

태풍 진로예측을 위한 다중모델 선택 컨센서스 기법 개발

전상희* · 이우정 · 강기룡 · 윤원태

기상청 국가태풍센터

(접수일: 2015년 2월 10일, 수정일: 2015년 4월 24일, 게재확정일: 2015년 6월 15일)

Development of the Selected Multi-model Consensus Technique for the Tropical Cyclone Track Forecast in the Western North Pacific

Sanghee Jun*, Woojeong Lee, KiRyong Kang, and Won-Tae Yun

National Typhoon Center, Korea Meteorological Administration, Jeju, Korea

(Manuscript received 10 February 2015; revised 24 April 2015; accepted 15 June 2015)

Abstract A Selected Multi-model CONsensus (SMCON) technique was developed and verified for the tropical cyclone track forecast in the western North Pacific. The SMCON forecasts were produced by averaging numerical model forecasts showing low 70% latest 6 h prediction errors among 21 models. In the homogeneous comparison for 54 tropical cyclones in 2013 and 2014, the SMCON improvement rate was higher than the other forecasts such as the Non-Selected Multi-model Consensus (NSMCON) and other numerical models (i.e., GDAPS, GEPS, GFS, HWRF, ECMWF, ECMWF_H, ECMWF_EPS, JGSM, TEPS). However, the SMCON showed lower or similar improvement rate than a few forecasts including ECMWF_EPS forecasts at 96 h in 2013 and at 72 h in 2014 and the TEPS forecast at 120 h in 2013. Mean track errors of the SMCON for two year were smaller than the NSMCON and these differences were 0.4, 1.2, 5.9, 12.9, 8.2 km at 24-, 48-, 72-, 96-, 120-h respectively. The SMCON error distributions showed smaller central tendency than the NSMCON's except 72-, 96-h forecasts in 2013. Similarly, the density for smaller track errors of the SMCON was higher than the NSMCON's except at 72-, 96-h forecast in 2013 in the kernel density estimation analysis. In addition, the NSMCON has larger range of errors above the third quantile and larger standard deviation than the SMCON's at 72-, 96-h forecasts in 2013. Also, the SMCON showed smaller bias than ECMWF_H for the cross track bias. Thus, we concluded that the SMCON could provide more reliable information on the tropical cyclone track forecast by reflecting the real-time performance of the numerical models.

Key words: Consensus, multi-model, tropical cyclone, track forecast, ensemble

1. 서 론

열대성 저기압의 사회경제 손실 및 인명 피해를 최소화하기 위해서는 정확한 진로 예보가 필수적이다.

진로예보에 사용되는 기술 중에 다중모델 컨센서스 기법은 개별 수치모델보다 비교적 신뢰도 높은 정보를 제공하여 열대성 저기압의 진로예보 정확도 향상에 크게 기여하였다(WMO, 2007; Elsberry, 2014). 그에 따라 오스트레일리아 기상청(Australian Bureau of Meteorology), 중국 기상청(China Meteorological Administration), 중태평양 허리케인센터(Central Pacific Hurricane Center), 홍콩 기상청(Hong Kong Observatory), 일본 기상청(Japan Meteorological Administration), 미

*Corresponding Author: Sanghee Jun, National Typhoon Center, Korea Meteorological Administration, 2 Seoseongro 810-gi, Namwon-eup, Seogwipo-si, Jeju 699-942, Korea.
Phone : +82-70-7850-6374, Fax : +82-64-805-0368
E-mail : appjsh@korea.kr

국 합동태풍경보센터(Joint Typhoon Warning Center, JTWC), 미국 허리케인센터(National Hurricane Center, NHC), 베트남 수문-기상예측센터(Vietnam National Center for Hydro-Meteorological Forecasting) 등 국외의 많은 현업기관에서 다양한 컨센서스 기법이 개발되어 활용되고 있다(Burton et al., 2006; Heming and Goerss, 2010). 본 연구는 기상청 국가태풍센터의 컨센서스 기법의 개발과 검증에 대한 내용을 포함하였다.

컨센서스 기법이란 모델들의 예측을 조합한 결과로, 이때 사용되는 앙상블 예측 구성모델은 단일 또는 여러 개로 구성될 수 있다(NHC, 2009; Cangialosi and Franklin, 2015). NHC와 JTWC에서는 단순평균(Goerss, 2000; Goerss and Sampson, 2004), 바이어스 보정, 가중치(Krishnamurti et al., 2000; Williford et al., 2003), 선택 방법(Carr and Elsberry, 2001) 등 다양한 컨센서스가 개발되어 매년 활용 및 평가되고 있다. 단순평균 방법은 NHC의 TVCN(GFS, EGRR, GFDL, HWRF, ECMWF 등으로 구성된 진로 컨센서스)이 대표적이며 이들을 산출하는 데 사용되는 멤버 모델은 매년 평가되어 변경될 수 있다(NHC, 2009; Cangialosi and Franklin, 2015). TVCN의 동일한 멤버 모델에 바이어스 보정 방법을 적용한 TVCC는 예측초기에 사용할 수 있는 파라미터를 기반으로 산출된 모델의 바이어스를 보정하여 생산된다. 마지막으로 가중치 기법은 회귀분석을 통해 과거 예측성능에 따라 모델별 가중치를 부여하는 방법이다.

반면, 국내의 태풍 진로예측 컨센서스에 대한 연구와 개발은 미진한 상태이다. 기상청 국가태풍센터는 동적 데이터베이스 기반 태풍 진로예측(Dynamic database Typhoon tRack Prediction, DYTRAP; Lee et al., 2011)이라는 컨센서스 예측 시스템을 개발하였다. 이 시스템은 현재 태풍과 유사한 진로를 보이는 태풍에 대한 모델 성능을 평가하고, 이를 토대로 임의의 가중치를 부여하여 컨센서스를 생산한다. 그러나 이 과정이 부분적으로 수동작업을 필요로 하고 유사 진로와 모델 선택에 있어 예보관의 주관적인 판단을 필요로 한다. 이에 Jun et al. (2015)은 객관성과 자동화의 관점에서 가중치 기법을 적용한 다중모델 컨센서스를 개발하였으나, 국외와 같이 다양한 다중모델 컨센서스 기법을 실시간 예측에 활용하지 못하는 실정이다.

Elsberry and Carr (2000)은 실시간으로 진로예측 정확도가 낮을 것으로 예상되는 모델을 제외한 선택 컨센서스가 비선택 컨센서스보다 정확도가 높을 것이라 하였다. Carr and Elsberry (2000a)와 Carr and Elsberry (2000b)는 수치모델의 진로오차가 커지는 메커니즘을 분석하여 이를 예보에 활용할 수 있도록 개념모델을 수립하였으며 Carr and Elsberry (2001)는 이를 적용한 Systematic Approach Forecast Aid (SAFA)를 개발

하였다. SAFA는 72시간 예측에 진로오차가 300 마일 이상이 될 모델을 예보관이 판단하여 선택 컨센서스를 생산할 수 있게 도와주는 시스템으로 예보관의 수동적인 작업이 필요하다. 이 평가를 수행한 Sampson et al. (2007)은 선택 컨센서스를 산출하는 과정이 객관적이고 자동적으로 수행될 필요성이 있다고 하였다.

Qi et al. (2013)은 모델이 지속적으로 개선되기 때문에 개별 모델의 과거 성능 특성이 현재와 다를 수 있다는 점을 지적하고, 실시간으로 최근 12시간 예측 성능을 평가하는 선택 컨센서스 기법을 개발하고 평가하였다. 그러나 Qi et al. (2013)은 단일모델 앙상블 예측만을 이용하였다는 한계가 있다. Goerss (2000)에 따르면 컨센서스의 오차는 사용한 모델의 평균 오차와 모델 간의 독립성과 관련이 있으므로, 단일모델 앙상블 예측들은 필연적으로 독립성이 다중모델 앙상블 보다 작을 수밖에 없다. 비록 Yu et al. (2013)은 다중모델 접근방법을 통해 선택 컨센서스를 구축하였으나 태풍 강도예측에만 적용하였다.

다중모델 앙상블에 실시간으로 최근 예측 성능을 평가하여 모델을 선택하는 기법을 적용하면, 태풍시즌, 태풍, 예측시간마다 변하는 수치모델의 성능을 반영할 수 있다. 이는 단순평균, 바이어스 보정, 가중치 기법을 이용한 다중모델 컨센서스가 과거 수치모델의 성능에 의존하는 것과는 차이가 있다. 또한, 과거 수치모델 성능을 평가하기 위해서는 각 모델별로 충분한 자료가 확보되어야 하지만 실시간으로 최근 예측 성능을 평가하는 방법은 자료가 충분하지 못하는 모델도 사용할 수 있으므로 더 많은 모델을 이용할 수 있다.

따라서 본 연구는 태풍 진로예보에서 사용되는 21개 수치모델을 이용하여 태풍예보 시각 기준 최근 예측의 오차가 큰 모델을 제외하는 다중모델 선택 컨센서스 기법을 구축하고 진로예측 성능을 검증하고자 하였다. 2장에서는 사용된 자료와 다중모델 선택 컨센서스 구축 방법에 대해 서술하였으며, 3장에서는 이 기법의 산출 기준 도출을 위한 민감도 실험, 성능검증, 사례분석을 제시하였다. 4장에서는 연구의 요약 및 결론을 제시하였다.

2. 자료 및 방법

본 연구는 기상청 태풍 분석위치와 21개 수치모델 태풍 진로예측 자료를 사용하였다(Table 1). 다중모델 선택 컨센서스는 실시간 예측을 목적으로 구축되어, 2013, 2014년의 총 54개 태풍 사례를 대상으로 실시간 모의 예측(hindcast) 검증이 실시되었다.

수치모델 자료는 모델 예측 산출 시간과 입전 과정으로 인하여 태풍 예보에 사용하기 위해서는 6~12시간 이상이 소요된다. 따라서 수치모델의 진로예측은

Table 1. List of the numerical models and their information used in this study.

Produce Center	Model name	Type*	Forecast time (h)	Frequency/day
KMA (Korea Meteorological Administration)	GDAPS	S	0~288/87	4
	RDAPS	S	0~87	4
	KWRF	S	0~72	4
	TWRF	S	0~120	2
	DBAR	S	0~72	4
	GEPS	E	0~288	2
NCEP (US National Centers for Environmental Prediction)	GFS	S	0~168	2
	GFS_H	S	0~180	4
	HWRF	S	0~126	4
	GEFS	E	0~240	4
FNMOC (Fleet Numerical Meteorology and Oceanography Center)	NAVGENM	S	0~180	2
ECMWF (European Centre for Medium Range Weather Forecasts)	ECMWF	S	0~168	2
	ECMWF_H	S	0~240	2
	ECMWF_EPS	E	0~144	2
CMA (China Meteorological Administration)	GRAPES_TCM	S	0~72	4
	CMA_EPS	E	0~120	2
CMC (Canadian Meteorological Centre)	CMSC	S	0~144	2
	CMSC_EPS	E	0~240	2
JMA (Japan Meteorological Agency)	JGSM	S	0~84	4
	TEPS	E	0~132	4
UKMO (UK Met Office)	EGRR_EPS	E	0~360	2

*S: Single run, E: Ensemble run.

6시간 간격으로 내삽되고 6~12시간 이전 자료 중 최신의 자료만을 현재 예보 시점의 분석위치로 조정(shift or adjust) 된다(Goerss and Sampson, 2004). 그리고 내삽 방법에는 Goerss and Sampson (2004)에서 사용된 큐빅 스플라인 내삽 방법보다 더 작은 오차를 보인다고 알려진 선형내삽을 사용하였다(Sampson et al., 2006).

Qi et al. (2013)은 각 태풍예보 시점 별로 최근 12시간 진로오차가 전체 멤버 평균 오차보다 작은 단일 모델 앙상블 멤버를 이용하여 컨센서스 결과를 생산하였다. 본 연구는 이와 같은 실시간 선택방법을 다중모델 앙상블에 적용하되 민감도 실험을 통해 다음과 같이 기준을 재설정하였다. 우선, 12시간 진로예측을 평가하여 모델을 선택하기 위해서는 태풍예보 시각 기준 12시간 이전 수치모델 자료를 이용해야 한다. 그러므로 진로오차가 평가되는 예측시간은 사용되는 모델예측이 생산된 시간을 결정하며, 민감도 실험을 통해 태풍예보 시각 기준 최근 6시간으로 하였다(Fig. 1). 또한, 모델을 선택하는 기준 값으로 전체 평균오차가 아닌 순위 분포인 하위 70% 진로오차 범위를 이용하였다. 다음은 선택 컨센서스를 산출하는 순서이고 Fig. 1에 모식도를 나타냈다.

1단계. 현재 예보시점에 대해 6~12시간 이전 모델 중 최신 자료를 일괄적으로 6시간 이전 자료로 내삽 및 조정.

2단계. 태풍예보 시각 기준 최근 6시간 예측 진로 오차가 하위 70%인 모델 선택(상위 30%인 모델 제외).

3단계. 선택된 모델들의 예측을 평균하고 현 예보 시점으로 조정.

SMCON의 활용성을 검증하고자, 성능 구분 없이 모든 모델을 평균한 비선택 다중모델 컨센서스(Non-Selected Multi-model CONsensus, NSMCON) 및 개별 수치모델과 성능을 비교하였다. 그리고 산출되는 모든 다중모델 컨센서스는 2개 이상의 모델이 있을 경우 산출되었다. 성능비교에 사용되는 모델은 전체 예보 시점 대비 66.6% 이상의 자료가 있는 경우로, 태풍예보시 사용가능 시간을 고려해 6~12시간 이전 자료를 내삽 및 조정된 자료이다(Cangialosi and Franklin, 2015). 또한, 진로오차가 매우 크거나, 샘플링시 사례 수를 매우 적게 하는 모델은 제외되었다. 진로오차는 기상청 태풍 분석 지점과 예측 지점간의 하버사인 공식(Haversine formula equation; Sinnott, 1984)을 적용한 대원거리로 정의하였다. 하버사인 공식으로 계산

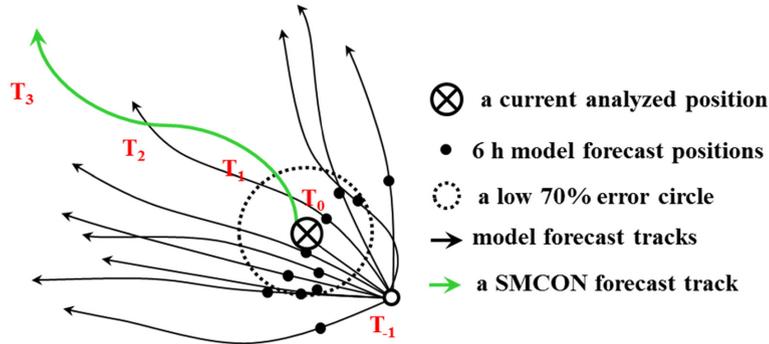


Fig. 1. Schematic diagram of SMCON technique. The radius of the dashed circle includes model members showing low 70% 6 h track errors among all models.

된 진로오차는 예측시스템에 대한 상대적인 성능을 파악하기 용이하도록 식(1)과 같이 성능향상 비율(improvement)로 변환하여 성능검증에 사용하였다. 성능향상 비율은 다음과 같은 식으로 산출되며, E_f 는 성능을 평가하고자 하는 대상의 예측 오차이고 E_r 은 비교를 위한 기준 오차로 NSMCON이 사용되었다.

$$\frac{E_f - E_r}{E_r} \times 100. \tag{1}$$

3. 결 과

3.1 모델 선택 기준을 위한 민감도 실험

선택 컨센서스 구축에 적합한 기준을 도출하기 위하여 2013, 2014년 발생 태풍을 대상으로 민감도 실험을 하였다(Table 2). 2년 평균 진로오차로 보았을 때, 모델의 12시간 진로예측을 평가하여 산출한 Exp2보

Table 2. Mean track errors (km) of the four selected multi-model consensus experiments in 2013 and 2014 for each forecast time (h).

Forecast time (h)	Number of cases	Track error (km)			
		Exp1	Exp2	Exp3	Exp4
24	708	78.3	83.9	78.8	77.1
48	534	136.1	146.4	137.0	133.0
72	373	195.3	206.1	196.8	190.7
96	235	289.0	308.6	293.6	290.0
120	143	433.4	478.4	432.9	431.5

Exp1: selecting models showing smaller than mean 6 h errors of all available models.

Exp2: same as Exp1 except 12 h.

Exp3: selecting models showing low 50% 6 h errors of all available models.

Exp4: same as Exp3 except low 70%.

다 6시간 예측을 이용한 Exp1의 진로오차가 모든 예측 시간(24, 48, 72, 96, 120시간)에서 작아 각각 5.6, 10.3, 10.8, 19.6, 45.0 km의 차이를 보였다. 이와 같은 결과는 현재 예보 시점에서 과거에 생산된 모델을 사용할수록 평가되는 예측시간이 길어지지만 모델의 정확도는 낮아지기 때문이다. 그리고 모델을 선택하는 기준 값으로 평균(Exp1)을 사용한 결과보다 하위 50%의 기준을 사용한 Exp3이 120시간을 제외한 예측시간에서 5 km 이하로 진로오차가 컸다. Exp3의 Exp1 대비 진로오차는 2013년에는 작은 경향이었고, 2014년에는 큰 경향이였다. 또한, 태풍예보 시각 기준 최근 6시간 예측 진로오차가 하위 70%인 모델들을 선택하는(상위 30% 모델들을 제외) Exp4는 2년 평균에서 96시간 예측을 제외하면 모든 민감도 실험 중 가장 작은 진로오차를 보였다. 각각 연도별로 분석하였을 때, Exp4는 2013년 96시간 예측에서 Exp3보다 1.9 km, 2014년 96, 120시간 예측에서 Exp1보다 각각 3.1, 4.0 km 정도 진로오차가 컸던 것을 제외하면 나머지 예측시간 모두 가장 작은 진로오차를 보였다. 또한, 이와 같은 기준은 Elsberry and Carr (2000)에서 제시한 선택 컨센서스 정의와 부합한다. 따라서 모든 예보시점마다 산출된 최근 6시간 진로오차가 하위 70%인 모델들의 예측을 평균한 것을 다중모델 선택 컨센서스(Selected Multi-model CONsensus, SMCON)로 정의하고 성능을 검증하였다.

3.2 SMCON 성능검증

NSMCON 대비 성능향상 비율을 통해 SMCON과 개별 수치모델과의 예측성능을 비교하였다. SMCON의 성능은 2013년 24, 48, 72, 96, 120시간 예측에서 NSMCON보다 우수하였다(Fig. 2a). 수치모델과 성능 비교하였을 때, 24, 48, 72시간 예측에서는 SMCON이 전체 8개 모델(GDAPS, GEPS, GFS, HWRF, ECMWF, ECMWF_H, ECMWF_EPS, JGSM, TEPS 등)보다 성

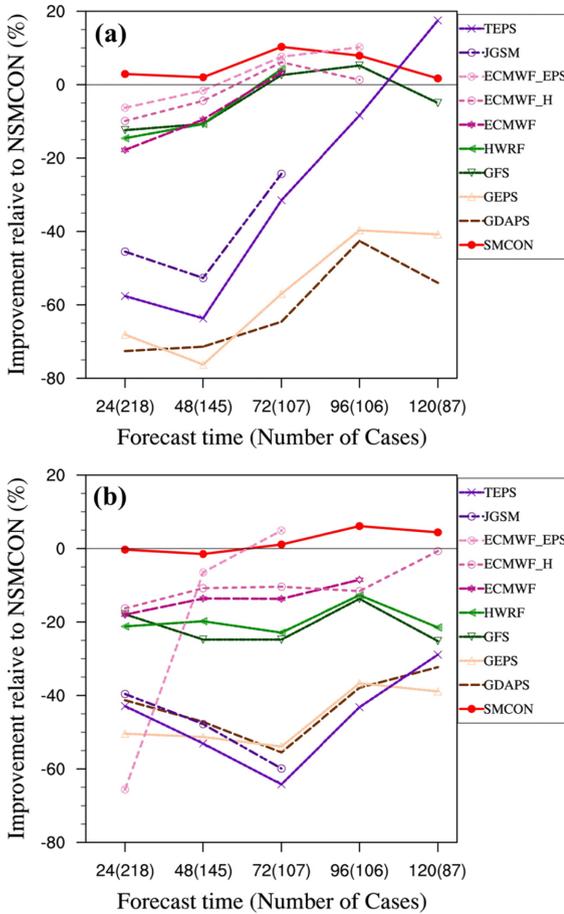


Fig. 2. Homogenous comparison of improvement rates (%) for SMCON and 8 numerical models relative to NSMCON in (a) 2013 and (b) 2014.

등이 우수하였다. 96, 120시간에서도 SMCON은 각각 ECMWF_EPS, TEPS를 제외한 모든 수치모델보다 성능이 우수하였다. 또한, 전체 예측시간으로 미루어 볼 때 SMCON의 진로오차는 개별 수치모델보다 작은 경

향이였다. 2014년의 경우 SMCON의 NSMCON 대비 성능향상 비율은 48시간 예측에서 음의 값을 보였으나, 그 값은 매우 작았으며 72시간부터 120시간까지 양의 값을 보였다(Fig. 2b). 수치모델과 비교하였을 때도 SMCON은 ECMWF_EPS의 72시간 예측을 제외하면 개별 수치모델보다 모든 예측시간에서 성능이 우수하였다.

위에서는 SMCON, NSMCON, 수치모델 등 모두 샘플링하여 전체적인 진로예측 성능을 파악하였다. 이와는 다르게 NSMCON과 일대일 샘플링을 통해 사례 수 제거를 최소화하여 분석한 결과, 2013, 2014년 SMCON의 24, 48, 72, 96, 120시간 진로오차는 NSMCON보다 작았다(Table 3). 2년 평균 진로오차 값으로 보았을 때, SMCON은 NSMCON보다 24, 48, 72, 96, 120시간 예측에서 각각 0.4, 1.2, 5.9, 12.9, 8.2 km 만큼 진로오차가 작아 24, 48시간보다 72, 96시간 예측에서 성능이 더 우수한 것으로 나타났다.

SMCON 진로오차 분포를 상자그림을 이용하여 상대적으로 진로오차가 작았던 NSMCON, ECMWF_H, GFS 등과 비교하였다(Fig. 3). 박스도표는 5개 값으로 이루어져 있는데, 중앙에 중위수가 표시되고 경첩(hinge)으로 불리는 제1분위수(Q_1)와 제3분위수(Q_3)로 상자가 그려진다. 상자 양 극단으로 수염(whisker)의 길이는 각 경첩에 \pm 상자길이($Q_3 - Q_1$)를 합한 값 범위 안에 있는 최소 또는 최대값으로 정의되며, 그 범위를 넘는 값은 이상치(outlier)로 점 표시된다. 상자 그림 분석에서도 연평균 성능향상 비율과는 다르게 일대일 대응으로 샘플링 하였기 때문에 예측시간별 사례수가 상이하였다. NSMCON과의 2013년 비교에서 SMCON은 24, 48, 120시간 예측 진로오차 중심분포 경향이 더 낮은 분포에 위치하였으며, 72, 96시간 예측의 경우 제3분위수 이후의 범위가 적고 이상치의 개수가 적었다. 2014년의 경우, 모든 예측시간에서 SMCON의 진로오차 중심분포 경향이 더 낮은 값에 위치하였다(Fig. 3a). 다음으로 ECMWF_H와 진로오차 비교에서 SMCON의 중심분포 경향은 2014년 120시간 예측을 제외한 전 예측시간이 상대적으로 작은 값에 위치하였다. 또한, 2013년 ECMWF_H의 이상치

Table 3. Comparison of mean track errors (km) for SMCON and NSMCON in 2013 and 2014.

Forecast time (h)	in 2013				in 2014	
	Number of cases	Track error (km)		Number of cases	Track error (km)	
		SMCON	NSMCON		SMCON	NSMCON
24	386	76.4	76.5	373	82.6	83.3
48	280	131.2	132.1	297	143.1	144.7
72	185	193.7	200.2	227	199.0	204.4
96	108	306.2	325.2	160	278.9	285.7
120	55	487.2	498.9	113	395.6	400.2

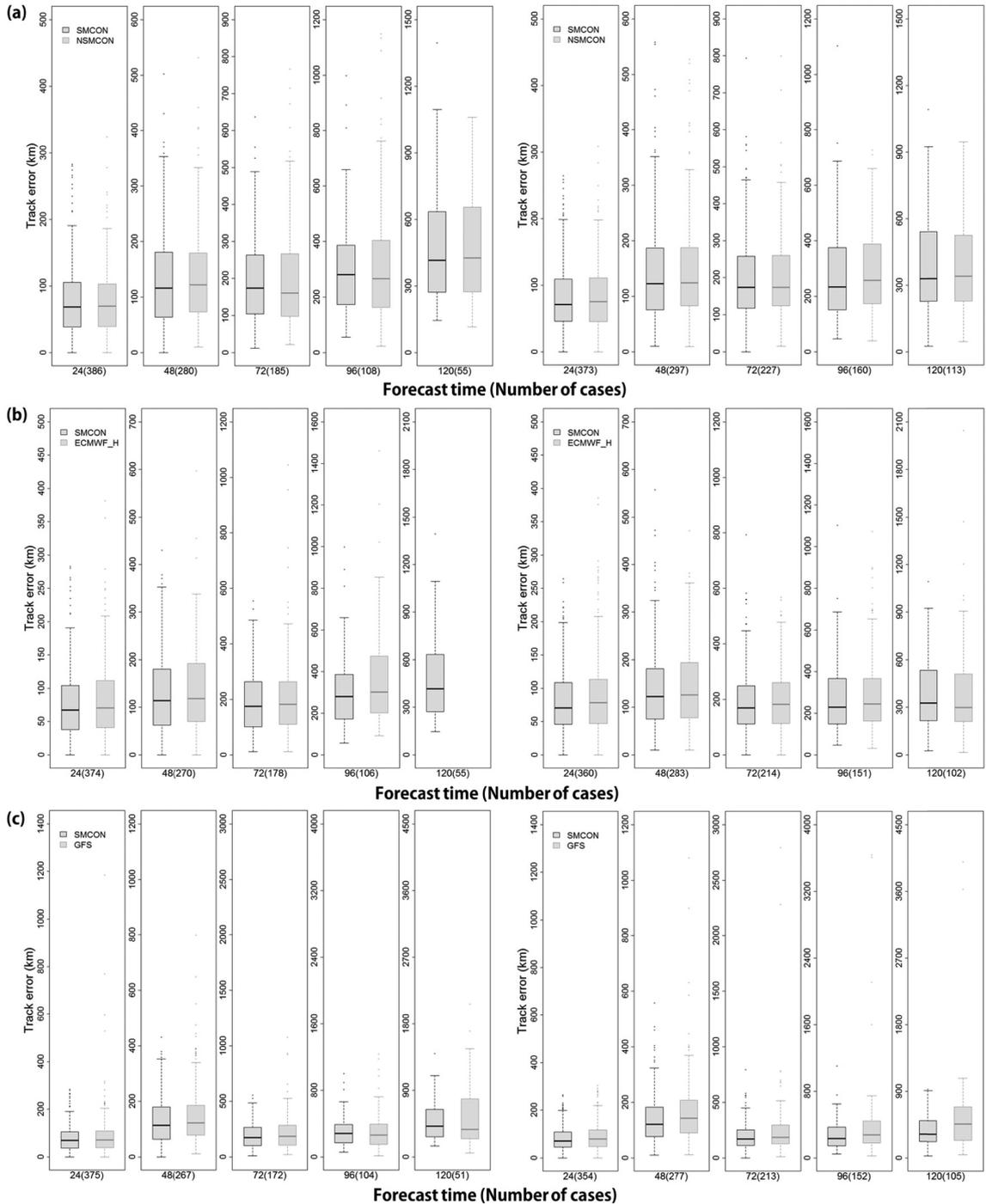


Fig. 3. Boxplots for track errors of SMCON to be compared with (a) NSMCON, (b) ECMWF_H, (c) GFS, in 2013 (left) and 2014 (right).

의 상한선 범위가 SMCON보다 큰 경향이 나타났다 (Fig. 3b). GFS의 경우, SMCON보다 최대값의 범위가

매우 컸으며, 2년의 진로오차 비교에서 2013년 96, 120시간을 제외한 SMCON 예측이 중심분포 경향이

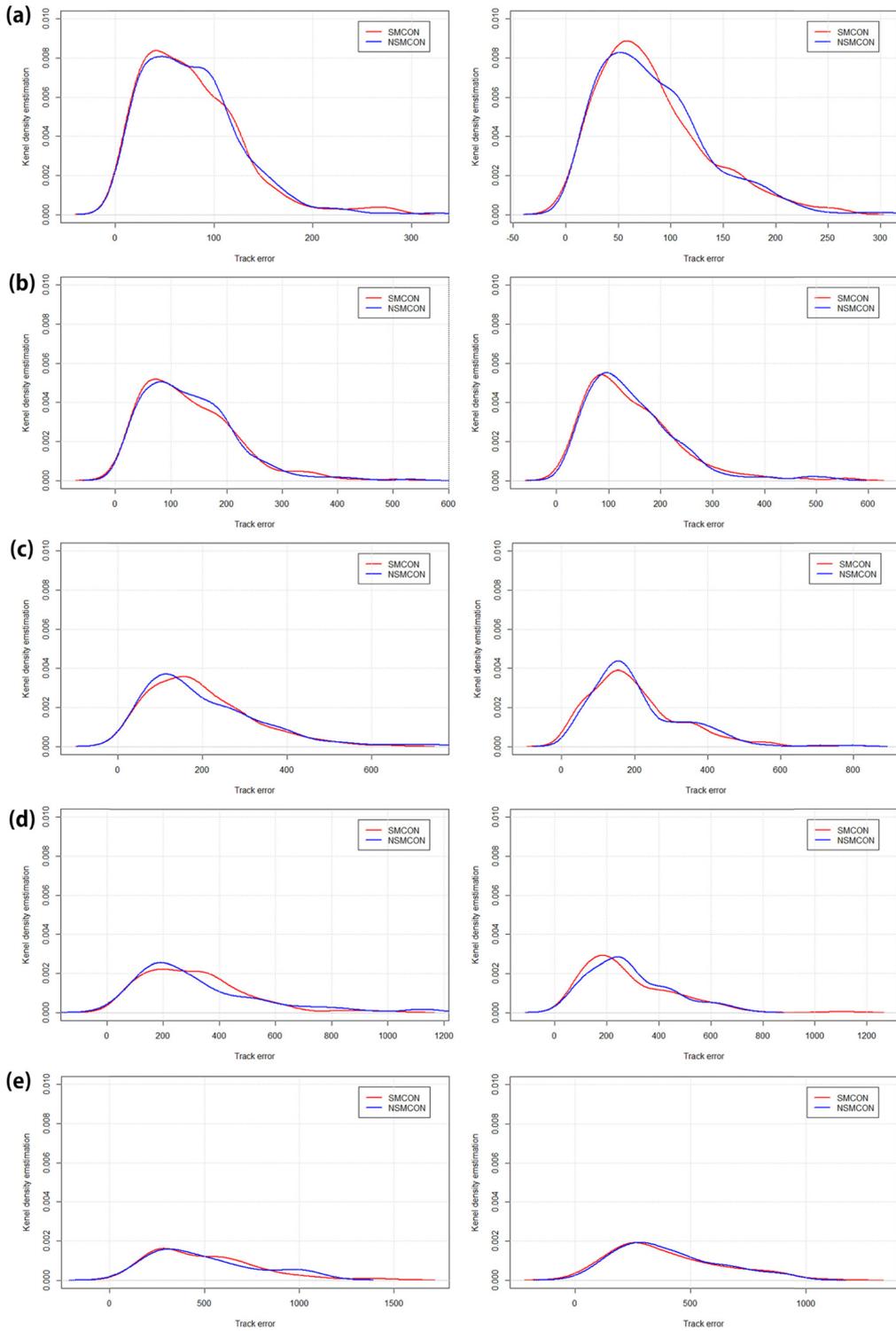


Fig. 4. KDE for (a) 24-, (b) 48-, (c) 72-, (d) 96-, (e) 120-h track prediction errors of SMCON and NSMCON in 2013 (left) and 2014 (right).

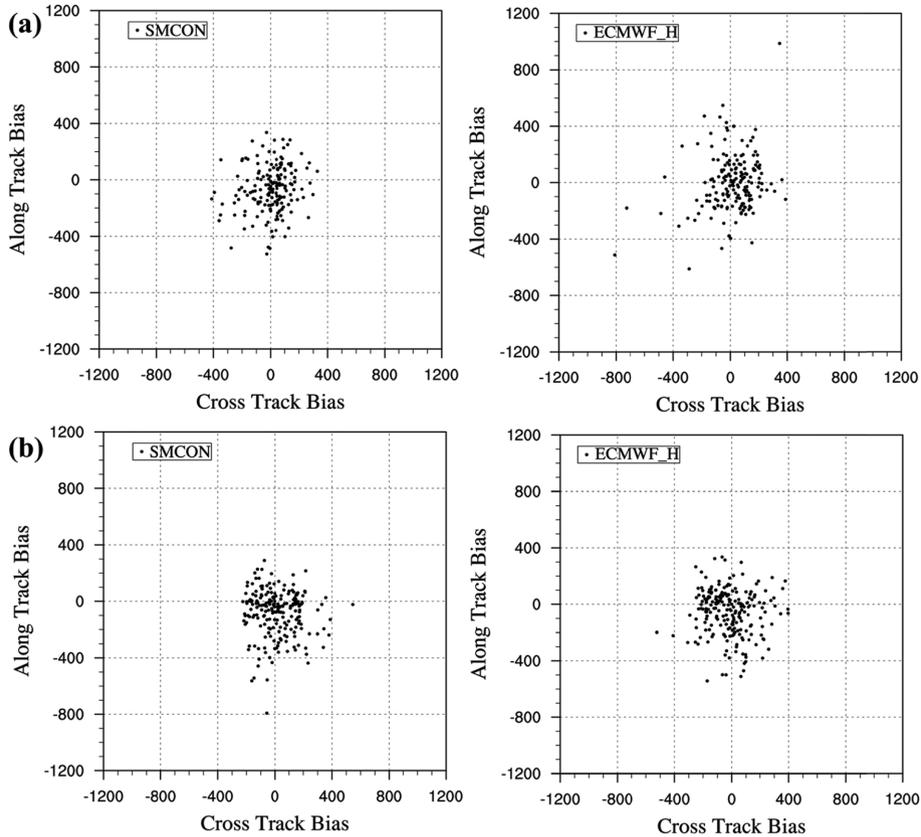


Fig. 5. Scatter plots of ATB and CTB (km) for SMCON (left) and ECMWF_H (right) 72 h prediction in (a) 2013 and (b) 2014. Negative value of ATB and CTB means that prediction position is behind and to the left the analyzed tropical cyclone position respectively.

작은 값에 위치하였다(Fig. 3c). SMCON 진로오차 중심분포 경향은 전반적으로 NSMCON, ECMWF_H, GFS보다 작은 값에 위치하였으며, 모델 예측보다 최대값이 작은 경향이였다.

SMCON과 NSMCON의 진로오차 분포를 면밀히 비교하기 위해 커널밀도산정(Kernel Density Estimation, KDE)을 사용하였다(Fig. 4). KDE는 확률밀도산정과 다르게 비모수이며 각 값의 빈도 분포에 커널 스무딩(smoothing)을 적용한다(Wilks, 2011). 진로오차의 KDE는 예측시간이 길어질수록 더 넓게 퍼져 있었다. 2013, 2014년 SMCON의 KDE는 NSMCON에 보다 전반적으로 작은 진로오차에서 밀도가 높았다. 단, 상자도표와 동일하게 2013년의 72, 96시간 예측에서 NSMCON이 SMCON보다 작은 진로오차에서 밀도가 높았다. 하지만 72, 96시간 예측의 표준편차가 SMCON에서는 118.3, 179.8 km이고 NSMCON에서는 137.3, 265.1 km로 NSMCON의 오차의 변동성이 더 컸다.

다음으로 수치모델과의 예측특성 차이를 보기 위해

서 성능이 우수한 ECMWF_H의 72시간 예측의 태풍 진행 방향 편차(Along Track Bias, ATB)와 태풍 진행 수직 방향 편차(Cross Track Bias, CTB)를 비교하였다(Fig. 5). ATB는 예측진로와 분석진로의 진행 방향 속도 차이를 나타내며, 음의 값은 예측이 실제 태풍 이동 속도보다 느리게 예측한 것이고 양의 값은 빠르게 예측한 것이다. CTB가 양의 값이면 실제 태풍 위치의 오른쪽으로 과대 예측, 음의 값이면 왼쪽으로 과대 예측 한 것을 뜻한다(Neumann and Pelissier, 1981; Aemisegger, 2009). 분석결과 SMCON과 ECMWF_H의 ATB가 큰 음의 값을 보이는 경우가 많았다. CTB는 연도에 따라 다른 경향성을 보여서 2013년의 경우(Fig. 5a), CTB가 큰 음의 값이었던 사례가 많았고 2014년의 경우(Fig. 5b) CTB의 경우 큰 양의 값을 보이는 사례가 많았으며, 이러한 경향성은 ECMWF_H가 더 컸다. 즉, SMCON과 ECMWF_H는 느린 예측 오차가 큰 경향성이 있었으며, SMCON은 ECMWF_H보다 진로방향에서 오른쪽 또는 왼쪽 편향하여 예측

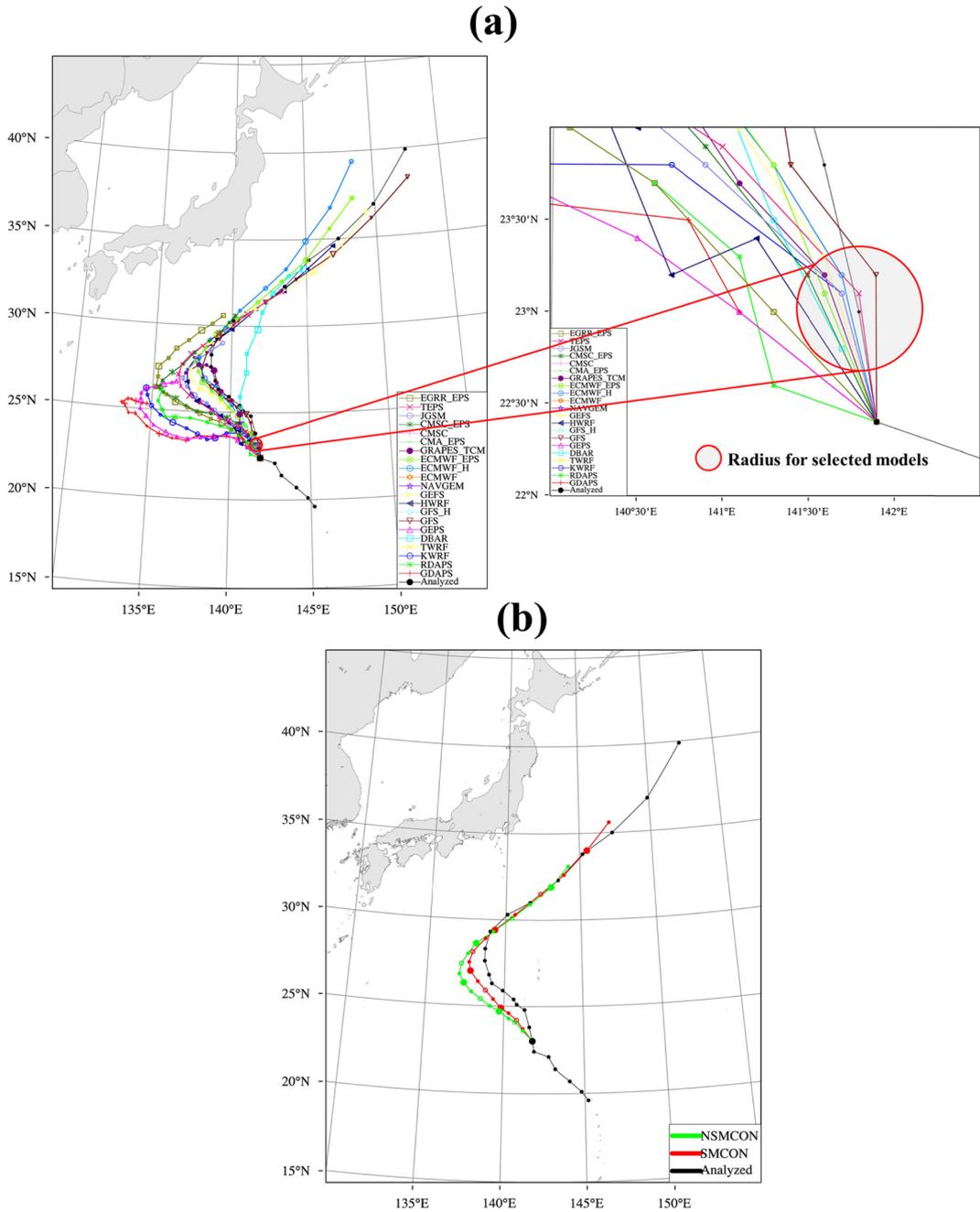


Fig. 6. Comparison forecasted and analyzed tracks for tropical cyclone Pabuk (1320) 1800 UTC 22 Sep 2013. (a) Numerical model forecast tracks are 6 h before (b) NSMCON and SMCON forecasts (see line and symbol definitions).

하는 경향성이 더 적었다.

3.3 사례 분석

앞 장에서 본 것과 같이, SMCON의 예측성능은 72,

96시간에서 NSMCON보다 더 나은 결과를 보이는 것으로 나타났다. 이러한 사실을 더 정밀하게 분석하기 위하여 SMCON의 진로오차가 72시간 또는 96시간 예측에서 NSMCON보다 크게 작았던 태풍 파북(1320),

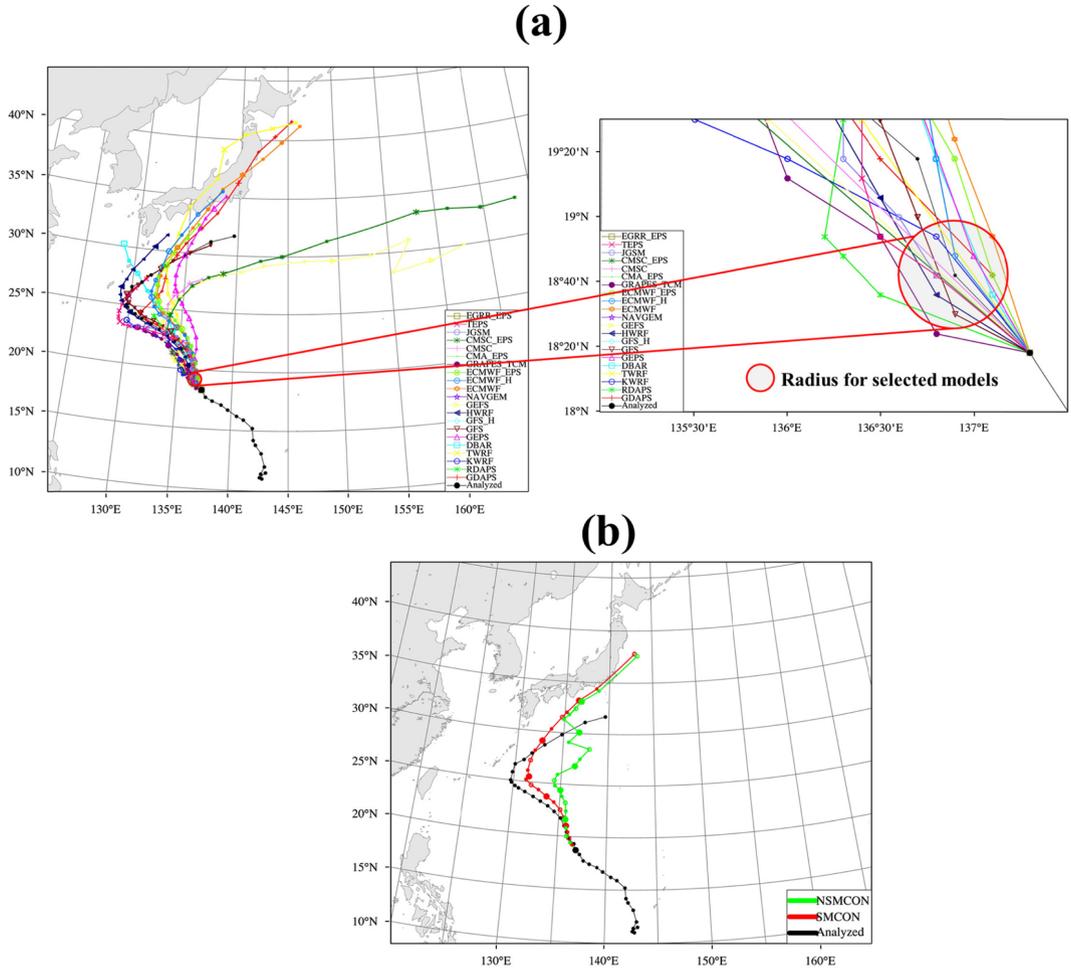


Fig. 7. Same as Fig. 6 except for tropical cyclone Francisco (1327) 1200 UTC 20 Oct 2013.

프란시스코(1327), 간무리(1417) 등의 사례를 분석하였다(Figs. 6~8). 파북(1320) 2013년 9월 22일 1800 UTC의 96시간 예측에서 SMCON은 512.6 km, NSMCON은 842.1 km 진로오차를 나타냈다(Fig. 6). 태풍예보 시각 기준 최근 6시간 예측 정확도 평가에서 GDAPS, RDAPS, GEPS, HWRF, EGRR_EPS의 진로오차가 커서 SMCON 산출에서 제외되었으며 이 모델들은 6시간 이후 예측에서도 다른 모델에 비해 기상청 분석 진로와 크게 차이가 났다(Fig. 6a). 24시간 예측 이후로 NSMCON의 진로예측은 SMCON보다 기상청 분석 진로에서 더 서쪽으로 편향된 예측을 보였다(Fig. 6b). 이는 24시간 이후 SMCON에서 제외된 모델 예측이 다른 모델에 비해 기상청 분석 진로보다 매우 크게 서쪽으로 편향된 예측을 보였고 72시간 이후로 서쪽 편향 오차를 줄여줄 다른 모델 수가 줄어들었기 때문이다.

태풍 프란시스코(1327) 2013년 10월 20일 1200 UTC의 사례의 72시간 예측에서 SMCON은 179.6 km, NSMCON은 671.9 km의 진로오차를 보였다(Fig. 7). 최근 6시간 예측 정확도 평가를 통해 RDAPS, TWRF, GEFS, GRAPES_TCM, CMSC, CMSC_EPS 등이 SMCON 예측 산출에서 제외되었다(Fig. 7a). 태풍 파북(1320)의 사례와 유사하게 30시간 이후로 SMCON보다 NSMCON의 진로예측이 기상청 분석 진로보다 동쪽으로 크게 편향되어 오차가 커졌다(Fig. 7b). 이와 같은 결과는 예측 시간이 길어질수록 TWRF, GEFS, CMSC, CMSE_EPS 등의 예측진로가 다른 모델에 비해 기상청 분석진로에서 크게 동쪽으로 편향되었고 이 편향성을 줄여줄 모델 수가 72시간 이후로 줄어들었기 때문이다. 하지만 120시간 예측 이후로 SMCON과 NSMCON에 사용되는 모델 종류가 동일하여 예측 진로가 같아졌다.

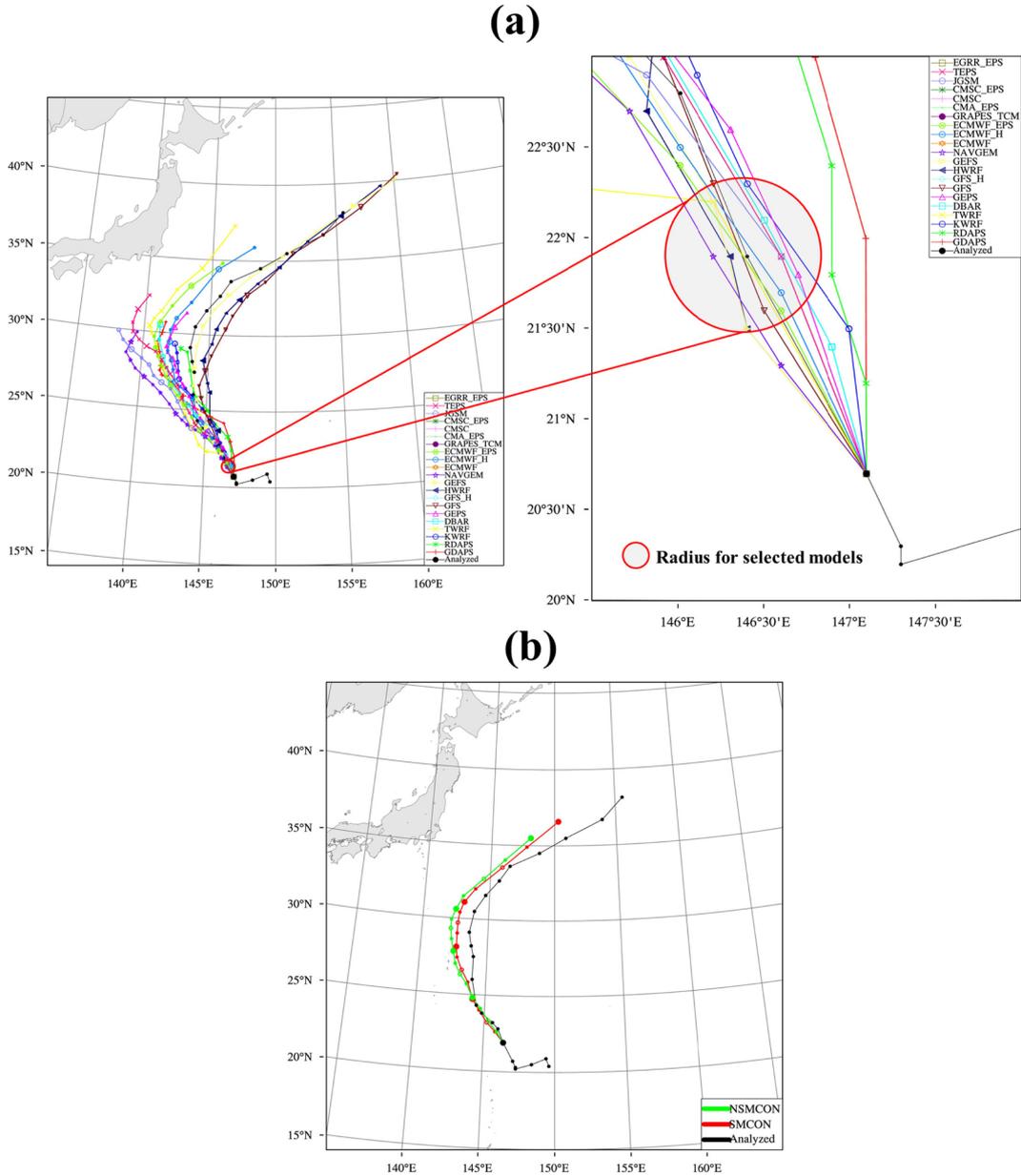


Fig. 8. Same as Fig. 6 except for tropical cyclone Kammuri (1417) 0000 UTC 26 Sep 2014.

위의 두 태풍의 사례와 유사하게 태풍 간무리(1417) 2014년 9월 26일 0000 UTC의 사례는 96시간 예측에서 SMCON이 497.2 km, NSMCON은 727.4 km의 진로 오차를 보였다(Fig. 8b). NSMCON은 72시간 이후로 SMCON보다 느린 예측 경향성을 보였다. GDAPS, RDAPS, KWRP, DBAR, NAVGEM 등의 모델 예측이 최근 6시간 진로오차 평가를 통해 SMCON 구축에서 제외되었다(Fig. 8a). 이 수치모델 중 GDAPS와

NAVGEM은 다른 모델들보다 느리고 서쪽으로 편향된 예측을 보였다. 특히, 72시간 이후 가용할 수 있는 모델 수가 점점 줄어들어 NSMCON에 대한 GDAPS와 NAVGEM 예측의 비중이 커지자 96시간에 매우 큰 진로오차를 보였다(Fig. 8b).

위의 사례분석에서 볼 때 SMCON의 72, 96시간 예측에서 NSMCON보다 진로오차가 더 작았던 원인은 태풍예보 시각 기준 최근 6시간 평가에서 제외된

모델들의 초기 진로예측 실패가 예측시간이 길어지면서 다른 모델에 비해 더 큰 진로오차로 이어졌기 때문인 것으로 보인다. 또한, 48시간 예측 이전에는 사용되는 모델의 수가 많아서 NSMCON에 대한 진로오차가 큰 모델의 영향을 줄여주지만, 72, 96시간 예측에는 사용할 수 있는 모델이 적어져서 진로오차가 큰 모델의 비중이 커졌기 때문이다.

4. 요약 및 결론

본 연구는 태풍예보 시각 기준 최근 6시간 진로예측을 실시간으로 평가하여 하위 70% 오차를 보이는 수치모델들을 선택하는(상위 30% 오차를 보이는 모델들 제외) SMCON 기법을 구축하고, 그 예측성능을 검증하였다. 이 모델 선택기준은 민감도 실험을 통해 결정되었다. 사용된 모델은 총 21개이며 2013, 2014년 발생 태풍 54개에 대해 검증하였다.

NSMCON 대비 성능향상 비율 분석에서 SMCON은 NSMCON과 검증에 사용된 수치모델(GDAPS, GEPS, GFS, HWRF, ECMWF, ECMWF_H, ECMWF_EPS, JGSM, TEPS 등)보다 전반적으로 예측성능이 우수하였다. 다만, ECMWF_EPS보다 2013년 96시간과 2014년 72시간에서, TEPS보다 2013년 120시간에서 유사하거나 약간 좋지 못한 성능을 보였다. 사례 수 감소를 최소화하기 위해 NSMCON과 일대일 샘플링하여 분석한 결과, 24, 48, 72, 96, 120시간 예측의 SMCON의 2년 평균 진로오차가 각각 0.4, 1.2, 5.9, 12.9, 8.2 km 작았으며 이러한 경향은 2013, 2014년에 모두 나타났다. 특히, 진로오차의 차이는 72, 96시간에서 컸다.

평균값에서 드러나지 않는 진로오차의 분포를 비교하기 위해서 상자그림과 KDE 분석, ATB, CTB 산점도 분석을 하였다. 상자그림을 분석하였을 때, SMCON은 두 해에 걸쳐 NSMCON 대비 진로오차의 중심분포 경향이 작은 값에 위치하였다. 단, 2013년 72, 96시간 예측은 NSMCON이 진로오차의 중심분포 경향이 더 작았으나, 제3분위수 이후의 범위가 더 컸다. 수치모델 중 우수한 성능을 보이는 ECMWF_H, GFS보다 일부 예측시간을 제외하면 중심분포 경향이 작은 경향이었고, 개별 모델예측의 경우 최대값이 SMCON보다 매우 큰 경향을 보였다. 그리고 KDE 분석을 통해 진로오차의 분포를 더 세밀하게 살펴 보았을 때도 SMCON은 2013, 2014년 각각 전체적인 예측시간에서 NSMCON보다 작은 값의 밀도가 높았다. 단, 2013년 72, 96시간 예측에서 SMCON은 NSMCON보다 작은 값의 밀도가 낮았으나, 표준편차 값과 평균값이 더 작아 더 신뢰도 높은 예측을 생산했음을 파악할 수 있었다. 그리고 SMCON은 ECMWF_H와 유사한 느

린 예측을 나타냈지만 태풍 진행방향에 대한 좌우 편향성은 적은 것으로 나타났다.

태풍 파북(1320), 프란시스코(1327), 간무리(1417) 등의 사례에서 SMCON의 진로오차가 NSMCON보다 72시간 또는 96시간 예측에서 크게 작았던 원인을 분석하였다. 그 원인은 태풍 예보시각 기준 최근 6시간 평가를 통해 SMCON 산출에서 제외되었던 수치모델의 초기 진로예측의 오차가 시간이 지나면서 더욱 커지고 72, 96시간 예측에서 이런 예측오차를 감소시킬 다른 모델 수가 줄어들었기 때문이었다.

위의 결과를 종합하면, SMCON은 비선택 방법인 NSMCON과 수치모델보다 전반적으로 더 신뢰도 높은 예측을 생산하기 때문에 진로예보 정확도 향상에 기여할 수 있을 것이라 판단된다. 또한, SMCON을 이용하면 분석 진로에서 매우 크게 벗어난 이상예측이 포함될 위험성을 제거할 수 있으며, 태풍시즌, 태풍, 예측시간마다 차이를 보이는 수치모델의 예측성능을 반영한 진로예측 정보를 생산할 수 있다. 그러나 현업 활용도를 높이기 위해서는 SMCON의 예측 불확실성의 크기에 대한 정보가 필요하다. 따라서 향후에는 SMCON의 진로오차의 크기를 예측할 수 있는 인자들을 발굴하고, 이들을 종합하여 예측 불확실성에 대한 정보를 줄 수 있는 방법을 개발할 예정이다.

감사의 글

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

REFERENCES

- Aemisegger, F., 2009: Tropical cyclone forecast verification: three approaches to the assessment of the ECMWF model. ETH, 89 pp.
- Burton, A., P. Caroff, J. Franklin, E. Fukada, T. C. Lee, C. Sampson, and T. Smith, 2006: Sharing experiences in operational consensus forecasting. Proc. Sixth WMO Int. Workshop on Tropical Cyclones, Topic 3a, San Jose, Costa Rica, WMO, 424-441.
- Cangialosi, J. P., and J. L. Franklin, 2015: 2012 National Hurricane Center forecast verification report. NHC, 82 pp [Available online at http://www.nhc.noaa.gov/verification/pdfs/Verification_2014.pdf].
- Carr III, L. E., and R. L. Elsberry, 2000a: Dynamical tropical cyclone track forecast errors. Part I: tropical region error sources. *Wea. Forecasting*, **15**, 647-661.
- _____, and _____, 2000b: Dynamical tropical cyclone track forecast errors. Part II: midlatitude circulation

- influences. *Wea. Forecasting*, **15**, 662-681.
- _____, and _____, 2001: Beta test of the systematic approach expert system prototype as a tropical cyclone track forecasting aid. *Wea. Forecasting*, **16**, 355-368.
- Elsberry, R. L., 2014: Advances in research and forecasting of tropical cyclones from 1963~2013. *Asia-Pac J. Atmos. Sci.*, **50**, 3-16.
- _____, and L. E. Carr III, 2000: Consensus of dynamical tropical cyclone track forecasts-errors versus spread. *Mon. Wea. Rev.*, **128**, 4131-4138.
- Goerss, J. S., 2000: Tropical cyclone track forecasts using an ensemble of dynamical models. *Mon. Wea. Rev.*, **128**, 1187-1193.
- _____, and C. R. Sampson, 2004: A history of western North Pacific tropical cyclone track forecast skill. *Wea. Forecasting*, **19**, 633-638.
- Heming, J., and J. Goerss, 2010: *Track and structure forecasts of tropical cyclones. Global perspectives on tropical cyclones, Chap.10*, Chan, J. C. L., and J. D. Kepert (Ed), World Scientific Publishing, Singapore, 287-323.
- Jun, S., W. Lee, K. Kang, K. Y. Byun, J. Kim, and W. T. Yun, 2015: Applicability of the superensemble to the tropical cyclone track forecasts in the western North Pacific. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **51**, 39-48.
- Krishnamurti, T. N., C. M. Kishtawal, Z. Zhang, T. LaRow, D. Bachiochi, E. Williford, S. Gadgil, and S. Surendran, 2000: Multimodel ensemble forecasts for weather and seasonal climate. *J. Climate*, **13**, 4196-4216.
- Lee, Y., H. J. Kwon, and D.-C. Joo, 2011: Dynamic database Typhoon Track Prediction (DYTRAP). *Atmosphere*, **21**, 209-220 (in Korean with English abstract).
- Neumann, C. J., and J. M. Pelissier, 1981: Models for the prediction of tropical cyclone motions over the North Atlantic: An operational evaluation. *Mon. Wea. Rev.*, **109**, 522-538.
- NHC, 2009: Technical Summary of the National Hurricane Center Track and Intensity Models. NHC, 18 pp [Available online at http://www.nhc.noaa.gov/pdf/model_summary_20090724.pdf].
- Qi, L., H. Yu, and P. Chen, 2013: Selective ensemble-mean technique for tropical cyclone track forecast by using ensemble prediction systems. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **140**, 805-813.
- Sampson, C. R., J. S. Goerss, and H. C. Weber, 2006: Operational performance of a new barotropic model (WBAR) in the western Pacific basin. *Wea. Forecasting*, **21**, 656-662.
- _____, J. A. Knaff, and E. M. Fukada, 2007: Operational evaluation of a selective consensus in the western North Pacific basin. *Wea. Forecasting*, **22**, 671-675.
- Sinnott, R. W., 1984: Virtues of the Harversine. *Sky Telescope*, **68**, 159-161.
- Wilks, D. S., 2006: *Statistical methods in the atmospheric sciences*. Academic press, 627 pp.
- Williford, C. E., T. N. Krishnamurti, R. Correa Torres, S. Cocks, Z. Christidis, and T. S. Vijaya Kumar, 2003: Real-time multimodel superensemble forecasts of Atlantic tropical systems of 1999. *Mon. Wea. Rev.*, **131**, 1878-1894.
- WMO, 2007: Sixth WMO International Workshop on Tropical Cyclone (IWTC-VI). WMO, 92 pp [Available online at http://www.aoml.noaa.gov/hrd/Landsea/WWRP2007_1_IWTC_VI.pdf].
- Yu, H., P. Chen, Q. Li, and B. Tang, 2013: Current capability of operational numerical models in predicting tropical cyclone intensity in the western North Pacific. *Wea. Forecasting*, **28**, 353-367.