

이동속도와 방향을 고려한 수치모델의 태풍진로 예측성 평가

신현진* · 이우정 · 강기룡 · 변건영 · 윤원태
기상청 관측기반국 국가태풍센터

(접수일: 2014년 9월 2일, 게재확정일: 2014년 10월 29일)

Evaluation of the Numerical Models' Typhoon Track Predictability Based on the Moving Speed and Direction

Hyeonjin Shin*, WooJeong Lee, KiRyong Kang, Kun-Young Byun, and Won-Tae Yun

National Typhoon Center/KMA, Jeju, Korea

(Manuscript received 2 September 2014; accepted 29 October 2014)

Abstract Evaluation of predictability of numerical models for tropical cyclone track was performed using along-and cross-track component. The along-and cross-track bias were useful indicators that show the numerical models predictability associated with cause of errors. Since forecast errors, standard deviation and consistency index of along-track component were greater than those of cross-track component, there was some rooms for improvement in along-track component. There was an overall slow bias. The most accurate model was JGSM for 24-hour forecast and ECMWF for 48-96-hour forecast in direct position error, along-track error and cross-track error. ECMWF and GFS had a high variability for 24-hour forecast. The results of predictability by track type showed that most significant errors of tropical cyclone track forecast were caused by the failure to estimate the recurvature phenomenon.

Key words: Tropical cyclone track, predictability, along-track, cross-track, numerical model

1. 서 론

우리나라는 매년 약 3개 정도의 태풍에 직접 혹은 간접적인 영향을 받고 있고, 그로 인한 인명 및 재산 피해가 상당하다(KMA, 2011b). 특히 한반도가 태풍의 영향권에 들 경우에 언제 어느 지역으로 태풍이 접근하여 통과할 것인지는 방재대책과 직접적인 관련이 있으므로, 태풍의 진로예측은 그 중요성이 크다고 할 수 있다. 2008년 국가태풍센터 개소 이후, 2009년부터 2012년까지의 기상청 태풍진로 예보오차(48시간 기준)는 각각 213.5 km (KMA, 2009), 207 km (KMA, 2010), 181.6 km (KMA, 2011a), 180.6 km (KMA, 2012)

로, 그 정확도가 지속적으로 향상되었으며, 2012년에는 미국의 오차 161.3 km, 일본의 오차 198.9 km (KMA, 2012)와도 비교할 만한 수준이다. 태풍진로 예보오차는 현재의 수준을 정확히 파악하고, 오차의 원인을 구체적으로 진단한다면 앞으로도 계속 개선될 수 있을 것으로 예상된다. 이를 위해서 예보결과 검증과 예보가이던스로 활용가치가 높은 수치모델의 성능평가는 필수적이다.

기존의 태풍진로 예보검증은 예보위치와 분석위치의 단순한 거리차이인 단순거리오차(direct position error)에 초점이 맞추어져 있다. 단순거리오차는 태풍진로예보에 대한 일반적인 오차수준을 나타내지만, 예보한 태풍이 실제 태풍보다 느렸는지 빨랐는지, 왼쪽으로 치우쳤는지 오른쪽으로 치우쳤는지에 대한 정보는 포함하고 있지 않다(Aemisegger, 2009). 즉, 단순거리오차는 서로 다른 예보위치가 동일한 오차를 가질 가능성을 포함하여 오차요인을 구체적으로 파악하기

*Corresponding Author: Hyeonjin Shin, National Typhoon Center/KMA, 2 Seoseongro 810-gil, Namwon-eup, Seogwipo-si, Jeju 699-942, Korea.

Fax : +82-64-805-0368

E-mail : cien@korea.kr

Table 1. List of numerical models' output used in this study.

Model	Full name or short description	Resolution	TC bogus	Source agency
GDAPS	Global Data Assimilation and Prediction System	25 km	Yes	KMA
RDAPS	Regional Data Assimilation and Prediction System	12 km	Yes	KMA
KEPS	Korea Ensemble Prediction System	40 km	No	KMA
TWRF	Regional TC-forecasting model based on WRF with GFDL type bogussing	15 km	Yes	KMA
ECMWF	European Centre for Medium Range Weather Forecasts	50 km	No	ECMWF
GFS	Global Forecast System	100 km	No	NCEP
JGSM	Japanese Global Spectral Model	18 km	Yes	JMA
TEPS	Typhoon Ensemble Prediction System	56 km	Yes	JMA

Korea Meteorological Administration (KMA), European Centre for Medium Range Weather Forecasts (ECMWF), US National Centers for Environmental Prediction (NCEP), Japan Meteorological Agency (JMA).

어려운 한계점이 있다. 이를 보완하기 위해서는 단순 거리오차를 태풍진행방향과 태풍진행 수직방향 성분으로 분리한 지표의 도입이 필요하다. 이 지표는 Neumann and Pelissier (1981)에 의해 고안되었으며, 태풍의 진로예보를 평가하고 오차의 원인을 규명하는 많은 연구에 사용되어왔다(Neumann and Pelissier, 1981; Elsberry and Peak, 1986; Peak and Elsberry, 1986; Rennick, 1999; Fogarty and Bowyer, 2008 etc.). 한편, 예보 가이드선로서 수치모델의 활용가치를 논하는 데 쓰이는 지표로는 예측정확도를 진단하는 예측오차를 비롯하여 예측경향을 살펴볼 수 있는 바이어스, 예측오차가 산포된 정도(변동성)를 나타내는 표준편차, 그리고 지난 예보에 대한 일관적인 정도를 가늠할 수 있는 일관성 지수 등이 있다.

이 연구는 태풍예보에 사용되고 있는 여러 수치모델의 태풍진로 예측성을 평가하는 것을 목적으로, 태풍진행방향과 태풍진행 수직방향 성분을 고려하여 수치모델의 예측정확도와 예측경향 그리고 예측변동성과 일관성을 파악하고자 한다. 2장에서는 수치모델의 태풍진로 예측성 평가에 사용된 자료 및 방법에 대해 기술하였고, 3장에서는 최근 4년간 수치모델들의 평균적인 태풍진로 예측성과 진로유형별 태풍진로 예측성을 평가한 결과를 제시하였으며, 4장에서는 연구결과를 요약하여 결론을 내렸다.

2. 자료 및 분석방법

2.1 자료

본 연구는 최근 4년간(2010~2013년) 북서태평양에서 발생한 태풍을 대상으로, 일본 동경 지역특별기상센터(Regional Specialized Meteorological Center-Tokyo, RSMC-Tokyo)의 태풍 최적경로(best track) 자료를 관측값으로 사용하였고, 국가태풍센터에서 사용하는 수치

모델자료 중에서 2010년부터 자료가 존재하고 그 양이 비교적 많은 8개 모델의 자료를 예측 값으로 사용하였다. 사용된 모델자료는 기상청(Korea Meteorological Administration)의 GDAPS, RDAPS, KEPS, TWRF와, 유럽중기예보센터(European Centre for Medium Range Weather Forecasts)의 ECMWF, 미국 국립환경 예측센터(National Centers for Environmental Prediction)의 GFS, 일본기상청(Japan Meteorological Agency)의 JGSM과 TEPS의 자료이다(Table 1). GDAPS, ECMWF, GFS, JGSM은 전지구모델이고, RDAPS는 지역모델이며, TWRF는 태풍전용모델, KEPS는 앙상블모델, TEPS는 태풍앙상블모델이다. 전지구 모델 중에 수평해상도가 가장 높은 모델은 JGSM이다. 그리고 KEPS, ECMWF, GFS를 제외한 모델들은 관측자료 보거싱을 수행한다.

두 개 이상의 모델을 의미 있게 평가하기 위해서는 동일 샘플이 바탕이 되어야 하므로, 본 연구에서는 최근 4년간 북서태평양에서 발생한 91개 태풍에 대한 0000 UTC, 1200 UTC 모델 자료 중 8개 모델이 공통적으로 갖고 있는 61개 태풍에 대한 자료를 사용하였다. 모델자료는 120시간(5일) 예측까지 평가되었으나, 72시간까지 예측을 생산하는 RDAPS와 84시간까지 예측을 생산하는 JGSM은 72시간 예측까지만 평가되었다.

2.2 분석방법

2.2.1 예측오차

태풍진로 예보정확도 검증에 주로 사용되는 지표는 예보위치와 관측위치 사이의 대권거리로 정의되는 단순거리오차이고, 이 오차는 태풍진행방향 편차(along-track bias)와 태풍진행 수직방향 편차(cross-track bias)로 성분을 분리할 수 있다(Fig. 1). 태풍진행방향오차(along-track error)는 태풍진행방향 편차의 절대값으로

1. Direct Position Error
2. Along Track Bias (+: fast /-: slow)
3. Cross Track Bias (+: right /-: left)

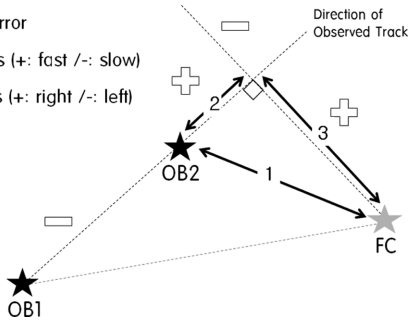


Fig. 1. Types of positional forecast errors. Dark stars (OB1, OB2) indicate the observed position at 6-hour intervals and a gray star (FC) represents forecasted position 6-hour later at OB1.

정의되고, 태풍진행 수직방향오차(cross-track error)는 태풍진행 수직방향 편차의 절대값으로 정의된다.

이동속도개념을 포함하는 태풍진행방향 편차는 관측된 태풍과 예측된 태풍이 태풍의 진행방향을 따라 다른 속도로 움직였을 때 발생하는 위치오차이다. 양의 값은 예측된 태풍의 이동속도가 더 빨랐다는 의미이고, 음의 값은 예측된 태풍의 이동속도가 더 느렸다는 의미이다. 방향개념을 포함하는 태풍진행 수직방향 편차는 태풍의 진행방향에 수직인 축을 따르는 위치오차로, 관측된 태풍이 예측된 태풍과 다른 방향으로 움직였을 때 발생하는 오차이며, 예측위치가 태풍의 진행방향 양 옆으로 얼마나 치우쳐 있는지 알 수 있다. 양의 값은 (북반구 기준)예측된 태풍의 위치가 관측된 태풍진로의 오른쪽에 위치해 있다는 의미이고, 음의 값은 예측된 태풍의 위치가 관측된 태풍진로의 왼쪽에 위치해 있다는 의미이다. 태풍진행방향 편차와 태풍진행 수직방향 편차의 개념도는 Fig. 1과 같다. Figure 1의 OB1과 OB2가 6시간 간격의 태풍 실제경로이고, FC가 OB1로부터 6시간 후의 태풍 예상 위치 일 때, 태풍진행방향 편차와 태풍진행 수직방향 편차를 구하는 식(Aemisegger, 2009)은 Eqs. (1), (2)와 같다. Equations (1), (2)에서 $\|$ 는 벡터의 크기(norm)를 의미한다.

$$ATB = \frac{\overrightarrow{OB1OB2} \cdot \overrightarrow{OB1FC}}{\|\overrightarrow{OB1OB2}\|} - \|\overrightarrow{OB1OB2}\|, \quad (1)$$

$$ATE = |ATB|,$$

$$CTB = \sqrt{\|\overrightarrow{OB1FC}\|^2 - \frac{(\overrightarrow{OB1OB2} \cdot \overrightarrow{OB1FC})^2}{\|\overrightarrow{OB1OB2}\|^2}}, \quad (2)$$

$$CTE = |CTB|,$$

단순거리오차, 태풍진행방향오차, 태풍진행 수직방

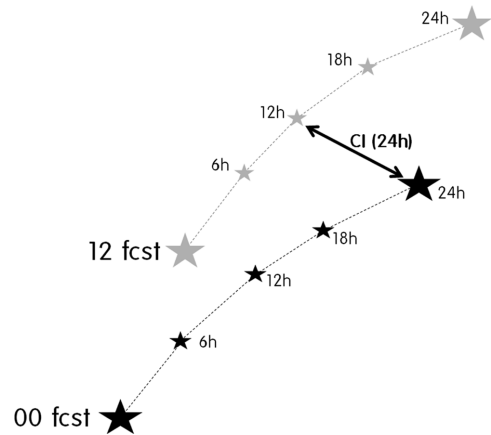


Fig. 2. Diagram of Consistency index. Black stars indicate a numerical model's forecast at 00 UTC, gray stars indicate a numerical model's forecast at 12 UTC. Big stars represent predicted position at a 24-hour intervals and small stars represent predicted position at a 6-hour intervals.

향오차로부터 오차의 절대적인 크기를 알 수 있으며, 태풍진행방향 편차, 태풍진행 수직방향 편차로부터 오차의 경향을 알 수 있다. 대권거리를 구하는 방법으로는 간단하면서도 정확한 하버사인공식(Haversine formula; Veness, 2010)을 사용하였다. 그리고 이러한 오차들에 대한 표준편차를 계산하여 오차의 산포 정도로부터 예측변동성을 파악하였다.

2.2.2 일관성 지수

일관성 지수(consistency index)는 시간이 경과함에 따른 수치모델의 진로예측간 차이로, 각 예측의 예측지점과 각 예측의 12시간 후 예측에서 동일한 시점의 예측지점을 비교하여 이전 시간 예측이 일관되게 유지되는 정도를 정량적으로 나타낸다(Fig. 2). 일관성 지수 또한 예측오차와 마찬가지로 태풍진행방향 일관성(along-track consistency)과 태풍진행 수직방향 일관성(cross-track consistency)으로 나누어 일관적인 정도를 성분 별로 구분하였다. 값이 작을수록 예측이 일관됨을 의미하고, 이를 일관성이 높다고 판단한다. 일관성 지수의 계산은 Fig. 2의 0000 UTC 예측을 관측값, 1200 UTC 예측을 예측값으로 하였을 때 예측오차(단순거리오차, 태풍진행방향오차, 태풍진행 수직방향오차)를 계산하는 방식과 동일하다.

3. 결 과

3.1 평균적인 태풍진로 예측성

먼저 수치모델의 최근 4년간 평균적인 예측오차의

Table 2. Mean direct position error of numerical models' forecast for tropical cyclone track from 2010 to 2013. \bar{X} , σ , N indicate the mean direct position error, the standard deviation and number of sample cases, respectively. The unit of \bar{X} and σ is in kilometers.

Forecast time (h)		Model								Mean
		GDAPS	RDAPS	KEPS	TWRF	ECMWF	GFS	JGSM	TEPS	
0	\bar{X}	18.7	18.7	18.7	36.4	18.7	18.7	19.2	19.5	21.1
	σ	31.3	31.3	31.3	108.0	31.3	31.3	32.5	32.7	41.2
	N	(399)	(399)	(399)	(399)	(399)	(399)	(399)	(399)	(3192)
24	\bar{X}	114.4	120.9	126.4	<i>126.9</i>	98.9	94.5	89.8*	104.8	109.6
	σ	71.7	85.1	82.1	78.6	<i>148.5</i>	125.1	58.0*	68.2	89.7
	N	(378)	(362)	(375)	(379)	(326)	(374)	(375)	(381)	(2950)
48	\bar{X}	221.4	231.9	241.6	<i>245.6</i>	140.2*	162.9	182.7	221.5	206.0
	σ	149.2	<i>198.8</i>	169.9	143.9	106.5*	178.4	130.1	152.2	153.6
	N	(335)	(313)	(329)	(336)	(276)	(337)	(329)	(344)	(2599)
72	\bar{X}	356.7	391.0	394.5	<i>425.6</i>	228.9*	265.9	304.2	362.5	341.2
	σ	275.3	<i>380.0</i>	311.6	268.1	176.6*	250.8	235.1	273.1	271.3
	N	(262)	(240)	(260)	(274)	(218)	(275)	(259)	(284)	(2072)
96	\bar{X}	520.4	-	521.5	<i>661.3</i>	325.0*	386.1	-	537.9	492.0
	σ	436.1	-	390.0	<i>474.7</i>	257.4*	341.4	-	408.5	384.7
	N	(193)	-	(188)	(210)	(166)	(216)	-	(220)	(1193)
120	\bar{X}	763.3	-	679.1	<i>1007.8</i>	487.4*	539.7	-	693.8	695.2
	σ	605.2	-	519.1	<i>841.6</i>	388.5*	434.2	-	497.6	547.7
	N	(133)	-	(126)	(147)	(121)	(155)	-	(159)	(841)

The bold face represents the smallest 3 values and the asterisk (*) represents the minimum value. The italic represents the maximum value.

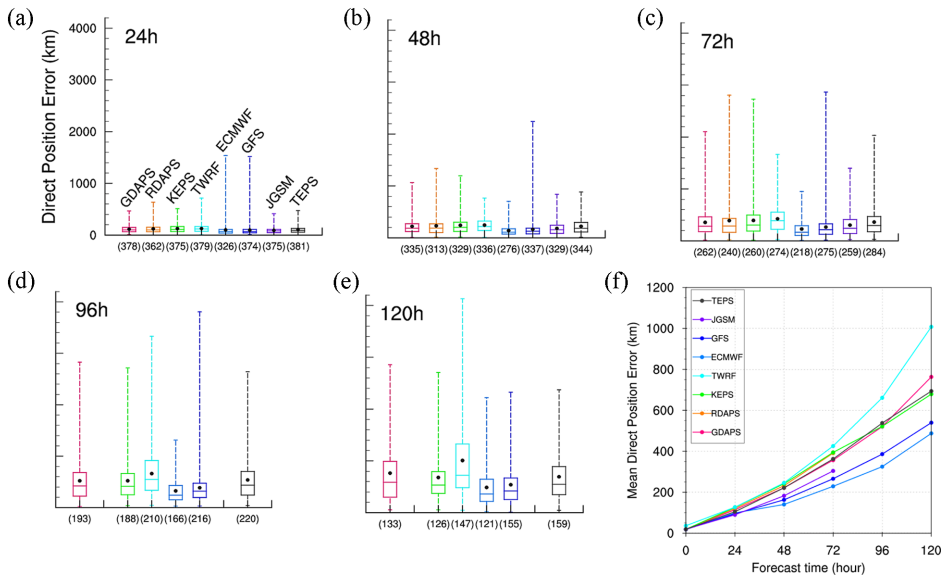


Fig. 3. Distribution of direct position error by forecast time from 2010 to 2013. The top and bottom point, and line across each small box in panel (a)~(e) represent the 25th and 75th percentiles, and the median, respectively. And dot represents mean value. The numbers in parentheses along the x-axis refer to the number of sample cases. Bottom right panel indicates the mean direct position error.

Table 3. Mean along-track and cross-track error of numerical models' forecast for the tropical cyclone track from 2010 to 2013. $\overline{|X|}$, $q_{0.5}$, σ indicate the mean absolute bias, the value of second quartile and the standard deviation of along-track bias (ATB) and cross-track bias (CTB), respectively. The unit of values is in kilometers.

	Forecast time (h)	Model								Mean	
		GDAPS	RDAPS	KEPS	TWRF	ECMWF	GFS	JGSM	TEPS		
ATB	24	$\overline{ X }$	83.2	88.4	91.2	83.5	67.0	64.6	61.9*	76.7	77.1
		$q_{0.5}$	-47.9	-48.3	-46.2	7.3	0.7	-10.7	-23.7	-40.3	-26.1
		σ	95.8	107.0	108.4	107.6	<i>156.3</i>	112.9	77.9*	90.5	107.1
	48	$\overline{ X }$	167.0	180.2	183.8	159.9	95.4*	109.3	140.0	175.2	151.4
		$q_{0.5}$	-104.6	-94.7	-102.3	-2.3	-10.4	-36.9	-62.9	-94.0	-63.5
		σ	197.1	<i>235.0</i>	222.9	215.8	134.3*	181.7	173.5	201.8	195.3
	72	$\overline{ X }$	288.3	<i>320.7</i>	316.1	324.8	174.1*	197.8	252.4	297.0	271.4
		$q_{0.5}$	-133.9	-181.2	-171.2	-32.9	-36.4	-47.4	-126.5	-148.4	-109.7
		σ	366.2	<i>423.9</i>	393.7	421.6	236.6*	301.5	311.9	364.1	352.4
	96	$\overline{ X }$	435.9		433.4	<i>492.4</i>	262.2*	293.6		437.2	392.5
		$q_{0.5}$	-185.6		-214.7	-105.1	-52.9	-89.0		-234.3	-146.9
		σ	562.4		539.9	<i>659.1</i>	359.1*	433.0		512.2	511.0
120	$\overline{ X }$	675.6		585.6	<i>759.8</i>	360.9*	405.5		582.5	561.7	
	$q_{0.5}$	-261.5		-325.9	-134.6	-99.7	-155.3		-315.0	-125.3	
	σ	811.4		709.9	<i>1067.9</i>	493.2*	556.8		677.4	719.4	
CTB	24	$\overline{ X }$	62.3	63.7	69.0	76.8	58.8	55.6	51.6*	54.9	61.6
		$q_{0.5}$	-13.3	-9.2	-16.6	-19.7	-16.3	-13.0	-16.3	-17.7	-15.3
		σ	80.5	81.9	91.4	102.1	83.4	<i>106.3</i>	66.1*	72.1	85.5
	48	$\overline{ X }$	108.4	106.7	114.2	<i>147.2</i>	83.6*	96.7	85.7	96.0	104.8
		$q_{0.5}$	-17.2	-22.2	-16.1	-44.9	-13.3	-18.8	-20.4	-15.2	-21.0
		σ	142.1	142.4	154.2	<i>182.0</i>	112.7*	150.6	116.6	131.7	141.5
	72	$\overline{ X }$	150.1	165.5	170.7	<i>206.2</i>	116.6*	137.0	122.1	142.8	151.4
		$q_{0.5}$	-12.2	-20.3	-9.6	-20.3	-14.3	-14.0	-29.3	-21.0	-17.6
		σ	194.5	237.2	253.7	<i>265.6</i>	161.1*	193.7	163.0	192.3	207.6
	96	$\overline{ X }$	195.7		208.2	<i>337.5</i>	144.6*	188.7		223.1	216.3
		$q_{0.5}$	17.7		31.0	87.3	-18.8	16.5		4.9	23.1
		σ	259.7		281.8	<i>447.1</i>	192.9*	267.1		329.9	296.4
120	$\overline{ X }$	257.6		250.2*	<i>491.2</i>	251.2	263.5		262.9	296.1	
	$q_{0.5}$	24.4		58.2	58.3	-34.8	0.0		45.4	25.3	
	σ	355.5		343.3	<i>714.3</i>	357.0	400.5		339.5*	418.4	

The bold face represents the smallest 3 values and the asterisk (*) represents the minimum value. The italic represents the maximum value.

크기와 오차의 산포 정도를 파악하기 위해 단순거리 오차와 표준편차를 계산하였다(Table 2). 그리고 Fig. 3에 단순거리오차의 수치모델 별 평균 값과, 모든 예측시간에 해당하는 단순거리오차분포를 Boxplot으로 나타내었다. Boxplot에는 최소값, 제25백분위수, 중간값, 제75백분위수, 최대값이 표출되어 평균 값만으로 알 수 없는 오차의 분포특징을 살펴보기에 용이하다.

태풍의 초기위치는 TWRF를 제외한 모델이 실제 태풍위치와 약 19 km 정도의 오차를 가졌다. TWRF

는 2011년 12호 태풍사레에서 8월 26일 00시에 2087.4 km에 달하는 큰 오차를 가져, 이 값이 평균예측오차와 표준편차에 영향을 준 것으로 확인되었다. 각각의 예측시간에서 수치모델들은 평균적으로 109.6 km(24시간), 206.0 km(48시간), 341.2 km(72시간), 492.0 km(96시간), 695.2 km(120시간)의 오차를 가진다. 오차와 표준편차가 가장 작은 모델은 24시간 예측에서 JGSM, 48~120시간 예측에서 ECMWF이다. 이 두 모델의 높은 예측정확도는 작은 값에 대부분의 오차가 분포하

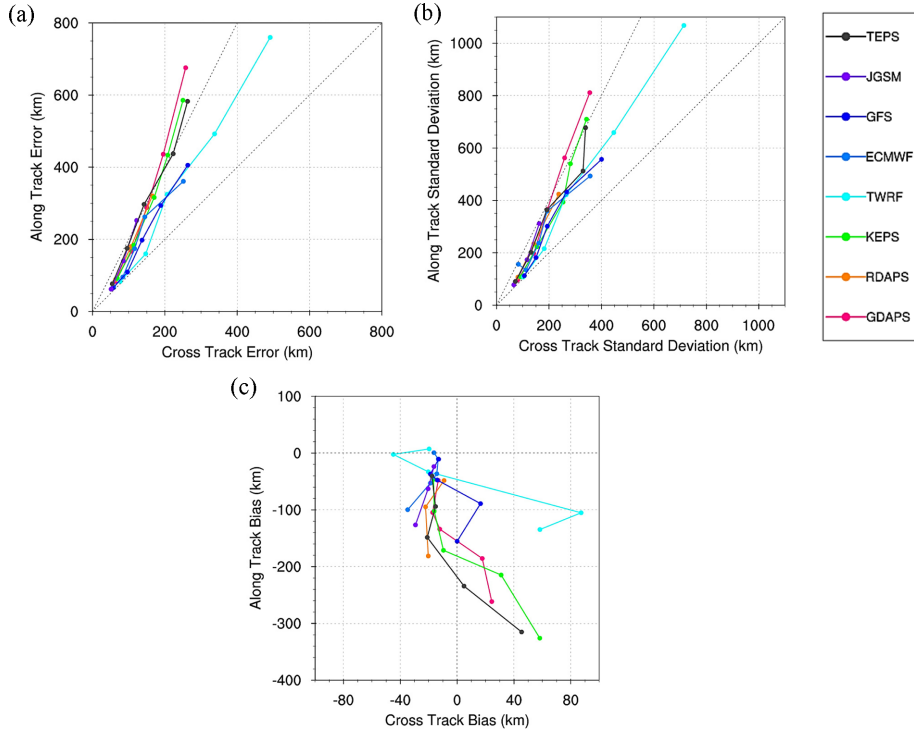


Fig. 4. Characteristics of the errors using along- and cross-track component of numerical models' forecast for the tropical cyclone track from 2010 to 2013. (a) Relationship between along-track error and cross-track error, (b) relationship between along-track standard deviation and cross-track standard deviation, and (c) median bias of along- and cross-track. Each dot representing value of each forecast time was connected in (a) (b) (c).

는 양상에서도 확인할 수 있다. 모든 예측시간에서 높은 예측정확도를 보인 ECMWF와 GFS의 경우, 24시간 예측에서 특히 큰 값의 표준편차를 가져 큰 예측 변동성을 보인다. 또한 GFS는 48시간 예측에서도 큰 예측변동성을 가진다. 그러나 그 이후의 예측 시간에서 ECMWF, GFS는 정확도가 높고 변동성도 작은 예측을 하는 것으로 나타났다.

단순거리오차를 태풍진행방향과 태풍진행 수직방향 성분으로 나누어 살펴본 결과는 Table 3과 같다. 태풍 진행방향오차는 각각의 예측시간에서 평균적으로 77.1 km(24시간), 151.4 km(48시간), 271.4 km(72시간), 392.5 km(96시간), 561.7 km(120시간)이다. 가장 작은 태풍 진행방향오차를 갖는 모델은 24시간 예측에서 JGSM, 48~120시간 예측에서 ECMWF로, 단순거리오차로 평가했을 때 예측정확도가 가장 높았던 모델과 동일하다. 그리고 대부분의 예측시간에서 예측오차가 작은 모델들이 표준편차도 작게 나타나 예측변동성이 작은 것으로 나타났으나, 24시간 예측에서는 오차가 작은 두 모델 ECMWF, GFS가 큰 값의 표준편차를 가져 단순거리오차의 경우와 마찬가지로 큰 예측변동성을

가진다.

태풍진행 수직방향오차는 각각의 예측시간에서 평균적으로 61.6 km(24시간), 104.8 km(48시간), 151.4 km(72시간), 216.3 km(96시간), 296.1 km(120시간)의 오차를 가진다. 가장 작은 태풍진행 수직방향오차를 갖는 모델은 24시간 예측에서 JGSM, 48~96시간 예측에서 ECMWF, 120시간 예측에서 KEPS로 나타났다. 이는 120시간 예측을 제외하고 단순거리오차와 태풍진행방향오차로 평가했을 때 예측정확도가 가장 높았던 모델과 동일하다. 그리고 마찬가지로 대부분의 예측시간에서 예측정확도가 높은 모델들이 작은 예측 변동성을 가지는 것으로 나타났으나, 24시간 예측에서 GFS는 높은 예측정확도에도 불구하고 큰 예측변동성을 가진다.

Figure 4a는 X축을 태풍진행 수직방향오차, Y축을 태풍진행방향오차로 하여 성분 별 평균예측오차 간 관계를 나타낸 그림이다. 각각의 오차는 예측시간에 비례하며, 수치모델들은 대체로 태풍진행 수직방향보다 태풍진행방향으로 큰 오차를 가져 이동속도의 예측정확도가 더 낮음을 알 수 있다. 두 성분의 상대적

Table 4. Mean consistency index (CI), along-track consistency (ATC) and cross-track consistency (CTC) of numerical model's forecast for tropical cyclone track from 2010 to 2013. The unit of values is in kilometers.

	Forecast time (h)	Model								Mean
		GDAPS	RDAPS	KEPS	TWRF	ECMWF	GFS	JGSM	TEPS	
CI	24	95.9	95.4	94.4	<i>100.5</i>	86.2	64.8*	65.3	75.5	87.6
	48	147.0	157.2	141.8	<i>175.5</i>	118.4	108.5*	114.6	119.8	139.2
	72	226.1	256.8	201.5	<i>323.4</i>	157.0*	186.9	161.9	196.4	221.9
	96	305.2		251.5	<i>467.2</i>	207.8*	306.4		286.6	323.4
	120	379.6		265.4*	<i>717.6</i>	269.0	467.2		413.5	449.4
ATC	24	67.9	65.9	64.1	66.9	59.6	47.4	47.0*	56.7	61.2
	48	112.7	114.6	108.6	<i>127.5</i>	84.7	83.2*	88.8	94.0	104.4
	72	184.0	191.8	155.7	<i>244.0</i>	121.0*	151.8	123.4	151.1	171.7
	96	231.1		201.1	<i>335.7</i>	157.8*	226.3		220.2	242.9
	120	284.3		201.6	<i>557.8</i>	200.1*	329.4		316.6	337.9
CTC	24	54.3	54.1	54.9	<i>59.9</i>	49.1	33.2*	35.3	38.0	49.4
	48	72.0	82.9	67.1	<i>94.5</i>	64.6	54.1*	55.5	56.0	70.4
	72	97.8	124.8	93.1	<i>165.4</i>	78.0*	80.6	79.7	91.6	104.7
	96	150.6		109.9	<i>252.3</i>	105.1*	155.3		141.3	161.9
	120	181.6		121.6*	<i>337.8</i>	148.3	251.1		202.5	224.3

The bold face represents the smallest 3 values and the asterisk (*) represents the minimum value. The italic represents the maximum value.

크기는 태풍진행방향오차가 태풍진행 수직방향오차의 최대 약 2.3배 정도이다. Figure 4b는 X축을 태풍진행 수직방향 표준편차, Y축을 태풍진행방향 표준편차로 하여 성분 별 평균예측오차의 분포정도를 상대적으로 비교한 그림이다. 표준편차 또한 예측오차와 마찬가지로 예측시간에 비례하며, 태풍진행 수직방향보다 태풍진행방향으로 더 큰 값을 가져 이동속도의 예측변동성이 더 큰 것으로 나타났다. 두 성분의 상대적 크기는 태풍진행방향 성분이 태풍진행 수직방향 성분의 최대 약 2.1배 정도이다. Figure 4c는 각 모델의 예측시간 별 태풍진행 수직방향 편차와 태풍진행방향 편차의 중간 값을 이어 그린 그림으로, 모델들의 평균적인 예측경향을 직관적으로 살펴볼 수 있다. 대체로 태풍진행방향 편차는 음의 값을 가져 수치모델들이 이동속도를 느리게 예측하는 경향이 나타났다. 그리고 예측시간이 짧은 JGSM과 RDAPS를 제외한 대부분의 모델들이 72시간 예측을 전후로 실제 진로에 대해 왼쪽, 오른쪽으로 치우쳐 예측하는 경향이 있으나, ECMWF는 72시간 이후에도 계속해서 왼쪽으로 치우쳐 예측하는 경향이 있다.

수치모델의 태풍진로 예측오차를 태풍진행방향과 태풍진행 수직방향 성분으로 나누어 살펴본 결과, 수치모델의 진로예측은 태풍진행방향 성분에서 정확도가 낮고 변동성이 커서 이동속도 면에서 오차가 더 크게 발생하는 것으로 보인다. 또한 태풍진행방향으로 음의 값을 가져 이동속도를 느리게 예측하는 경향

이 있으며, 태풍진행 수직방향으로는 72시간까지는 왼쪽으로 치우쳐 예측하는 경향, 그 이후로는 오른쪽으로 치우쳐 예측하는 경향이 나타났다.

Table 4는 수치모델들이 얼마나 일관성 있게 진로 예측을 생산했는지 비교한 결과이다. 시간이 경과함에 따른 수치모델의 진로예측간 단순거리차이로 일관성 지수를 정의하고, 이를 다시 태풍진행방향 일관성과 태풍진행 수직방향 일관성으로 성분을 나누어 살펴보았다. 그리고 Fig. 5에 단순거리차이로 정의한 일관성 지수의 수치모델 별 평균 값과, 태풍진행방향 일관성과 태풍진행 수직방향 일관성 간 관계를 나타내었다. 먼저 단순거리차이로 정의한 일관성 지수 결과로부터 가장 일관성이 높은 모델은 24~48시간 예측에서 GFS, 72~96시간 예측에서 ECMWF, 120시간 예측에서 GDAPS로 나타났다. 태풍진행방향 성분의 일관성이 높은 모델은 24시간 예측에서 JGSM, 48시간 예측에서 GFS, 72~120 시간 예측에서 ECMWF이고, 태풍진행방향 수직성분의 일관성이 높은 모델은 24~48시간 예측에서 GFS, 72~96시간 예측에서 ECMWF, 120시간 예측에서 KEPS이다. 최소오차 모델과 최소 일관성 모델을 비교해본 결과, 예측정확도가 높은 모델이 일관성도 높게 나타났다. 그리고 예측오차와 마찬가지로 태풍진행방향 성분이 더 낮은 일관성을 보인다.

3.2 진로 유형별 태풍진로 예측성

Lander (1996)에 의한 북서태평양 태풍 진로 유형

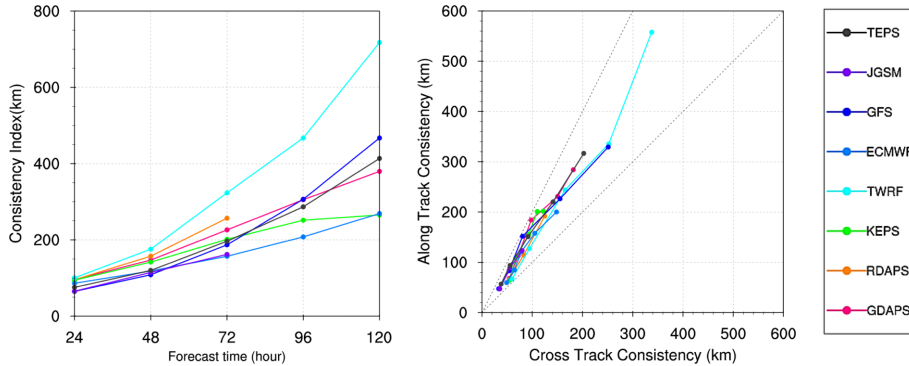


Fig. 5. Mean consistency index (left) and relationship between along-track consistency and cross-track consistency (right) of numerical models' forecast for the tropical cyclone track from 2010 to 2013.

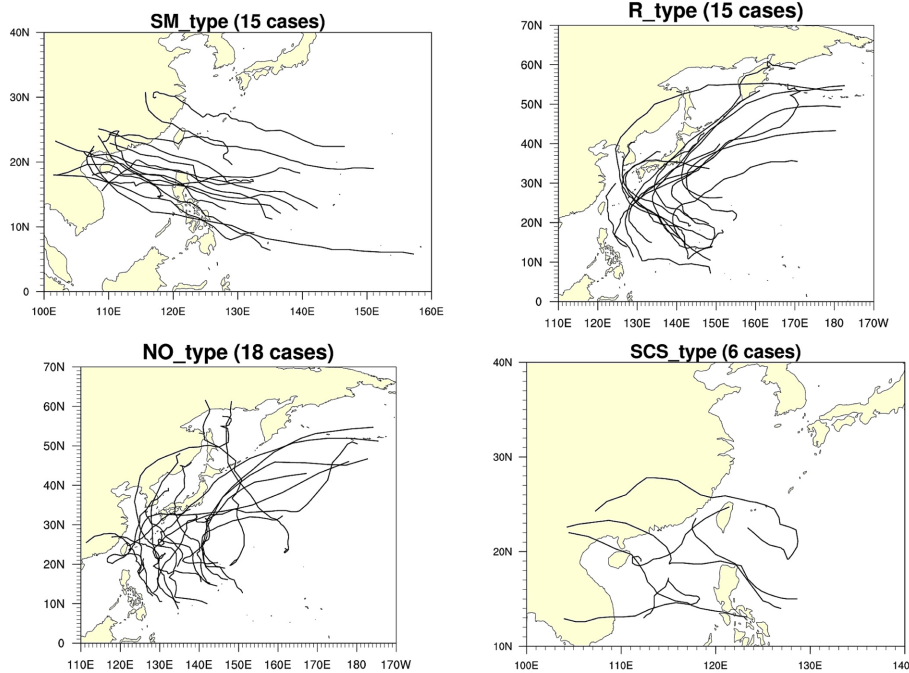


Fig. 6. Typhoon track and number of cases for four track types.

을 이용하여 최근 4년간 발생한 태풍의 진로를 4개 유형으로 분류하고, 진로 유형별로 태풍진행방향과 태풍진행 수직방향 성분을 고려한 48시간 예측정확도와 예측변동성, 일관성 그리고 예측경향을 살펴보았다. 수치모델의 48시간 예측을 평가한 이유는 기상청의 예보평가가 기준이 48시간 오차이기 때문이다. 분류된 네 가지 유형은 i) Straight Moving (SM)유형, ii) Recurving (R)유형, iii) North Oriented (NO)유형, iv) South China Sea (SCS)유형이다. SM유형은 태풍의 발생지점에서 상륙하는 곳(동남아시아, 남중국)까지 일

직선으로 서북서진하는 유형이고, R유형은 처음에 서북서진하다가 느리게 북쪽으로 전향하고 마지막에 고위도의 편서풍을 따라 북동쪽으로 점차 빨리 이동하는 유형이다. NO유형은 일반적으로 발생지역으로부터 북쪽으로 오랜 기간 진행하는데, 크게 S형으로 진행하거나 갑자기 왼쪽 또는 오른쪽으로 전향하며, 대개 7월~10월에 발생한다. SCS유형은 모든 혹은 대부분의 일생을 남중국해에서 보내는 태풍으로, 상륙하기 전 아주 짧은 기간 동안 활동하거나 남중국해의 한정된 지역에서 불규칙하게 움직인다. 사례의 개수

Table 5. Errors and standard deviation of numerical model's 48-hour forecast for tropical cyclone track from 2010 to 2013 by track type. \bar{X} , σ , N indicate the mean value of direct position error (DPE), along-track error (ATE) and cross-track error (CTE), standard deviation and number of sample cases, respectively. The unit of \bar{X} and σ is in kilometers.

Track type	N	DPE		ATE		CTE	
		\bar{X}	σ	\bar{X}	σ	\bar{X}	σ
SM	519	181.6	115.4	123.3	137.6	106.8	144.9
R	674	<i>229.1</i>	<i>167.7</i>	<i>187.1</i>	<i>215.9</i>	94.8	123.8
NO	998	204.7	146.2	141.2	190.6	<i>113.5</i>	<i>148.0</i>
SCS	116	176.8	107.7	127.6	142.4	96.9	118.7

The bold face represents the minimum value and the italic represents the maximum value.

Table 6. The best model, mean error and standard deviation of the best model for 48-hour forecast for tropical cyclone track from 2010 to 2013 by track type. \bar{X} , σ indicate the mean value of direct position error (DPE), along-track error (ATE) and cross-track error (CTE), and standard deviation, respectively. The unit of values is in kilometers.

Track type	DPE		ATE		CTE	
	Best model	\bar{X} (σ)	Best model	\bar{X} (σ)	Best model	\bar{X} (σ)
SM	ECMWF	137.0 (108.0)	ECMWF	82.5 (195.0)	JGSM	85.3 (123.6)
R	ECMWF	138.8 (77.1)	ECMWF	99.2 (126.5)	JGSM	71.5 (83.2)
NO	GFS	144.1 (115.1)	GFS	93.2 (120.3)	ECMWF	89.9 (116.6)
SCS	ECMWF	117.4 (78.5)	ECMWF	83.5 (105.6)	ECMWF	64.0 (88.2)

는 NO유형이 18개로 가장 많았고, SCS유형이 6개로 가장 적었다. Figure 6은 평가에 사용된 태풍사례들의 진로도이다.

Table 5는 진로유형 별로 48시간 예측오차와 표준편차를 비교한 결과이다. 단순거리오차로 평가했을 때 가장 예측정확도가 높은 유형은 SCS유형으로, 작은 값의 표준편차를 가져 변동성도 작은 것으로 나타났다. 태풍진행방향오차로 평가했을 때 가장 예측정확도가 높고 변동성이 작은 유형은 SM유형이고, 태풍진행 수직방향 오차로 평가했을 때 가장 예측정확도가 높은 유형은 R유형이다.

반대로 단순거리오차와 태풍진행방향오차로 평가했을 때 가장 예측정확도가 낮고 변동성이 큰 유형은 R유형이고, 태풍진행 수직방향오차로 평가했을 때 가장 예측정확도가 낮고 변동성이 큰 유형은 NO유형이다. R유형과 NO유형은 둘 다 전향현상을 동반하는 유형으로, 이로부터 수치모델의 태풍진로예측오차는 전향현상을 잘 예측하지 못한 것이 원인으로 사료된다. 특히 R유형은 가장 낮은 태풍진행방향 예측정확도와 가장 높은 태풍진행 수직방향 예측정확도를 보여 성분 별로 예측정확도 차이가 극명하였는데, 이는 전향태풍의 오차가 주로 이동속도를 잘 예측하지 못한 데서 기인한 것임을 나타낸다. 그리고 NO유형은 가장 낮은 태풍진행 수직방향 예측정확도와 두 번째로 낮은 태풍진행방향 예측정확도를 보여 이동속도와

방향 모두에서 오차가 많이 발생했다. 이 결과는 태풍진로의 예측오차를 유발하는 주된 요인 중 한가지는 전향현상(전향여부와 전향 이후의 이동속도)과 관련이 있다(Jarrell et al., 1978)는 연구결과와 일치한다. SM유형은 태풍진행방향 성분의 예측변동성이 더 크게 나타난 다른 유형들과 달리 태풍진행 수직방향 성분의 예측변동성이 더 크게 나타난 것이 특징적이다.

Table 6은 진로유형별 48시간 최소오차 모델과 그 값을 비교한 자료이다. 48시간 단순거리오차로 평가했을 때 가장 예측정확도가 높은 모델은 SM, R, SCS 유형에서 ECMWF로 나타났고, NO유형에서 GFS로 나타났다. 48시간 태풍진행방향오차로 평가했을 때 가장 예측정확도가 높은 모델은 진로유형별로 단순거리오차로 평가한 결과와 같다. 48시간 태풍진행 수직방향오차로 평가했을 때 가장 예측정확도가 높은 모델은 SM, R유형에서 JGSM으로 나타났고, NO, SCS 유형에서 ECMWF로 나타났다.

Figure 7은 수치모델들의 48시간 평균 예측 경향을 진로유형 별로 나타낸 그림이다. 먼저 SM유형을 살펴보면, 수치모델들이 일관적인 방향예측 경향을 갖지는 않았지만 이동속도를 빠르게 예측한 TWRP를 제외하고는 이동속도를 느리게 예측한 경향이 나타났다. R유형은 전체적으로 실제 진로에 대해 왼쪽으로 예측하고 이동속도를 느리게 예측한 경향이 두드러졌다. NO유형도 R유형과 마찬가지로 실제 진로에 대해

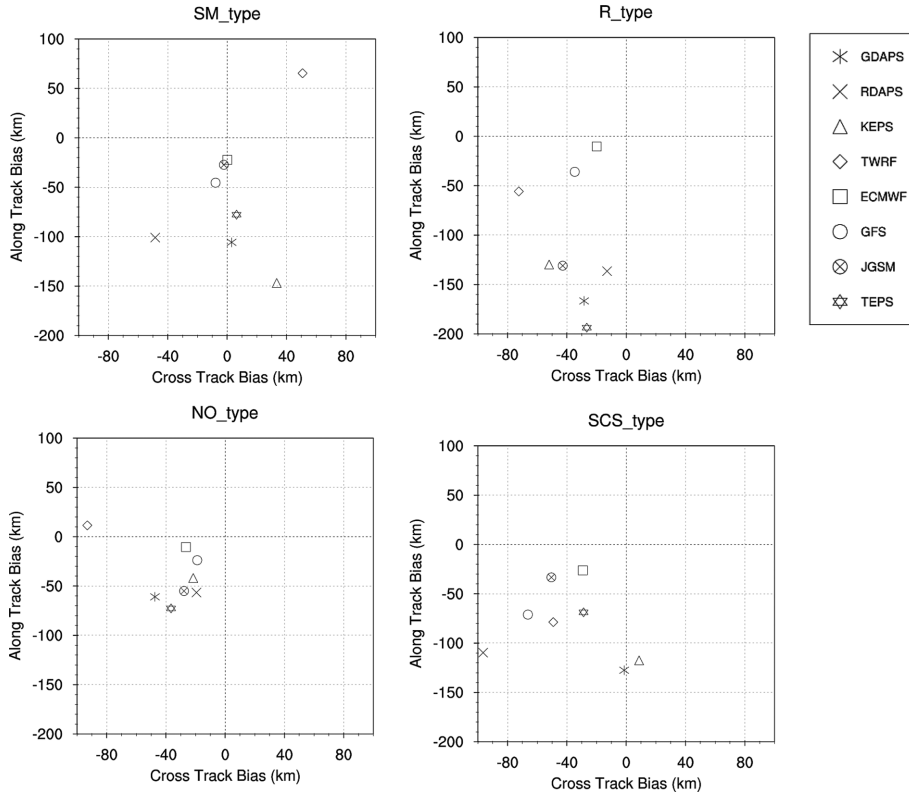


Fig. 7. Median bias of along- and cross-track of numerical models' 48-hour forecast for tropical cyclone track by track type.

Table 7. Mean consistency index (CI), along-track consistency (ATC), cross-track consistency (CTC) and the best model for 48-hour forecast for tropical cyclone track from 2010 to 2013 by track type. The unit of values is in kilometers.

Track type	CI		ATC		CTC	
	\bar{X}	Best model (\bar{X})	\bar{X}	Best model (\bar{X})	\bar{X}	Best model (\bar{X})
SM	115.8	GFS (82.8)	80.9	GFS (59.3)	65.9	GFS (45.0)
R	156.5	ECMWF (128.5)	127.7	ECMWF (93.6)	65.5	TEPS (47.2)
NO	131.4	GFS (100.5)	94.5	GFS (70.6)	71.8	TEPS (55.0)
SCS	216.2	JGSM (94.0)	100.7	JGSM (78.6)	67.7	JGSM (36.2)

The bold face represents the minimum value and the italic represents the maximum value.

왼쪽으로 예측한 경향과 이동속도를 느리게 예측한 경향이 나타났으나, TWRF는 이동속도를 빠르게 예측한 경향이 나타났다. SCS유형도 실제 진로에 대해 왼쪽으로 예측한 경향과 이동속도를 느리게 예측한 경향이 나타났으나, KEPS는 실제 진로에 대해 오른쪽으로 예측한 경향이 나타났다. SM유형을 제외하고는 모든 진로유형에서 실제 진로에 대해 왼쪽으로 예측한 경향과 이동속도를 느리게 예측한 경향이 공통적으로 나타났다. 그리고 TWRF는 SM유형과 NO유형에서 이동속도를 빠르게 예측한 경향이 나타났다.

Table 7은 진로유형 별로 48시간 예측일관성 값을 비교한 결과이다. 먼저 단순거리차이로 정의한 일관성 지수 결과에서 수치모델들이 가장 일관성 있게 예측한 진로유형은 SM유형이다. 그 중에서 가장 높은 일관성을 보인 모델은 GFS로 나타났다. 태풍진행방향 예측 일관성이 가장 높은 진로유형과 모델은 단순거리차이로 정의한 일관성 지수로 평가한 결과와 동일하다. 태풍진행 수직방향 예측 일관성이 가장 높은 진로유형과 모델은 R유형과 TEPS로 나타났다.

반대로 단순거리차이로 정의한 일관성 지수 결과에

서 수치모델들이 가장 일관적이지 않게 예측한 진로 유형은 SCS유형으로 나타나, SCS유형은 예측정확도가 높지만 일관적이지 않게 예측되었음을 알 수 있다. 태풍진행방향 예측 일관성이 가장 낮은 진로유형은 R 유형으로 나타났고, 태풍진행 수직방향 예측 일관성이 가장 낮은 진로유형은 NO유형으로 나타나 각 성분 별 예측일관성이 낮은 유형과 예측정확도가 낮은 유형이 일치한다. 또한 모든 진로유형에서 태풍진행방향 예측 일관성이 태풍진행 수직방향 예측 일관성보다 낮게 나타났다. 따라서 수치모델들이 전향하는 태풍을 일관적이지 않게 예측하며 특히 태풍진행방향으로 더 일관적이지 않게 예측함을 알 수 있다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 태풍진행방향과 태풍진행 수직방향 성분을 고려하여 태풍예보에 사용되고 있는 수치모델의 태풍진로 예측성을 평가하였다. 예측성 평가도구에는 예측정확도와 예측경향, 그리고 예측변동성과 예측일관성이 포함된다. 평가는 최근 4년간(2010~2013년) 북서태평양에서 발생한 태풍에 대하여 실시하였으며, 기준자료로 RSMC-Tokyo의 태풍 최적경로 자료를 사용하였다.

예측오차를 분석한 결과, 단순거리오차와 태풍진행방향오차, 태풍진행 수직방향오차에서 가장 예측정확도가 높은 모델은 24시간 예측에서 JGSM, 48~96 시간 예측에서 ECMWF였다. 대체로 ECMWF와 GFS는 예측정확도가 높고 변동성이 작은 예측을 하는 것으로 나타났으나, 24시간 예측에서는 이 두 모델이 큰 예측변동성을 보였다. 수치모델들은 태풍진행방향으로 음의 오차를 가져 전반적으로 이동속도를 느리게 예측하는 경향이 있었으며, 태풍진행 수직방향으로는 72시간까지는 왼쪽으로 치우쳐 예측하는 경향, 그 이후로는 오른쪽으로 치우쳐 예측하는 경향이 나타났다. 그리고 일관성 지수를 분석한 결과, 예측정확도가 높은 모델이 일관성도 높으며, 예측오차와 마찬가지로 태풍진행방향 성분의 일관성이 더 낮았다. 따라서 수치모델의 진로예측은 태풍진행방향 성분에서 더 정확도가 낮고 변동성이 크며 일관성 또한 낮아서, 이동속도 면에서 개선해야 할 점이 많음을 알 수 있었다. 이는 오차분포에서 태풍진행방향 성분이 우세하고, 전반적으로 느린 바이어스를 가지며, 태풍진행 수직방향 성분은 경향이 일관되지 않는다(Fogarty and Bowyer, 2008)는 연구결과와 일치한다. 이러한 경향에 대하여 Fogarty and Bowyer (2008)는 적도 지역에 비해 뚜렷하고 강한 흐름을 가지는 중위도 지역의 지향류가 원인이라고 언급하고 있다. 그러나 수치모델의 일관성 있는 예측은 예보관의 의사결정에 도움을 주긴 하지

만, 비선형적인 자연현상에 부합하지 못할 수도 있다는 의미임을 감안해야 한다. 그리고 이동속도가 일정하게 유지되더라도 진로 변환 중에 발생하는 방향의 변화가 음의 태풍진행방향 편차를 생산할 수 있으므로(Neumann and Pelissier, 1981), 태풍진행방향 편차가 절대적인 값은 아니라는 점도 염두에 두어야 할 것이다. 하지만 그럼에도 불구하고 이동속도와 방향의 개념이 포함된 태풍진행방향 편차, 태풍진행 수직방향 편차는 태풍진로 예측성능을 오차의 원인과 결부시켜 나타내는 유용한 지표이다.

또한 수치모델의 진로유형별 예측성을 평가한 결과, 각 성분 별로 가장 예측정확도가 낮고 변동성이 크며 일관성이 낮은 유형은, 태풍진행방향 성분에서 R유형, 태풍진행 수직방향 성분에서 NO유형으로 나타나 전향현상을 동반하는 유형의 진로를 갖는 태풍이 오차가 큰 것을 알 수 있었다. 이 결과는 태풍진로의 예측오차를 유발하는 주된 요인 중 한가지는 전향현상(전향여부와 전향 이후의 이동속도)과 관련이 있다(Jarrell et al., 1978)는 연구결과와 일치한다. 추후에 구체적인 사례에 대한 정량적인 분석을 추가하여 수치모델 특성에 따른 예측오차 원인을 파악한다면, 좀 더 객관적인 예보 가이던스로 활용 가능할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 기상청 재원 “국가태풍센터 운영” 사업 및 국립기상연구소의 “예보기술 지원 및 활용 연구”의 일환으로 수행되었습니다.

REFERENCES

KMA, 2009: 2009 Typhoon Analysis Report. KMA. 130 pp.
 _____, 2010: 2010 Typhoon Analysis Report. KMA. 175 pp.
 _____, 2011a: 2011 Typhoon Analysis Report. KMA. 300 pp.
 _____, 2011b: *Typhoon White Book*. KMA. 330 pp.
 _____, 2012: 2012 Typhoon Analysis Report. KMA. 375 pp.
 Aemisegger, F., 2009: *Tropical Cyclone Forecast Verification*. ETH, 99 pp.
 Elsberry, R. L., and J. E. Peak, 1986: An evaluation of tropical cyclone forecast aids based on cross-track and along-track components. *Mon Wea Rev.*, **114**, 147-155.
 Fogarty, C., and P. Bowyer, 2008: An analysis of along- and cross-track forecast errors and error biases for

- TCs in the Atlantic Basin. *the 28th Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology*, Amer. Meteor. Soc.
- Jarrell, J. D., S. Brand, and D. S. Nicklin, 1978: An analysis of western North Pacific tropical cyclone forecast errors. *Mon Wea Rev.*, **106**, 925-937.
- Lander, M. A., 1996: Specific tropical cyclone track types and unusual tropical cyclone motions associated with a reverse-oriented monsoon trough in the western North Pacific. *Wea. Forecasting*, **11**, 170-186.
- Neumann, C. J., and J. M. Pelissier, 1981: Models for the prediction of tropical cyclone motion over the North Atlantic: An operational evaluation. *Mon Wea Rev.*, **109**, 522-538.
- Peak, J. E., and R. L. Elsberry, 1986: Prediction of tropical cyclone turning and acceleration using empirical orthogonal function representations. *Mon Wea Rev.*, **114**, 156-164.
- Rennick, M. A., 1999: Performance of the Navy's tropical cyclone prediction model in the western North Pacific basin during 1996. *Wea. Forecasting*, **14**, 297-305.
- Veness, C., 2010: Calculate distance and bearing between two latitude/longitude points using Haversine formula in javascript. Online at: <http://www.movable-type.co.uk/scripts/latlong.html>.