



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

석사학위논문

북서태평양 태풍상륙모델을  
이용한 통계-역학적  
태풍강도예측모델 성능개선

제주대학교 대학원

해양기상학협동과정

이 태 운

2016년 12월



북서태평양 태풍상륙모델을  
이용한 통계-역학적  
태풍강도예측모델 성능개선

지도교수 문 일 주

이 태 윤

이 논문을 이학 석사학위 논문으로 제출함

2016 年 12 月

이태윤의 이학 석사학위 논문을 인준함

심사위원장 \_\_\_\_\_

위 원 \_\_\_\_\_

위 원 \_\_\_\_\_

제주대학교 대학원

2016 年 12 月

Improving Performance of Statistical Typhoon  
Intensity Prediction Model using Typhoon  
Landfall Model in the Western North Pacific

Tae-yun Lee

(Supervised by professor Il-Ju Moon)

A thesis submitted in partial fulfillment of the requirement for the degree  
of Master of Science

2016. 12.

This thesis has been examined and approved.

Interdisciplinary Program in Marine Meteorology

GRADUATE SCHOOL

JEJU NATIONAL UNIVERSITY

# 목 차

List of tables .....	ii
List of figures .....	iii
Abstract .....	vi
1. 서론 .....	1
2. 자료 및 방법 .....	4
2.1. 자료 .....	4
2.2. STIPS2015모델 소개 및 평가방법 .....	6
2.3. 태풍상륙모델 개요 .....	9
3. 결과 및 고찰 .....	18
3.1. STIPS2015모델 성능평가 결과 .....	18
3.2. L-STIPS모델 훈련기간 검증 결과 .....	21
3.3. L-STIPS모델 예측실험 결과 .....	24
4. 요약 및 결론 .....	37
참고문헌 .....	39

## List of tables

Table 1. Regression coefficients ( $a_1$ , $a_2$ , $b$ ), the $R^2$ , and MAE for the landfall model of the Philippine region. ....	14
Table 2. Same as Table 1, but for the landfall model of Taiwan region. ....	15
Table 3. Same as Table 1, but for the landfall model of Korea and Japan region. ....	15
Table 4. Same as Table 1, but for the landfall model of South China Sea region. ....	15

## List of figures

- Figure 1. Typhoon tracks of 8 clusters classified by the Fuzzy c-Mean Clustering method. Gray lines represent individual typhoon tracks. Blue lines represent mean track of each cluster. Typhoon numbers for each cluster are shown in the bracket of each panel. .... 7
- Figure 2. Four classified regions for development of typhoon landfall model :  
① the Philippines, ② Taiwan, ③ Korea and Japan, ④ South China Sea. .... 10
- Figure 3. Experimental result for intensity change ratio after typhoon's landfall using 12-hour pre-landfall intensity. Color lines indicate intensity change ratio in each typhoon. .... 11
- Figure 4. Same as in Figure 3, but using 6-hour pre-landfall intensity. .... 11
- Figure 5. Land points (red) and ocean points (blue) within the radius of 110km from storm center. .... 13
- Figure 6. Intensity predicted by Regression equation using each average initial wind and LAND in training period at a typhoon landfall model. Red line shows landing over the Philippines, blue line shows over the Taiwan, black line shows over the Korea & Japan, and pink line shows South China Sea, respectively. .... 16
- Figure 7. Schematic diagram for operational performance of L-STIPS model. .... 17
- Figure 8. The comparison with Bias(left) and MAE(right) of forecast results of intensity over time between KMA analysis and each models (legend) in 2014. .... 19
- Figure 9. Same as Figure 8, but for in 2015. .... 19
- Figure 10. A sample of an overestimation of STIPS2015 during typhoon's landfall. Left and right panels represent track and intensity forecast

results(color lines), respectively, black solid lines represent analysis results for RUMBIA(1306, top), MAYSAK(1504, middle), and ETAU(1518, bottom).·····	20
Figure 11. Comparisons of MAE between L-STIPS and STIPS2015 for training period of eight clusters.·····	22
Figure 12. Same as Figure 11, but for total clusters. ·····	23
Figure 13. Typhoon forecast tracks (color lines) and analysis track(black solid line) of KMA which are used in evaluating the performance for 8 individual typhoons. : (a) 1408 NEOGURI, (b) 1410 MATMO, (c) 1416 FUNG-WONG, (d) 1501 MEKKHALA, (e) 1515 GONI, (f) 1521 DUJUAN (g) 1604 NIDA, (h) 1411 HALONG.·····	26
Figure 14. Comparisons of forecast results for NEOGURI (1408) among KMA analysis, L-STIPS and STIPS2015. Black solid line, blue dash line and red solid line represent KMA analysis, L-STIPS and STIPS2015, respectively.·····	27
Figure 15. Comparisons Bias (left) and MAE (right) between L-STIPS and STIPS2015 for NEOGURI (1408). Blue dash line and red solid line show L-STIPS and STIPS2015, respectively.·····	27
Figure 16. Same as in Figure 14, but results for MATMO (1410).·····	28
Figure 17. Same as in Figure 15, but results for MATMO (1410).·····	28
Figure 18. Same as in Figure 14, but results for FUNG-WONG (1416).·····	29
Figure 19. Same as in Figure 15, but results for FUNG-WONG (1416). ·····	29
Figure 20. Same as in Figure 14, but results for MEKKHALA (1501).·····	30
Figure 21. Same as in Figure 15, but results for MEKKHALA (1501).·····	30
Figure 22. Same as in Figure 14, but results for GONI (1515).·····	31
Figure 23. Same as in Figure 15, but results for GONI (1515).·····	31
Figure 24. Same as in Figure 14, but results for DUJUAN (1521).·····	32
Figure 25. Same as in Figure 15, but results for DUJUAN (1521).·····	32
Figure 26. Same as in Figure 14, but results for NIDA (1604).·····	33



Figure 27. Same as in Figure 15, but results for NIDA (1604).·····	33
Figure 28. Same as in Figure 14, but results for HALONG (1411).·····	34
Figure 29. Same as in Figure 15, but results for HALONG (1411).·····	34
Figure 30. Comparisons of Bias (top) and MAE (bottom) between L-STIPS and STIPS2015 for all typhoons in 2014 (left) and 2015 (right).·····	35
Figure 31. Comparisons of Bias (left) and MAE (right) between L-STIPS and STIPS2015 for landfall typhoons in 2014 and 2015.·····	36

## Abstract

The STIPS2015 model, which is an operational statistical typhoon intensity prediction model in the Korea Meteorological Administration, tends to overestimate the intensity for landfall periods. To resolve this problem, this study developed typhoon landfall models for four regions (Philippines, Taiwan, Korea & Japan, and South China Sea) considering the geographical characteristics of the western North Pacific and combined with STIPS2015 model. The combined model, which is named L-STIPS in this study, is developed using regression functions for each predicted time based on initial intensity ( $V_0$ ) and landmass ratio (L) for the training period 2004–2013 instead of using a function of time after landfall. The results for the training period (2004–2013) show that typhoon intensity prediction of the L-STIPS model was improved by 8% compared to the STIPS2015 model in terms of the mean absolute error (MAE). For the realtime prediction experiments for landfall periods in 2014 and 2015, the L-STIPS model was improved by 20% in MAE, particularly for 60-hour lead time, along with the reduction of bias.

**Keyword:** Statistical Typhoon Intensity scheme, Typhoon landfall model, L-STIPS, Typhoon

# 1. 서론

강풍과 폭우를 동반하는 태풍은 지구상에서 가장 큰 피해를 발생시키는 기상 현상 중에 하나이다. 특히, 태풍은 해상에 있을 때보다 육지에 접근하거나 상륙할 때 대부분의 피해를 발생시킨다. 우리나라에 가장 큰 재산피해를 발생시킨 2002년 15호 태풍 루사(RUSA)와 2003년 14호 태풍 매미(MAEMI)의 경우에도 대부분의 피해는 태풍이 한반도에 상륙한 기간 동안 발생하였다(태풍백서, 2011). 태풍의 상륙 시기에 발생하는 피해를 줄이기 위해서는 태풍이 상륙하는 시점의 진로와 강도 등에 대한 정확한 예측정보가 필수적이다. 특히, 태풍의 상륙 시기에 정확한 태풍강도 예측자료는 정부차원의 방재계획을 세우는 데 필수적인 정보이다. 태풍의 강도 예측을 위해서는 정확한 진로예측이 우선이며 그 외에도 태풍강도에 영향을 미치는 다양한 환경요인, 태풍-해양 상호작용, 그리고 태풍내부의 역학과정에 대한 이해를 필요로 한다. 태풍 강도에 영향을 미치는 이러한 복합적인 요인들 때문에 태풍강도 예측기술의 발전 속도는, 최근 급속한 관측 및 수치역학모델 기술의 발달에도 불구하고, 매우 느린 실정이다(DeMaria et al., 2007).

그동안 역학모델의 한계를 보완하기 위하여 많은 현업기관에서는 통계모델을 사용한 다양한 방법들이 태풍 강도예측에 사용되어 왔다. 그 중에 가장 대표적인 방법은 통계모델과 역학모델의 장점을 결합한 통계-역학적 허리케인 강도예측모델(Statistical Hurricane Prediction Scheme, SHIPS; DeMaria and Kaplan, 1994; DeMaria and Kaplan, 1999; DeMaria et al., 2005)이다. SHIPS모델은 태풍 강도에 영향을 미치는 다양한 예측인자를 정적인(static) 요소와 역학모델로부터 예측된 환경요소로부터 산출한 후 회귀식에 적용하여 태풍강도를 예측한다. SHIPS모델은 초기에는 북대서양 허리케인의 강도 예측을 위해 개발 되었지만, 이 후 Knaff et al. (2005)에 의해 미국합동태풍경보센터(Joint Typhoon Warning Center, JTWC)의 북서태평양 태풍강도 예측을 위한 통계예측모델(Statistical Typhoon Prediction Scheme, STIPS)로 사용되었다. 국내에서는 박종숙 등(2005)이 SHIPS 모델을 기반으로 북서태평양의 태풍강도 예측을 위한 통계모델을 개발하였고, 김

성훈 등(2014)이 STIPS모형을 더욱 발전시켜 태풍의 이동경로에 따른 군집분류 방법과 다양한 해양 접합 예측인자를 사용한 개선된 태풍강도예측모델 (Statistical Typhoon Intensity Prediction Scheme, STIPS2015)을 개발하였다. STIP2015모형은 현재 기상청의 현업 태풍강도 통계예측모델로 운용 중이다(국가 태풍센터, 2015).

지금까지 소개된 통계모델들은 주로 태풍이 외해에 있을 때 강도를 예측하기 위해 개발되었기 때문에 태풍이 육지에 가까워지거나 상륙한 경우에 태풍의 강도가 급격하게 감소하는 경향을 잘 예측하지 못하였다. Kaplan and DeMaria (1995)는 이를 보완하기 위하여 허리케인이 상륙할 때 나타나는 급격한 강도 약화를 예측하기 위한 육상바람약화모델(Inland Wind Decay Model, IWDM)을 개발하였다. 이 모델은 1967-1997년 기간 동안 미국 37°N 이남에 상륙한 모든 허리케인과 1967년 이전에 플로리다의 해안선을 따라 상륙한 3개의 허리케인 시기에 관측된 풍속자료(HURDAT, Jarvinen et al., 1988)를 이용하여 개발되었다. 이 모델은 허리케인 상륙 시 시간에 따라 허리케인 강도가 지수함수 형태로 감소하는 식을 사용한다.

Kaplan and DeMaria (2001)는 개발된 IWDM을 미국 북부 뉴잉글랜드 지역에 상륙한 허리케인에 대해서 적용하였고, Roy Bhowmik et al. (2005)는 인도에 상륙한 열대저기압에 적용하였다. 이들 연구에서 사용된 IWDM은 Kaplan and DeMaria (1995)를 기반으로 하고 있으나 감소계수( $R$ )에 의해 산출되는 매개변수의 값( $\alpha, V_b$ )을 별도로 산출하였다. Kaplan and DeMaria (2001)는 IWDM을 뉴잉글랜드 지역에 적용한 결과, 이 지역의 고유한 특성(즉 고위도, 높은 지형, 강한 연직바람쉬어 등)때문에 허리케인의 강도가 미국 남부(37°N 이남)에서 상륙하는 경우보다 더 빠르게 약화됨을 보고하였다. 이러한 결과는 IWDM을 지역적 특성에 맞게 별도로 구성할 필요성을 시사한다.

DeMaria et al. (2005)는 대서양 지역과 동태평양 지역에서 사용된 SHIPS모형을 IWDM과 결합하여 허리케인 강도예측에 사용하였다. 그 결과, 72시간 이전의 초기 예측시간에서는 기존의 SHIPS모델보다 향상된 결과를 보였으나 그 이후의 장기에측에서는 상륙지점과 진로에 대한 오차의 증가로 통계적으로 유의미한 성능 개선은 나타나지 않았다. DeMaria et al. (2006)은 기존의 IWDM이 상륙 후

소멸하는 허리케인에 대해서만 개발되어 허리케인이 육지를 통과하여 바다로 나가 재발달하는 경우를 고려되지 않은 점을 지적하고, 이를 개선하기 위해 새로운 방안을 제시하였다. 이 연구에서는 허리케인 중심으로부터 110 km 반경 내의 육지비율을 이용하여 IWDM을 개선하였고, 이를 SHIPS모델에 적용하여 기존 모델보다 2001~2004년 기간 동안 허리케인 중심에서 500km 반경 내에 육지가 포함되는 경우에 대해 최대 8%정도의 성능 향상을 이루었다. 국내에서는 최기선 등(2007)이 한반도 상륙 태풍에 대해서 진로별로 시간에 따라 태풍 중심기압이 변화하는 간단한 회귀모델을 개발하여 적용하였다.

지금까지 살펴본 IWDM 기반의 태풍상륙모델들은 태풍(또는 허리케인)의 강도 감소를 상륙 후 경과한 시간에 대한 함수로 나타낸다. 따라서 어떤 지역에서 태풍상륙모델을 개발하기 위해서는 태풍이 상륙한 이후에 태풍의 이동경로를 따라 관측된 정확도 높은 풍속(또는 기압) 자료가 필요하다. 북서태평양은 해안선이 복잡하고 태풍 이동경로에 많은 섬이 분포할 뿐 아니라 태풍이 상륙하는 범위가 매우 넓어(인도네시아에서 중국남부를 거쳐 한반도까지) 하나의 태풍상륙모델로 북서태평양 상륙 태풍을 모두 적용하기에는 한계가 있다. 또한 북서태평양 연안에서는 모델의 개발에 필요한 고품질의 풍속과 기압 관측자료가 부족하여 기존의 IWDM 기반으로 모델을 구성하는 데에는 어려움이 있다. 이러한 이유로 아직까지 북서태평양에서는 태풍상륙모델이 개발되지 않았다.

본 연구의 목적은 태풍의 활동구역이 넓을 뿐 아니라, 많은 섬과 복잡한 지형 등의 다양한 지리적 특성을 지닌 북서태평양에 대해 특화된 태풍상륙모델을 개발하는 것이다. 이를 위해 모델은 다양한 상륙 태풍의 특성이 반영되도록 태풍이 상륙하는 지형의 특성에 따라 지역을 세분화하여 따로 구성하였다. 또한 모델 개발은 기존의 IWDM 방식과는 달리 태풍 강도변화를 시간의 함수로 사용하지 않고 태풍이 육지에 접근한 시기의 초기강도와 태풍 중심으로부터 정의된 반경에 포함된 육지가 차지하는 비율을 이용하여 각 예측시간마다 따로 구성하는 방법을 사용하였다. 개발된 태풍상륙모델은 현재 기상청에서 현업모델로 사용 중인 STIPS2015모델에 결합하여 태풍 상륙 시 나타나는 과대모의를 보정하여 궁극적으로 태풍강도 예측성능 개선여부를 평가하고자 한다.

## 2. 자료 및 방법

### 2.1. 자료

본 연구에서는 먼저 STIPS2015모델의 예측성능을 평가하기 위해 2014~2015년에 대한 모델 예측결과를 다른 모델의 예측결과와 비교하였다. 비교검증을 위해 GFS(Global Forecast System), NOGAPS(Navy Operational Global Atmospheric Prediction System), HWRF(Hurricane WRF), UM(Unified Model), UM\_R(Unified Model\_Regional), KEPS(Korea Ensemble Prediction System), KWRF(Korea Meteorological Administration Weather Research and Forecasting), TEPS(Typhoon Ensemble Prediction System), JGSM(Japan Global Spectral Model) 역학모델의 예측결과를 사용하였다. GFS모델은 미국 NCEP(National Centers for Environmental Prediction)에서 사용되는 전 지구 예측시스템이고, NOGAPS는 미 해군에서 개발하고, 운영 중인 전 지구 모델이며, HWRF는 미국 NCEP에서 운용하는 WRF모델을 기반으로 한 허리케인 예측모델이다(Vijay et al., 2014). UM과 UM\_R은 우리나라 기상청에서 현업 예측모델로 사용하고 있는 전구모델과 지역모델이고(Lee et al., 2011), KEPS모델은 기상청에서 운영하는 앙상블 모델이며(오유정, 2015), KWRF모델은 WRF모델을 기반으로 한 기상청의 지역예보시스템중 하나이다(Park et al., 2008). TEPS모델은 일본 기상청의 전 지구 앙상블 태풍예측 모델이며(Yamaguchi and Komori, 2009), JGSM은 일본 기상청 전 지구 예측모델이다(Nakagawa, 2009).

본 연구에서 태풍상륙모델의 개발을 위한 훈련기간은 2004년~2013년, 그리고 모델 예측실험기간은 2014년~2015년으로 정하고 실험을 진행 하였다. 훈련기간 동안 STIPS2015모델의 성능검증과 태풍상륙모델을 개발하기 위해 사용된 태풍의 진로와 강도에 대한 태풍정보는 도쿄특별기상센터(The Regional Specialized Meteorological Center, RSMC\_Tokyo)에서 나오는 최적경로자료를 이용하였다. 예측실험기간에 사용된 태풍진로예측정보는 한국기상청(Korea Meteorological

Administration, KMA) 5일 현업 예측자료를 이용하였다. 또한 이 기간의 성능평가와 진로확인도 KMA에서 제공하는 태풍분석 자료를 이용하였다(본 연구에서 'KMA analysis'라 칭함). 태풍영향인자들을 구하기 위한 대기자료는 NCEP에서 제공하는 GFS 자료를 사용하였다. 이 자료는 하루 4번 6시간간격으로 제공되며, 1도의 수평해상도를 갖는다.

STIPS2015모델의 해양인자 계산에는 Hybrid Coordinate Ocean Model (HYCOM) Navy Coupled Ocean Data Assimilation (NCODA) Global Analysis (GLBa0.08) data가 사용되었다. 이 자료는 1/12도의 공간해상도를 가지며 하루에 한 번씩 10일 예측장을 제공한다.

태풍상륙모델에 사용되는 LAND인자(태풍의 반경 내 육지가 차지하는 비율)를 계산하기 위해 사용된 지형자료는 미국해양대기청(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)에서 제공하는 1/12도 격자의 ETOPO5(Earth Topography at 5minute grid)자료이다.

## 2.2. STIPS2015모델 소개 및 평가방법

본 연구에서 사용한 STIPS2015모델은 현재 우리나라 기상청 현업에서 사용되고 있는 모델로, 태풍의 진로에 따라 8개의 군집으로 나누고, 각 군집마다 6시간 간격으로, 총 120시간(5일)에 대해 총 160개의 다중회귀식으로 구성되어 있다. 군집을 분류하는 방법은 Bezdek (1981)이 제안한 Fuzzy c-mean clustering(FCM) 알고리즘이 사용되었다. 이 방법은 Hard c-Means clustering(HCM)을 개선하기 위해 인간의 판단을 수학적으로 접근하여 정량적으로 나타내는 퍼지이론을 적용하여 각 데이터를 각 군집별 소속정도에 따라 분류하는 알고리즘이다. Figure 1은 8개로 군집으로 분류된 태풍의 진로와 평균진로를 나타낸다. 군집 중에 2번과 8번(b, d)은 북위 20°이하의 저위도에서는 서진하는 모습을 보인다. 1번과 5번 군집(a, e)은 일본 동쪽해역에서 상륙하지 않고 외해에서만 이동하는 진로를 보인다. 3번과 6번 군집(c, f)은 몇몇의 태풍이 상륙하고 있으나 평균진로는 상륙하지 않는 것을 보여준다. 따라서 2, 4, 7, 8번 군집(b, d, g, h)에 소속된 태풍의 진로가 대부분 육지로 상륙하는 군집이다.

STIPS2015모델에서는 다중회귀식에서 선택된 예측인자들 사이의 다중공선성 문제를 해결하기 위하여 추후에 선택될 예측인자가 먼저 선택된 예측인자와 99%이상의 상관도를 보이는 경우 해당 인자를 제외하고 다른 인자들 중에서 선택하게 된다. 모델의 종속인자는 초기강도에 대한 최대풍속변화 값과 절대강도 값을 예측시간 별로 가중치를 두어 사용한다. 이 방법에 따르면 회귀식의 종속인자를 독립변수와의 상관도가 높은 종속변수로 선택함으로써, 종속인자는 단기예측에서는 강도변화가, 그리고 장기예측에서는 절대강도가 선택된다.

STIPS2015모델에 사용되는 예측인자는 태풍의 이동속도, 초기강도, 태풍중심의 위도와 경도, 최대잠재강도(MPI), 잠재강도변화(POT), 해양열용량(OHC), 해수면온도(SST), 상대습도(RHHI, RHLO), 수직바람시어(SH200, SH500), 대기온도(T200), 수평바람(U200)등이다. 여기서 태풍의 이동속도, 초기강도, 태풍중심의 위도와 경도는 KMA 태풍 예측자료에서 구하고, 최대잠재강도, 잠재강도변화, 해양열용량, 해수면 온도 등의 해양자료는 HYCOM, 상대습도, 수직바람시어, 대기온도, 수평바람은 GFS 자료에서 계산하여 산출된다.



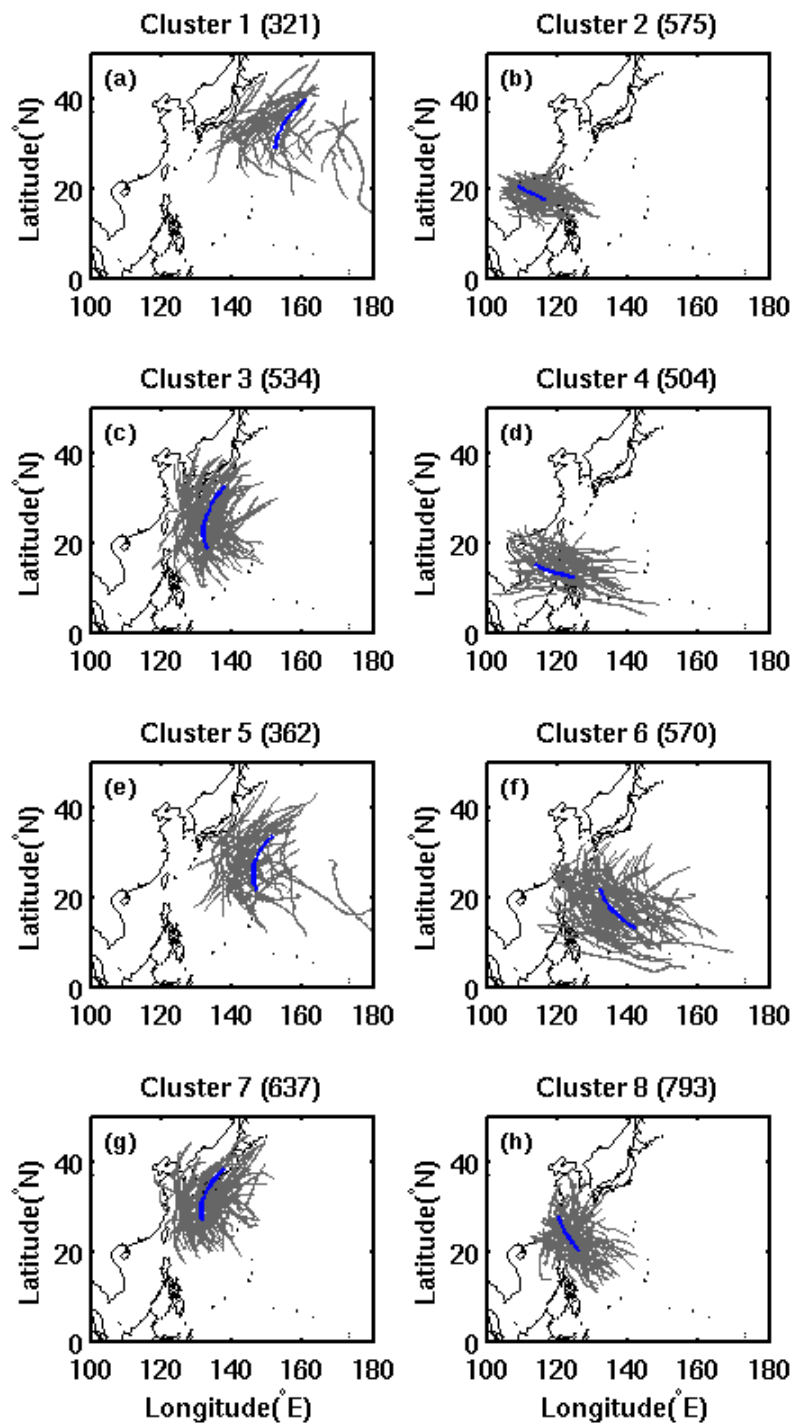


Figure 1. Typhoon tracks of 8 clusters classified by the Fuzzy c-Mean Clustering method. Gray lines represent individual typhoon tracks. Blue lines represent mean track of each cluster. Typhoon numbers for each cluster are shown in the bracket of each panel.

우선 본 연구에서는 현재 국가태풍센터에서 현업으로 운용중인 STIPS2015모델의 2014년~2015년 태풍의 강도예측성능을 평가하였다. 성능평가를 위해 GFS, NOGAPS, HWRF, UM, UM\_R, KEPS, KWRF, TEPS, JGSM 모델들의 태풍강도 예측성능과 비교하였다. 2014년에는 모든 모델의 예측자료가 존재하여 모든 모델과 성능비교를 하였으며, 2015년의 경우 KWRF모델의 자료가 존재하지 않아 제외되었다. 성능평가는 KMA 태풍분석 자료를 기준으로 비교하였으며, 분석에는 편차(Bias)와 평균절대오차(Mean Absolute Error, MAE)를 사용하였다(식 (4)와 (5) 참고).

$$Bias = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (M_i - K_i) \quad (4)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (|M_i - K_i|) \quad (5)$$

여기서  $M_i$ 는 모델의 태풍강도 예측 값,  $K_i$ 는 KMA 분석 자료의 태풍강도 값,  $n$ 은 자료의 총 개수를 나타낸다.

### 2.3. 태풍상륙모델 개요

Kaplan and DeMaria(2001)은 위도와, 지위고도 등의 절대적인 환경에 따라 태풍의 상륙 시 강도가 감소하는 형태가 다르게 나타난다고 보고하였다. 본 연구에서도 북서태평양의 태풍의 활동 지역에서 위도와 같은 절대적인 환경에 따라 태풍의 특징이 다르게 나타나는 점을 고려하여 북서태평양의 상륙지역을 4개의 지역으로 구분을 하였다(Figure 2). 1번은 STIPS2015모델의 4번 군집에서 태풍이 필리핀 섬에 상륙 하는 경우이다. 이 지역은 필리핀을 중심으로 크고 작은 섬이 모여 있어, 태풍의 상륙 시간이 길지 않으며, 섬을 통과해 다시 해양으로 빠져 나갈 때 태풍의 강도가 다시 상승할 가능성이 있는 지역이다. 2번은 8번 군집에서 대만을 통과하거나 대만 근처의 중국으로 상륙하는 경우로 대부분의 태풍은 대만을 통과하여 중국으로 상륙하면서 강도가 계속적으로 감소하게 된다. 3번은 7번 군집에서 한반도와 일본으로 상륙하는 경우이다. 이 경우는 태풍이 상대적으로 고위도 지역을 이동하므로, 태풍이 상륙하지 않더라도 강도가 계속 약화되는 경향이 있다. 4번은 2번 군집에서 남중국해를 지나 상륙하는 경우로, 1번 지역인 필리핀을 지나온 경우의 태풍들이 주로 포함되며, 태풍은 필리핀을 지나 강도가 강해지거나 유지되었다가 다시 상륙하면서 약해지는 경향을 보인다.

Kaplan and DeMaria (1995)는 상륙 6시간 전 강도를 기준으로 상륙 후 이동거리를 고려한 지수함수식을 만들어 IWDM을 개발하였다, 본 연구에서는 선행연구에서 IWDM의 지수함수식과 비슷한 형태의 시간이 지남에 따라 어느 한 지점으로 수렴하게 되는 형태의 회귀식을 구성하였다. 북서태평양에서는 강도가 감소되기 시작하는 시점이 대서양과는 다를 수 있기 때문에 본 연구에서는 태풍이 상륙하는 동안 초기강도에 비한 강도의 변화율 조사 실험을 실시하였다.

태풍상륙모델의 실행시점과 초기강도를 결정하기 위한 실험(Figures 3, 4)에서 태풍이 상륙하기 12시간과, 6시간 전 강도를 기준으로 시간에 따른 강도 변화율을 조사하였다. 12시간 전 강도를 기준으로 하였을 때는 한반도와 일본으로 상륙하는 태풍(Figure 3a)은 초기시간부터 상륙 이후에도 계속 감소하는 경향을 보였으나, 필리핀이나 남중국, 대만으로 상륙하는 몇몇 태풍(Figure 3b, c, d)은 강도가 증가하는 경우도 보이고 있다. 반면 상륙 6시간 전 강도를 기준으로 태풍강도

변화율을 확인하였을 때, 4 지역 모두 태풍이 상륙하는 동안 강도가 감소하는 것을 보여주었다. 다만 이 경우에 필리핀이나 대만으로 상륙하는 몇 가지 경우의 태풍(Figure 3a, b)이 상륙한 이후 강도가 상승하는 모습을 볼 수 있는데 이는 태풍이 상륙 후 다시 바다로 나가면서 강도가 증가한 경우이다. 따라서 본 연구에서는 태풍상륙모델의 실행 시점을 태풍의 상륙 6시간 전으로 정하고 그 때의 강도를 모델의 초기강도로 설정하였다.

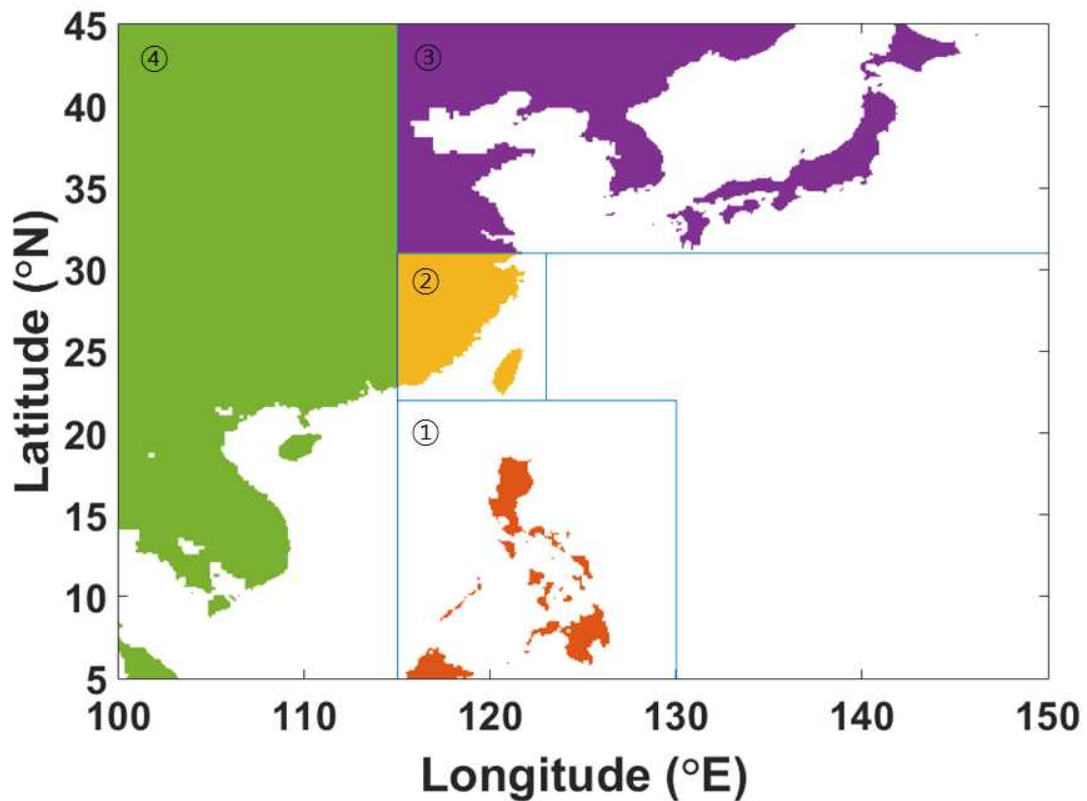


Figure 2. Four classified regions for development of typhoon landfall model : ① the Philippines, ② Taiwan, ③ Korea and Japan, ④ South China Sea.

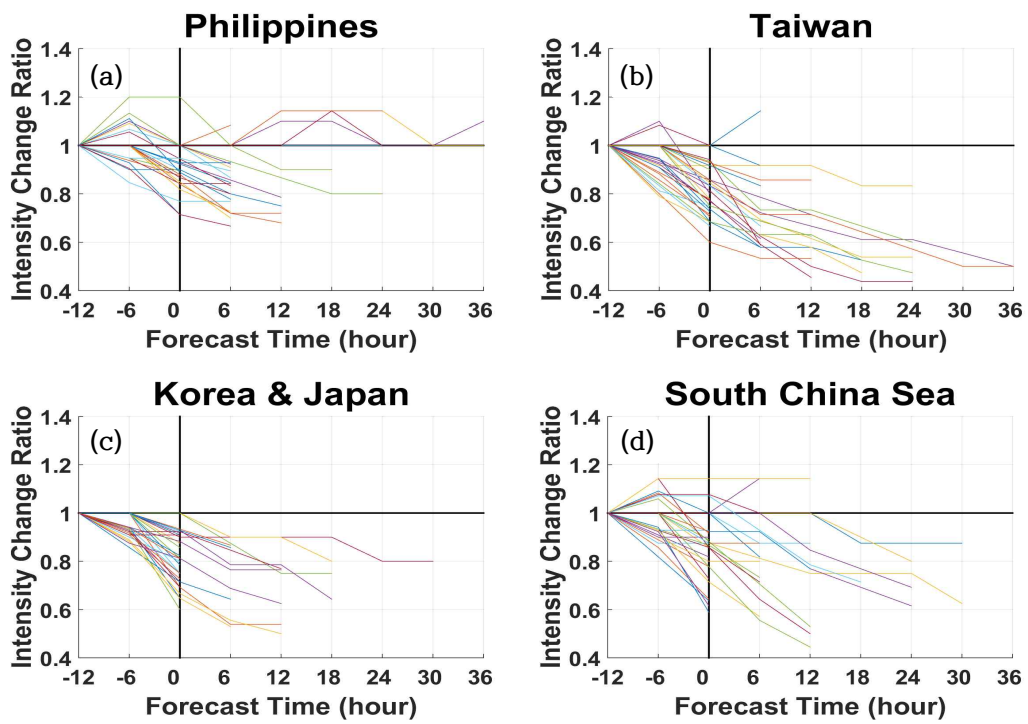


Figure 3. Experimental result for intensity change ratio after typhoon's landfall using 12-hour pre-landfall intensity. Color lines indicate intensity change ratio in each typhoon.

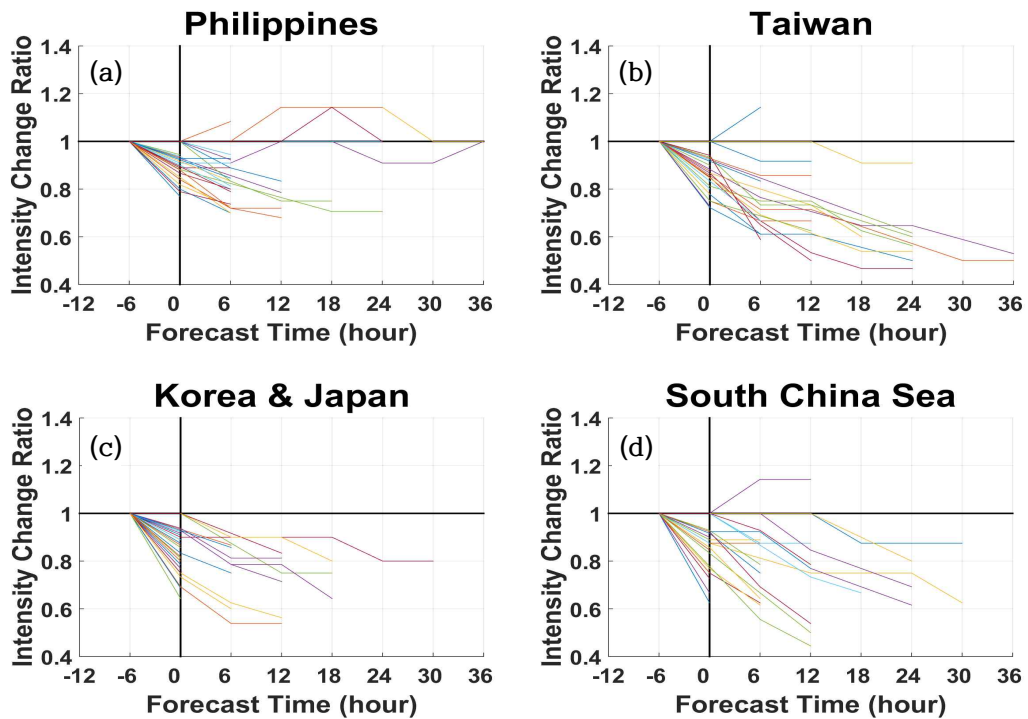


Figure 4. Same as in Figure 3, but using 6-hour pre-landfall intensity.

DeMaria et al(2006)은 상륙 후 바다로 나가거나 섬을 통과할 때의 강도변화를 고려하여 기존의 IWDM을 개선하였다.

$$\frac{dV}{dt} = -\alpha V \quad (6)$$

$V(t)$ 는 1분평균풍속이며,  $\alpha$ 는 붕괴상수,  $t$ 는 상륙 후 시간이다.

$$V(t) = V_p e^{-\alpha t} \quad (7)$$

$V_p$ 는  $t=0$ 일 때 1분평균풍속이며,

$$\frac{dV}{dt} = -\alpha(V - V_b) \quad (8)$$

1분평균풍속은 배경풍속인  $V_b$ 로 붕괴된다.

$$V(t) = V_b + (V_0 - V_b)e^{-\alpha t} \quad (9)$$

식(2)와 식(3)을 풀면 식(4)가 되며,

$$V(t) = V_b + (RV_p - V_b)e^{-\alpha t} \quad (10)$$

감소는  $V_0$ 와  $R$ 의 곱으로 설명된다( $R=1.0, 0.9, 0.8, 0.7$ ).

$$\frac{dV}{dt} = \alpha F(V - V_b) \quad (11)$$

$F$ 는 태풍의 반경 내 육지 포함정도이고, 태풍이 완전히 육지에 상륙하였을 경

우  $F=1$ 이므로 식(8)과 동일하게 된다.

본 연구에서는 선행연구를 참고하여 섬을 통과하거나 상륙 후 다시 바다로 나가는 경우를 고려하기 위해 두 번째 잠재예측인자인 LAND인자를 사용하였다. LAND인자는 태풍 반경 내 육지의 비율을 나타내며, 이 인자를 산출하기 위해 태풍반경은 DeMaria et al.(2006)이 사용한 110km 태풍 반경을 사용하였다. Figure 5는 해양격자자료에서 태풍 중심을 기준으로 반경 110km이내의 격자의 총 개수(파란격자 + 빨간격자의 개수)와 육지인 격자(빨간격자의 개수)의 비율을 나타낸다.

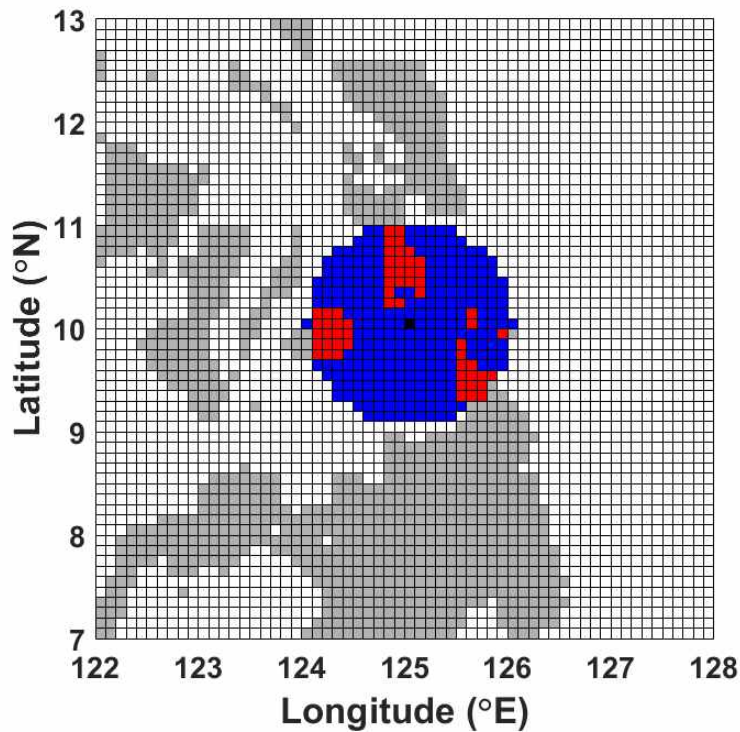


Figure 5. Land points (red) and ocean points (blue) within the radius of 110km from storm center.

기존의 IWDM기반의 태풍상륙모델은 강도의 감소를 상륙 후 경과시간에 따른 함수로 나타내었다. 그러나 북서태평양의 경우 섬이 많고 지형이 복잡하며 태풍의 상륙지역 범위가 넓을 뿐만 아니라, IWDM을 적용하기에 개발에 필요한 태풍의 상륙 후 이동경로에 따른 고품질의 풍속, 기압 관측 자료가 부족하다(풍속 17m/s이하의 값 제공안함). 따라서 본 연구에서 태풍상륙모델은 모델의 구성은 상륙 6시간 전부터 상륙 후 30시간까지 총 36시간동안 각 지역별로 6개씩 총 24개의 다중 회귀식 이용하여 구성하였다. 구성된 회귀식은 다음의 함수로 나타낼 수 있다.

$$V_t = a_{1t} V_0 + a_{2t} L + b_t \quad (12)$$

여기서,  $V_t$ 는  $t$ 시간 후의 강도,  $V_0$ 는 상륙 6시간 전 태풍강도,  $L$ 은 태풍반경 내 육지포함비율을 나타낸다.

Table 1에서 Table 4까지는 각각의 지역별로 구성된 회귀식의 회귀계수( $a_1$ ,  $a_2$ ,  $b$ ), 결정계수( $R^2$ ), 평균절대오차(MAE)를 나타낸다.

Table 1. Regression coefficients ( $a_1$ ,  $a_2$ ,  $b$ ), the  $R^2$ , and MAE for the landfall model of the Philippine region.

forecast lead time (t)	regression coefficient			$R^2$	MAE (knot)
	$a_1$	$a_2$	$b$		
0	0.832	-4.349	8.557	0.981	3.185
6	0.633	-5.815	17.078	0.935	4.505
12	0.610	-4.981	15.067	0.937	5.601
18	0.571	0	12.143	1	$1.42 \times 10^{-14}$
24	0	0	0	NaN	NaN
30	0	0	0	NaN	NaN



Table 2. Same as table 1, but for the landfall model of Taiwan region.

forecast lead time (t)	regression coefficient			R <sup>2</sup>	MAE (knot)
	a <sub>1</sub>	a <sub>2</sub>	b		
0	0.792	-2.179	5.613	0.924	4.217
6	0.379	-9.741	30.011	0.738	5.137
12	0.130	-10.769	45.156	0.612	5.897
18	-0.116	7.666	37.659	0.222	3.223
24	0.163	6.380	20.367	0.497	1.540
30	0	-13.17	20.375	1	0.000

Table 3. Same as table 1, but the landfall model of Korea and Japan region.

forecast lead time (t)	regression coefficient			R <sup>2</sup>	MAE (knot)
	a <sub>1</sub>	a <sub>2</sub>	b		
0	0.799	-10.013	10.855	0.868	4.374
6	0.570	5.660	9.889	0.734	4.551
12	0.476	3.994	18.464	0.689	3.298
18	0.198	12.536	26.339	0.962	0.491
24	-0.000	0.000	40	NaN	0.000
30	0.000	-24.511	0	NaN	0.000

Table 4. Same as table 1, but for the landfall model of South China Sea region.

forecast lead time (t)	regression coefficient			R <sup>2</sup>	MAE (knot)
	a <sub>1</sub>	a <sub>2</sub>	b		
0	0.717	-14.320	18.206	0.899	3.865
6	0.539	-18.240	26.859	0.754	5.480
12	0.305	-15.557	34.493	0.750	3.876
18	-0.090	11.564	33.490	0.357	3.982
24	0.500	-11.199	18.699	0.946	0.263
30	0.000	27.307	0	NaN	0

Figure 6은 구성된 회귀식에 훈련기간의 평균 초기강도와 육지포함정도를 대입하여 나온 결과를 나타낸다. 필리핀의 경우 처음 상륙 후 18시간 이후 까지 계속 상륙해 있는 경우가 없기 때문에 18시간 이후의 값이 없으며, 다른 지역의 경우 시간이 지남에 따라 35~40 knot의 값으로 수렴하는 모습을 확인할 수 있다. 이는 시간이 지남에 따라 선행연구에서 설명한 지수함수의 형태로 감소하는 것을 보여준다. 기존의 최기선 등(2007)이 개발한 한반도에 상륙한 회귀모형은 태풍의 강도를 평균 중심기압으로 표현하였으며, 시간에 대한 함수로 회귀식을 구성하였다(식 (13)).

$$P_t = P_0 + a \ln t \quad (13)$$

그러나 이처럼 시간에 대한 함수로 나타낼 경우 태풍의 급격한 강도변화를 잘 모의하지 못하는 경향이 나타난다. 그러나 본 연구의 회귀식은 급격한 변화뿐만 아니라 대만이나 한반도, 일본으로 상륙할 때의 6~12시간 때에서 태풍이 전향하면서 강도의 변화가 줄어드는 경향도 모의하는 것을 확인할 수 있다.

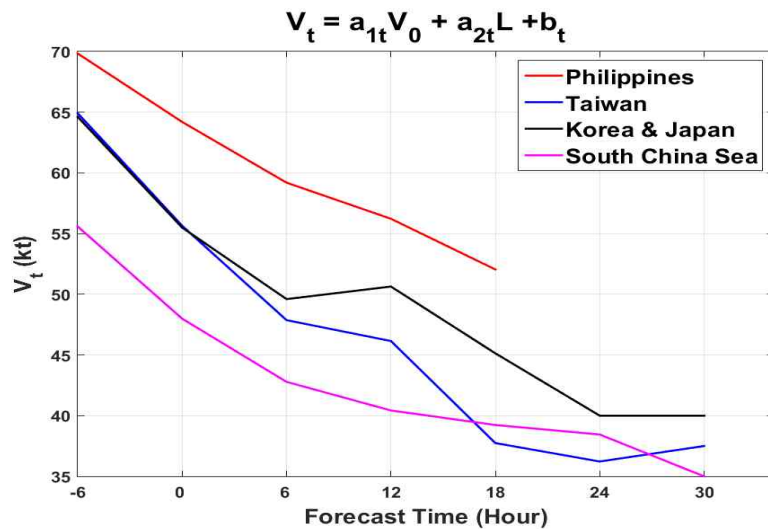


Figure 6. Intensity predicted by Regression equation using each average initial wind and LAND in training period at a typhoon landfall model. Red line shows landing over the Philippines, blue line shows over the Taiwan, black line shows over the Korea & Japan, and pink line shows South China Sea, respectively.

태풍상륙모델의 실행은 태풍이 발생하면 STIPS2015가 실행되고, KMA 태풍예측진로를 바탕으로 태풍이 상륙하기 6시간 전부터 태풍상륙모델이 실행되도록 결합하였다. 이후 태풍이 소멸하거나 다시 해양으로 빠져 나가는 경우 STIPS2015모델이 다시 실행 되도록 구성하였다. 그러나 태풍이 바다로 나가더라도 태풍상륙모델의 결과에서 태풍의 강도가 17m/s이하로 감소하였을 경우 태풍이 소멸한 것으로 판단하여 더 이상 STIPS2015모델이 실행되지 않는다. 본 연구에서는 태풍상륙모델(Typhoon Landfall Model, TLM)과 STIPS2015모델을 결합한 모델을 L-STIPS(Landfall Statistical Typhoon Intensity Prediction Scheme) 모델이라 칭하였다(Figure 7).

## L-STIPS

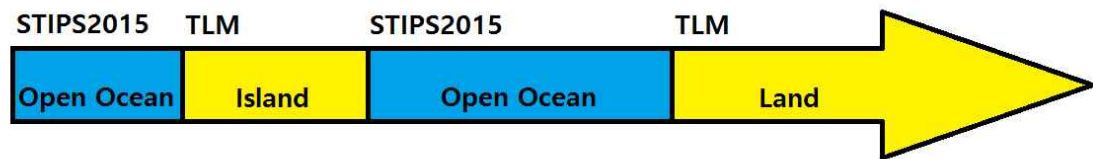


Figure 7. Schematic diagram for operational performance of L-STIPS model.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 STIPS2015모델 성능평가 결과

본 연구에서는 2014년과 2015년의 STIPS2015모델과 각 역학모델들의 KMA 분석 자료를 기준으로 편차와 평균절대오차를 비교하여 성능을 평가하였다. 두해의 편차(Figures 8, 9, left)를 확인해보면 초기시간부터 120시간까지 STIPS2015모델은 음의 값을 나타내고 있으며, 이는 모델이 과대모의하는 경향을 나타낸다. 그러나 다른 모델과 비교해봤을 때 편차의 변동이 매우 적고 약 2m/s이내의 값을 유지하고 있는 것을 확인할 수 있다. STIPS2015모델의 과대모의하는 부분은 본 연구를 통해 개선시키면 더 좋은 성능이 나타날 수 있다고 사료된다. 2014년 평균절대오차를 확인해 봤을 때(Figure 8, right), 약 60~80시간 예측에서 NOGAPS모델이 STIPS2015모델보다 좋은 성능을 보여주는 것을 볼 수 있으나 대부분의 예측시간에서는 STIPS2015모델의 결과가 약 6m/s 이내로 가장 좋은 성능을 나타내었다. 특히, 2015년 평균절대오차(Figure 9 right)에서 STIPS2015모델은 7m/s의 오차를 보이며, 모든 모델 중에서 가장 좋은 성능을 보여주고 있다.

STIPS2015모델은 다른 수치모델들과 비교하였을 때 가장 좋은 성능을 보여주고 있는 모델이지만, 태풍을 개별로 예측결과를 확인해보면, 태풍이 육지에 상륙하는 시점에서 태풍의 강도를 과대모의하는 경향이 나타난다. Figure 10은 태풍이 상륙할 때 STIPS2015모델 강도예측결과가 과대모의하는 경우를 나타낸다. Figure 10(top)은 태풍 룸비아(RUMBIA)가 필리핀을 지나 남중국해를 통과하여 상륙하는 경우이다. 이 경우 KMA 분석 자료에서는 초기에 태풍의 강도가 강화되지 않는 모습을 보여주고 있으나 STIPS2015모델은 필리핀에 상륙하는 시점에도 태풍의 강도가 상승하는 것으로 예측을 하고 있으며, 남중국해를 지나 내륙으로 상륙할 때도 강도를 과대모의하였다. Figure 10(middle)은 태풍 마이삭(MAYSAK)이 필리핀 지나 남중국해에서 소멸한 경우로, 필리핀을 통과하는 동

안 강도가 증가하는 예측을 하였다. 이는 필리핀이 육지임에도 불구하고 태풍의 발달에 도움을 주는 환경으로 인식하여 STIPS2015모델에서 강도가 발달한다고 예측한 것으로 사료된다. Figure 10(bottom)은 태풍 아타우(ETAU)가 일본으로 상륙하는 경우이며, 태풍이 상륙할 때 급격한 강도변화를 잘 모의하지 못하고 있다. 이처럼 태풍이 상륙하는 시간 때에서 약간의 강도약화의 경향을 보여주고는 있지만, 급격한 강도감소를 모의를 하지 못하거나 KMA 태풍분석 자료와 비교하였을 때 과대모의를 하고 있는 경향을 확인 할 수 있다.

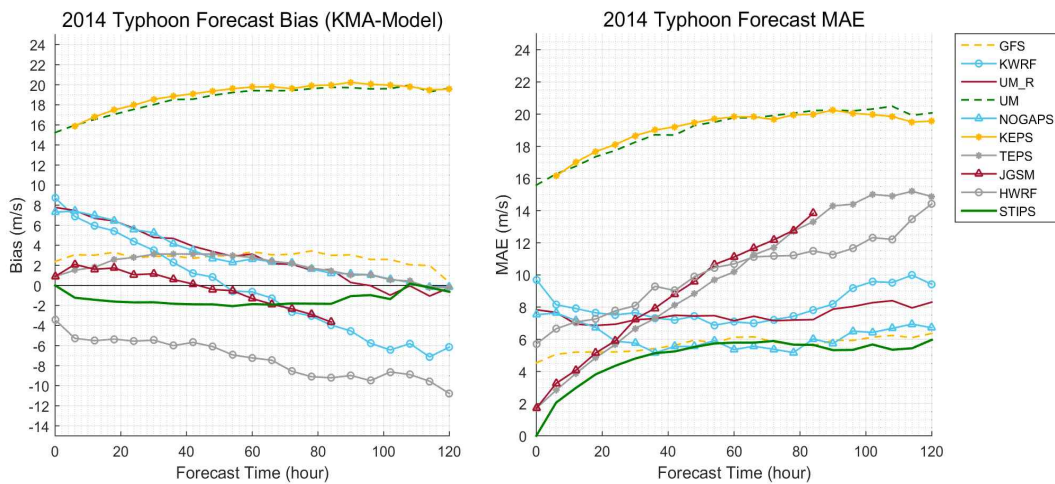


Figure 8. The comparison with Bias(left) and MAE(right) of forecast results of intensity over time between KMA analysis and each models (legend) in 2014.

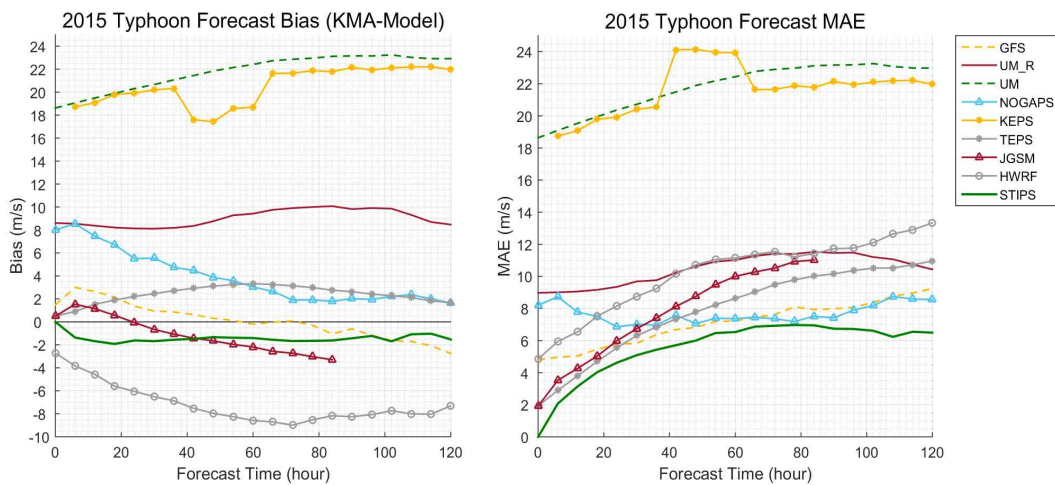


Figure 9. Same as Figure 8, but for in 2015.

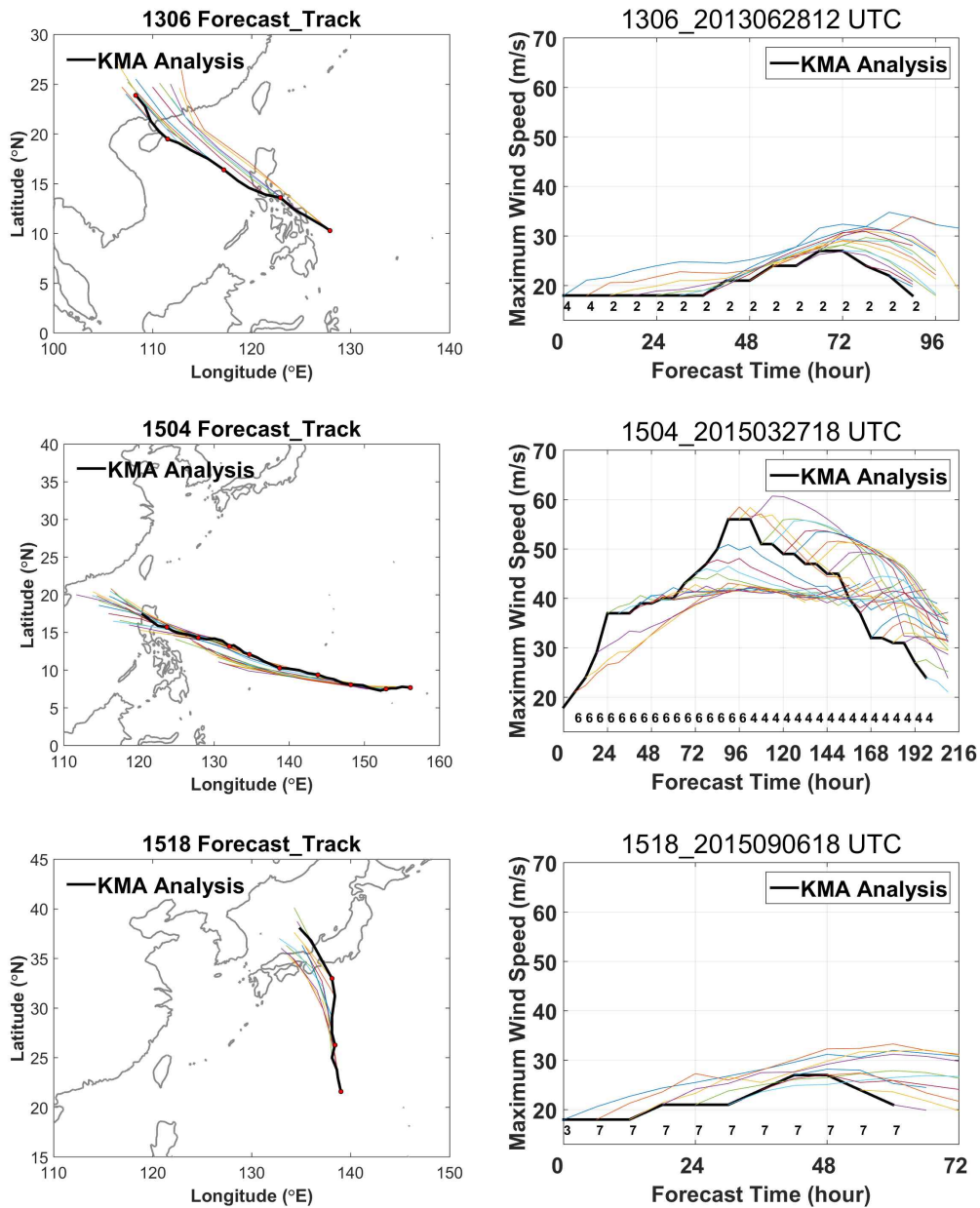


Figure 10. A sample of an overestimation of STIPS2015 during typhoon's landfall. Left and right panels represent track and intensity forecast results(color lines), respectively, black solid lines represent analysis results for RUMBIA(1306, top), MAYSAK(1504, middle), and ETAU(1518, bottom).

### 3.2. L-STIPS모델의 훈련기간 검증 결과

L-STIPS모델의 훈련기간 동안의 모델의 성능을 검증하기 위해 STIPS2015모델과 L-STIPS모델의 평균절대오차를 비교해 보았다. Figure 11은 훈련기간 내 예측시간에 따른 모델의 군집별 성능을 나타낸다. 평균절대오차를 보면 태풍이 육지에 많이 상륙하는 2, 4, 7, 8번 군집(Figure 11b, d, g, h)에서 예측시간 24시간 이후부터 태풍상륙모델을 결합하였을 때 성능향상을 보여준다. 특히 2번 군집에서 다른 군집보다 많은 최대 15%의 향상을 보여주고 있으며, 4번과 8번 군집(Figure 11d, h)은 평균 7% ~ 9%의 향상을, 7번 군집(Figure 11g)의 경우 지리적으로 고위도 지역이기 때문에 STIPS2015모델에서도 태풍강도 약화를 잘 모의하고 있어 초, 중기 예측에서 다른 군집보다 적은 향상을 보여 주고 있으나, 96시간이후의 장기예측에서는 최대 15% 정도의 많은 개선이 이루어졌다. 3번과 6번 군집(Figure 11c, f)의 경우 72시간 이후의 장기예측에서 약간의 성능향상을 보여 주는데, 이는 3번과 6번 군집의 평균적인 태풍 진로는 상륙하지 않지만 몇몇의 태풍들이 상륙하는 경우도 포함이 되기 때문으로 사료된다. 1번과 5번 군집(Figure 11a, e)의 경우는 대부분의 태풍 진로가 상륙하지 않는 먼 바다에서 생성, 소멸되는 태풍들이기 때문에 태풍상륙모델을 결합하였을 때 변화를 보이지 않는다.

훈련기간동안 전체 태풍의 예측시간에 대한 평균절대오차(Figure 12)를 살펴보면 예측시간 약 24시간 이후부터 평균절대오차 값이 STIPS2015모델보다 줄어드는 것을 확인 할 수 있으며, 48시간 이후부터는 두 모델의 오차 값의 차가 일정하게 유지되고 있다. 즉, L-STIPS모델의 경우가 STIPS2015모델 보다 최대 8% 정도의 성능 향상을 보여주고 있다.

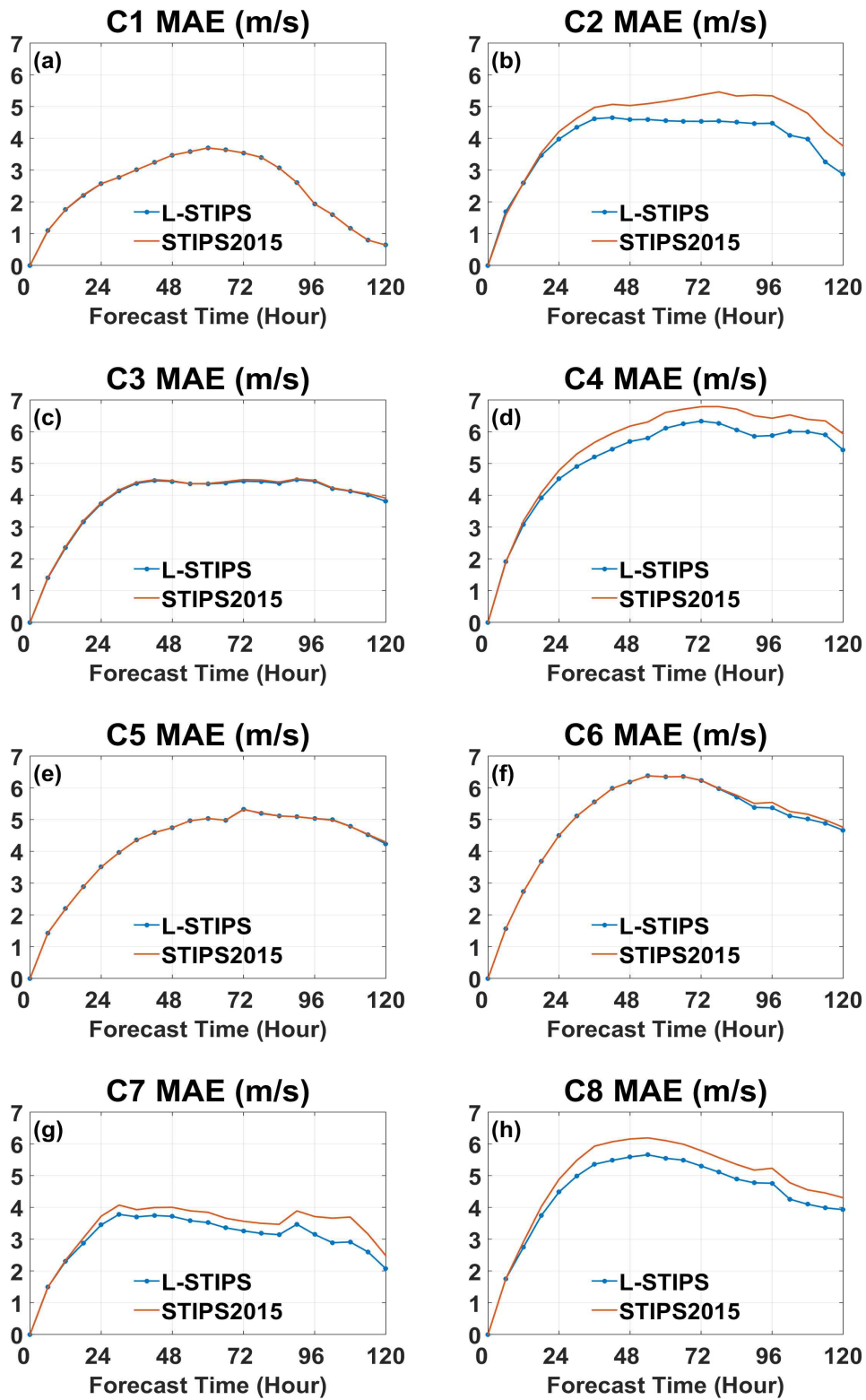


Figure 11. Comparisons of MAE between L-STIPS and STIPS2015 for training period of eight clusters.



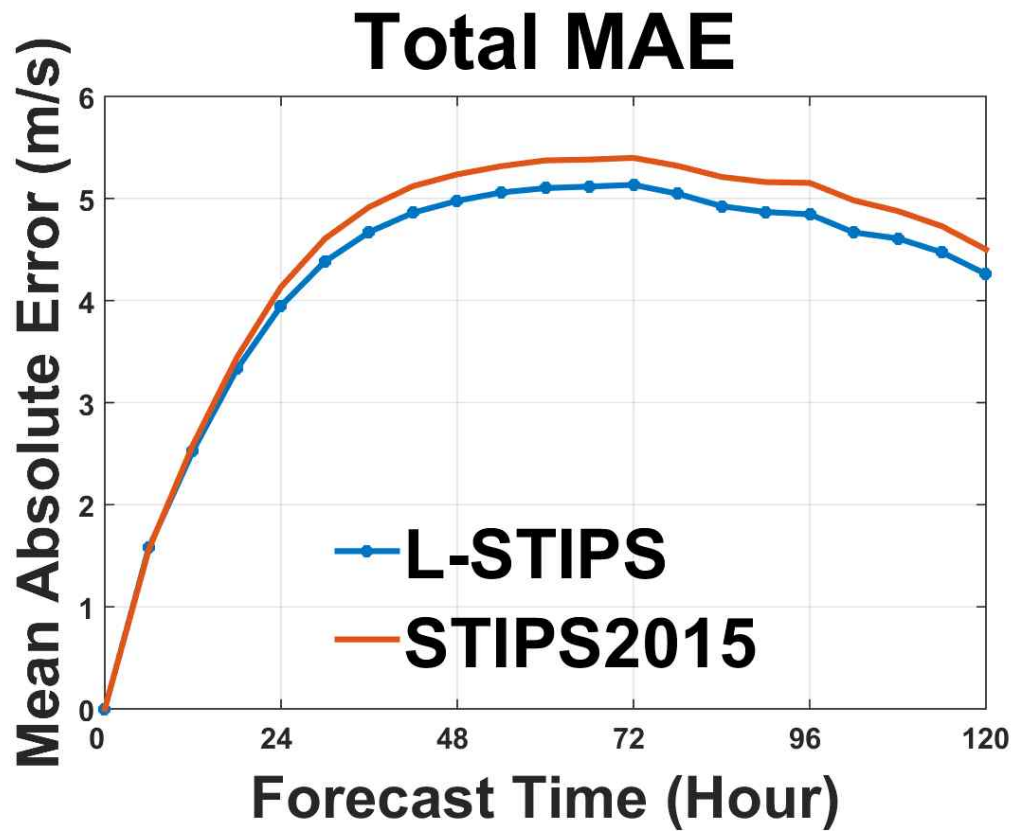


Figure 12. Same as Figure 11, but for total clusters.

### 3.3. L-STIPS모델의 예측실험 결과

L-STIPS모델의 실제 예측 성능을 평가하기 위하여 예측실험기간인 2014년 23개 태풍, 2015년 27개 태풍, 그리고 2016년 04호 태풍 니다(NIDA)에 대해 예측 실험을 실시하고 STIPS2015모델과 L-STIPS모델의 예측 결과를 각 태풍별, 연도별로 편차와 평균절대오차를 비교하였다. Figure 13은 태풍들의 KMA 예측 진로를 나타내며, Figure 14 ~ 21은 태풍의 예측결과와 예측결과의 편차, 평균절대오차를 나타낸다. 각 태풍별 결과를 보면 태풍이 육지에 상륙하는 부분에서 STIPS2015모델이 과대모의를 하고 있는 부분을 L-STIPS모델이 개선을 하여 편차와 평균절대오차가 줄어든 것을 확인 할 수 있다. 2014년 08호 태풍 너구리(NEOGURI)는 일본으로 상륙한 태풍으로, 태풍이 일본에 상륙할 때 STIPS2015모델의 경우 강도가 감소하고 있는 경향은 예측하였지만 전체적으로 과대모의하고 있으며, L-STIPS모델의 경우는 STIPS2015모델이 상륙할 때 과대모의하고 있는 부분의 강도를 줄여주어 오차를 감소 시켰다(Figures 13a, 14, 15). 편차(Figure 15 left)에서도 138시간 이후의 과대모의하는 부분이 개선된 것이 잘 나타나며, 이 결과로 평균절대오차의 결과도 개선되는 것으로 사료된다. 2014년 10호 태풍 매트모(MATMO)는 대만을 통과하여 중국으로 상륙한 태풍으로(Figures 13b, 16, 17), 120시간부터 144시간까지 STIPS2015모델이 과대모의하는 부분을 L-STIPS모델이 개선시킨 것을 확인 할 수 있다. 그 결과 편차는 최대 약 2m/s, 평균절대오차는 최대 약 1m/s가 감소하였다. 2014년 16호 태풍 풍영(FUNG-WONG)은 필리핀의 북쪽과 대만을 통과하여 중국으로 상륙하는 경우로(Figures 13c, 18, 19), 72시간부터 상륙할 때 STIPS2015모델의 과대모의하는 부분이 개선되었으며, 그 결과 편차와 평균절대오차 모두 최대 1.5m/s정도가 감소하였다. 2015년 01호 태풍 메칼라(MEKKHALA)는 필리핀으로 상륙하여 소멸한 태풍으로(Figures 13d, 20, 21), 필리핀에 상륙하는 78시간 이후부터 과대모의를 개선하여 편차, 평균절대오차 모두 최대 약 0.7m/s가 감소하였다. 2015년 15호 태풍 고니(GONI)는 대만 근처를 지나 일본으로 상륙하는 태풍으로(Figures 13e, 22, 23), 일본으로 상륙하는 240시간 이후부터 STIPS2015모델이 과대모의하는 부분을 개선시켜 편차와 평균절대오차 모두 최대 1m/s정도가 감소하였다. 2015

년 21호 태풍 두취안(DUJUAN)은 대만을 통과하여 상륙한 태풍으로(Figures 13f, 24, 25), 144시간 이후의 예측에서 STIPS2015모델보다 적은 오차를 보여주며, 편차는 최대 약 1.7m/s, 평균절대오차는 최대 약 2m/s가 감소하였다. 2016년 04호 태풍 니다(NIDA)는 필리핀을 통과하여 남중국해를 지나 내륙으로 상륙하는 태풍으로(Figures 13g, 26, 27), 필리핀을 지나는 12시간~36시간에서는 이미 STIPS2015모델이 태풍강도를 과소모의하고 있어 태풍상륙모델이 실행되었을 때 편차와 평균절대오차가 증가하지만, 내륙으로 상륙한 60시간 이후에서 STIPS2015모델의 과대모의를 크게 개선시켜 편차와 평균절대오차 모두 최대 2.3m/s정도가 감소하였다. 2014년 11호 태풍 할롱(HALONG)은 일본을 통과한 태풍으로(Figures 13h, 28, 29), 일본을 통과할 때 STIPS2015모델이 처음부터 강도를 약하게 모의하고 있어 태풍상륙모델이 실행되었을 때 더 크게 과소모의를 하는 경우이다. 그 결과 편차와 평균절대오차 모두 약 2m/s가 증가하였다.

예측실험기간의 각 연도별 편차와 평균절대오차를 확인한 결과(Figure 30) 편차는 2014년 예측결과의 경우 최대 약 30%의 향상을 보였으며, 2015년 예측결과는 평균 약 17%의 성능향상을 보여주었다. 이는 STIPS2015모델에서 과대모의하고 있는 부분이 개선되어 편차가 줄어든 것을 나타낸다. 평균절대오차의 경우 L-STIPS모델과 STIPS2015모델의 차이가 크게 보이지 않는다. 이는 예측시간별로 상륙하는 태풍의 개수가 적기 때문에 이 그림에서는 평균절대오차의 값의 개선이 나타나지 않는 것으로 사료된다. 따라서 태풍이 상륙하는 경우에 대해서만 L-STIPS모델의 성능을 따로 확인하기 위해 각 예측시간별로 태풍이 상륙한 시점만을 이용하여 편차와 평균절대오차 분석을 실시하였다(Figure 31). 그 결과, STIPS2015모델이 상륙 시 과대모의를 하는 것을 줄여주었으며, 이로 인해 평균절대오차에서 60시간 이후의 장기 예측에서 L-STIPS모델의 성능이 최대 20%정도 향상되는 것을 확인할 수 있다.

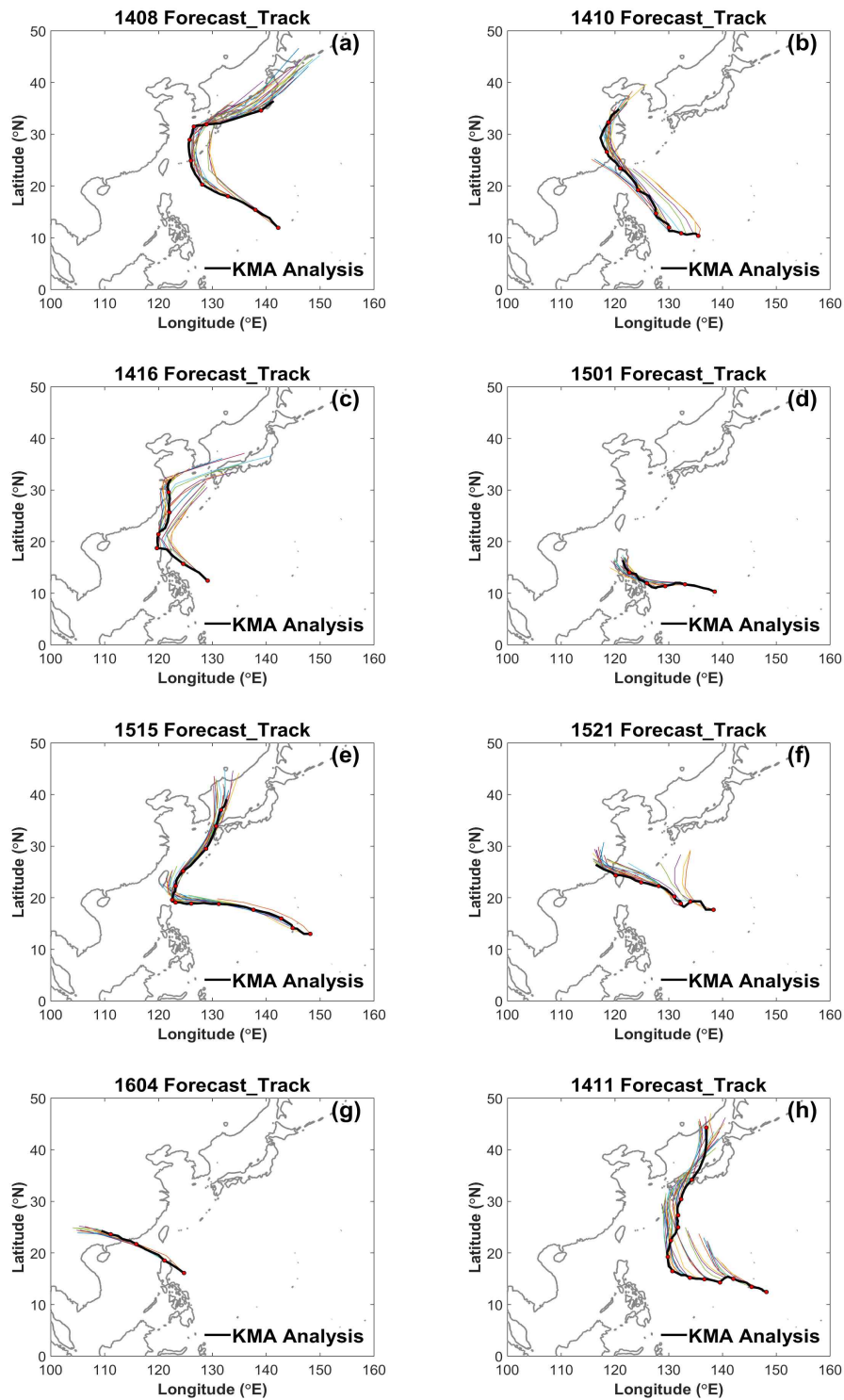


Figure 13. Typhoon forecast tracks (color lines) and analysis track (black solid line) of KMA which are used in evaluating the performance for 8 individual typhoons. : (a) 1408 NEOGURI, (b) 1410 MATMO, (c) 1416 FUNG-WONG, (d) 1501 MEKKHALA, (e) 1515 GONI, (f) 1521 DUJUAN (g) 1604 NIDA, (h) 1411 HALONG.

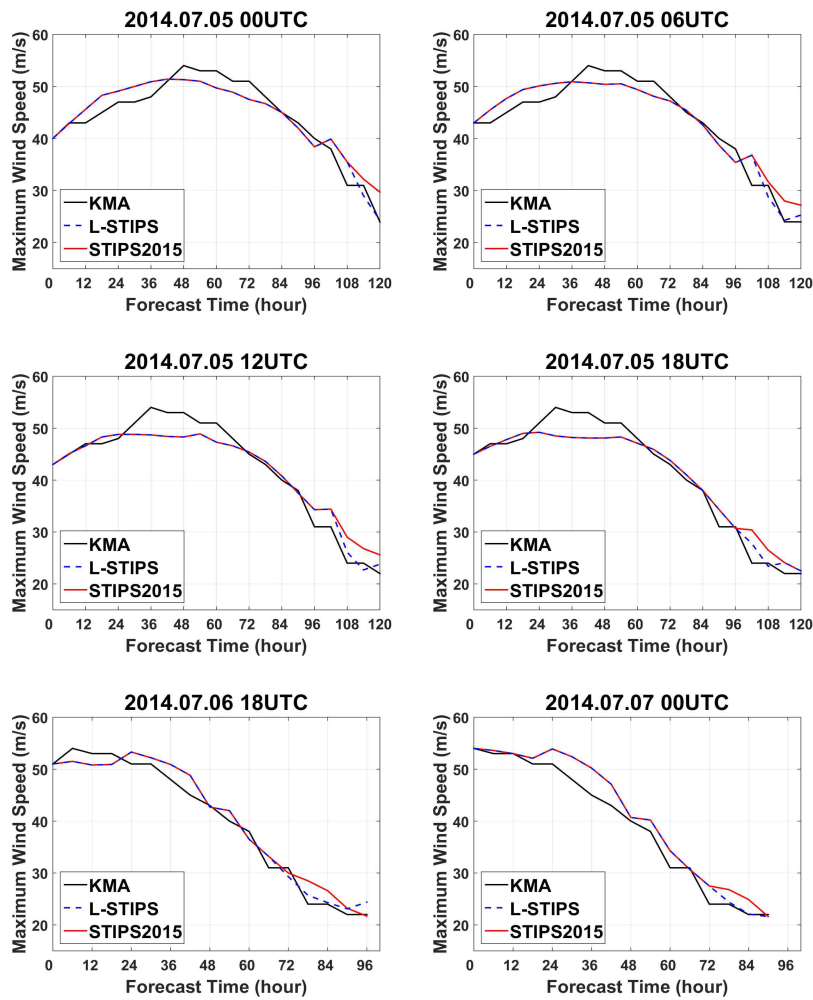


Figure 14. Comparisons of forecast results for NEOGURI (1408) among KMA analysis, L-STIPS and STIPS2015. Black solid line, blue dash line and red solid line represent KMA analysis, L-STIPS and STIPS2015, respectively.

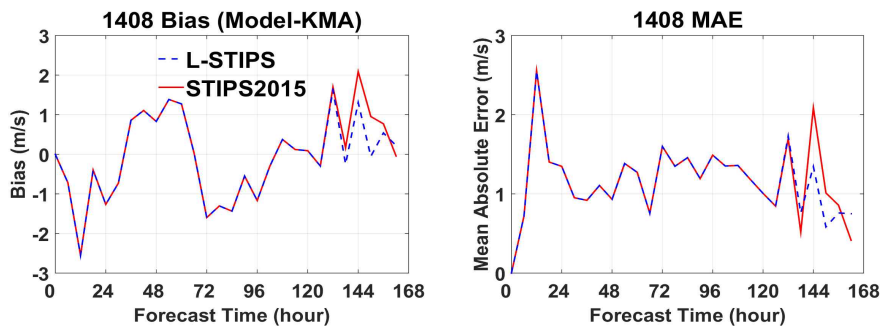


Figure 15. Comparisons Bias (left) and MAE (right) between L-STIPS and STIPS2015 for NEOGURI (1408). Blue dash line and red solid line show L-STIPS and STIPS2015, respectively.

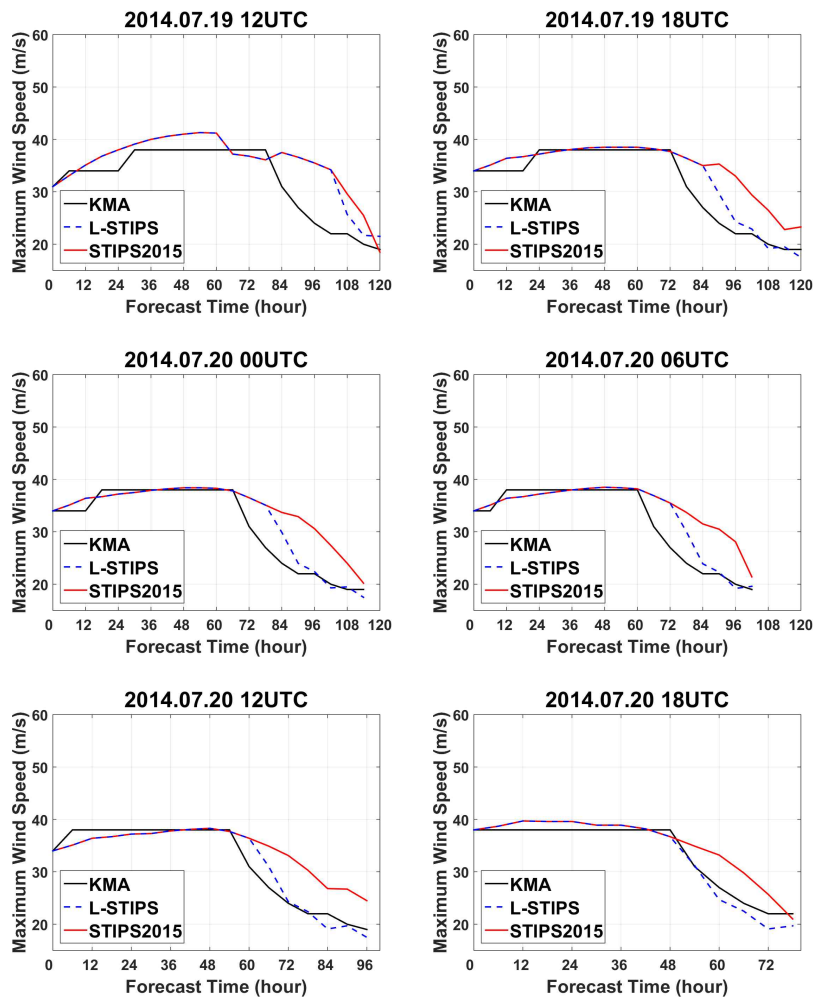


Figure 16. Same as in Figure 14, but results for MATMO (1410).

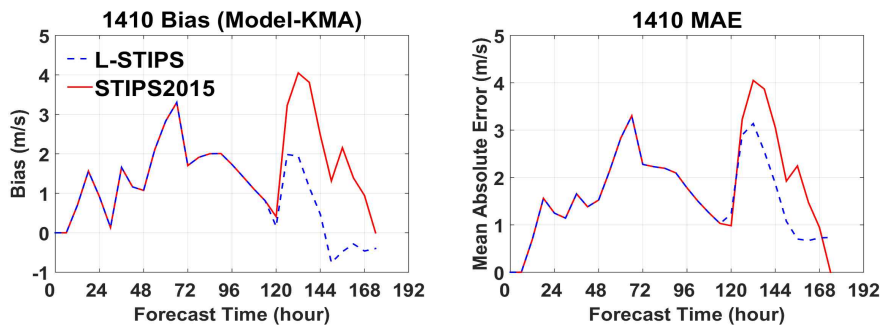


Figure 17. Same as in Figure 15, but results for MATMO (1410).

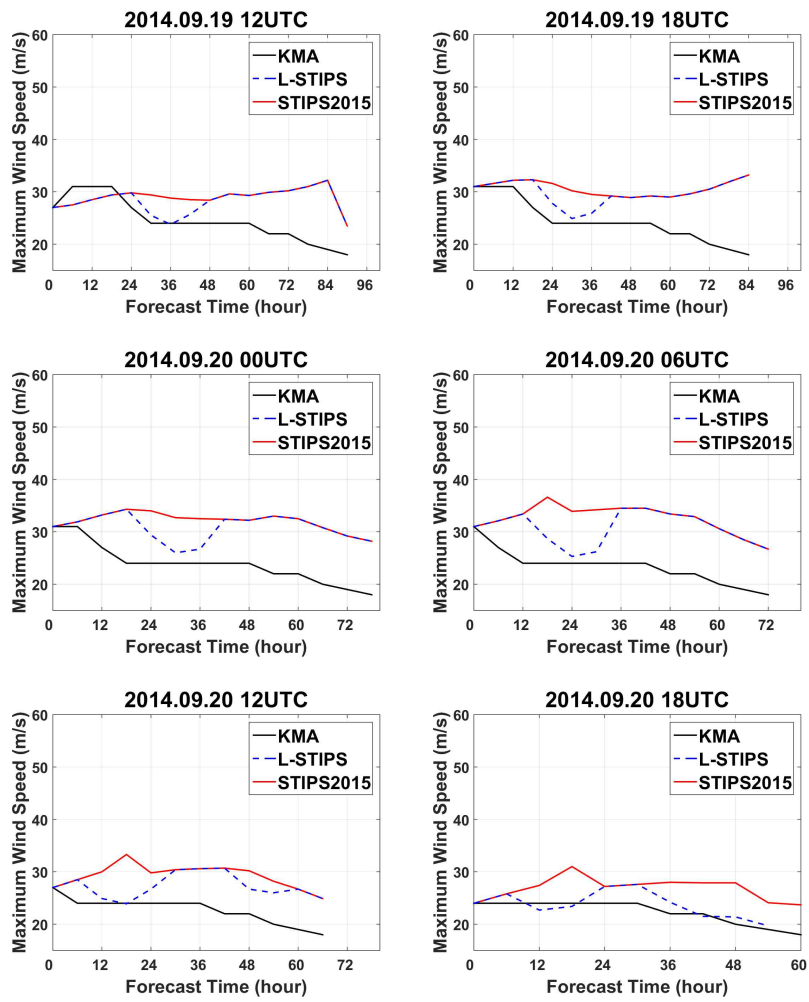


Figure 18. Same as in Figure 14, but results for FUNG-WONG (1416).

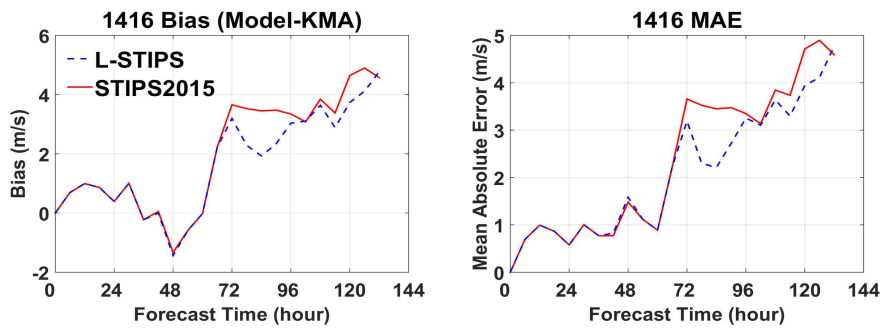


Figure 19. Same as in Figure 15, but results for FUNG-WONG (1416).

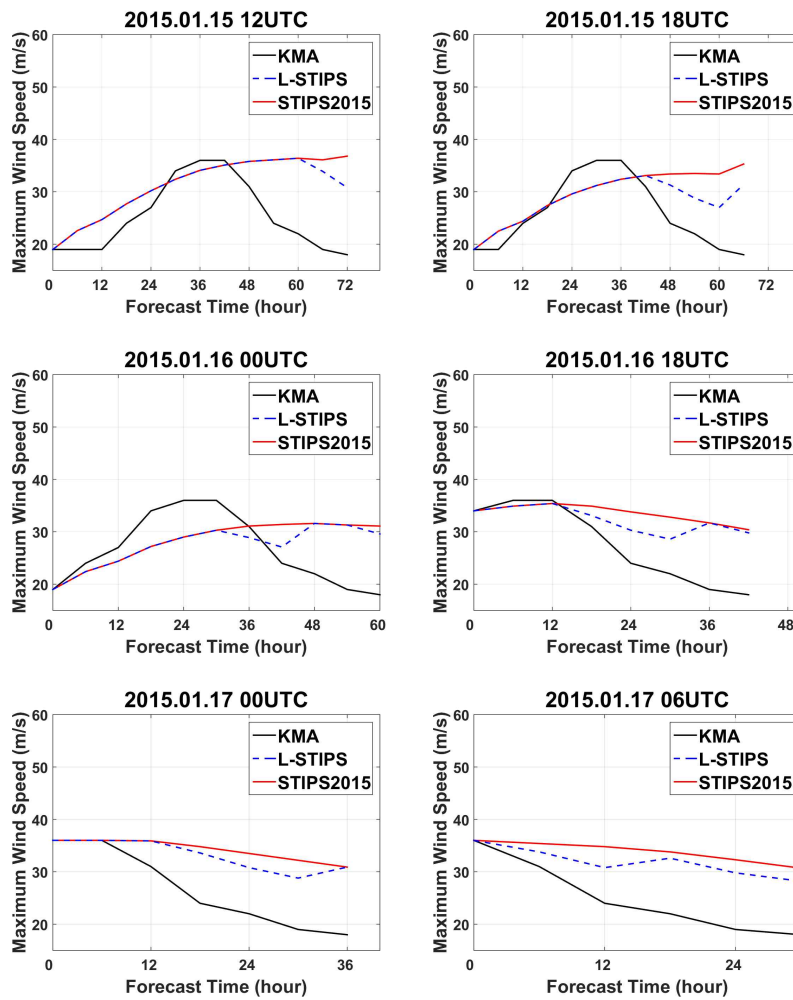


Figure 20. Same as in Figure 14, but results for MEKKHALA (1501).

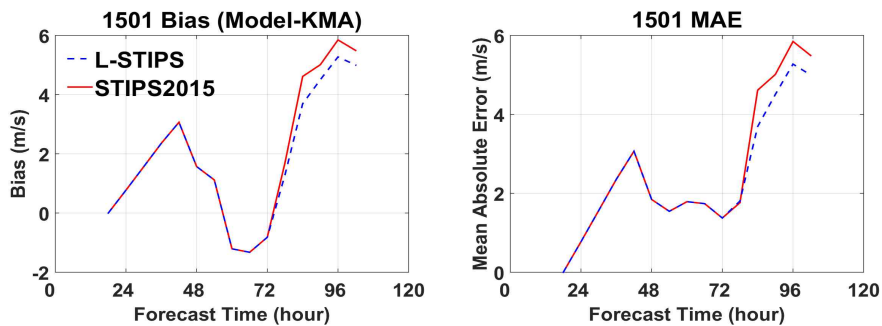


Figure 21. Same as in Figure 15, but results for MEKKHALA (1501).



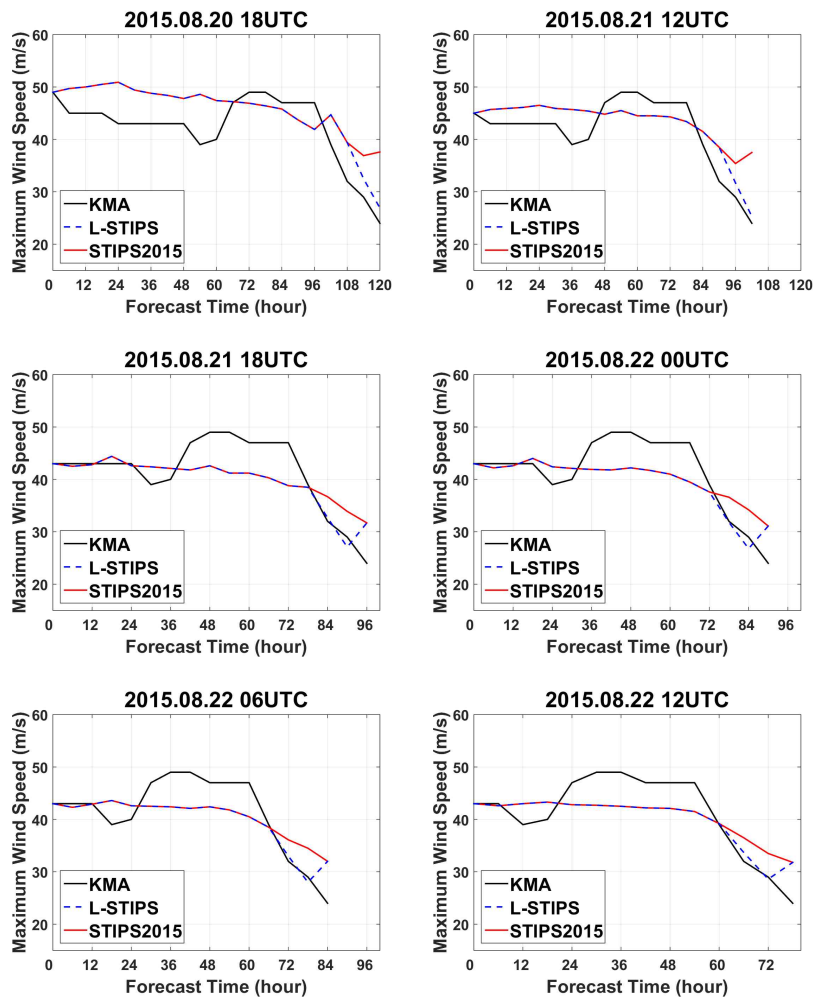


Figure 22. Same as in Figure 14, but results for GONI (1515).

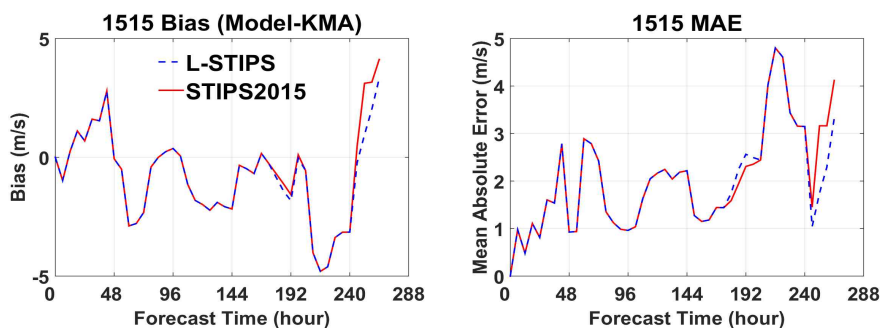


Figure 23. Same as in Figure 15, but results for GONI (1515).

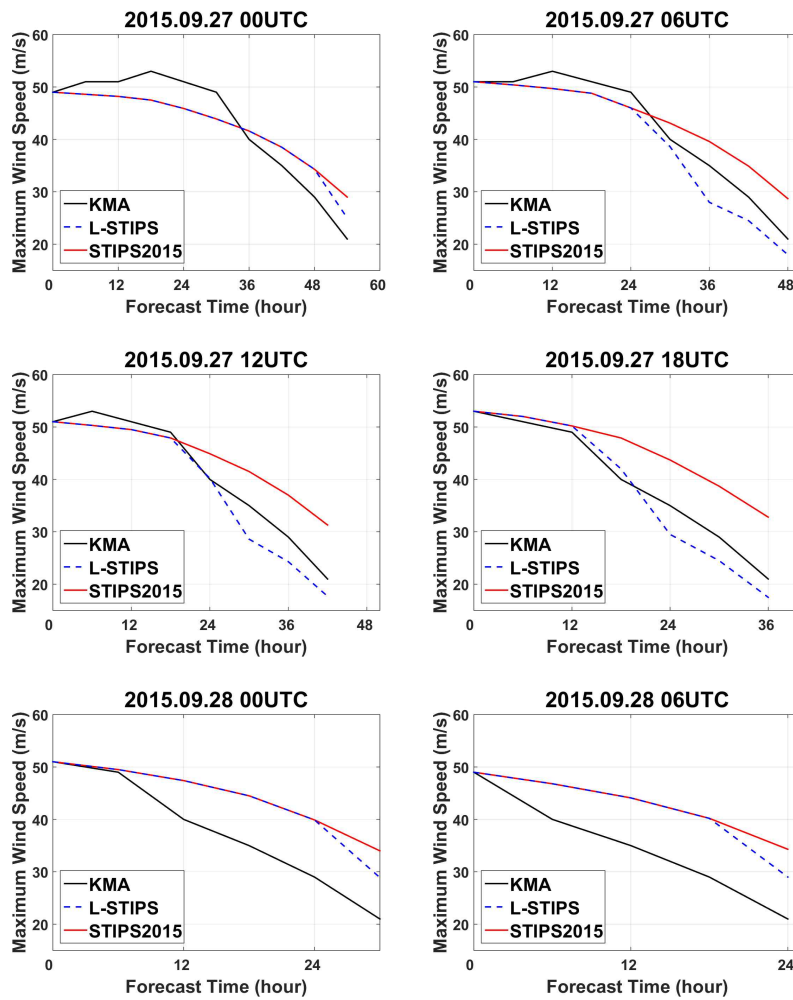


Figure 24. Same as in Figure 14, but results for DUJUAN (1521).

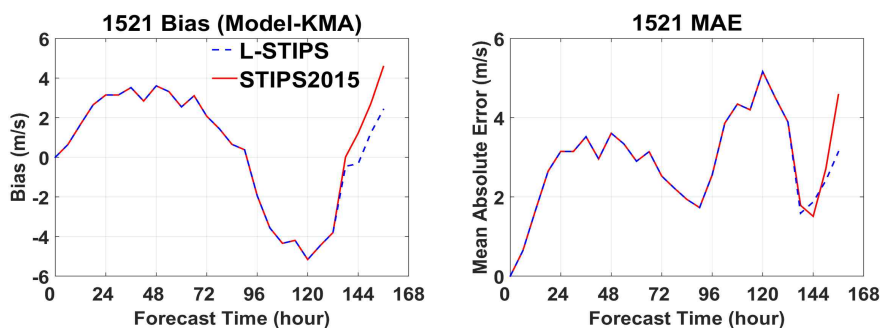


Figure 25. Same as in Figure 15, but results for DUJUAN (1521).

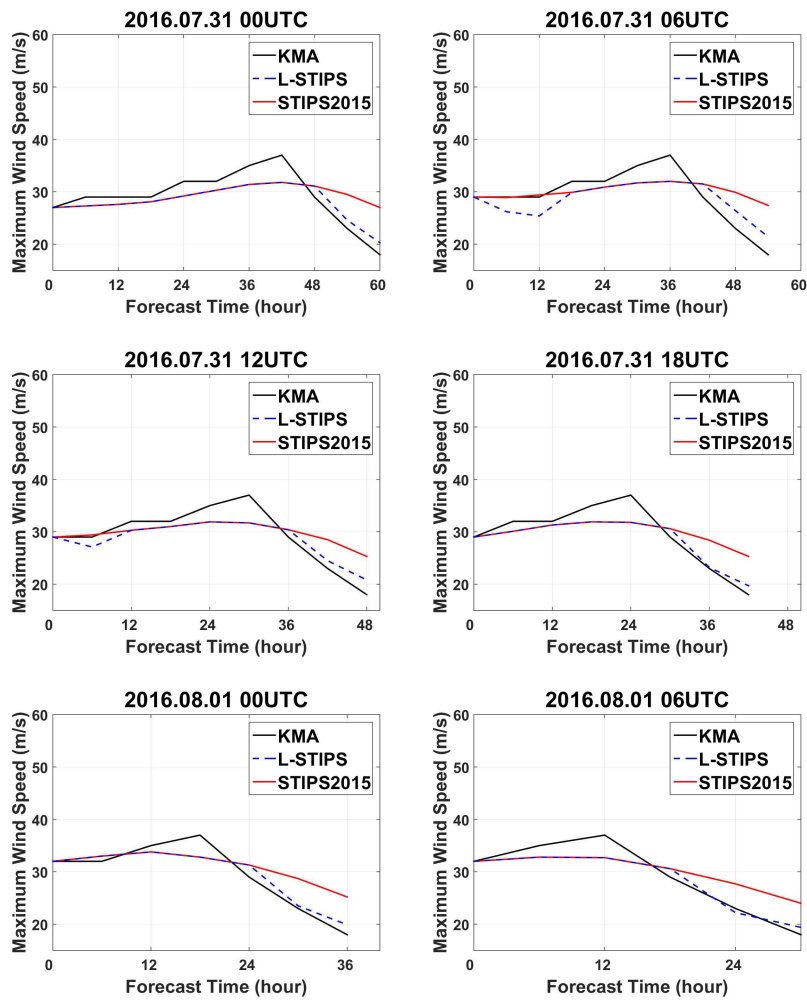


Figure 26. Same as in Figure 14, but results for NIDA (1604).

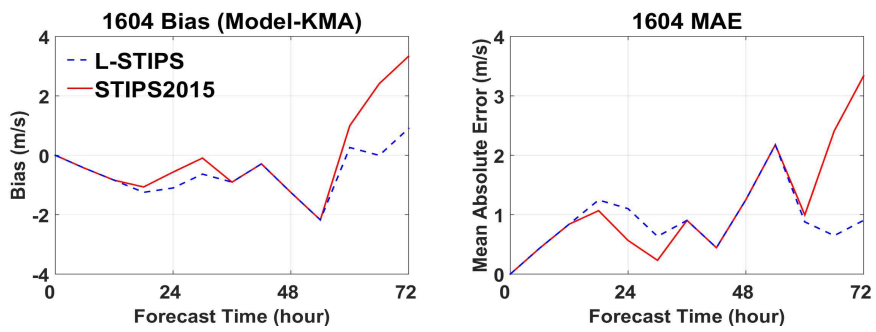


Figure 27. Same as in Figure 15, but results for NIDA (1604).

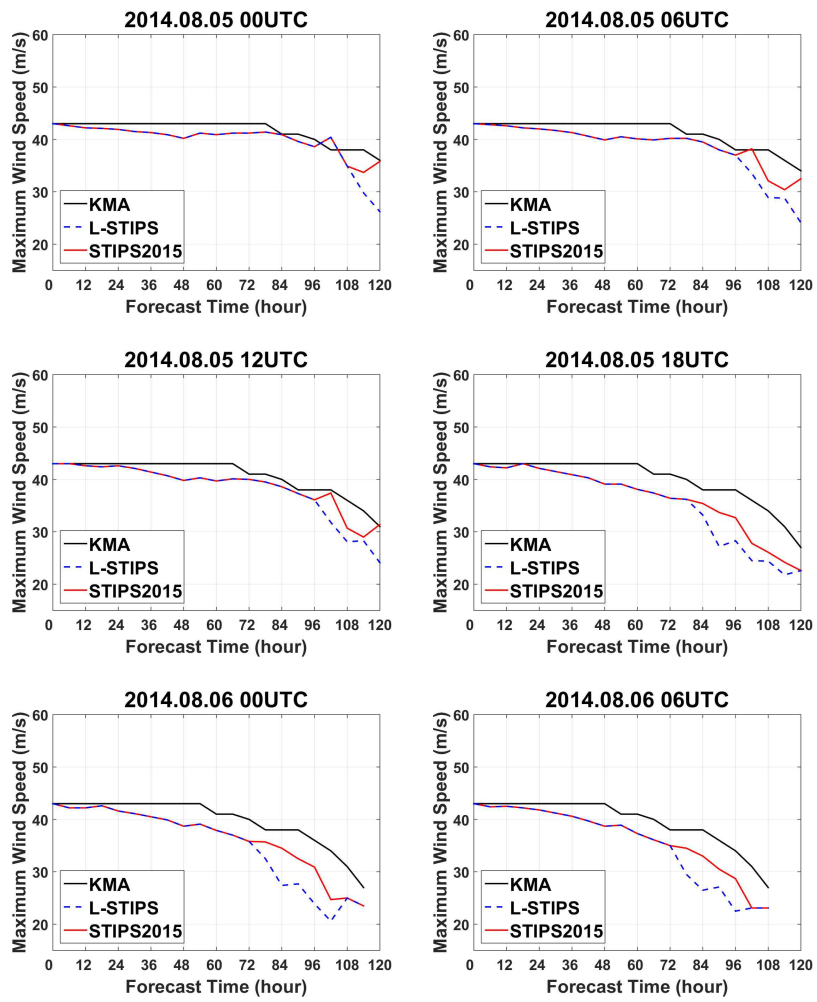


Figure 28. Same as in Figure 14, but results for HALONG (1411).

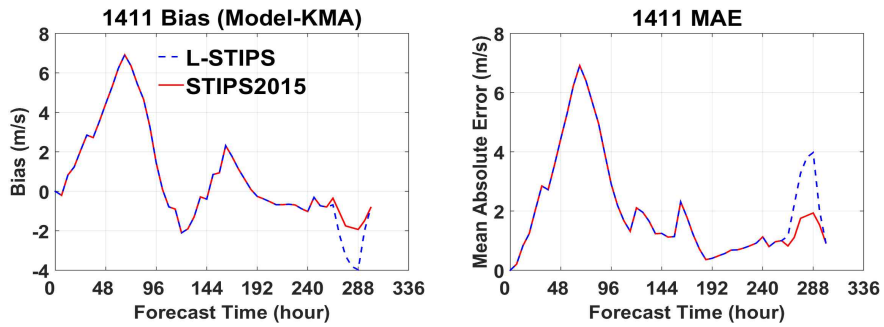


Figure 29. Same as in Figure 15, but results for HALONG (1411).

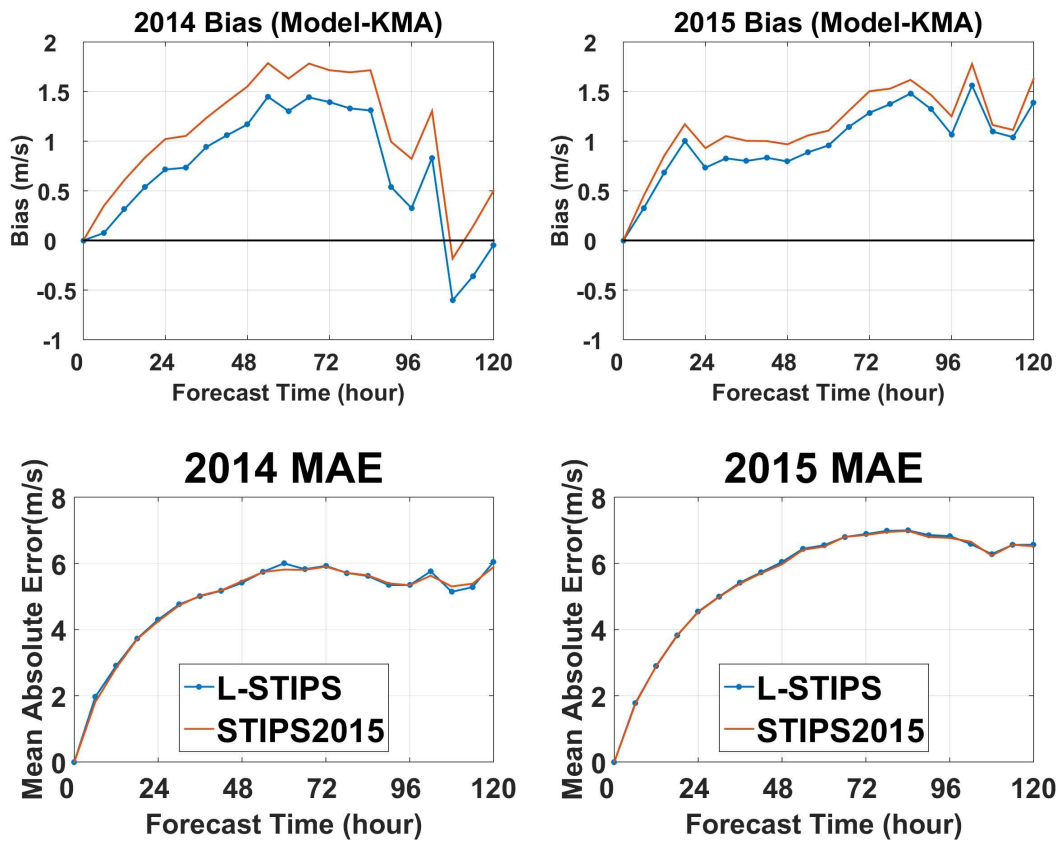


Figure 30. Comparisons of Bias (top) and MAE (bottom) between L-STIPS and STIPS2015 for all typhoons in 2014 (left) and 2015 (right).

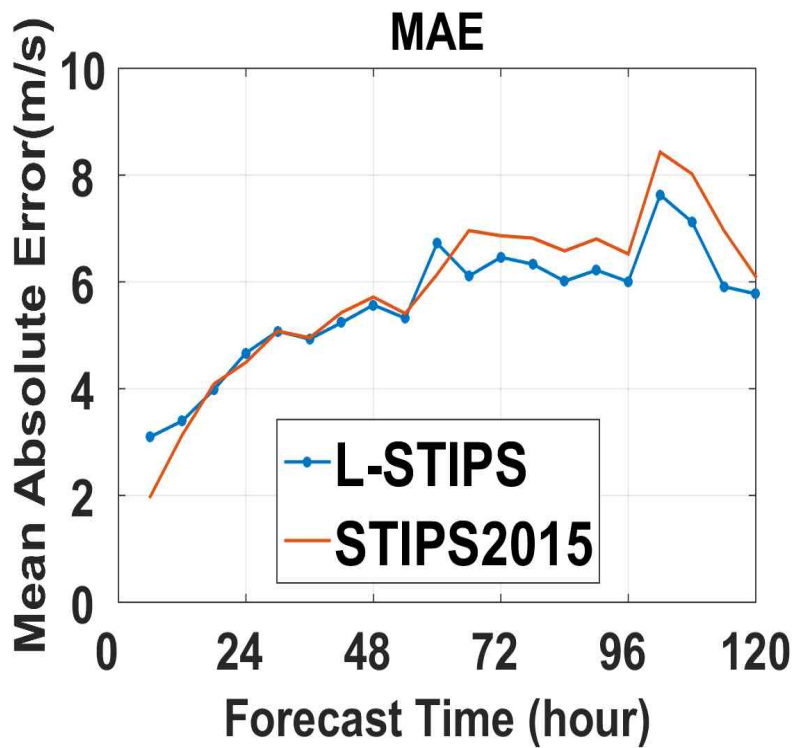
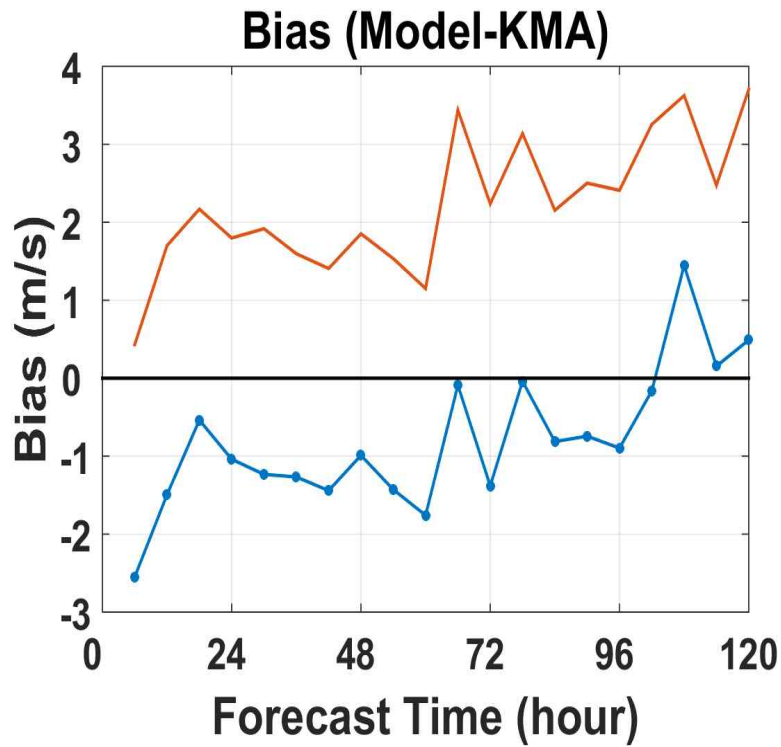


Figure 31. Comparisons of Bias (left) and MAE (right) between L-STIPS and STIPS2015 for landfall typhoons in 2014 and 2015.

## 5. 요약 및 결론

본 연구에서는 태풍의 활동구역이 넓은 북서태평양에 대해 특화된 태풍상륙모델을 개발하여 기상청에서 현업모델로 사용 중인 STIPS2015모델에 결합하여 그 성능을 조사하였다. 먼저 2014-2015년 기간 동안 현업에서 사용되고 있는 STIPS2015모델의 태풍강도 예측결과를 다양한 현업기관의 수치역학모델들의 예측결과와 비교하였다. 분석결과, 두 해 모두 STIPS2015모델이 다른 역학모델들보다 대부분의 예측시간에서 낮은 편차와 평균절대오차를 보였다. 그러나 태풍의 개별 예측결과를 자세히 분석해보면 태풍이 상륙하는 시점에 일부 태풍에서 강도를 과대 모의하는 경향이 나타났다. 이러한 과대모의 경향을 개선하기 위해 본 연구에서는 북서태평양의 지형적 특성을 고려하여 총 4개 지역(필리핀, 대만, 한반도/일본, 남중국해)에 대한 태풍상륙모델을 개발하고, STIPS2015모델에 결합하였다(이하, L-STIPS).

개발된 모델은 태풍 강도변화를 시간의 함수로 사용하는 기존의 방법과는 달리 태풍이 육지에 접근한 시기의 초기강도( $V_0$ )와 태풍중심으로부터 정의된 반경에 포함된 육지비율( $L$ )을 이용하여 각 예측시간마다 따로 강도변화를 추정하는 방법을 사용하였다. 태풍상륙모델의 실행시점(상륙 6시간 전)과 각 회귀식에 사용된 상수 값은 훈련기간(2004~2013) 동안 상륙한 태풍의 최적경로 자료를 이용하여 결정하였다. 회귀식에 사용된 태풍 반경 내 육지포함 비율은 선행연구에서 사용한 태풍 반경인 110 km를 사용하여 산출하였다. 태풍상륙모델은 STIPS2015 모델이 수행되는 동안 예측진로의 태풍중심이 상륙하기 6시간부터 수행된다. 만약 태풍상륙모델이 수행 중에 태풍의 중심이 다시 해양으로 진입하면 태풍상륙모델은 종료되고 다시 STIPS2015모델이 수행된다. 또한 태풍상륙모델이 실행되고 있는 동안에도 만약 태풍 강도가 17 m/s 이하로 예측될 경우 태풍이 소멸하였다고 판단하여 모델은 더 이상 수행되지 않는다.

이러한 방법으로 훈련기간에 대해 L-STIPS모델의 성능을 조사한 결과, 상륙한 태풍이 많은 STIPS2015모델의 2, 4, 7, 8번 군집에서 L-STIPS모델이 기존의

현업 STIPS2015모델보다 평균절대오차에서 평균 약 7~15%의 성능향상을 보였으며, 전체 태풍에 대한 분석에서도 평균절대오차에서 최대 8%정도의 성능향상이 나타났다. 2014년 23개 태풍과 2015년 27개 태풍에 대해 실제 예측성능을 조사한 결과에서도 L-STIPS모델을 이용한 결과가 전반적으로 향상된 태풍 강도에 예측을 나타내었다. 성능이 개선된 태풍 사례에 대해 자세히 분석해 본 결과, 태풍이 상륙하기 전 과대모의를 하고 있는 경우에 L-STIPS모델이 강도를 감소시키는 효과가 있는 것으로 나타났다. 그러나 이와 반대로 태풍이 육지에 도달되기 전에 강도를 과소 모의하고 있는 경우에는 도리어 L-STIPS모델이 강도를 더 감소시켜 오차가 증가되었다. 예측실험기간동안의 연도별 편차와 평균절대오차 분석 결과, 편차는 예측시간에 따라 2014년과 2015년에 각각 최대 30%와 17%의 성능개선이 확인되었으나 평균절대오차에서는 큰 성능의 개선이 나타나지 않았다. 평균절대오차가 큰 차이가 보이지 않은 이유는 예측시간별로 상륙한 태풍의 개수가 적기 때문으로 사료된다. 이를 자세히 확인하기 위해 예측실험기간동안의 예측시간별로 상륙한 태풍에 대해서만 분석을 실시한 결과, 편차에서는 STIPS2015모델이 과대모의하고 있는 경우를 L-STIPS모델이 많이 감소시켜주었으며, 평균절대오차에서 60시간 이후의 장기예측에서 최대 20%정도의 성능향상을 나타냈다.

현재 현업에 사용되는 STIPS2015모델은 태풍이 상륙하는 경우를 포함한 전체 이동경로에 대해 군집분류를 실시하고 이를 바탕으로 군집별 모델을 만들어 사용하고 있기 때문에 군집별로 이미 육지의 영향이 간접적으로 고려될 수 있다. 따라서 향후에는 태풍이 해상에 위치하는 경우에 대해서만(즉 상륙 시기를 제외하고) STIPS모델을 개발하고 이를 태풍상륙모델과 결합한다면 더 좋은 결과를 낼 수 있을 것으로 사료된다.



## 참고 문헌

- 기상청, 2011. 태풍백서, pp. 31-41
- 기상청 국가태풍센터, 2015. 예보기술지원 및 활용연구(VII), 태풍 단·장기 예측기술 개발(III), 11-1360000-001253-10, pp. 323-368.
- 오유정, 2015 : 수치모델의 태풍강도예측성능 평가 및 컨센서스 기법 연구. 석사학위논문, 제주대학교, 제주.
- 박종숙, 권혁조, 신도식, 2005 : 통계적 방법에 의한 북서태평양 태풍 강도 예측 모델 (STIPS) 개발. 기상기술 Vol. 1 No.1, 2005. pp. 15-24.
- 최기선, 김백조, 이지윤, 2007 : 한반도 상륙 태풍의 강도변화 예측을 위한 단순회귀모형 개발. 대기 Vol.17 No.2, 2007. 6 pp. 135-145.
- 김성훈, 문일주, 변건영, 이우정, 강기룡, 강남영, 윤원태, 2014: Statistical typhoon intensity predictions in the western North Pacific using a track-pattern clustering approach. 한국기상학회, 기상학회 학술대회 논문집. 2014. 10, pp. 473-474.
- Jarvinen, B. R., C.J.Neumann, and M. A. S. Davis, 1988: A tropical cyclone data tape for the North Atlantic Basin, 1886-1983: Contents, limitations, and uses. NOAA Tech. Memo. NWS NHC **22**, Miami, FL, 21.
- Bezdek, J. C., 1981: Pattern Recognition with Fuzzy Objective Function Algorithms. Kluwer Academic, pp. 256.
- DeMaria, M., and J. Kaplan, 1994a: A statistical hurricane intensity prediction scheme (SHIPS) for the Atlantic basin. Wea.Forecasting, **9**, pp. 209 - 220.
- DeMaria, M., and J. Kaplan, 1994b: Sea surface temperature and the maximum intensity of Atlantic tropical cyclones. J. Climate, **7**, pp. 1324 - 1334.
- Kaplan, J., and M. DeMaria, 1995: A simple empirical model for predicting the

- decay of tropical cyclone winds after landfall. *J. Appl. Meteor.*, **34**, pp. 2499 - 2512.
- DeMaria, M., 1996: The effect of vertical shear on tropical cyclone intensity change, *J. Atmos. Sci.*, **53**, pp. 2076-2087.
- DeMaria, M., and J. Kaplan, 1999: An updated statistical hurricane intensity prediction scheme (SHIPS) for the Atlantic and eastern North Pacific basins. *Wea. Forecasting*, **14**, pp. 326 - 337.
- Kaplan, J., and M. DeMaria, 2001: On the decay of tropical cyclone winds after landfall in the New England area. *J. Appl. Meteor.*, **40**, pp. 280-286.
- DeMaria, M., M. Mainelli, L. K. Shay, J. A. Knaff, and J. Kaplan, 2005: Further improvements to the Statistical Hurricane Intensity Prediction Scheme (SHIPS). *Wea. Forecasting*, **20**, pp. 531-543.
- Roy Bhowmik, S. K., S. D. Kotal, and S. R. Kalsi, 2005: An empirical model for predicting the decay of tropical cyclone wind speed after landfall over the Indian region. *J. Appl. Meteor.*, **44**, pp. 179-185.
- Knaff, J. A., C. R. Sampson, and M. DeMaria, 2005: An operational Statistical Typhoon Intensity Prediction Scheme for the western North Pacific. *Wea. Forecasting*, **20**, pp. 688 - 699.
- M. DeMaria., Knaff, J. A., and Kaplan, J., 2006: On the decay of tropical cyclone winds crossing narrow landmasses. *J. Appl. Meteor., Climat.*, **45**, pp. 491 - 499.
- DeMaria, M., J. A. Knaff, and C. Sampson, 2007: Evaluation of long-term trends in tropical cyclone intensity forecasts. *Meteor. Atmos. Phys.*, **97**, pp. 19-28.
- Lee, J. W., S. W. Lee., S. O. Han., S. J. Lee., and D. E. Jang., 2011: The Impact of Satellite Observations on the UM-4DVar Analysis and Prediction System at KMA. *Atmosphere*, 21(1), pp. 85-93.
- Park, S. Y., S. W. Joo., H. C. Shin., J. Y. Cho., 2008: Coupling of typhoon Bogusing for KMA WRF. *Proceedings of the Spring Meeting of KMS*,

2008, pp. 260–261.

Yamaguchi, M., and Komori, T., 2009: Outline of the Typhoon Ensemble Prediction System at the Japan Meteorological Agency. JMA.

Nakagawa, M., 2009: Outline of the Hight Resolution Global Model at the Japan Meteorological Agency. JMA.

Vijay, T., and HWRF Team, 2014: Overview of the NCEP Operational HWRF Modeling System, Joint EMC/DTC HWRF Tutorial