태풍 진로 예보의 확률반경 정보 검증

박 정 현
기상청 국가태풍센터 기상연구사
pjh21@kma.go.kr

강 남 영
기상청 국가태풍센터 기상사무관
kny@kma.go.kr

오 승 선
기상청 국가태풍센터 연구원
unionri@kma.go.kr

김 동 호
기상청 국가태풍센터 센터장
kimdh@kma.go.kr

1. 서 론

북서태평양에서는 연간 약 27개의 태풍이 발생하여 이 중 3-4개 정도가 우리나라에 직·간접적인 영향을 미친다. 태풍은 자연재해 중 가장 큰 피해를 유발시키는 것 중 하나로서 강풍, 호우, 해일 등을 동반한 총체적 악기상 현상이다. 태풍피해는 최근 10년(1998-2007)간 자연재해 전체 피해액의 약 53%를 차지하는 등 점차 대형화되고 있는 추세이다(2007년 재해연보, 소방방재청).

태풍예보의 성능은 기후의 변동성, 분석자료의 질, 모델의 성능, 예보관의 능력 등 많은 요소에 좌우된다. 통계적인 분석을 통해 모든 변수가 반영된 확률반경은 예보의 성능을 객관적으로 설정해줌으로써 정보수요자로 하여금 후속 방재절차를 체계적으로 진행할 수 있게 해주는 중요한 지침이 된다. KMA(Korea Meteorological Administration, 기상청)는 태풍의 진로예보 정확도에 대한 신뢰도 정보로서, 2005년 제 2호 태풍 로커(ROKE)부터 태풍예보에 확률반경을 함께 제공하고 있다. 태풍이 각 예보시간에 대한 70% 확률을 갖는 위치의 원형영역을 확률원(Probability circle)이라하며, 이 때의 반경이 확률반경(Radius of probability circle)이다.

현재 KMA에서 각 예보시간에 대해 일괄적으로 제공하고 있는 70% 확률반경은 24시간 예상위치에 대해서는 150km, 48시간은 250km 이며 72시간에 대해서는

400km 이다. KMA와 더불어 확률반경으로 예보 정확도에 대한 신뢰도 정보를 제공하고 있는 기관은 JMA(Japan Meteorological Agency, 일본기상청)가 있으며, 3~4년 단위로 최신 태풍진로 예보오차를 검증하고 확률반경 정보를 갱신하여 발표하고 있다. 태풍예보의 정확도는 태풍예보환경 특성변화에 의존적이므로 KMA에서도 이러한 환경변화에 따른 정확도 및 최신 신뢰도 정보를 지속적으로 분석하여 개선할 필요가 있다. JMA는 2001년부터 2004년까지 3년간의 태풍진로의 예보오차를 검증하여 2004년 6월 1일부터 기존 확률반경을 조정하였고, 2005년부터 2007년까지 3년간의 태풍예보오차에 근거하여 2008년 5월 21일부터 재조정하였다. 또한, 태풍의 이동특성에 따라 정확도 차이가 뚜렷하므로 이를 반영하여 이동속도 및 진행방향에 따라 차별화된 신뢰도 정보를 제공하고 있다. 이는 태풍재해에 대한 보다 효율적인 방재활동을 가능하게 하므로 매우 유용한 정보로 활용된다.

이 연구는 KMA의 태풍진로예보 정확도를 체계적으로 검증하고, 태풍의 이동특성별로 각기 다른 확률반경을 새롭게 제시함으로써 태풍예상진로에 대한 정보의 가치를 현실적으로 개선하기 위한 기반을 마련하고자 한다.

2. 분석 자료

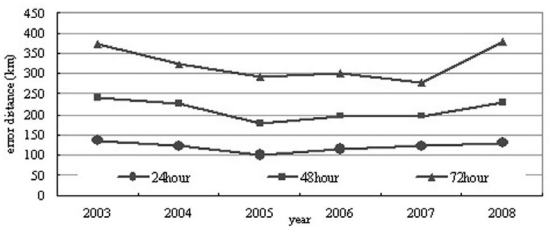
KMA의 태풍진로예보에 대한 정확도 분석을 위하여 72시간 태풍예보를 제공하기 시작한 2003년부터 2008년까지 최근 6년간의 태풍진로예보 자료를 사용하였다. 태풍이동특성 분류와 예보오차 분석을 위한 기준값으로는 KMA 분석자료를 사용하였다. 통계학적 표본 및 분석기간 결정을 위하여 KMA의 태풍발생통계를 참조하였으며 KMA의 연도별 태풍예보 정확도 수준 비교에 JMA, JTWC(Joint Typhoon Warning Center, 미국 합동태풍경보센터)의 태풍예보 및 분석자료를 이용하였다 (http://metocph.nmci.navy.mil/jtwc.php).

3. 결과 분석

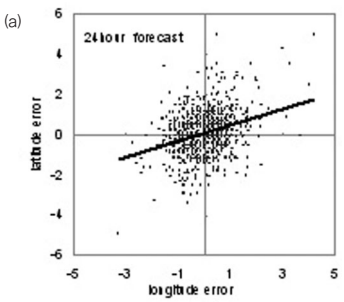
3. 1. 진로예보의 특성분석

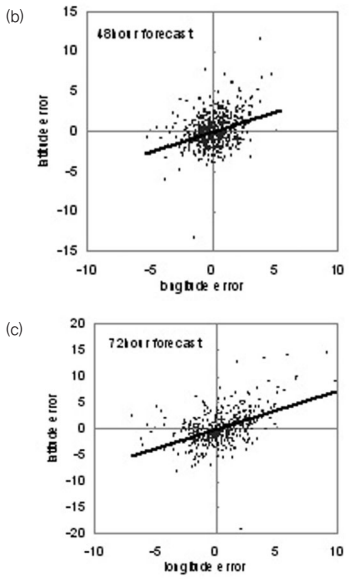
KMA는 2003년부터 태풍예보시간을 72시간으로 확장함으로써, 현재까지 24시간, 48시간, 72시간 예보정보를 발표하고 있다. 2003년부터 2008년까지의 각 예보시간별 진로오차를 Fig. 1에 보였다. 연도별 진로예보 오차는 각 예보시간별로 유사한 경향을 보이며 2005년 가장 작은 오차를, 2007년보다 2008년 증가한 예보오차를 보인다. 연도별 오차의 편차에서도 2005년에 가장 작지만 2007년과 2008년을 비교할 경우, 2007년보다 2008년이 오차의 편차가 줄어들어 보다 안정적인 예보경향을 보임을 알 수 있다(Table 1).

예보시간별 진로오차의 방향성을 분석하면, 24시간 예보의 오차는 위 · 경도 ±2도 안에 집중 분포하면서 대체로 북동과 남서 방향으로 큰 오차들이 분포해있다. 48시간의 경우, 위 · 경도 ±3도 안에 집중해 있고 주로 큰 오차들은 24시간 예보오차와 마찬가지로 북동과 남서 방향으로 분포해 있다. 72시간 예보는 위도 오차가 경도오차보다 증가함을 알 수 있다(Fig. 2).



〈Fig.1.〉 Annual means of position errors of KMA's 24, 48 and 72 hour forecasts.





〈Fig.2.〉 Scatter diagram of position errors for KMA's 24 (a), 48 (b) and 72 (c) hour forecast from 2003 to 2008.

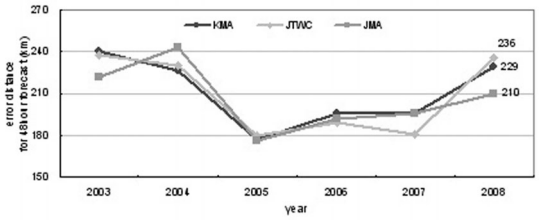
〔table-1〕 Annual means and standard deviations of position errors of KMA's 24, 48 and 72 hour forecast from 2003 to 2008 (km).

	year / forecast hour	2003	2004	2005	2006	2007	2008	mean
mean	24	136.14	121.78	99.79	114.46	122.19	129.03	121.01
error	48	240.00	227.38	177.37	195.68	195.87	228.75	211.21
[km]	72	374.14	321.87	291.97	302.41	278.04	379.20	325.20
standard	24	95.64	89.38	60.06	79.99	88.35	77.85	82.76
deviation	48	189.85	160.24	103.98	122.95	152.31	134.51	144.27
[km]	72	347.62	259.93	178.36	229.77	164.27	224.06	234.04

3. 2. 기관별 진로예보 정확도 비교

최근 6년간 연도별 태풍 발생 수는 과거 30년(1971-2000) 평균 발생수에서 크게 벗어나지 않고 최소 21개에서 최대 29개까지 발생하였다. 이러한 태풍에 대한 연도별 진로예보오차를 Fig. 3에 나타내었다. 일반적으로 태풍진로예보의 정확도 척도로 쓰이는 48시간 예보에 대한 것으로 KMA와 JTWC 및 JMA의 예보오차를 비교하였다.

KMA, JTWC, JMA의 연도별 예보정확도 경향은 대체로 일치하고 있으며 분석기간동안 3개 기관 모두 2005년 가장 좋은 예보정확도를 보인다. 연도별 오차의 편차는 KMA 24.6km , JTWC 28.2km , JMA 23.8km 이다. 반면 JMA는 태풍예보모델 등의 개선으로 확률반경을 10% 이상 수정하며 예보정확도의 개선을 인지하고 있음에도 불구하고, 2008년의 예보정확도가 3개 기관 모두 크게 낮아졌다. 2008년 48시간 진로예보 오차가 JTWC는 236km , KMA 229km, JMA는 210km 로 2007년에 비해 JTWC는 55km 까지 증가하는 등 예보정확도가 대체로 하향되었다. 따라서, JMA가 발표한대로 2000년대에 들어서면서 앙상블 예보시스템 향상 등으로 태풍진로예보 정확도가 크게 향상된 것은 사실이나, 해마다 다른 열대상황이나 종관상태에 따른 예보환경이 달라지고 개별 태풍사례에 대한 예보오차의 편차도 크므로 보다 상세한 예보 정확도 분석이 요구된다.

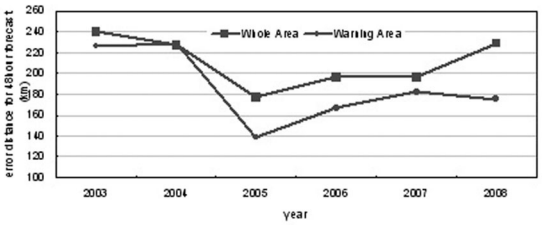


〈Fig.3.〉 Annual means of position errors of 48 hour forecast from KMA, JTWC and JMA.

3. 3. 경계구역 진로예보 정확도

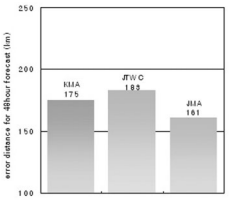
KMA는 태풍감시 및 예보를 위해 우리나라를 중심으로 북서태평양을 감시구역(Watching Area, 북위25도 남쪽과 동경135도 동쪽), 경계구역(Warning Area, 북위25도 북쪽과 동경135도 서쪽), 비상구역(Alert Area, 북위28도 북쪽과 동경132도 서쪽)으로 분류하고 있다(Fig. 5). 예비특보 발표의 일차 기준이 되는 경계구역의 예보오차를 전체영역에 대한 결과와 비교해보면 우리나라에 인접한 태풍의 사례에 대해서는 KMA의 예보정확도가 높아지는 것을 알 수 있다(Fig. 4). 또한 2008년도 예보오차가 전체영역에 대해서는 229km 인 반면 경계구역에 대해서는 175km 로 2007년보다 오히려 향상된 결과를 보이고 있다. 2008년 경계구역에 대한 KMA 진로예보는 오차가

183km 인 JTWC보다는 높은 정확도를, 오차가 161km 인 JMA보다는 낮은 정확도를 보인다(Fig. 4).



〈Fig.4.〉 Annual means of KMA's 48 hour track forecasts for Whlole Area and Warning Area.

〈Fig.5.〉 Typhoon Monitoring Areas.



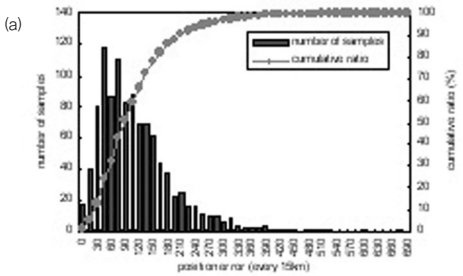
〈Fig.6.〉 Comparision of the forecast errors among KMA, JTWC and JMA for Warning Area.

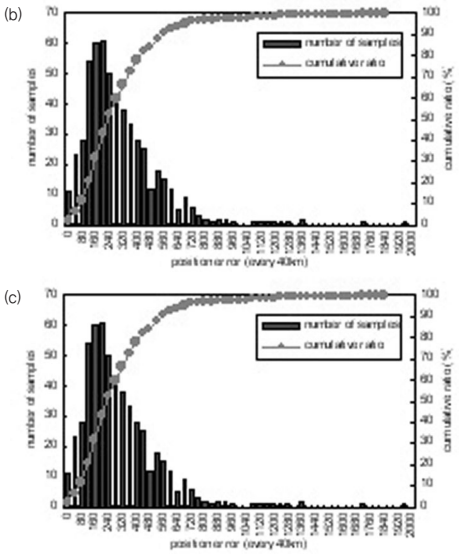
3. 4. 진로예보에 대한 확률반경

KMA에서 발표하는 태풍정보는 태풍진로예보에 각 예보시간별 확률반경 정보를 포함하고 있으며 현재 발표하고 있는 24시간, 48시간 및 72시간의 확률반경은 각각 150km , 250km 와 400km 로 고정되어있다.

JTWC는 이러한 신뢰도 정보를 제공하지 않지만, JMA는 우리나라와 같이 각 예보시간별 신뢰도 정보로서 확률반경을 제공하고 있으며, 이를 3-4년 단위로 갱신하고 있다.

최근 6년간 KMA 태풍예보자료를 근거하여 KMA의 실제 70% 확률반경을 분석하였다. Fig. 7은 24시간, 48시간, 72시간 진로예보에 대하여 15km , 25km , 40km 구간별 히스토그램과 누적확률을 보인 것으로, 각 예보시간별 70% 확률반경은 각각 145km , 252km , 387km 이다.





〈Fig.7.〉 Histogram (bars) and cumulative ratio of position errors (polygonal lines) from 2003 to 2008, 24 hour forecast (a), 48 hour forecast (b) and 72 hour forecast (c). Histogram is measured with left axis and cumulative ratio is measured with right axis.

예보환경 변화를 고려하고 충분한 표본수를 확보한다고 판단되는 3년 단위로 구분하여, 전반 3년(2003-2005)과 후반 3년(2006-2008)의 평균오차거리와 편차, 70% 확률반경 등을 비교해 보았다(Table 2). 48시간 평균오차거리는 약 8km 감소하였으나, 24시간과 72시간 오차는 큰 변화가 없으며, 70% 확률반경도 큰 차이가 없다. 다만, 모든 예보시간별 오차의 편차가 크게 감소하여 예보의 안

(table-2) The radius of probability circle in typhoon track forecast.(1)

	forecast hour	mean error distance[km]	standard deviation[km]	radius of 70% probability circle[km]	reference radius and probability[km]	data no.
latest 6 years ('03-'08)	24	121.01	82.76	145.18	150(72%)	1051
	48	211.21	144.27	251.93	250(69%)	773
	72	325.20	234.04	387.26	400(73%)	551

(table-2) The radius of probability circle in typhoon track forecast.(2)

	forecast hour	mean error distance[km]	standard deviation[km]	radius of 70% probability circle[km]	reference radius and probability[km]	data no.
first 3 years ('03-'05)	24	119.31	84.68	147.86	150(71%)	403
	48	216.12	157.47	251.96	250(69%)	290
	72	324.41	261.95	383.46	400(74%)	196
second3 years ('06-'08)	24	122.06	81.58	144.67	150(73%)	648
	48	208.26	135.81	251.59	250(70%)	483
	72	325.63	217.49	389.31	400(72%)	355

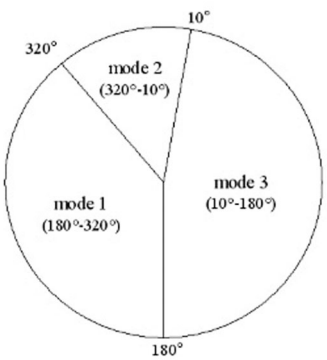
(table-3) The radius of 70% probability circle for 24, 48 and 72 hour forecast from 2003 to 2008(KM).

year / forecast hour	2003	2004	2005	2006	2007	2008	mean
24	168.22	142.05	124.07	138.85	148.33	155.22	145.18
48	290.43	272.03	221.26	223.47	241.72	278.17	251.93
72	402.11	386.02	326.66	326.35	335.41	451.77	387.26

정성은 뚜렷이 증가하였다.

연도별 진로예보의 70% 확률반경 변화를 보면 2005년과 2006년까지 크게 감소하다가 2007년과 2008년에 다시 커지면서, 분석기간 6년의 전·후반기 확률반경 차이를 줄이는 데에 기여하였다(Table 3).

3. 5. 태풍이동특성에 따른 진로오차 분류와 확률반경 산출



〈Fig.8.〉 Classification of typhoon moving directions, mode 1 is 'before recurvature', mode 2 is 'during recurvature', and mode 3 is 'after recurvature'.

태풍진로예보의 정확도는 전향 등 이동특성에 따라 크게 달라진다. 태풍은 적도부근에서 발생하여 중위도 편서풍대로 이동해오면서 기류를 따라 일반적으로 북동진하게 되는데, 편의상 이러한 태풍의 진행방향을 태풍의 전향 기준으로 정하고, 전향전(180°-320°, 이하 mode 1), 전향중(320°-10°, 이하 mode 2) 그리고 전향후(10°-180°, 이하 mode 3)로 분류하였다(Nobutaka, 2005, Fig. 8). 또한, 각 방향에 대해 태풍의 이동속도를 10km/h 단위로 구분하여 예보정확도를 검증하였다.

Table 4는 최근 6년과 최근 3년 태풍이동특성에 따른 예보시간별 진로오차와 표본수를 보인 것이다. 표본수가 20미만인 경우는 기울임 글씨체로 표현하였으며, 이동속도 40km/h 이상인 사례는 표본수가 매우 작아서 의미있는 정확도 분석이 어렵다. 표본수가 충분한 이동속도 30km/h 미만의 경우를 살펴보면 모든 예보시간에 대해 mode 1과 mode 2의 예보오차가 mode 3보다 확연히 작은 것으로 나타난다. 최근 6년과 3년을 분류하여 각각의 특성을 살펴보아도 그 경향이 대체로 일치하고 있다.

24시간 예보의 경우, mode 2의 오차가 108.13km 로 가장 작으며, mode 3의 오차가 158.09km로 가장 크다. 48시간, 72시간의 경우도 같은 경향을 보인다.

모든 예보시간에서 이동속도 30km/h 이상인 mode 1과 mode 2는 표본수가 부족하여 의미있는 값을 얻기 어려우며, 이동속도 30km/h 이상인 경우는 대체로 mode 3만이 20이상의 표본수를 보였다. 48시간 예보에 대해, 평균오차는 208.26km 이며 mode 1의 이동속도 10~20km/h 가 166.97km 오차를 보이는데 반해, mode 3의 이동속도 40km/h 이상은 353.52km 의 오차를 가진다. 따라서, 최근 3년간 이동속도가 큰 경우를 다수 포함하는 mode 3의 큰 예보오차가 mode 1과 mode 2의 예보오차와 혼합되어 평균 오차를 증가시키고 있다.

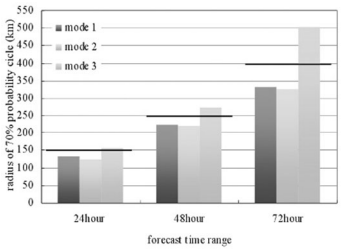
이러한 이동특성별 예보오차에 근거하여 의미있는 오차값을 재분류하여 70% 확률반경을 분석하였다(Table 5). 최근 3년동안 24시간 예보의 70% 평균 확률반경은 145km이며, 이동속도 30km/h 이하인 경우, mode 1과 mode 2는 각각 134km 와 125km , mode 3은 158km 이다. 40km/h 이상으로 매우 빠르게 이동하는 태풍에 대해서는 302km의 오차를 보인다. 48시간 예보는 평균 252km 의 확률반경을, 40km/h 이상의 mode 3은 305km , 30km/h 미만인 mode 1과 mode 2는 233km

〔table-4〕 Mean error distance (km)and number of samples in 2006~2008. Angle of the moving direction is measured clockwise from north. The value with Italic characters means the number of sample is smaller than 20.

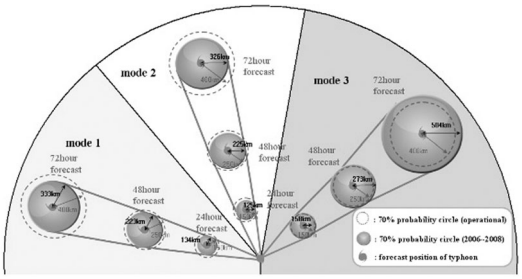
forecast time range	moving speed [km/h] / moving direction	V<10	10≤V<20	20≤V<30	30≤V<40	40≤V	all moving speed
24hour forecast	mode 1 (180°-320°)	100.49(34)	101.01(107)	130.59(89)	*144.64(14)*	*154.89(1)*	114.40(245)
	mode 2 (320°-10°)	103.58(53)	97.51(125)	120.83(60)	*167.90(14)*	77.68(1)	108.13(253)
	mode 3 (10°-180°)	*135.89(11)*	121.54(33)	127.40(34)	167.35(40)	224.46(32)	158.09(150)
	all direction	106.14(98)	101.91(265)	126.80(183)	162.79(68)	218.10(34)	122.06(648)
48hour forecast	(180°-320°)	218.86(28)	166.97(78)	196.42(54)	*266.88(12)*	-(0)	191.63(172)
	mode 2 (320°-10°)	185.84(44)	179.48(93)	204.41(43)	*248.91(9)*	267.61(1)	190.35(190)
	mode 3 (10°-180°)	*212.58(8)*	258.39(27)	231.98(31)	233.17(32)	353.52(23)	260.01(121)
	all direction	200.07(80)	185.31(198)	207.72(128)	243.48(53)	349.94(24)	208.26(483)
72hour forecast	mode 1 (180°-320°)	*204.50(1)*	289.23(23)	258.29(48)	296.89(32)	436.25(9)	289.21(113)
	mode 2 (320°-10°)	237.15(35)	277.28(65)	322.72(30)	*356.41(9)*	-(0)	282.11(139)
	mode 3 (10°-180°)	*369.49(5)*	372.54(26)	434.85(26)	326.95(26)	618.21(20)	424.31(103)
	all direction	252.50(41)	301.42(114)	321.01(104)	316.55(67)	561.74(29)	325.63(355)

〔table-5〕 Radius of 70% probability circle(km), distance (km) corresponding to cumulative ratio of 70% and number of samples in 2006-2008. Angle of the moving direction is measured clockwise from north.

forecast time range	moving speed[km/h] / moving direction	V<30	30≤V<40	40≤V	all moving speed
24hour forecast	mode 1(180°-320°)	134	-	-	-
	mode 2(320°-10°)	125	-	-	-
	mode 3(10°-180°)	158	-	-	-
	all direction	-	164	302	145
48hour forecast	mode 1(180°-320°)	223	-	-	-
	mode 2(320°-10°)	222	-	-	-
	mode 3(10°-180°)	273	-	-	-
	all direction	-	295	405	252
72hour forecast	mode 1(180°-320°)	333	-	-	-
	mode 2(320°-10°)	326	-	-	-
	mode 3(10°-180°)	504	-	-	-
	all direction	-	436	630	389



〈Fig.9.〉 Original (solid line) and improved (bars) radius of 70% probability circle (Km) for 24, 48 and 72 hour forecast in the latest 3 years (2006-2008). In this case, the moving speed is les than 30km/h.



〈Fig.10.〉 Comparison of the improved result with the current operational 70% probability circle.

와 222km 의 확률반경을 보인다. 72시간 예보의 경우도 40km/h 이상인 mode 3의 70% 확률반경이 30km/h 미만인 mode 2의 결과보다 약 2배 이상 큰 값이다.

4. 요약 및 제언

본 연구에서는 현재 KMA가 실시간 발표하고 있는 24시간, 48시간, 72시간 태풍진로예보의 정확도를 분석하고, 이의 신뢰도 정보로 함께 제공하는 확률반경을 검증하였다. 72시간 예보를 시작한 2003년부터 2008년까지 최근 6년간의 태풍예보자료를 바탕으로 분석한 연도별 예보오차는 편차 24.6km 의 변동을 보였으며, 지속적 향상을 단언하기에는 어려움이 있었다. KMA를 포함한 JTWC와 JMA의 연도별 예보오차의 경향도 유사하였다.

우리나라로 다가오는 태풍의 상륙 가능성을 대비하여 태풍 예비특보 발표의 일차 기준인 경계구역만을 대상으로 했을 때는 전체영역과 달리 2008년의 예보정확도가 2007년보다 향상된 결과를 보였다. 24시간, 48시간, 72시간 예보의 평균오차는 각각 121km , 211km , 325km 이며 편차는 각각 83km , 144km , 234km 으로 각 예보시간별 정확도의 연변화 경향은 유사하였다. 이러한 예보정확도에 대한 신뢰도 정보인 70% 확률반경은 최근 3년 평균 각 예보시간별로 145km , 252km , 389km 였다. 이는 48시간 예보에 대한 확률반경을 제외하고는 현재 공식 발표되는 태풍정보의 70%확률반경보다 단축된 값이다.

보다 상세한 예보정확도와 신뢰도 정보 분석을 위해 태풍이동특성별로 분류하였다. 위·경도 오차 분석에서 나타난 방향성 오차 뿐 아니라, 태풍의 전향과 같은 이동방향과 속도에 따른 오차특성 차이도 뚜렷하였다. 전향전(mode 1)이나 전향중(mode 2)인 경우는 30km/h 미만의 속도로 이동하는 태풍의 48시간 예보 70% 확률반경이 223km 와 222km 로 평균확률반경 252km 보다 단축된 값으로 분석되었다. 반면 전향후(mode 3)의 경우 30km/h 미만의 속도로 이동하는 태풍은 273km 이고, 30km/h 이상속도로 이동하는 태풍에 대해서는 방향성 구분이 무의미하며 점점 확률반경도 커짐을 알 수 있었다. 40km/h 이상인 경우는 확률반경이 405km 로 상대적으로 정확도가 매우 낮고, 각 예보시간별로 큰 예보오차가 이 영역에서 나타났다.

현재, 태풍예보 정확도가 수치예보모델에 의존적이고, 2008년 제 6호 태풍 등이 그 해 전체 평균오차 증가에 큰 영향을 미친것과 같이 개별 사례에 대한 수치예보 모델 예측 능력 및 안정성 문제로인해 아직 연도별 성능 향상을 단언하기는 어렵다. 더불어, 예상위치에 대한 확률반경 변화는 크지 않았지만, 태풍이동특성에 따라 오차특성차이는 뚜렷하므로 이에 대한 상세 확률정보는 우리나라로 접근하는 태풍에 대한 중요한 방재정보로 활용될 수 있을 것이다.

감사의 글

이 연구는 2009년도 국가태풍센터의 주요사업인 「태풍예측능력 향상」의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

- 소방방재청, 2007: 재해연보, 749pp.
- 기상청, 1996: 태풍백서, 20pp.
- 기상청, 2005-2007: 태풍분석보고서
- Nobutaka Mannoji, 2005: Reduction of the Radius of Probabilitiy Circle in Typhoon Track Forecast. RSMC Tokyo Technical Review, No.8