Tokyo의 최적 경로를 사용하였다. Fig. 6에 보인 사례는 2004년 8월 22일 12UTC의 CHABA (0416)의 바람 분포 모습이다. 이때, 태풍의 중심기압, 최대풍속, 30/50 kt 반경에 대한 정보는 Table 1에 나타났다. r50L과 r50S는 각각 50 kt 바람의 장반경과 단반경을 말하며 D50L은 장반경 방향을 말한다. 마찬가지로 r30L과 r30S는 각각 30 kt 바람의 장반경과 단반경이며 D30L

Table 1. Detailed information of CHABA(0416) at 12UTC 22 August 2004.

Pc (hPa)	Vm (kt)	D50L	r50L (NM)	r50S (NM)	D30L	r30L (NM)	r30S (NM)
930	100	SE	110	90	SE	280	220

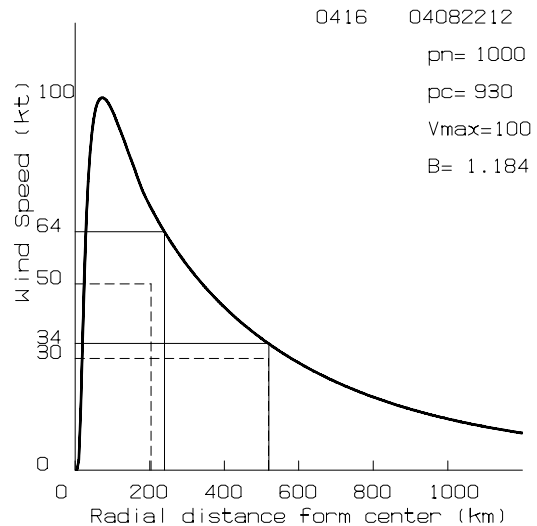


Fig. 6. Holland wind profile before adjustment of CHABA(0416) on 22 August 2004.

은 장반경 방향이다. 풍속반경이 비축대칭일 경우에는 단반경과 장반경에 대해서 각각 수행하는데, 본 연구에서는 장반경에 대한 결과를 실었다. RSMC Tokyo의 최적경로의 정보를 있는 그대로 보이는 의미에서 풍속, 거리 등의 단위는 kt와 해리 (NM: Nautical Mile) 단위의 정보를 제시하였다.

p_n 과 계산된 B값은 각각 1000과 1.184였다. 계산으로 얻은 최대풍의 값은 거의 비슷하게 나왔으나, 우리가 필요로 하는 정보, 즉 r34는 30 kt 반경과 같게 나왔으며, r64는 50 kt 반경보다 크게 나왔다. 따라서 기울기를 조금 덜 완만하게 해줄 필요가 있다. p_n 을 줄여서 B를 크게 해주면 경사가 가파르게 되는데, Fig. 7을 보면 p_n 을 980으로 줄이자, B값이 너무 커져서 경사가 너무 급해지고, 결국 태풍 정보보다 30 kt 반경의 위치가 더 안쪽으로 위치했다. 따라서 p_n 뿐 아니라 B값의 조정도 필요하게 되는데, B를 1.658에서 1.258로 수정했다 (Fig. 8). 결과적으로 최대풍은 태풍 정보보다 작게 나타났지만, r34, r64는 전문의 정보와 비교해서 적절하게 나왔다. Holland 경험식의 보정 과정은 p_n 값의 변화를 우선으로 하고, 이후에 미세한 조정이 필요한 경우 B값을 0.1씩 줄이거나, 늘려서 바람 분포 함수가 전문에 나와 있는 r30, r50과 비교해서 적절한 거리에 위치하도록 했다.

이 사례의 경우, 태풍 정보에서는 30 kt 풍속에 대한 장반경이 518.84 km 였으며, 계산식으로 구한 풍속 변화 곡선에서는 405 km 로 나타났다. 오차는 113.84 km 였다. 이는 수정과정에서 34 kt 반경보다 64 kt 반경 오

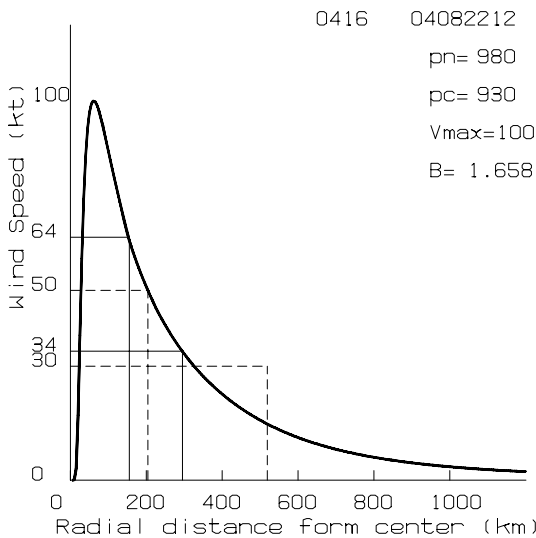


Fig. 7. Holland wind profile after adjusting p_n of CHABA(0416) on 22 August 2004.

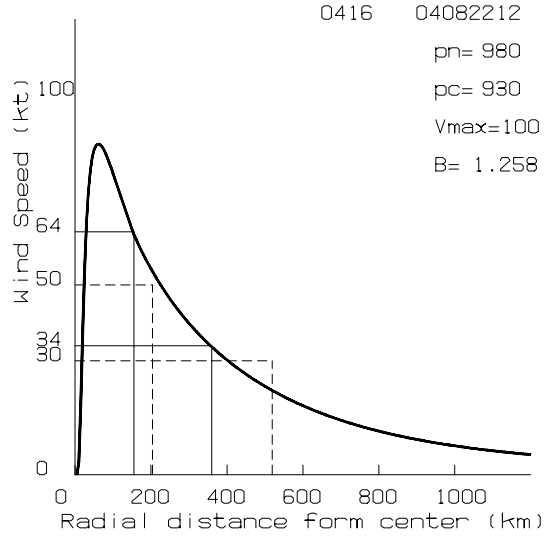


Fig. 8. Holland wind profile after adjusting p_n and B of CHABA(0416) on 22 August 2004.

차를 줄이기 위해 과정을 반복했기 때문이다. 50 kt 반경에 대한 오차는 10 km 미만으로 나타났다.

3.2 계산된 풍속 변화가 완만한 사례 2

Fig. 9의 사례는 2004년 5월 15일 18UTC의 NIDA (0402)의 바람 분포로, 이때 중심기압은 955 hPa, 최대풍은 75 kt 였다. 태풍 정보는 Table 2와 같았다.

계산으로 구한 바람 분포는 전문에 나와 있는 r30,

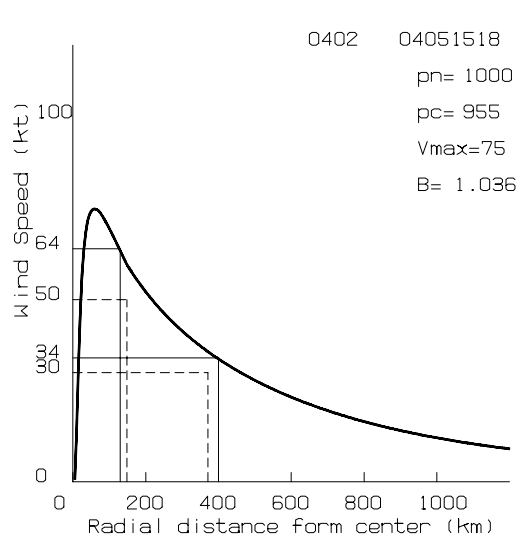


Fig. 9. Holland wind profile before adjustment of NIDA(0402) on 15 May 2004.

Table 2. As in Table 1 except for NIDA(0402) at 18UTC 15 May 2004.

Pc (hPa)	Vm (kt)	D50L	r50L (NM)	r50S (NM)	D30L	r30L (NM)	r30S (NM)
955	75	E	80	40	E	200	100

Table 3. As in Table 1 except for SUDAL(0401) at 06UTC 16 April 2004.

Pc (hPa)	Vm (kt)	D50L	r50L (NM)	r50S (NM)	D30L	r30L (NM)	r30S (NM)
990	45	N/A	N/A	N/A	SE	280	160

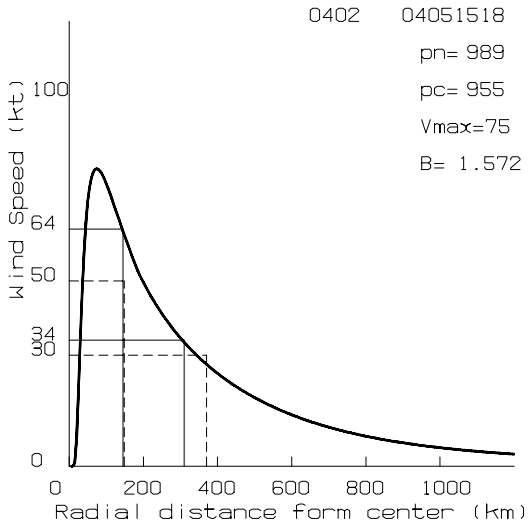


Fig. 10. Holland wind profile before adjustment of NIDA(0402) on 15 May 2004.

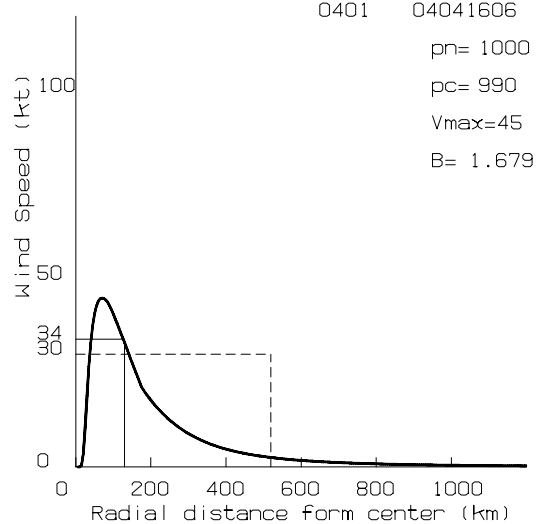


Fig. 11. Holland wind profile before adjustment of SUDAL(0401) on 16 April 2004.

r50의 위치보다 완만한 형태를 나타냈다. r64, r34도 각각 r50, r30보다 크게 나왔다. 보정 과정에서 p_n 을 988까지 줄이고, 이때 계산된 B값을 1.413에서 1.513으로 늘려서 경사를 급하게 만들었다 (Fig. 10). 이 경우 태풍 정보에서는 30 kt 반경이 370.6 km 였고, 계산된 30 kt 반경의 값은 345 km 로 나타났다. 오차는 -25.6 km 였다.

3.3 계산된 풍속 변화가 급경사진 사례

Fig. 11의 사례는 전문에 나와 있는 정보보다 경사가 급하게 나타난 경우, 이를 보정한 결과이다. 사례는 2004년 4월 16일 06UTC에 있던 태풍 SUDAL (0401)로, 이때 중심기압은 990 hPa, 최대풍은 45 kt 이었다. 태풍 정보는 Table 3과 같았다.

Fig. 11의 모습은 태풍 정보보다 급경사를 보였고, r_m 의 위치도 r30과 비교해서 너무 안쪽으로 치우쳐 나타났다. 따라서 보정 과정에서 r_m 의 위치를 수정했다. V_{max} 가 50 kt 보다 작고, r_m 이 r30의 1/3되는 지점보다 안쪽으로 위치해있을 경우 r_m 의 위치를 r30의 1/3되는 지점으로 수정한다. 그리고 p_n 의 값을 1010로 증가시켜

서 Fig. 12의 형태를 갖추도록 수정했다. 이러한 보정 과정은 프로그램 내에서 자동으로 판단하고 수정한다. 이 경우 태풍 정보에서의 30 kt 풍속에 대한 장반경은 518.84 km 였고, 계산된 풍속 변화 곡선에서 30 kt 반경은 525 km 였다. 오차는 6.16 km 였다.

3.4 적절한 풍속 변화를 구하는데 실패한 경우

이러한 수정작업을 수동이 아닌 자동으로 하다 보니, 자동화의 한계가 있었다. 물론 프로파일을 매번 그려보고 변수를 수정한다면 거의 완벽하겠지만, 자동으로 하다 보면 30번을 반복해서 수정해도 r30, r50 그리고, V_{max} 와 적절한 바람 분포의 형태를 끝내 못 찾아낼 경우가 있다. 이런 경우 특히 아주 강한 태풍의 경우에서 많이 나타나는데, 강한 태풍임에도 불구하고, r30, r50이 상대적으로 작을 경우 바람 분포 함수를 구하기가 어려웠다. 이런 경우에는 r64, r34를 r_m , r50, r30의 사이에 적절히 위치하도록 일률적으로 정했다.

r64가 r_m 보다 작을 때

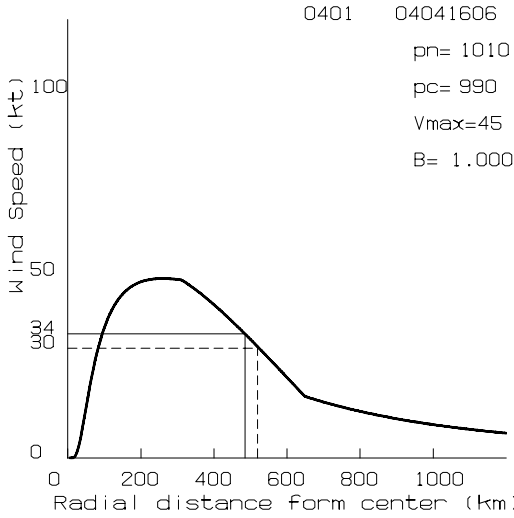


Fig. 12. Holland wind profile after adjustment of SUDAL(0401) on 16 April 2004.

$$: r_{64} = r_m + (r_{50} - r_m) \times 0.33$$

r64가 r50보다 클 때

$$: r_{64} = r_m + (r_{50} - r_m) \times 0.66$$

Vmax가 50이상이고, r34가 r30보다 클 때

$$: r_{34} = r_{50} + (r_{30} - r_{50}) \times 0.66$$

Vmax가 50이하이고, r34가 r30보다 클 때

$$: r_{34} = r_m + (r_{30} - r_m) \times 0.66$$

Fig. 13의 사례는 2004년 6월 16일 00UTC에 있던 태풍 DIANMU (0406)의 바람 분포로, 중심기압이 915 hPa, 최대풍이 100 kt로 강했다. 태풍 정보는 Table 4와 같았다.

이때 Holland 식에 따른 바람 분포 함수는 태풍 정보의 r30, r50보다 넓게 나타났기 때문에 pn을 줄여서 경사를 완만하게 만들었다. 그러나 pn값이 976까지 떨어진 후에 경사가 커졌다 작아졌다 반복하면서 r30과 함수 내의 30 kt 반경의 차가 좁혀지지 않았다. 이런 경우에는 r34와 r64의 위치를 r30과 r50에 비해서 적합한 위치가 되도록 정했다. 64 kt 반경은 r50으로부터 rm과 r50의 중간 거리의 2/3되는 지점을 r64로 보았으며, r34는 r50으로부터 r50과 r30의 중간 거리의 2/3되는 지점으로 정했다 (Fig. 14). 그러나 이러한 문제에 대해서는 차후 체계적인 방법에 대한 노력이 더 필요하다고 본다.

이 경우 태풍 정보의 30 kt 풍속에 대한 장반경은 648.55 km였으며, 계산된 풍속 변화 곡선에서의 30 kt

반경은 725 km였다. 그러나 이 경우에는 위에서 언급한 조건에 따라 곡선과 상관없이 일률적으로 값이 정해

Table 4. As in Table 1 except for DIANMU(0406) at 00UTC 16 June 2004.

Pc (hPa)	Vm (kt)	D50L	r50L (NM)	r50S (NM)	D30L	r30L (NM)	r30S (NM)
915	100	N/A	150	150	S	350	250

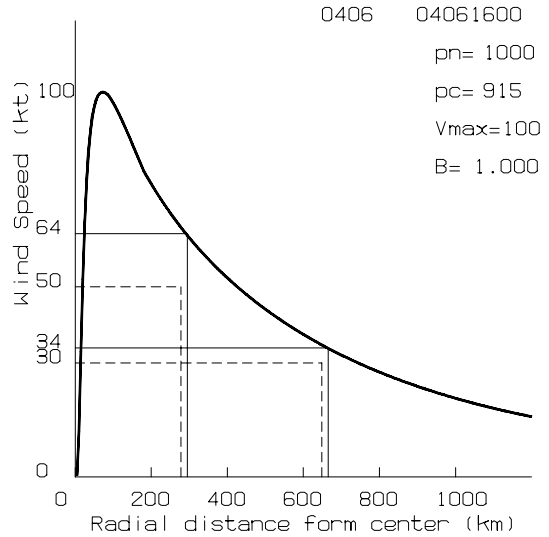


Fig. 13. Holland wind profile before adjustment of DIANMU(0406) on 16 June 2004.

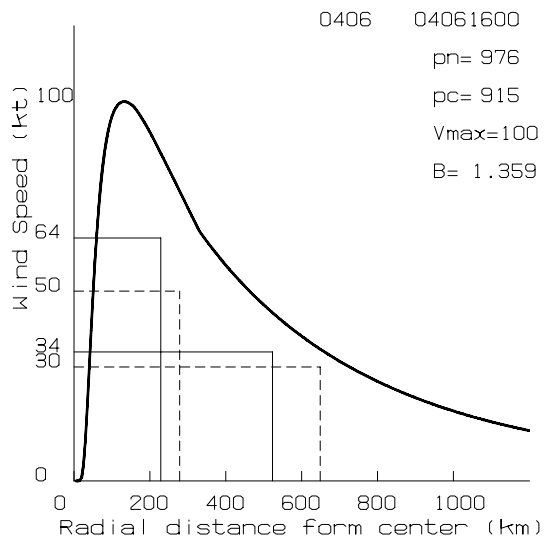


Fig. 14. Holland wind profile after adjustment of DIANMU(0406) on 16 June 2004.

지도록 되어있기 때문에 결국은 태풍 정보 그대로 정해 지게 되고, 오차는 없다.

3.5 결과 검증

위에서 설명한 과정을 2006년 모든 태풍에 대해서 적용했다. 총 23개의 태풍이 있었으며, 최대풍속이 30 kt 이상인 사례들에 대해 계산했다. 비축대칭 태풍일 경우에는 장반경과 단반경 각 방향에 대해서 모두 값을 구했으며, 총 1097 사례에 대해서 풍속 반경을 구했다. Holland 공식을 이용해서 구한 30 kt 반경과 태풍 정보의 30 kt 반경을 비교한 결과 전체 거리 오차가 27.39 km 였다. 3.4장의 조건대로 계산 결과가 나왔을 경우에는 일률적으로 태풍 정보값을 정하게 되는데, 이때는 오차가 0이 된다. 전체 사례 중 이러한 조건에 의해 일률적으로 값이 정해진 사례는 53사례였으며, 이 사례를 제외하고 다시 구한 전체 오차는 28.78 km 였다.

4. 결론

본 연구에서는 동경 RSMC에서 발행하는 태풍정보 중 최대풍속, 중심기압, 30 kt 반경, 50 kt 반경을 이용하여 34 kt 반경과 64 kt 반경을 추정하는 알고리즘을 제시하였다. 이 알고리즘은 Holland의 경험식을 기반으로 개발되었다.

Holland 공식의 주요 인자인 A, B 값으로 구성되는 바람 분포 함수를 구한 후 34 kt, 64 kt 이상이 되는 지점을 찾아서 태풍 정보에서 제공하는 30 kt 반경 거리와 비교함으로써 적절한 바람 분포가 되도록 변수들을 수정했다. 우선 p_n 값을 수정하였고, 수정한 바람분포가 태풍 정보에 수렴하지 않을 경우, B값을 수정했다. 태풍 정보보다 완만하게 나타났을 경우에는 p_n 을 줄이고, B값을 늘려서 수정했고, 태풍 정보보다 경사지게 나타났을 경우에는 p_n 을 늘리고, B값을 줄여서 수정했다. 자동화 단계에서는 parameter 수정 과정을 통해서도 r_{34} , r_{64} 의 거리가 r_{30} 과 비교해 적절하지 못할 경우에는 r_m 과 r_{30} 사이에 그 값이 놓이도록 했으며, 이러한 경우, 두 반경의 추정 방법에 대해서는 차후 체계적인 방법을 마련해야할 것이다.

2006년 모든 태풍들에 대해서 적용한 결과를 태풍 정보와 비교한 결과 전체 오차는 28.78 km 였다. 이렇게 r_{34} 와 r_{64} 는 미국의 국립허리케인센터 제공되는 콘텐

츠 중 하나인 34 kt/64 kt 바람 영향 범위를 복서태평양 태풍 자료로 재구성하는 데 있어서 필수적 요소로 활용되었다 (<http://www.typhoon.or.kr>). 2008년부터 기상청 태풍센터가 개소하여 본격적으로 태풍업무가 시작되면 이 알고리즘을 기반으로 실시간 태풍정보로 제공할 수 있을 것으로 기대한다.

사 사

이 연구는 국립기상연구소의 주요사업인 “진보된 태풍 분석 및 예측시스템 개발 연구”의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

- 기상청, 1996: *태풍백서*. 기상청, 261 pp.
- Holland, G. J., 1980: An analytic model of the wind and pressure profiles in hurricanes. *Mon. Wea. Rev.*, **108**, 1212-1218.
- Jakobsen, F., and H. Madsen, 2004: Comparison and further development of parametric tropical cyclone models for storm surge modelling. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, **92**, 375-391.
- Willoughby, H. E., and M. E. Rahn, 2004: Parametric representation of the primary hurricane vortex. part I: Observations and evaluation of the Holland(1980) model. *Mon. Wea. Rev.*, **132**, 3033-3048.
- _____, R. W. R. Darling, and M. E. Rahn, 2006: Parametric representation of the primary hurricane vortex. part II: A new family of sectionally continuous profiles. *Mon. Wea. Rev.*, **134**, 1102-1120.
- Xie, L., and S. Bao, 2006: Areal-Time hurricane surface wind forecasting model: Formulation and verification. *Mon. Wea. Rev.*, **134**, 1355-1370.
- Macafee, A. W., and G. M. Pearson, 2006: Development and testing of tropical cyclone parametric wind models tailored for midlatitude application-preliminary results. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **45**, 1244-1260.
- Kwon, H. J., S. H. Won, M. H. Ahn, A. S. Suh, and H. S. Chung, 2002: GFDL-Type typhoon initialization in MM5. *Mon. Wea. Rev.*, **130**, 2966-2974.
- 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.
- Knaff, J. A., R. M. Zehr, 2007: Reexamination of tropical cyclone wind-pressure relationships. *Mon. Wea. Rev.*, **22**, 71-88.