



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](#)

碩士學位論文

유사태풍 통계기반 한반도  
영향태풍의 누적강수량 예측

濟州大學校 大學院

海洋氣象學 協同科程

金 惠 智

2016年 2月

# 유사태풍 통계기반 한반도 영향태풍의 누적강수량 예측

지도교수 문 일 주

김 혜 지

이 논문을 이학 석사학위 논문으로 제출함

2015年 12月

김혜지의 이학 석사학위 논문을 인준함

심사위원장 \_\_\_\_\_ ①

위 원 \_\_\_\_\_ ①

위 원 \_\_\_\_\_ ①

제주대학교 대학원

2015年 12月

Statistical prediction of typhoon-induced  
accumulated rainfall over the Korean peninsula  
based on historical storm and rainfall database

Hye-Ji Kim  
(Supervised by professor Il-Ju Moon)

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

2015 . 12.

This thesis has been examined and approved.

Department of Marine Meteorology  
GRADUATE SCHOOL  
JEJU NATIONAL UNIVERSITY

# 목 차

List of Figures	ii
List of Tables	v
Abstract	vi
I. 서론	1
II. 자료	4
1. 태풍 최적경로 자료	4
2. 강수 관측자료	9
III. 통계모델 구성방법	12
1. 태풍시기의 누적강수량 산출 방법	12
2. 유사진로태풍 선정방법	19
3. 태풍강도를 고려한 누적강수량 보정방법	25
4. 최적의 앙상블 개수 선정 방법	28
IV. 결과	30
1. 유사태풍 통계기반 한반도 영향태풍의 누적강수량 예측모델 구성	30
2. 과거 태풍에 대한 누적강수량 오차 분석	42
3. 2015년 태풍에 대한 예측 실험	48
V. 요약 및 결론	65
참고문헌	67
부록	69
감사의 글	82

# List of Figures

- Fig. 1.** Full track of 91 typhoons (gray solid line) and genesis point (red circle) used in this study. ....5
- Fig. 2.** Map of the ASOS observation location used in this study (point number of 56). Symbols in legend box indicate administrative district, respectively. ....9
- Fig. 3.** (a) 1 hourly rainfall in the administrative district [legend box] and (b) typhoon track [Gray and black date is start and finish period of TAR.] of TC0215 RUSA. ....13
- Fig. 4.** (a) 1 hourly rainfall in the administrative district [legend box] and (b) typhoon track [Gray and black date is start and finish period of TAR.], (c) weather map [09KST 09 JUL 2006] of TC0603 EWINIAR. ....15
- Fig. 5.** (a) 1 hourly rainfall in the administrative district [legend box] and (b) and (c) typhoon track [Gray and black date is start and finish period of TAR.], (d) and (e) weather map [09KST 27 AUG 2012 and 30 AUG 2012] of TC1215 BOLAVEN and TC1214 DEMBIN, respectively. ....16
- Fig. 6.** (a) 1 hourly rainfall in the administrative district [legend box] and (b) typhoon track, (c, d) weather maps [09KST 25,26 JUN 2012] of TC1105 MEARI. ....18
- Fig. 7.** Map of the frequency for rainfall start point about 91 typhoons used in this study. Contour is frequency of rainfall start period in  $4^\circ$  by  $4^\circ$ . The symbol 'X' of red color is average rainfall start point for 91 typhoons. ....20
- Fig. 8.** Clustering range used in this study. gray line is full sample track, black and red line is track into clustering range latitude  $28-40^\circ\text{N}$  and  $32-40^\circ\text{N}$ , respectively. ....21

**Fig. 9.** The high-rank 6 (text in figure) similar tracks (black solid line) of TC1215 (gray solid line) using FCM. top and bottom figure is clustering latitude range of 28-40°N and 32-40°N, respectively. ....23

**Fig. 10.** Same as in Fig.9 but for TC1216 SANBA. ....24

**Fig. 11.** Scatter plots of Difference of intensity [Knot] and averaged bias [mm] for target typhoon track and similar track of rank1~6 and Correlation [R]. **(a) and (b)** is clustering latitude range of 28-40°N and 32-40°N, respectively. ....27

**Fig. 12.** RMSE and R<sup>2</sup> Comparison Ensemble Mean RMSE (EMR, black solid line) and Simple Mean RMSE (SMR, gray dashed line) of clustering range latitude 28-40°N. ....33

**Fig. 13.** Same as in Fig. 12 but for clustering range latitude 32-40°N. ....36

**Fig. 14.** Comparison clustering range latitude 28-40°N (black line) and 32-40°N (gray line) of EMR analysis. black and gray line is RMSE (solid line) and R<sup>2</sup> (dashed line), respectively. ....37

**Fig. 15.** Comparison after (gray line) and before (black line) correction of intensity bias. black and gray line is RMSE (solid line) and R<sup>2</sup> (dashed line), **(a) and (b)** is clustering latitude range of 28-40°N and 32-40°N, respectively. ....40

**Fig. 16.** The block diagram of procedure for statistical prediction of accumulated rainfall. ....41

**Fig. 17.** Map of **(a)** average observation(OBS) for 91 typhoons, **(b)** STD about (a), **(c)** TAR average MAE for 91 typhoons, **(d)** same as in (b) but for (c), **(e)** bias between OBS to forecast results by TAR statistical model, **(f)** same as in (e) but for R<sup>2</sup>. ....44

**Fig. 18.** Map of section of typhoon-induced intensity using bias correction. Symbol red 'X'is approach intensity of sample track. ....50

**Fig. 19.** Typhoon track (left) and map of ASOS observation typhoon-induced accumulated rainfall (right) for (a)TC1509, (b) TC1515. ....51

**Fig. 20.** The high-rank 16 (text in figure) similar tracks (black solid line) with RSMC Tokyo best track of TC1509 (gray solid line) using FCM. ....54

**Fig. 21.** Same as in Fig. 19 but for TC1515. ....55

**Fig. 22.** Map of ASOS observation typhoon-induced accumulated rainfall (left) and the prediction results used in accumulated rainfall (right) statistical model based on RSMC Tokyo best track for (a) TC1509, (b) TC1515. ....56

**Fig. 23.** WRF model output and RSMC tokyo best track (left) and prediction rainfall (right) by TAR statistical model of (a)~(i) 1200UTC 20 Aug 2015~1200UTC 24 Aug 2015 [prediction intervals of 12 hourly] for TC1515. ....61

**Fig. 24.** The TAR prediction of WRF output (track, intensity) using TAR statistical model. (a) Before and, (b) After weighted intensity of 1200UTC 22 Aug 2015 for TC1515. ....64

**Fig. A. 1.** Map of the high-rank 16 (text in figure) similar tracks correction TAR (after weighted) with RSMC Tokyo best track of TC1509. ....69

**Fig. A. 2.** Same as in Fig. A. 1 but for TC1515. ....71

**Fig. A. 3.** The high-rank 16 (text in figure) similar tracks(black solid line) with WRF-forecast track of TC1515 (gray solid line) using FCM. (a)~(i) 1200UTC 20 Aug 2015~1200UTC 24 Aug 2015 [prediction intervals of 12 hourly]. ....73

## List of Tables

<b>Table 1.</b> List of the KP-influence typhoons (1977-2014) and rainfall period used in this study. ....	6
<b>Table 2.</b> List of ASOS location information used in this study. ....	10
<b>Table 3.</b> List of the results as in Fig.17 : <b>(a)</b> OBS, <b>(b)</b> OBS minus STD of (a), <b>(c)</b> MAE , <b>(d)</b> MAE minus STD of (c), <b>(e)</b> and <b>(f)</b> bias and $R^2$ in the administrative district(point number 56), respectively.....	45
<b>Table 4.</b> The hindcast and forecast results for TC1509 and 1515 of developed statistical model in this study .....	63
<b>Table 5.</b> Same as in Table 4 but for Approach intensity and Track error of between hindcast and forecast track. ....	63

# Abstract

This study aims to develop a statistical model for typhoon-induced accumulated rainfall (TAR) prediction over the Korean Peninsular (KP) using historical track, intensity, and rainfall data for 91 KP-influence typhoons during 1977–2014. Tracks of typhoon are obtained from the best track data archived by the RSMC Tokyo and rainfall data are from the 56 meteorological stations over the KP. The procedure for the statistical estimation of TAR consists of three steps: (i) estimating the TAR at 56 stations for the KP-influence typhoons during 1977–2014, (ii) selecting historical typhoons similar to the track of the target typhoon within the regions of 32–40°N and 120–138°E using a Fuzzy c-Mean clustering method, (iii) averaging the TAR for the top-16 typhoons with the highest track similarity after a bias correction of TAR based on a linear regression between TAR and intensity (maximum wind speed of typhoon) bias.

Simulation results for 91 KP-influence typhoons revealed that the present model is capable to simulate TAR with an accuracy of 56mm mean root mean square error (RMSE) over 56 stations. For the validation of model, real-case predictions for Typhoon Chanhom and Goni in 2015 are performed. The result shows that the model predicted TAR with the RMSE of 33mm and 29mm for Chanhom and Goni, respectively, when the best track data are used. In the predictions using the predicted track and intensity data for Typhoon Goni, our model also showed an overall good performance with the RMSE of 28~50mm, varying according to the accuracy of the predicted track and intensity.

**Keywords:** typhoon-induced accumulated rainfall, statistical model, Korean Peninsular

## I. 서 론

일 년에 평균적으로 3~4개의 태풍이 한반도에 영향을 미친다. 태풍은 우리나라에서 발생하는 자연재해들 중에서 가장 극심한 피해를 주는 위협적인 기상현상이다. 최근 발생한 볼라벤 (1215), 산바 (1216), 다나스 (1324) 등의 태풍들은 10분 평균 풍속 65knot 이상의 강한 강도를 유지하면서 우리나라에 접근하였다. 이 태풍들은 호우와 강한바람으로 인해 우리나라에 많은 인명피해와 재산피해를 남겼다. 특히 태풍 내습 시 강수현상은 영향범위가 수백km에 달하기 때문에 우리나라 넓은 지역에 걸쳐 발생 한다. 또한 단시간에 집중되는 강수로 인해 산사태 등의 자연재해현상으로 많은 인명피해를 입힌다 (Lee and Choi, 2013). 이러한 피해를 줄이기 위하여 태풍에 의한 강수 예측 연구는 방재 및 재해 저감을 위해 필요로 한다.

여름철 강수 분포는 주로 장마에 의한 1차 우기와 태풍이 영향을 주는 2차 우기로 나뉜다. 최근 들어 2차 우기에 의한 강수량이 1차 우기보다 뚜렷이 증가함을 보였다 (Cha et al., 2008). Park et al. (2001)은 우리나라의 극한 강수가 태풍에 의한 영향으로 평소보다 이틀 더 영향을 줄 수 있으며, Choi and Moon (2008)는 여름철 태풍과 장마 등에 의한 피해는 매년 되풀이 되면서 발생하며 56년간 강수량 극값이 주로 여름철에 집중되고 있고 이 중 태풍시기의 발생한 경우는 41%를 차지한다고 밝혀 일 강수량의 극값의 증가가 많은 부분이 태풍에 의해 발생했음을 말하였다. 또한 Kim et al. (2006)은 1970년대 이후로 8~9월 사이에 하루 100mm이상의 호우가 증가하고 있으며 이는 이 기간에 60%를 차지하는 우리나라로 상륙하는 태풍들과 관련이 있다고 말하였다. 이처럼 태풍에 의한 강수량 증가가 최근 들어 뚜렷해지고 있으며, 이와 더불어 극한강수 증가에도 큰 영향을 주고 있다.

대부분 태풍은 여름과 초가을에 영향을 주며 이 시기에 우리나라 연평균 강수량에 70~80%의 강수가 내린다 (황호성 등, 2008). 특히 8월 말에 나타나는 강수량 분포에서 태풍에 의한 강수는 50%이상이다 (송혜진 등, 2003). 다른 기상

현상에 비해 태풍에 의한 비구름은 강한 바람과 더해져 진로에 따라 국지적으로 많은 양의 비를 내리게 한다 (김정희 등, 2003). 일반적으로 태풍은 세력이 강할 때 뿐 만 아니라 온대저기압화로 변질 되어도 강우강도는 약해지지만 강수범위는 넓어지기 때문에 (Hwang et al., 2010) 강도에 상관없이 큰 피해를 입힐 수 있다. 고성원 등 (2009)은 한반도 영향태풍에 대하여 태풍 상륙 위치별 강수량의 분포를 연구하였고 위·경도 거리가  $4^{\circ}$  에 근접할 경우 대부분의 강수가 나타나지만 태풍 전면대, 수렴대의 상호작용으로 이 보다 더 이 전에 강수가 시작되는 경우가 더 많다고 밝혔다.

과거 태풍에 의한 연구는 수치모델의 개발과 위성 관측 기술의 발달로 무수히 발전해 왔다 (Lin et al, 2008). 특히 여러 기상 요소들을 예측하기 위한 수치모델의 개발은 많은 연구의 과정과 결과들로 개선되어 왔으며 현재까지도 더 정확한 예측을 위해 많은 연구가 진행되어 오고 있다. 수치모델을 통한 태풍과 관련된 강수를 예보하기 위해 경로 뿐 만 아니라 강도, 구조에 대해 정확히 알아야 하며 이와 관련하여 좀 더 정확한 강수예측을 위해 앙상블 예보기법을 많이 이용한다 (김옥연 등, 2002). 그러나 태풍의 발생, 발달, 이동과 관련된 강수기구 및 에너지 등에 대해서 구체적으로 밝혀져 있지 않다. 그렇기 때문에 이에 따른 예측성도 다른 기상현상에 비해 상당히 낮고 (Lee et al., 1992), 태풍에 의한 강수는 지금 현 기술에서 예측하는데 있어서 아직까지도 관측 자료와 오차가 크다. 그러므로 정확한 정량적인 강수예측은 아직도 어려운 문제이고 (Lim and Lee, 1994) 해결해야 할 큰 문제로 남아있다.

그 동안의 통계적인 강수예측과 연구는 장마에 의한 1차 우기에 초점이 맞춰져 있었다. 최근 Lee and Seo (2013)가 다중선형회귀모형을 이용한 통계 예측 모델을 구축하여 우리나라 장마기간에 대하여 강수강도를 예측하였다. 북대서양 지역과 북태평양, 중앙태평양 지역의 해수면온도와 그 변화의 강도가 강하면 장마기간에 한반도로 유입되는 수증기의 수송을 증가시켜 이는 우리나라의 장마기간의 강수강도를 증가시킬 수 있다고 하였다. 하지만 예측한 결과가 과거에는 잘 맞았지만, 최근의 관측결과와 맞지 않았고 Kim and Seo (2014)는 앞선 분석에 대하여 3개의 지역 (베링해, 북인도양, 유라시아 눈덮임)을 분석에 추가시켜 봄철에 대하여 전방 단계별 회귀방법을 통해 교차검정을 하여 높은 상관계수를 가

지는 지역을 선정하였다. 이 결과를 토대로 회귀 식을 만들어 예측을 하였고 단순 앙상블 평균을 통해 통계모델의 예측을 향상시켰다. 이처럼, 장마와 관련된 통계적인 강수 예측은 많이 연구되어 왔지만, 우리나라 강수량에 많은 비중을 차지하는 태풍과 관련된 강수예측에 대한 연구는 이루어지지 않았다.

본 연구에서는 과거 한반도에 영향을 준 태풍(1977~2014년)의 진로와 강도를 고려하여 각 태풍들에 대하여 강수량의 상관관계를 분석하고 통계적으로 태풍에 의한 누적강수량을 예측하기 위한 ‘한반도 영향 태풍시기 누적 강수(Typhoon-induced accumulated rainfall, TAR) 통계모델’을 개발하고자 한다. 이 연구는 지역적(총 56개의 지역)으로 누적강수예측을 하기 위해서 태풍시기의 누적강수량을 산출하고 태풍의 유사진로를 강수 예측인자로 사용하여 Fuzzy C-Mean Clustering 기법을 통해 과거 태풍에 대하여 유사진로를 찾았다. 이 분석방법에 대해서는 III-2장에서 자세히 설명한다. 또한 누적강수량 예측에 대하여 개선방법으로 앙상블 평균 방법을 썼고, 이 방법을 토대로 태풍 강도에 대한 보정 전과 후에 대해서도 비교분석 하였다.

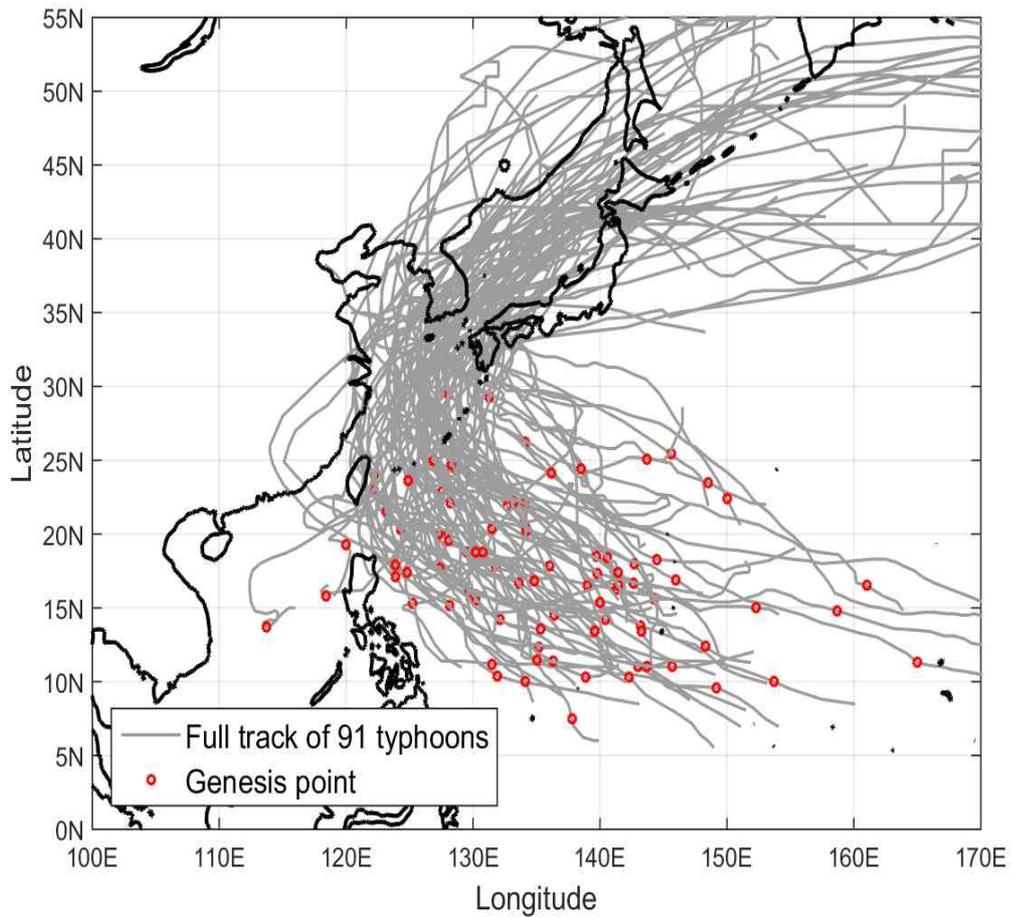
II장에서는 통계적인 강수예측을 위하여 분석에 사용된 관측 자료에 대하여 설명한다. III장에서는 모델 구성을 위한 과거태풍에 대한 분석방법을 설명하고, II장과 III장에서 제시한 자료와 방법을 토대로 ‘TAR 통계모델’을 구축하기 위한 과거태풍에 대한 분석 결과를 설명하였다. 이 결과를 토대로 구성된 통계모델에 대하여 과거태풍 예측과 관측 값과의 평균적인 분석 결과를 서술 하였으며 2015년 우리나라에 영향을 미친 태풍들을 예측한 결과에 대하여 IV장에서 말하고자 한다. V장에서는 본 연구에 대한 요약과 결론을 제시한다. 마지막으로 IV장의 실험결과 중 본문에 넣지 못한 내용을 부록에 첨부하였다.

## II. 자 료

### 1. 태풍 최적경로자료

본 연구에서는 한반도 (Korean Peninsular, KP) 영향 태풍에 대한 누적강수량을 통계적으로 분석하고 이를 구축하기 위해 과거 1977년에서 2014년까지의 태풍최적경로(Best Track) 와 지역별 강수량에 대한 자료를 수집하여 연구에 사용하였다. 연구에 사용된 태풍최적경로 자료는 동경 지역 특별 기상센터 (Regional Specialized Meteorological Center, RSMC-Tokyo) 에서 얻었다. 이 자료는 1951년부터 현재까지 북서태평양 지역에서 생긴 태풍들에 대하여 태풍 중심의 위, 경도 등의 정보를 제공하고 있으며 1977년부터는 10분 평균 중심최대풍속 (Mean Wind Speed, MWS) 정보를 태풍 별로 6시간 간격으로 제공하고 있다. 일반적으로, MWS가 34knot 이상일 경우 태풍이라고 언급하며, RSMC-Tokyo에서는 34knot 미만인 열대저압부와 온대저압부에 대해서도 최적 경로 자료를 제공한다. 본 연구에서는 강수량이 태풍이 온대 저기압 화 되었을 경우에도 많은 영향을 미칠 수 있기 때문에 태풍의 유사 진로 분석을 할 때, 이 시기의 진로도 분석에 포함 시켰다.

본 연구에서는 이후에 강수 통계 모델 구성에 있어서 강수량 보정 부분에 필요한 태풍 변수인 MWS 정보가 제공된 1977년부터 2014년까지 국가태풍센터 (National Typhoon Center)에서 정의한 태풍 중심이  $20^{\circ}$  N에서  $40^{\circ}$  N,  $120^{\circ}$  E에서  $138^{\circ}$  E 이내에 들어오고 한반도에 영향을 주었던 태풍 118개를 찾았다. 하지만 이 태풍들 중에서 위의 범위 안에 들더라도 강수의 영향이 전혀 없거나 장마시기와 겹쳐서 태풍에 의한 강수인지 구별을 할 수 없을 경우를 제외하였다. 그 결과, 총 91개의 한반도 영향태풍 (Fig. 1)에 대하여 본 연구에서 분석을 할 수 있었고, 통계모델을 구성하기 위한 과거 태풍에 대한 통계분석을 진행 하였다. 91개의 태풍의 정보에 관해서는 Table 1.을 참고하면 된다.



**Fig. 1.** Full track of 91 typhoons (gray solid line) and genesis point (red circle) used in this study.

Fig. 1.은 본 연구에서 사용된 1977년~2014년까지 태풍 진로와 태풍 발생 지점(34Knot 이상 되었을 때)을 나타낸다. 그림에서 보여주듯이 우리나라에 강수 영향을 줄 수 있는 한반도와 동중국해 또는 일본 서쪽으로 상륙한 경우의 태풍들이 본 연구에 포함 되었다. 대부분의 태풍들이 동중국해에서 전향 후 북서쪽으로 이동하는 전형적인 전향태풍의 특성을 가지고 있었으며, 태풍의 발생은 대부분 북위10도에서 25도 사이의 지역에서 발생하고 있는 것을 확인 할 수 있다(Fig.1,빨간 원).

**Table 1.** List of the KP-influence typhoons (1977–2014) and rainfall period used in this study.

No.	KP-influence Typhoon No.	Typhoon name	Typhoon-induced Raifall period
1	7707	AMY	08/23/08:00 ~ 08/24/21:00
2	7803	POLLY	06/19/13:00 ~ 06/20/21:00
3	7808	WENDY	07/31/16:00 ~ 08/03/20:00
4	7811	CARMEN	08/18/20:00 ~ 08/20/12:00
5	7818	IRMA	09/13/09:00 ~ 09/15/18:00
6	7910	IRVING	08/15/08:00 ~ 08/18/09:00
7	7911	JUDY	08/24/10:00 ~ 08/26/18:00
8	8007	IDA	07/13/10:00 ~ 07/15/00:00
9	8013	ORCHID	09/10/16:00 ~ 09/12/01:00
10	8105	JUNE	06/22/02:00 ~ 06/23/01:00
11	8110	OGDEN	07/31/12:00 ~ 08/01/18:00
12	8118	AGNES	09/02/03:00 ~ 09/04/06:00
13	8120	CLARA	09/23/23:00 ~ 09/25/20:00
14	8211	CECIL	08/12/14:00 ~ 08/15/06:00
15	8213	ELLIS	08/26/08:00 ~ 08/29/06:00
16	8219	KEN	09/25/01:00 ~ 09/25/15:00
17	8310	FORREST	09/27/01:00 ~ 09/28/15:00
18	8403	ALEX	07/04/21:00 ~ 07/06/00:00
19	8410	HOLLY	08/20/19:00 ~ 08/22/08:00
20	8508	KIT	08/08/09:00 ~ 08/11/03:00
21	8509	LEE	08/13/13:00 ~ 08/15/14:00
22	8513	PAT	08/31/00:00 ~ 09/01/03:00
23	8520	BRENDA	10/04/10:00 ~ 10/07/05:00
24	8605	NANCY	06/24/06:00 ~ 06/25/12:00
25	8613	VERA	08/27/16:00 ~ 08/29/16:00
26	8616	ABBY	09/19/10:00 ~ 09/21/20:00
27	8705	THELMA	07/14/14:00 ~ 07/16/21:00
28	8708	ALEX	07/29/06:00 ~ 07/30/19:00
29	8712	DINAH	08/30/14:00 ~ 08/31/12:00
30	8906	ELLIS	06/23/18:00 ~ 06/25/14:00
31	8911	JUDY	07/27/18:00 ~ 07/29/06:00
32	9007	ROBYN	07/10/12:00 ~ 07/12/17:00
33	9015	ABE	08/31/09:00 ~ 09/03/18:00
34	9109	CAITLIN	07/28/05:00 ~ 07/30/12:00
35	9112	GLADYS	08/21/09:00 ~ 08/24/18:00
36	9113	NONAME	08/29/00:00 ~ 08/30/21:00
37	9117	KINNA	09/14/00:00 ~ 09/14/15:00
38	9119	MIREILLE	09/26/03:00 ~ 09/28/01:00
39	9219	TED	09/23/03:00 ~ 09/25/12:00

Table 1. Continued.

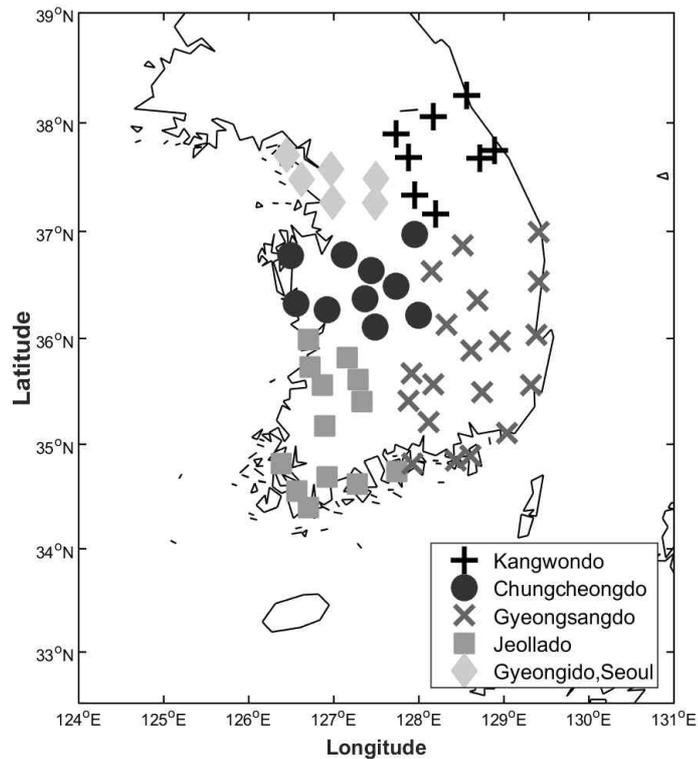
No.	KP-influence Typhoon No.	Typhoon name	Typhoon-induced Raifall period
40	9306	PERCY	07/28/05:00 ~ 07/30/12:00
41	9307	ROBYN	08/09/11:00 ~ 08/11/03:00
42	9313	YANCY	09/03/00:00 ~ 09/04/00:00
43	9407	WALT	07/26/03:00 ~ 07/28/12:00
44	9411	BRENDAN	07/31/23:00 ~ 08/02/03:00
45	9413	DOUG	08/09/21:00 ~ 08/12/12:00
46	9414	ELLIE	08/14/06:00 ~ 08/15/09:00
47	9429	SETH	10/10/08:00 ~ 10/12/10:00
48	9503	FAYE	07/22/14:00 ~ 07/24/13:00
49	9514	RYAN	09/22/00:00 ~ 09/24/13:00
50	9711	TINA	08/08/03:00 ~ 08/09/18:00
51	9719	OLIWA	09/15/11:00 ~ 09/17/04:00
52	9809	YANNI	09/29/00:00 ~ 10/01/06:00
53	9810	ZEB	10/17/07:00 ~ 10/18/06:00
54	9905	NEIL	07/26/12:00 ~ 07/28/12:00
55	9907	OLGA	08/03/02:00 ~ 08/04/00:00
56	9917	ANN	09/19/05:00 ~ 09/20/12:00
57	9918	BART	09/22/03:00 ~ 09/25/02:00
58	0004	KAI-TAK	07/10/07:00 ~ 07/12/00:00
59	0006	BOLAVEN	07/30/05:00 ~ 07/31/22:00
60	0012	PRAPIROON	08/30/16:00 ~ 09/01/16:00
61	0205	RAMMASUN	07/04/04:00 ~ 07/07/10:00
62	0209	FENGSHEN	07/26/03:00 ~ 07/27/20:00
63	0215	RUSA	08/30/08:00 ~ 09/01/20:00
64	0304	LINFA	05/29/12:00 ~ 05/31/17:00
65	0306	SOUDELOR	06/18/07:00 ~ 06/20/06:00
66	0310	ETAU	08/07/05:00 ~ 08/07/16:00
67	0314	MAEMI	09/10/22:00 ~ 09/13/13:00
68	0407	MINDULLE	07/03/12:00 ~ 07/05/11:00
69	0410	NAMTHEEUN	08/01/05:00 ~ 08/02/04:00
70	0415	MEGI	08/18/04:00 ~ 08/19/20:00
71	0418	SONGDA	09/06/09:00 ~ 09/08/11:00
72	0514	NABI	09/05/16:00 ~ 09/08/11:00
73	0603	EWINIAR	07/10/00:00 ~ 07/11/05:00
74	0610	WUKONG	08/18/00:00 ~ 08/20/16:00
75	0613	SHANSHAN	09/16/18:00 ~ 09/18/17:00
76	0704	MAN-YI	07/13/12:00 ~ 07/15/05:00
77	0705	USAGI	08/03/04:00 ~ 08/04/02:00
78	0711	NARI	09/16/03:00 ~ 09/17/10:00
79	0807	KALMAEGI	07/18/09:00 ~ 07/20/00:00
80	1004	DIANMU	08/09/22:00 ~ 08/11/16:00

Table 1. Continued.

No.	KP-influence Typhoon No.	Typhoon name	Typhoon-induced Raifall period
81	1007	LIONROCK	09/01/16:00 ~ 09/02/22:00
82	1009	MALOU	09/05/16:00 ~ 09/07/14:00
83	1109	MUIFA	08/07/10:00 ~ 08/08/23:00
84	1112	TALAS	09/02/08:00 ~ 09/03/08:00
85	1207	KHANUN	07/18/11:00 ~ 07/19/22:00
86	1214	TEMBIN	08/29/16:00 ~ 09/01/00:00
87	1215	BOLAVEN	08/27/23:00 ~ 08/29/08:00
88	1216	SANBA	09/15/14:00 ~ 09/18/06:00
89	1324	DANAS	10/07/19:00 ~ 10/09/04:00
90	1411	HALONG	08/09/02:00 ~ 08/11/07:00
91	1412	NAKRI	08/01/13:00 ~ 08/04/00:00

## 2. 강수 관측자료

본 연구에서는 한반도에 영향을 준 과거 태풍 91개에 대한 태풍시기의 지점별 시간당 강수량 산출을 위해 기상청에서 제공하는 유인관측소에서 관측하는 종관 기상관측 시스템(ASOS) 95개 지점에 대하여 시간당 강수량을 얻었다. 이 지점들 중에서 태풍최적경로 분석 시기와 동일한 시점의 자료가 모두 있는 지점을 찾았다. 그 결과 총 60개의 지점에 대하여 분석을 할 수 있었다. 그러나 울릉도(115), 제주(184), 성산(188), 서귀포(188)는 분석에 포함시키지 않았다. 그 결과, 총 56개의 지점에 대하여 분석을 할 수 있었고 이 지점들에 대하여 과거 태풍 91개에 대한 강수량 분석을 하였다 (Fig. 2). 분석에서 사용 된 56개 지점에 대한 ASOS 정보는 Table 2.에 정리하였다.



**Fig. 2.** Map of the ASOS observation location used in this study(point number of 56). Symbols in legend box indicate administrative district, respectively.

**Table 2.** List of ASOS location information used in this study.

No.	Administrative district	ASOS location (point number)	Latitude (° N)	Longitude (° E)
1		Sokcho (90)	30.2508	128.5647
2		Daegwallyeong(100)	37.6771	28.7183
3		Chuncheon (101)	37.9025	127.7357
4	Kangwondo	Gangneung (105)	37.7514	128.8909
5		Wonju(114)	37.3375	127.9466
6		Inje (211)	38.0598	128.1671
7		Hongcheon (212)	37.6836	127.8804
8		Seoul (108)	37.5714	126.9657
9		Incheon(112)	37.4775	126.6243
10	Kyeonggido,	Suwon (119)	37.2723	126.9853
11	Seoul	Kanghwa (201)	37.7073	126.4463
12		Yangpyeong (202)	37.4885	127.4944
13		Icheon (203)	37.2639	127.4842
14		Chungju(127)	36.9703	127.9526
15		Seosan (129)	36.7766	126.4939
16		Chungju (131)	36.6392	127.4406
17		Daejun (133)	36.372	127.3721
18		Chupungryeong (135)	36.2202	127.9945
19	Chungcheongdo	Jecheon (221)	37.1592	128.1943
20		Boeun (226)	36.4875	127.7341
21		Cheonan(232)	36.7796	127.1212
22		Boryeong (235)	36.3272	126.5574
23		Buyeo (236)	36.2723	126.9208
24		Geumsan (238)	36.1056	127.4817
25		Ulsan(130)	36.9917	129.4127
26		Pohang (138)	36.0325	129.3796
27		Daegu (143)	35.8851	128.6190
28		Ulsan (152)	35.5601	129.3202
29		Busan (159)	35.1046	129.0320
30		Tongyeong (162)	34.8454	128.4356
31		Jinju (192)	35.2084	128.1191
32		Yeongju (272)	36.8718	128.5169
33	Kyeongsangdo	Munbyeong (273)	36.6272	128.1487
34		Yeongduk (277)	36.5333	129.4093
35		Euisung (278)	36.3561	128.6886
36		Kumi (279)	36.1305	128.3205
37		Yeongchun (281)	35.9774	128.9514
38		Hapcheon (285)	35.5650	128.1698
39		Milyang (288)	35.4914	128.7441
40		Sancheong (289)	35.4129	127.8791
41		Geoje (294)	34.8881	128.6045
42		Namhae (295)	34.8166	127.9264

Table 2. Continued.

No.	Administrative district	ASOS location (point number)	Latitude (° N)	Longitude (° E)
43		Kunsan (140)	35.9929	126.7056
44		Jeonju (146)	35.8215	127.1549
45		Kwangju (156)	35.1729	126.8915
46		Mokpo (165)	34.8168	126.3812
47		Yeosu (168)	34.7392	127.7406
48		Wando (170)	34.3958	126.7018
49	Jeollado	Buan (243)	35.7295	126.7165
50		Imsil (244)	35.6122	127.2855
51		Jeongeup (245)	35.6122	127.2855
52		Namwon (247)	35.4053	127.3330
53		Jangheoung (260)	34.6887	126.9194
54		Haenam (261)	34.5535	126.5689
55		Koheoung (262)	34.6182	127.2757
56		Geochang (284)	35.6712	127.9110

### III. 통계모델 구성방법

본 연구에서는 과거태풍에 대한 유사진로와 강도를 기반으로 한 한반도 영향 태풍시기의 강수량을 통계적으로 분석을 하고 TAR모델을 구축하기 위한 방법으로, (i) ASOS 강수량 자료를 이용한 과거 한반도 영향 태풍 시기를 정하고, 이 시기에 대한 누적 강수량 산출, (ii) Fuzzy c-Means Clustering 방법을 사용한 과거태풍들에 대한 유사진로 태풍선정, (iii) 선정된 각 유사진로 태풍들에 대하여 누적강수량 보정을 위한 최적의 양상블 개수 선정하고, 부가적인 분석으로 강도 보정 전과 후의 차이를 분석한 결과에 대하여 최적의 방법으로 통계모델을 구성하기위한 분석을 하였다. 이 장에서는 위의 3가지의 방법에 대하여 설명한다.

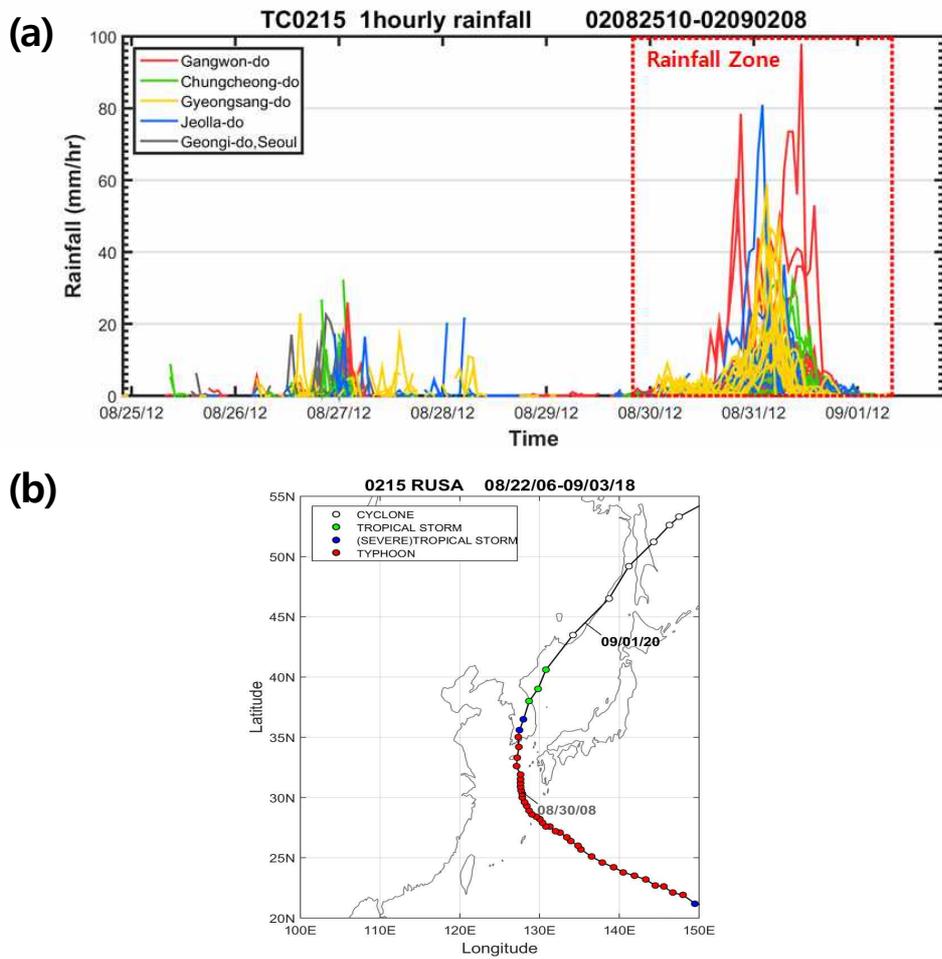
#### 1. 태풍시기의 누적강수량 산출 방법

한반도 영향태풍에 대한 누적 강수량을 통계적으로 예측하기 위하여, 과거 한반도 영향 태풍 91개에 대한 강수시기를 정하였고(Table 1.), 누적 강수량을 산출하였다. 먼저 태풍영향 강수시기를 정하기 위해 56개의 ASOS 지점에 대하여 총 5개의 행정구역(경기도, 강원도, 충청도, 경상도, 전라도)으로 나누었고 20-45° N, 120-145° E 지역 사이의 1시간당 강수량을 91개의 태풍에 대하여 분석해 보았다. 본 연구에서는 강수는 태풍이 끝나고 난 후에도 강수에 충분히 영향을 줄 수 있기 때문에, 태풍이 온대 저기압 화 되었을 경우도 강수량을 산출 할 때 포함을 시켰다.

Fig. 3, 4, 5는 91개의 태풍사례 중 각각 다른 강수분포에 대한 1시간당 강수량과 태풍 진로 그리고 참고자료로서 태풍시기 일기도를 보여준다.

Fig. 3는 2002년 15호 태풍 RUSA(루사)의 사례이다. Fig. 3.(a)와 (b)의 1시간당 강수량 분포와 태풍 진로를 보면, 8/25~8/29일 까지 30mm이하의 비가

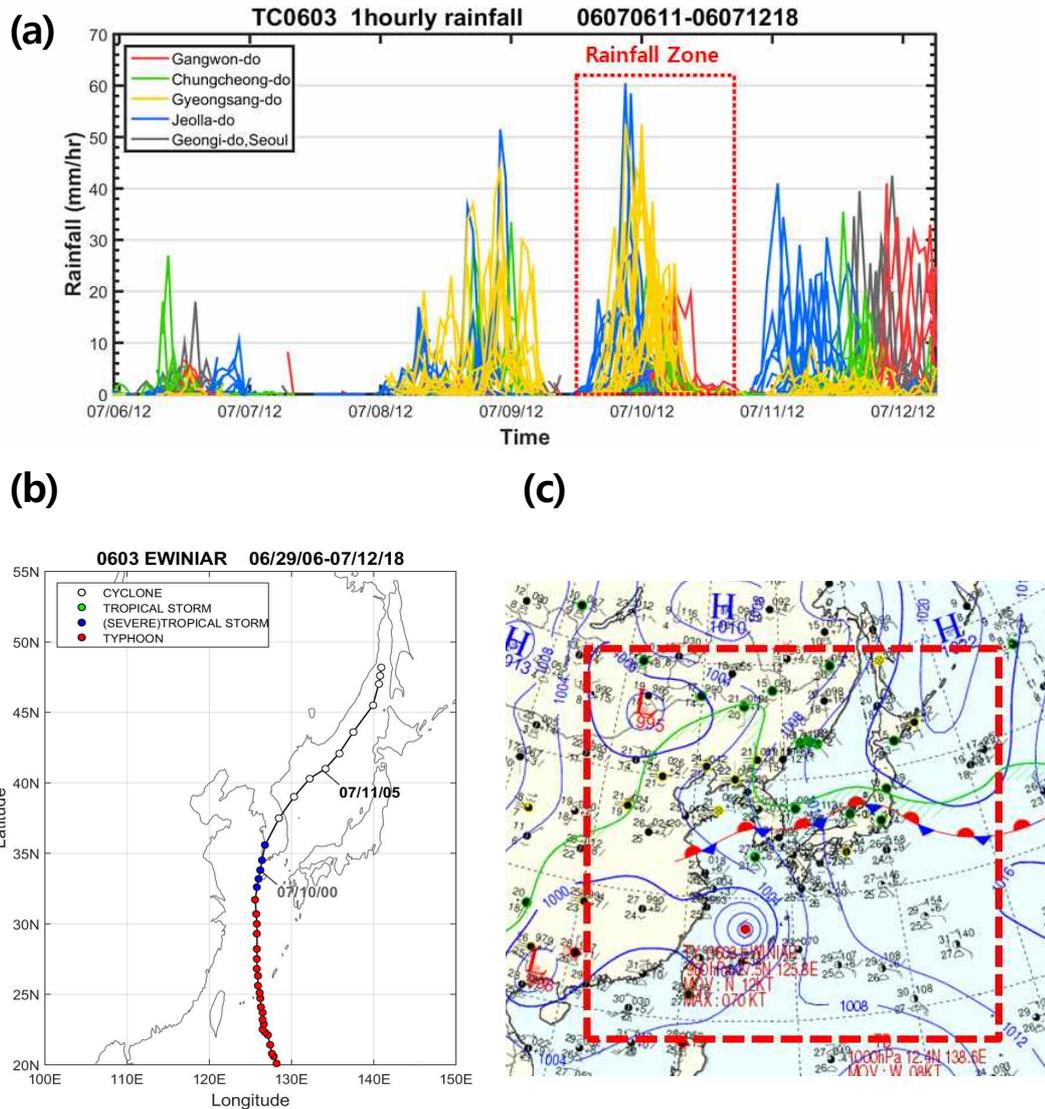
내리긴 했지만, 태풍이 우리나라 근처로 오기 이전의 강수량이므로 태풍의 영향이라 보기 어렵다. 8/30일부터 태풍이 북위 30도 근처로 오면서 약한 비가 내리기 시작했고, 경상도 지역을 시작으로 본격적으로 비가 내리면서 이 시기부터 강수가 끝날 때 까지 태풍영향에 의한 강수라고 정하였다. 이 사례의 경우 온대 저기압화가 된 후에도 강원도 지역에 많은 비를 뿌린 것을 확인 할 수 있었다. 김정희 외(2003)는 태풍 루사는 한반도 전역에 많은 비를 뿌렸으며, 특히 강릉 지역과 대관령 지역에 기록적인 강수량이 나왔다고 말하고 있다. 이는 태풍 전면 수렴대에 의한 수증기에 영향으로 많은 비를 뿌린 것이라고 하였다.



**Fig. 3.** (a) 1 hourly rainfall in the administrative district [legend box] and (b) typhoon track [Gray and black date is start and finish period of TAR.] of TC0215 RUSA.

Fig. 4은 태풍 2006년 3호 태풍 EWINIAR(에위니아)의 사례를 보여준다. 에위니아는 열대해역에서 북서쪽으로 이동하여 동중국해에서 전향한 후 제주도 서쪽을 지나 북동쪽으로 이동하였다(Jeong et al., 2013). Fig. 4.(b)를 보면 이 사례는 분석한 범위 안에서 강수에 영향이 지속적으로 있었다는 것을 보여준다. Fig. 4.(c)의 일기도를 보면 태풍이 우리나라 근처로 오기 전, 정체전선이 우리나라로 걸쳐있었다. 이 영향으로 7/8일부터 7/9일 오후까지 경상도, 전라도 지역에 시간당 30~40mm 이상의 많은 비를 뿌렸다. 7/9일 12시 이후로 정체전선이 없어지고, 잠시 비가 오지 않다가 본격적으로 태풍이 우리나라로 접근하면서 하루 전날의 강수량보다 더 많은 비를 뿌렸으며, 전라도와 경상도를 시작으로 태풍진로를 따라서 강수가 내린 것을 확인할 수 있다. 태풍이 점차 북상하면서 강원도 지역을 마지막으로, 태풍에 의한 강수가 끝난 것을 볼 수 있다. 7월 11일 05시(태풍진로의 검은색 날짜) 이후에는 태풍이 우리나라 지역에서 많이 멀어져 있었고, 이후 온대저기압으로 변질되었기 때문에, 7월 11일 12시 정도에 내린 강수는 태풍의 영향이 아닌 것을 확인할 수 있다.

Fig. 5는 2012년 기록적으로 3개의 태풍이(TC1214,1215,1216) 동시에 왔었던 사례 중 TC1214 DEMBIN(덴빈)과 TC1215 BOLAVEN(볼라벤)에 대한 강수 사례를 보여준다. 두 태풍은 연달아 한반도에 접근하면서 우리나라에 강수 영향을 주었다. 2012년 8월 27일 09시의 일기도를 보면, 태풍 볼라벤이 우리나라로 접근한 것을 볼 수 있으며(Fig. 5.(d)), 08월 29일 08시(Fig. 5.(b), 검은색 날짜) 까지 우리나라에 강수 영향을 준 것을 Fig. 5.(a)에서 보여주고 있다. 볼라벤이 우리나라에 영향을 준 8시간 후, 08월 29일 16시(Fig. 5.(c), 회색 날짜) 덴빈에 의한 강수가 시작되었고, 2012년 8월 30일 09시의 일기도를 보면 덴빈이 대만을 지나 우리나라에 완전히 상륙했음을 보여주고 있다(Fig. 5.(e)). 그 후 온대 저기압으로 변질되어 소멸하는 시기인 9월 1일 00시(Fig. 5.(c), 검은색 날짜)까지 강원도 지역에서 태풍에 의한 강수영향을 그림에서 보여주고 있다(Fig. 5.(a)).



**Fig. 4.** (a) 1 hourly rainfall in the administrative district [legend box] and (b) typhoon track [Gray and black date is start and finish period of TAR.], (c) weather map [09KST 09 JUL 2006] of TC0603 EWINIAR.

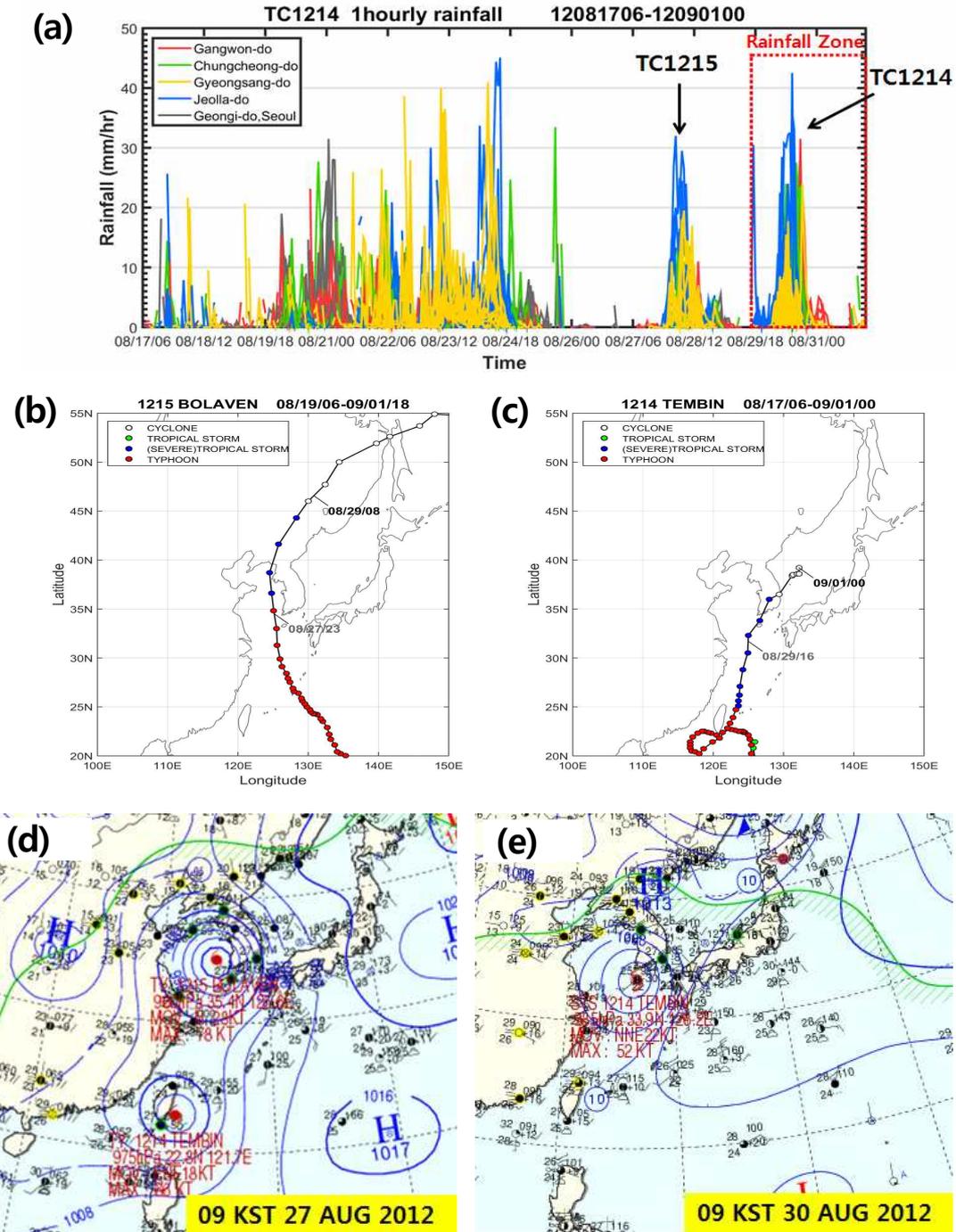


Fig. 5. (a) 1 hourly rainfall in the administrative district [legend box] and (b) and (c) typhoon track [Gray and black date is start and finish period of TAR.],(d) and (e) weather map [09KST 27 AUG 2012 and 30 AUG 2012] of TC1215 BOLAVEN and TC1214 DEMBIN, respectively.

Fig. 6은 본 연구에 포함 되지 않은 장마시기와 태풍시기가 겹쳐서 어느 영향에 대한 강수량인지 구분이 안 된 사례였던, TC1105 MEARI(메아리)의 범위안의 1시간당 강수량과 태풍진로 그리고 태풍이 우리나라 근처로 온 시기였던 2012년 6월 25일~26일 9시의 일기도를 보여준다.

Fig. 6.(a)를 보면 거의 3일 간 지속적으로 비가 계속 왔다는 것을 보여주고 있다. 강수량 그림만 봤을 때는 이 비가 태풍의 영향일 수도 있겠지만, 태풍에 의한 비라면 지역적으로 전형적인 남부지방에서 중부지방으로 순차적으로 내리지만, 그런 패턴이 전혀 보이지 않고, Fig. 6.(b)에서 비가 계속 내린 6월 24일~ 25일은 태풍이 북위 25도의 대만 북동쪽에 위치하고 있었기 때문에, 굉장히 강한 강도의 태풍이라면 가능 할 수도 있지만, 이 지점부터 우리나라에 영향을 주는 비가 내리기란 쉽지 않다. 강도도 TY급(64knot 이상)이 아닌 파란색 원의 TS(34knot이상)급의 태풍이기 때문에, 이 시기의 비는 정체전선에 의한 장마일 확률이 높다.

Fig. 6.(c)와 (d)는 각각 6월 25일 09시와 6월 26일 09시의 지상일기도를 나타낸다. 태풍이 대만 북동쪽에 위치해 있었던 6월 25일 09시에 우리나라는 정체전선의 영향으로 전국에 걸쳐 강수가 내리고 있는 것을 확인 할 수 있었다. 다음날, 태풍은 우리나라 서해안 까지 이동하였으며, 태풍의 영향이라 볼 수 있지만, 경상도 지역에 정체전선이 아직도 존재하고 있는 것을 확인 할 수 있었으며, 태풍과 정체전선이 함께 존재하여 태풍에 의한 강수를 기간으로 정확히 파악할 수 없었다.

본 연구에서는 한반도 영향태풍 118개중에서 Fig. 6처럼 장마시기와 겹쳐 태풍영향 강수시기를 확실히 알 수 없거나, 태풍에 의한 강수가 전혀 오지 않았던 경우를 제외한, 91개의 태풍에 대하여 Fig.3, 4, 5에서 설명한 세 개의 사례와 같은 방법으로 강수시기를 정하였다. 정한 강수시기에 대한 정보는 Table 1에 기재되어 있다. 정해진 강수시기를 토대로, 이 시기의 누적강수량을 56개의 지점에 대하여 지역별로 누적강수량을 산출하였고, 후에 모델구성을 위한 유사진로에 따른 누적강수량 통계 분석에 사용하였다

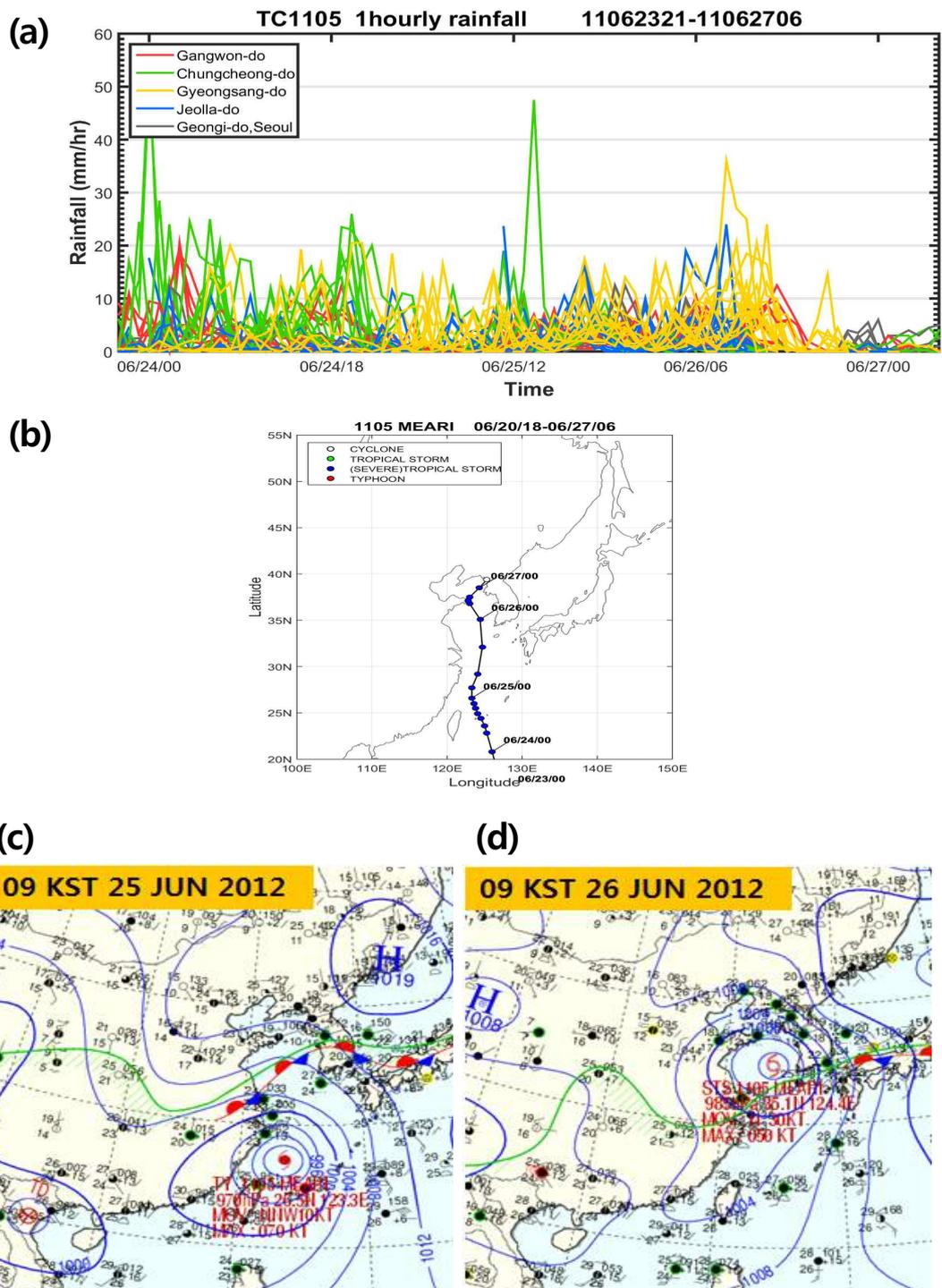


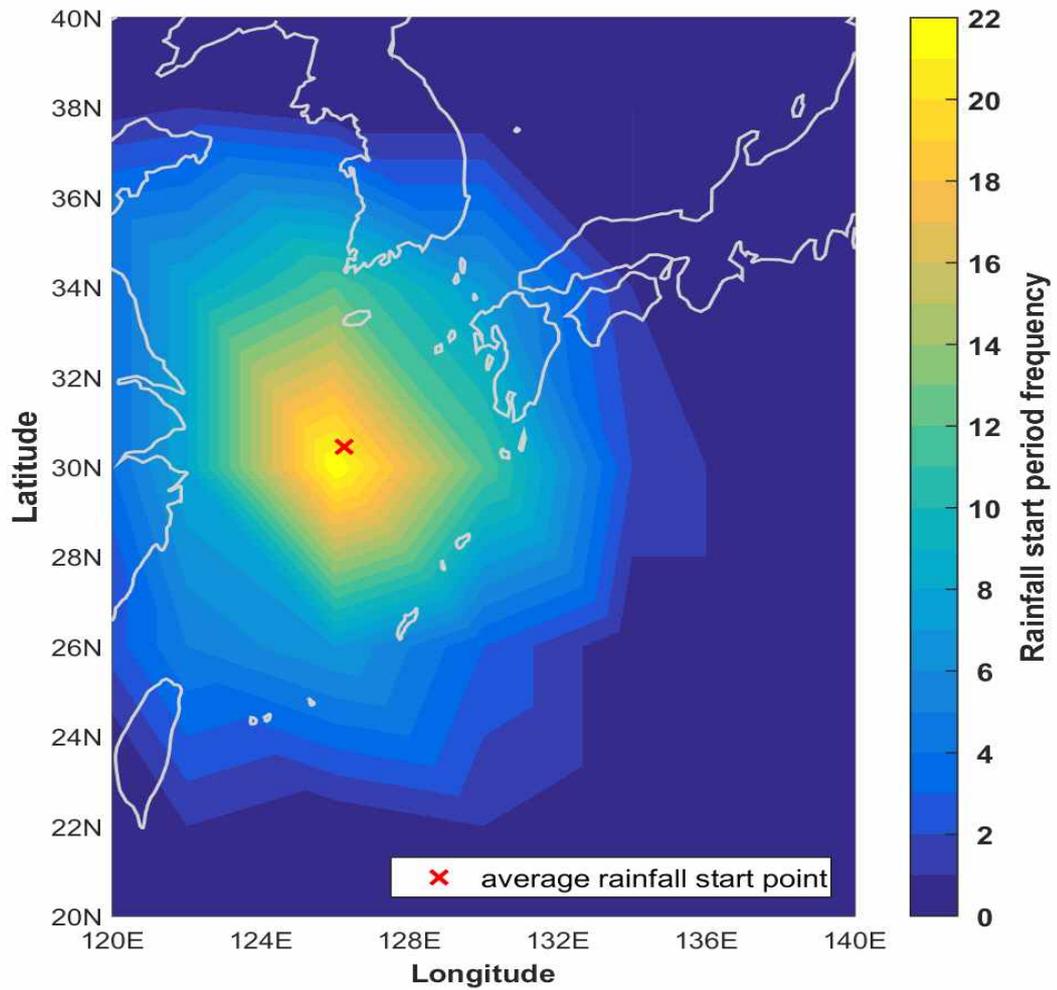
Fig. 6. (a) 1 hourly rainfall in the administrative district [legend box] and (b) typhoon track, (c, d) weather maps [09KST 25,26 JUN 2012] of TC1105 MEARI.

## 2. 유사진로태풍 선정방법

일반적으로 태풍 영향에 의한 강수는 태풍 진로에 따라 강수량과 이에 따른 패턴이 지역적으로 달라진다. 본 연구에서는 과거 태풍을 토대로 한 누적강수량을 통계적으로 예측하기 위하여 앞서 선정한 과거 태풍들 91개에서 예측되어질 태풍의 유사진로를 순위 별로 찾아, 진로가 비슷했던 순서대로 순위를 매겼고 누적강수량 예측을 위한 분석을 하였다. 그 전에, 과거태풍 91개에 대하여 각 태풍을 기준태풍이라 정하고, 기준태풍을 제외한 나머지 90개의 태풍에 대하여 이 태풍에 대한 유사진로를 찾는 분석을 하였다.

유사진로를 찾기 위해서 본 연구에서는 Kim et al. (2011)이 제시한 Fuzzy-c Means(FCM)을 기반으로 한 태풍을 비슷한 진로끼리 분류하는 클러스터링 방법을 이용 하였다. Kim et al. (2011)의 논문에서는, 1965~2006년까지 RSMC Tokyo가 제공하는 최적경로에 대하여 TS(33Knot 이상)에 대한 진로에 대하여 7개의 군집으로 나누었다. 그리고 2007~2010년까지의 같은 경로자료를 이용하여 7개의 군집(Cluster)들의 평균 진로와 새로 추가된 각 태풍들의 진로에 대한 Membership coefficient를 구하여, 가장 상관관계가 높은 Cluster를 찾았다. 각 태풍진로는 21개의 포인트로 내삽을 하여 동일하게 맞췄다.

본 연구에서는 위 방법을 토대로, 기존에 있던 경로를 91개의 태풍이라고 정하고, 새로 추가된 태풍(기준 태풍)들을 각각 하나씩 정하여 91개의 Cluster를 만들었다. 클러스터링 범위를 정하기 위해, 먼저 앞서 정한 태풍 영향에 의한 강수시작시기(Table 1. 참고)에 대하여 경도 120~140° E, 위도 20~ 40° N 범위에 대하여 4° by 4° 격자로 나눈 후, 이 격자 안에 들어오는 강수시기에 대하여 개수를 세서 어느 지역에서 강수가 많이 시작되는 지 분포를 통해 알아보았다(Fig. 7). 그 결과, 위도 28~32° N와 124~132° 지점에 대한 격자부터 한반도 영향 강수가 시작된 것을 확인 할 수 있었으며, 이 범위에서만 91개의 태풍 중 22개의 태풍에 대하여 강수가 시작 된 것을 알 수 있다.

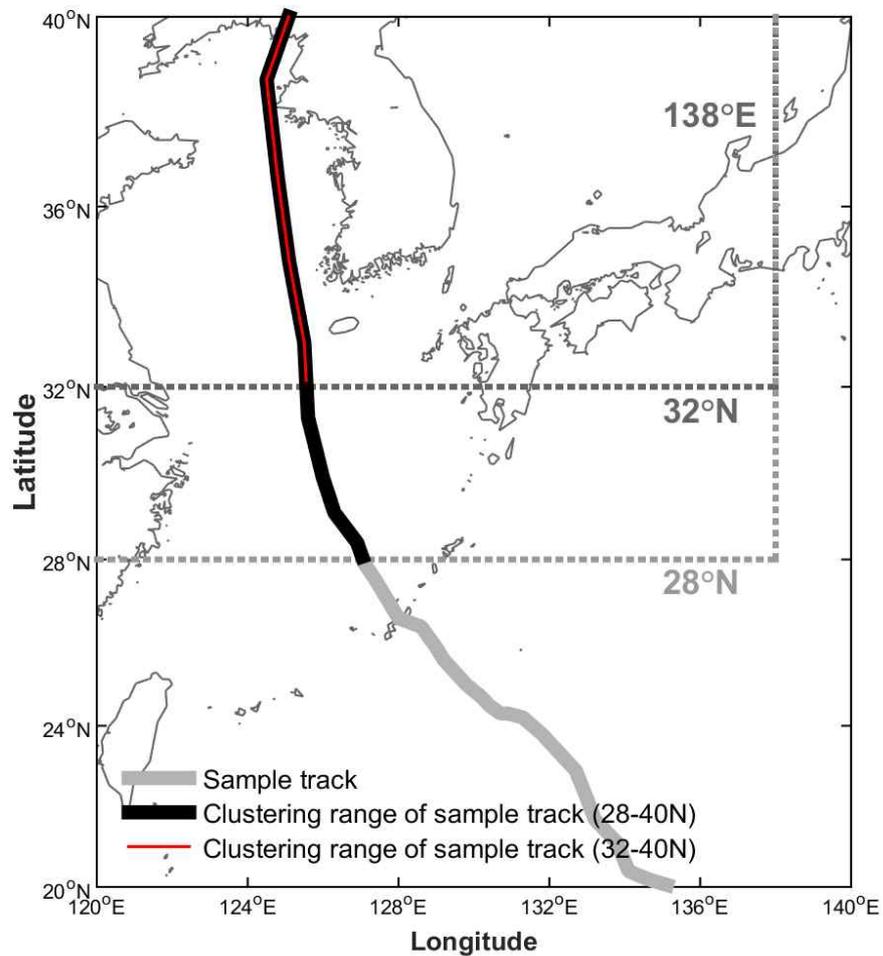


**Fig. 7.** Map of the frequency for rainfall start point about 91 typhoons used in this study. Contour is frequency of rainfall start period in  $4^\circ$  by  $4^\circ$ . The symbol 'X' of red color is average rainfall start point for 91 typhoons.

Fig. 7. 을 보면, 한반도 바로 옆에서 강수가 시작된 경우를 볼 수 있는데, 이는 태풍이 중국 쪽에 완전히 밀착되어 북상하다가 우리나라 쪽으로 전향하였거나, 반대로 일본 쪽으로 가다가 우리나라로 온 케이스가 된다. 평균적으로 봤을 때는 북위 30도 지역에서 제일 많이 생겼지만, 분포로 봤을 때는 북위 28~32도 사이에서 많이 생겼으며, 본 연구에서는 중간 값에 대하여 클러스터링범위를 정하지 않고 두 가지 분석범위로 나눠서 클러스터링을 진행하였다.

먼저, 강수가 많이 시작된 지점보다 상대적으로 한반도랑 가까운 위도인 32° N를 기준으로, 국가태풍센터에서 정의한, 태풍이 한반도에 영향을 미칠 수 있는 32-40° N, 120-138° E 범위(이하 32° N) 안으로 들어온 태풍 진로에 대한 결과를 참고하여 클러스터링 분석범위를 정하였다 (Fig. 8, 빨간색 실선).

두 번째 분석범위로 강수가 많이 시작된 지점보다 상대적으로 한반도랑 멀었던 28° N 위도를 기준으로 앞서 설명한 기준을 토대로 28-40° N, 120-138° E(이하 28° N) 구역에 대하여 진로를 수정하여 클러스터링 분석을 하였다 (Fig. 8, 검은색 실선).



**Fig. 8.** Clustering range used in this study. gray line is full sample track, black and red line is track into clustering range latitude 28-40° N and 32-40° N, respectively.

앞서 설명한 두 가지의 클러스터링 범위에 대하여 기준태풍에 대한 각 진로에 대한 Membership coefficient값이 산출 되고, 이중 가장 좋은 값(1에 가까워질 수록 상관관계가 높음)은 기준태풍의 유사진로 1위 태풍이 되는 것이다. 하지만, 과거 태풍에 대한 통계분석을 할 때는 91개의 태풍 중에 기준태풍이 들어가 있기 때문에 가장 좋은 값은 기준태풍과 동일한 태풍의 진로일 것이고 1의 값을 나타낼 것이다. 그렇기 때문에, 1의 값이 나오는 유사진로 1위태풍인 동일한 태풍을 제외한 2~91위에 대하여 다시 순위를 매겨 2위를 유사진로 1위태풍이라 정하였고 총 90개의 태풍에 대하여 유사진로를 찾을 수 있었다.

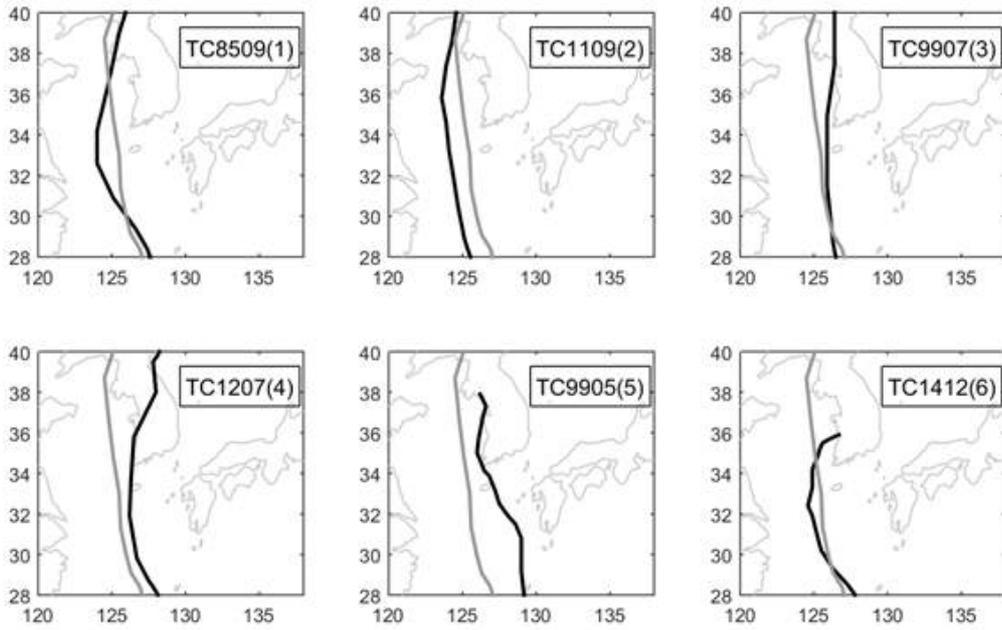
Fig. 9와 Fig. 10은 2012년에 한반도에 영향을 준 TC1215 볼라벤과 TC1216 SANBA(산바)에 대한 두 범위에 따른 클러스터링 결과를 보여주고 있다.

두 케이스에 대한 클러스터링 결과를 보면, 범위에 따른 선정된 유사진로 태풍의 순위가 다른 것을 확인 할 수 있다. 먼저 볼라벤의 유사진로 태풍선정 결과를 보면, 클러스터링 범위가  $28^{\circ}$  N인 볼라벤의 유사진로 1위 태풍은 TC8508호 태풍으로 선정되었지만,  $32^{\circ}$  N에서는 TC1109호 태풍으로 선정된 것을 알 수 있었으며,  $28^{\circ}$  N에서는 TC1109호 태풍이 2위 태풍으로 선정된 것을 확인 할 수 있다. 또한  $28^{\circ}$  N에서는 6위안에 1412호 태풍이 선정 되었지만,  $32^{\circ}$  N범위 안에서는 선정되지 못했다 (Fig. 9).

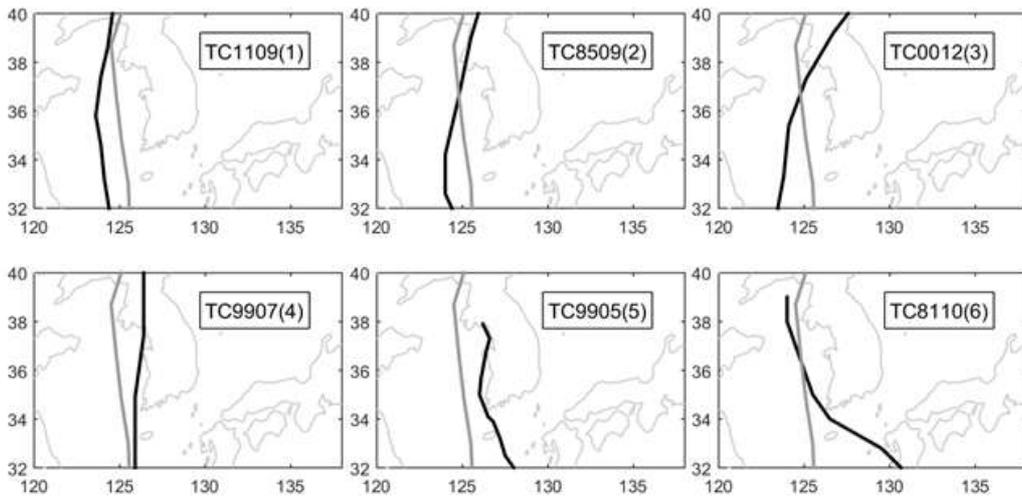
산바에 대한 유사진로 태풍들의 결과를 보면,  $28^{\circ}$  N범위에서 유사진로 1위 TC9503태풍이,  $32^{\circ}$  N에서의 클러스터링 결과에서는 유사진로 3위 태풍으로 밀려난 것을 확인 할 수 있었다.  $32^{\circ}$  N범위에서 유사진로 1위 태풍으로 선정된 TC0006호 태풍이  $28^{\circ}$  N범위에서는 6위안에 순위가 없는 것을 확인 할 수 있었고, 대부분의 클러스터링 결과가 기준태풍에 대하여 비슷한 진로를 잘 찾은 것을 확인 할 수 있었다(Fig. 9, Fig. 10).

이처럼 클러스터링 범위에 따른 선정된 유사진로 태풍과 순위가 달라질 수 있기 때문에, 클러스터링 범위를 나눠서 분석해야 하며, 이에 따른 비교분석이 필요하다. 나머지 90개의 태풍들에 대해서도 위 방법과 마찬가지로 순위를 정하여 비교 분석하였고, 가장 좋은 결과 값에 대하여 후에 통계모델을 구성하였다.

**Similar track of TC1215 (Clustering range :: Lat28-40°N)**

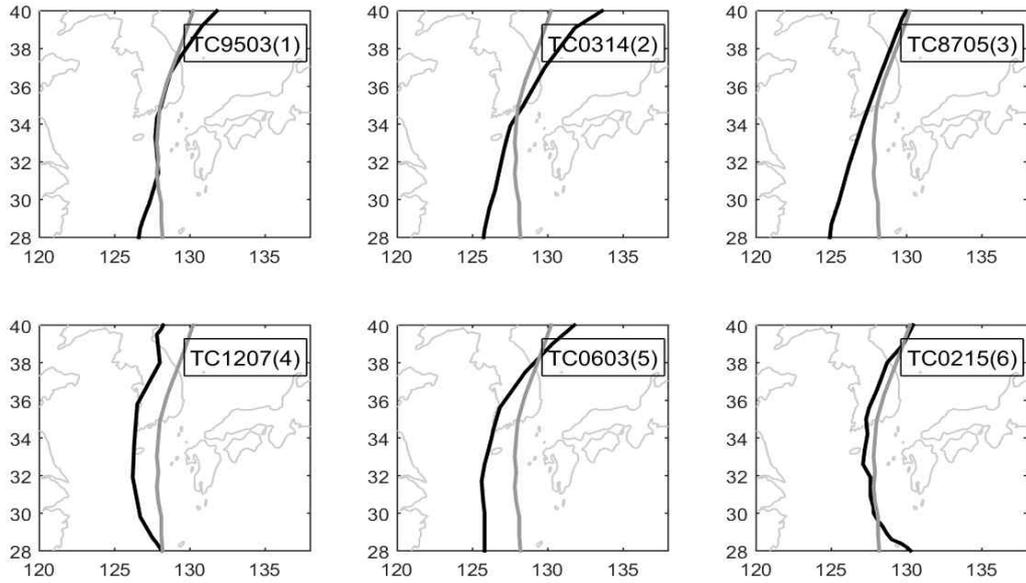


**Similar track of TC1215 (Clustering range :: Lat32-40°N)**



**Fig. 9.** The high-rank 6 (text in figure) similar tracks (black solid line) of TC1215 (gray solid line) using FCM. top and bottom figure is clustering latitude range of 28-40° N and 32-40° N, respectively.

**Similar track of TC1216 (Clustering range :: Lat28-40°N)**



**Similar track of TC1216 (Clustering range :: Lat32-40°N)**

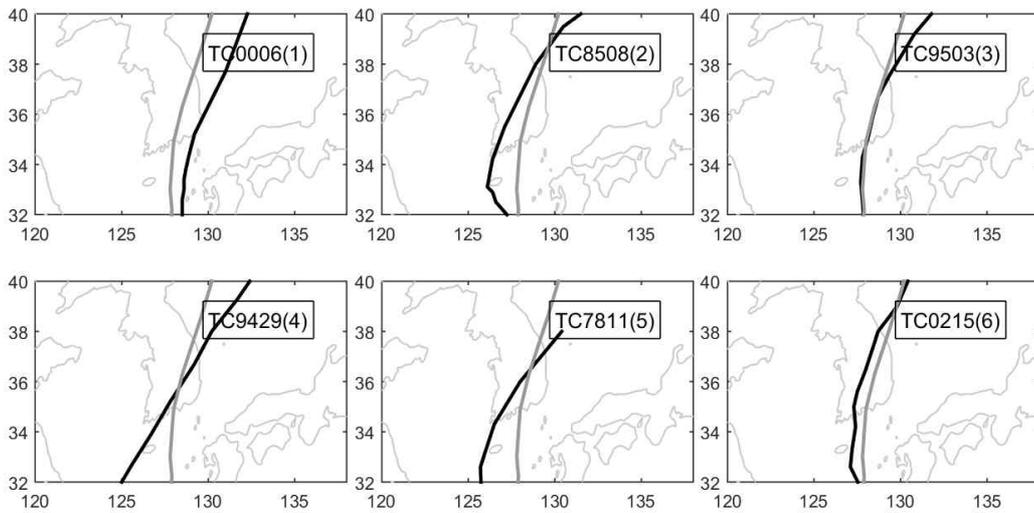


Fig. 10. Same as in Fig.9 but for TC1216 SANBA.

### 3. 태풍강도를 고려한 누적강수량 보정방법

본 연구에서는 누적강수량 산출 후, FCM 기반 클러스터링 방법을 사용하여 유사진로 태풍을 찾아 순위를 매겼다. 각 태풍에 대한 순위를 토대로 통계모델을 구성하기 위해 크게 두 가지 과정을 통해 분석을 하였다. 먼저, 태풍의 진로뿐만 아니라 강도효과를 고려하여, 각 누적강수량에 강도에 대한 보정 전과 후를 비교하기 위한 기본적인 분석을 하였다.

태풍에 의한 강수량에 대한 진로에 따른 지역별 차이는 누적 강수량을 예측하는 데 있어서 반드시 고려해야할 중요한 인자이다. 그러나 단순히 진로를 고려하여 분석을 했을 때, 다른 요인으로 인한 강수량의 차이가 생길수도 있지만 본 연구에서는 태풍의 강도에 따라 강수량이 달라질 수 있다고 가정 하에 본 분석을 진행하였다.

본 연구에서는 태풍 진로를 기반으로 하여 찾은 유사진로 태풍들과 기준태풍의 강도차이로 인한 누적강수량에 대한 오차를 줄이기 위하여 태풍의 강도를 통계모델 개선에 인자로 사용하기 위한 분석을 진행하였다. 보정을 위하여 2가지의 클러스터링 범위 별 각 기준태풍과 유사진로 태풍에 대한 각 태풍별로 정한 강수시기(Table 1)의 평균 강도 차이(기준태풍-각 순위에 대한 유사진로태풍)와 지점별 전체 누적 강수량에 대한 평균 Bias (식 (1) 참고)를 구하여 각 유사진로 순위에 따라 누적하면서 상관관계를 분석 하였다.

$$Bias = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (T_i - S_i) \quad (1)$$

여기서 n은 ASOS 총 지점의 개수, 즉 56개의 지점을 의미하며,  $T_i$ 는 기준태풍의 누적강수량을 말하며,  $S_i$ 는 유사진로태풍의 누적강수량을 의미한다.

Fig. 11.은 각 클러스터링 범위 별 유사진로 1위~6위까지 개수를 늘려가면서 구한 강수시기의 평균 강도차이와 누적강수량 Bias의 상관도를 나타낸다.

전체적으로 클러스터링 범위가 28° N 였던 경우에 유사진로를 찾은 순위에

대한 평균 강도의 차이와 누적강수량 Bias에 대한 상관도 보다 32° N의 클러스터링으로 분석한 결과들에 대한 상관도가 더 높았다.

Fig. 11.(b)를 보면, 유사진로 1위 태풍들만의 결과에 대한 강도차이와 Bias에 대한 상관도는 0.37로 전체에서 가장 높은 상관도를 보였으며 이는 99%유의한 결과를 보였다. 그러나 유사진로 순위에 대한 누적 개수가 늘어날수록, 상관도가 낮아지는 결과가 낮아지는 것을 확인할 수 있었다. Fig. 11.(a) 결과에서는 유사진로 1위 태풍에 대한 평균 강도차이와 누적강수량에 대한 Bias의 변동 폭이 32° N 클러스터링보다 작은 것을 보여주고 있고, 상관도가 0.24로 0.13의 큰 차이의 상관도를 보여주고 있다. 이는 강도차이에 따른 누적강수량과의 관련성이 한반도 근처에서 클러스터링을 했을 경우, 강도차이에 따른 누적강수량의 분포와 더 상관이 있다는 것을 보여줌과 동시에 강도에 따라 강수량이 변할 수 있다는 것을 의미한다.

본 연구에서는 분석한 기준 태풍과 유사진로 태풍의 강도차이와 평균 Bias의 상관관계를 토대로 강도보정을 하였다. 강도보정은 각 클러스터링 별로 진로가 잘 맞는 유사진로 1위 태풍들과의 상관관계에 대한 식에 대하여 보정할 Bias 값을 구하였고, 이를 모든 태풍에 대하여 보정하였다. 식 (2)와 (3)은 각각 Fig.11.(a)와 (b)의 유사진로 1위 태풍들로 분석한 결과에 대한 강도 보정 식이다.

$$y = 0.5612x - 3.7248 \quad (2)$$

$$y = 0.7394x - 0.0029 \quad (3)$$

위 식을 토대로 각 클러스터링 범위에 대하여 누적강수량의 강도 보정을 하고, 이를 보정 전과 비교하여 분석하였다.

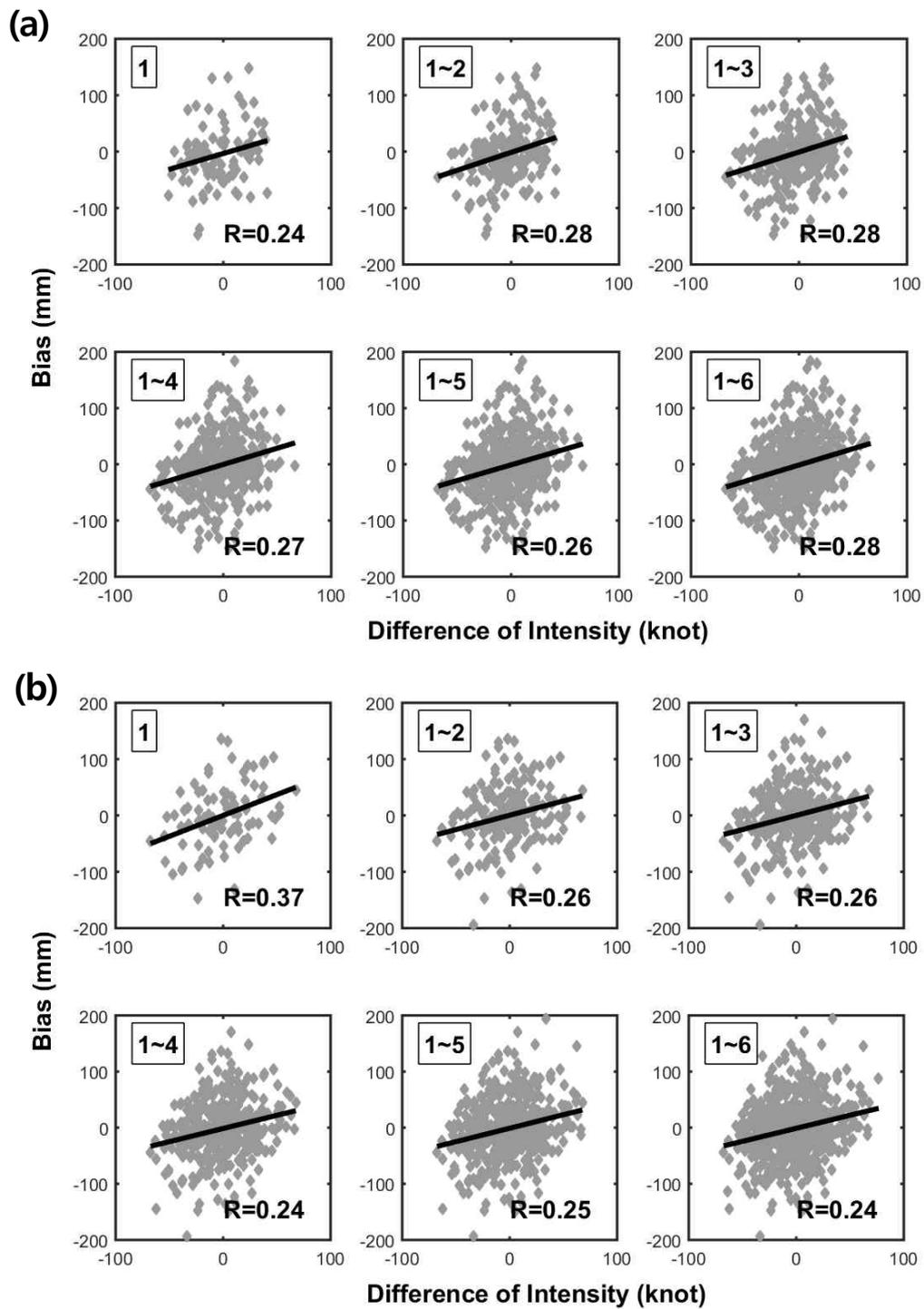


Fig. 11. Scatter plots of Difference of intensity [Knot] and averaged bias [mm] for target typhoon track and similar track of rank1~6 and Correlation [R]. (a) and (b) is clustering latitude range of 28–40° N and 32–40° N, respectively.

#### 4. 최적의 앙상블 개수 선정 방법

본 연구에서는 전체 91개의 태풍에 대하여 앞서 정한 두 가지 기준의 클러스터링 방법으로 분석한 유사진로태풍에 대한 순위를 기반으로, 강도를 누적 강수량 보정에 주요 인자로 사용했다. 이 장에서는 과거 태풍에 대한 누적 강수량과 유사진로 태풍들 간의 상관관계를 알아보고, 모델 구성을 위해 가장 최적의 누적 강수량에 대한 앙상블 개수를 찾아내기 위한 분석을 진행하였다.

첫째로, 단순히 기준태풍(91개의 태풍 중에서 기준이 되는 태풍)과 FCM 방법으로 찾은 유사진로 태풍(기준태풍을 제외한 나머지 태풍들에 대하여 클러스터링 방법으로 찾은 태풍)의 순위에 따른 누적강수량에 대한 Root Mean Square Error (RMSE, 식 (4) 참고)와 누적강수량에 대한 상관도 ( $R^2$ , 식 (5) 참고)를 분석하는 방법인 'Simple mean rainfall (SMR)' 분석을 진행하였고, 이에 대한 각 순위에 따른 상관도와 오차를 순위에 대해 평균적으로 분석해 보았다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (T_i - S_i)^2}{n}} \quad (4)$$

$$R^2 = \left( \frac{\sum_{i=1}^n (T_i - \bar{T})(S_i - \bar{S})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (T_i - \bar{T})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2}} \right)^2 \quad (5)$$

식 (4)와 (5)에 대한 변수는 식 (1)에서 사용된 변수와 같다. RMSE는 누적 강수량의 지역별로 전체적인 평균 오차 값이 어떤지를 위해 쓰인 식이고,  $R^2$ 는 기준태풍과 유사진로태풍의 누적강수량에 대하여 절대적인 상관도가 어떻게 되는 지를 수치적으로 확인하기 위해 본 연구에서 관측 값과의 누적강수량을 비교를 위한 방법으로 쓰였다. RMSE는 값이 적을수록 관측 값과의 오차가 적다고 하며,  $R^2$ 는 1에 가까우면 상관도가 높다고 하며, 0에 가까울수록 상관이 없다

고 말한다.

두 번째로, 누적강수량 오차를 줄이고 예측 정확도를 높이기 위한 방법으로 앞서 정한 유사진로 태풍들의 순위에 대하여 개수를 점점 늘려가면서 누적 강수량을 앙상블 평균하여 RMSE와  $R^2$  를 분석하는 'Ensemble mean rainfall (EMR)' 분석을 진행하였다. 보통 앙상블 방법은 수치모델 결과들에 대한 컨센서스(Consensus) 예측뿐만 아니라, 여러 통계적인 방법론에서 오차 값을 줄이기 위해 많이 사용하는 방법이다. 본 연구에서는 누적 강수량을 통계적으로 예측하고, 누적강수량의 평균적인 강수 값을 맞춰 관측 값과의 오차 값을 줄이는 것에 의의를 두고, 앙상블 방법을 채택하여, 결과 값을 분석하였다.

본 연구에서는 앞서 설명한 두 가지의 통계분석인 SMR 방법과 EMR 방법에 대한 분석을 진행하였고, 각 클러스터링 범위에 따른 정해진 유사진로 순위를 기반으로 각 분석방법에 대한 결과를 산출 하였다. 본 분석을 통해서 각 클러스터링 범위에 따른 SMR 방법과 EMR 방법의 RMSE와  $R^2$  분석 결과에는 어떤 차이가 있는지 비교분석 하였다. 또한 EMR분석에 대하여 강도보정 하기 전과 후에 분석결과에 대한 차이에 대하여 확인해 보았으며, 앞서 분석한 결과를 종합하여 가장 최소 오차 값을 찾아서 최적의 앙상블 개수를 찾고, 이를 통계모델 구성에 사용하여 누적강수량 예측에 사용하였다. 본 분석결과에 대한 내용은 IV장에서 자세히 다룰 것이다.

## IV. 결 과

이 장에서는 III장에서 설명한 방법들을 토대로 분석한 결과들에 대해서 설명하고, 통계모델을 구성한 후, 먼저 한반도 영향 태풍에 대한 누적강수량 통계모델을 구축하기 위하여, III장에서 설명한 통계모델 구성방법들을 토대로, 1977년부터 2014년 까지 한반도에 영향을 주었던 태풍들에 대하여 통계분석을 진행하였다. 또한 과거태풍을 기반으로 전체적으로 구성된 통계모델에 대하여 각 지점별로 누적강수량의 관측 값과 예측 값에 대한 오차 분석을 진행 하였다. 그 다음으로 실제 예측을 위해 우리나라에 영향을 준 4개의 2015년 태풍 중에서 2015년 09호 태풍과 15호 태풍에 대하여 RSMC Tokyo 태풍 최적경로자료와 역학 모델 아웃풋 예측결과를 토대로 모델 예측 실험을 하였다.

### 1. 유사태풍 통계기반 한반도 영향태풍의 누적강수량 예측모델 구성

본 연구에서는 한반도 영향 태풍에 대한 누적강수량 통계모델을 구축하기 위하여, III장에서 설명한 통계모델 구성방법을 토대로, 1977년부터 2014년 까지 한반도에 영향을 주었던 태풍들에 대하여 통계분석을 진행하였다. 먼저, 단순히 클러스터링 한 결과에 대한 유사진로 순위에 대하여 누적강수량 통계분석을 하는 SMR 분석과, 각 기준태풍과 유사진로 태풍 순위에 따른 RMSE와  $R^2$  를 기준으로 하여, 유사진로 상위와 하위태풍의 각 분석결과가 어떻게 다른지 알아보고, 누적강수량에 대하여 순위별로 개수를 늘려가면서 앙상블 평균을 하여 분석하는 EMR 분석을 통해 SMR 분석과의 차이에 대하여 살펴본다.

두 번째로, 앞서 분석하여 나온 결과들에 대하여 강도 보정에 대한 EMR 분석 결과와 보정 전과 어떠한 차이가 있는지 분석을 하였다.

## 1) 앙상블 방법

누적강수량 통계모델을 구성하기에 앞서, III장 에서 설명한 두 가지 방법을 토대로 과거 33년간 (1977~2014)의 누적강수량에 대한 RMSE와  $R^2$  를 두 가지 방법의 클러스터링 범위에 따라 분석하였다(Fig. 12).

Fig. 12는  $28^\circ N$ , 범위에 대하여 클러스터링 하여 얻은 순위에 대한 SMR과 EMR 분석에 대하여 91개의 태풍에 대한 평균 RMSE와  $R^2$  값을 보여준다. 단 순히 유사진로 순위에 대하여 기준태풍과의 분석을 한 SMR 분석의 결과를 보면 진로가 유사하지 않았던 하위권 순위의 태풍으로 갈수록 기준태풍과의 누적강수량 RMSE가 선형적으로 커지는 것을 볼 수 있었다 (Fig. 12.(a), 검은색 점선). Fig. 12.(a)의 검은색 실선을 보면 순위에 따른 기준태풍과의 강수 오차가 급변동하는 모습을 보이긴 하지만, 전체적으로 봤을 때 하위권 태풍으로 갈수록 증가하는 경향을 볼 수 있었다. 수치적으로 봤을 때, 유사진로 1위 태풍들에 대한 평균 RMSE 값인 74.66mm에서 하위권 태풍들에 대한 평균 RMSE 값은 최대 90mm 까지 증가하는 것을 보여준다.

$R^2$  또한 하위권 태풍으로 갈수록 기준태풍과의 누적강수량의 상관도가 점점 낮아지는 것을 확인 할 수 있었다(Fig. 12.(b), 검은색 실선). 유사진로 1위 태풍들의 상관도인 0.2에서 하위권 태풍들로 갈수록 0.1 이하의 낮은 상관도를 보였다. 이는 진로와 누적강수량의 상관관계가 크며, 진로에 따라서 누적강수량에 분포가 지역별로 큰 차이가 있다는 것을 보여주는 결과이다.

EMR 분석에서는 유사진로 순위에 따라 개수를 늘려가면서 누적강수량을 앙상블 평균하여 기준태풍과의 RMSE와  $R^2$  분석을 하였다. SMR 분석과는 반대로 기준태풍과의 강수량 오차가 순위에 따른 앙상블 개수에 따라 점점 줄어드는 것을 확인할 수 있었다. 하지만, 어느 한계에 도달하여 진로가 맞지 않은 태풍에 도달 했을 때, 다시 강수오차가 커지는 결과를 보여주었다(Fig. 12.(a), 회색 실선). 이 클러스터링 범위의 경우, 9위까지의 누적강수량에 대하여 앙상블을 하여 기준태풍과의 오차를 구하였을 때 전체에서 54.49mm의 가장 작은 오차 값을 보였으며, 이는 유사진로 1위 태풍과 기준태풍과의 RMSE값인 약 74.66mm보다 약 20mm감소한 값이다. 9위까지의 앙상블을 한 이 후로, 하위권 태풍들로

갈수록 다시 누적강수량 오차 값이 55mm 이상으로 점차 증가하는 것을 볼 수 있었다.

Fig. 12.(b)의 회색 실선은 기준태풍과 유사진로 태풍 또는 앙상블 개수에 따른  $R^2$  값을 나타낸다. 13위 태풍에 대하여, 0.35의 상관도를 보였다. 이는 유사진로 1위 태풍에 대한  $R^2$  보다 좋은 상관도를 보인다.  $R^2$  도 RMSE와 마찬가지로, 점점 증가하면서 좋은 값을 보이다가, 어느 한계에 도달했을 때 다시 감소하는 결과를 보여준다. 이는 진로가 맞지 않는 하위권 태풍들의 누적강수량이 앙상블 평균 되면서 기준태풍과의 누적강수량 오차를 증가시킨 것이다. 가장 좋은 상관도를 보였던 13위 태풍에 대하여 앙상블 평균한 RMSE값은 약55mm로, 9위 태풍까지의 앙상블 평균 오차 값보다 0.5mm도 큰 값이다. RMSE값이 가장 적었던 9위 태풍에 대한  $R^2$  는 0.33으로 0.35의 13위 태풍보다는 0.2 적은 값을 보였지만, 상관도가 SMR분석 값보다는 많이 개선됨을 알 수 있었다. 하지만 앙상블 개수가 50위 이 후 부터는 상관도가 0.3 아래로 떨어지는 결과를 볼 수 있었다(Fig. 12.(b),검은색 실선, 검은색 점선).

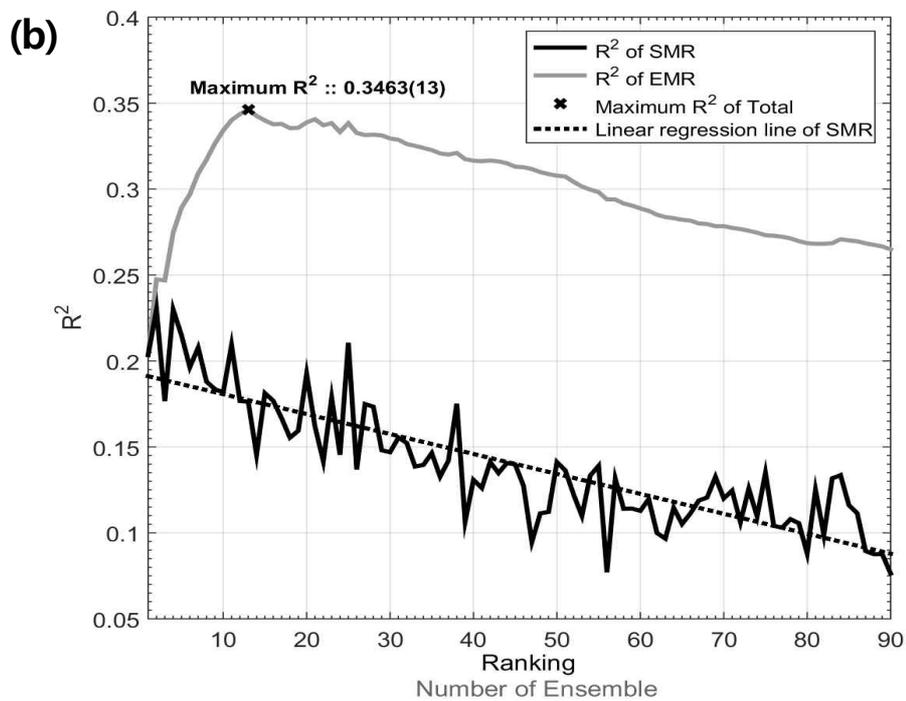
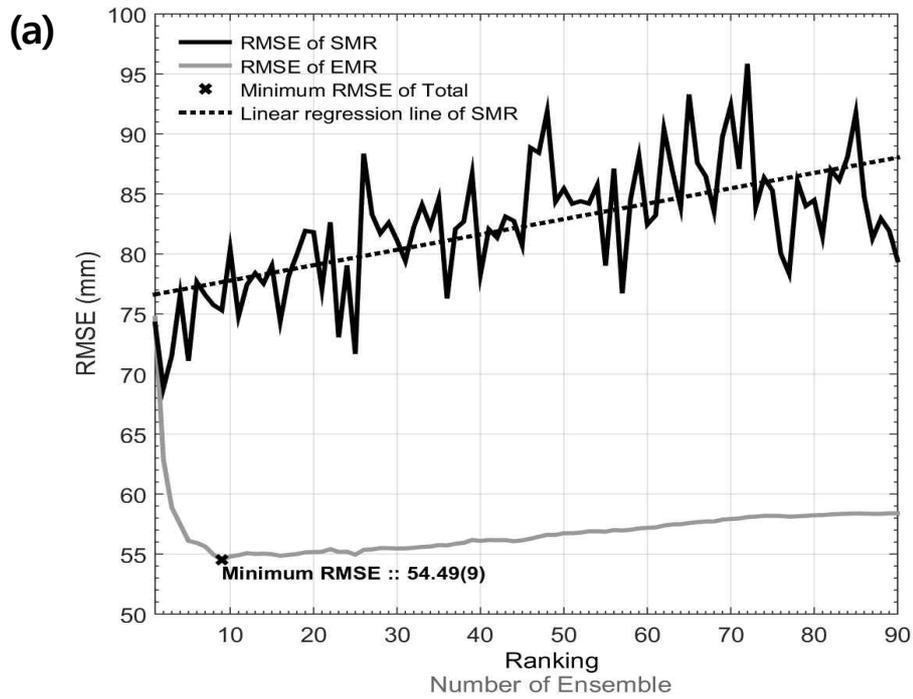


Fig. 12. RMSE and  $R^2$  Comparison Ensemble Mean RMSE (EMR, black solid line) and Simple Mean RMSE (SMR, gray dashed line) of clustering range latitude 28–40° N.

Fig. 13은 클러스터링 범위가 앞의 분석보다 한반도 근처인 32° N 범위에 대하여 클러스터링 하여 얻은 순위에 대한 SMR과 EMR 분석 결과이다.

그 결과, SMR 분석에서는 앞의 분석과 마찬가지로 진로가 유사하지 않았던 하위권 순위의 태풍으로 갈수록 기준태풍과의 누적강수량 RMSE가 선형적으로 커졌다 (Fig. 13.(a), 검은색 점선). 유사진로 1위 태풍들의 RMSE는 약 77mm로, 28° N으로 클러스터링 했을 경우 유사진로 1위태풍의 값인 약 72mm보다 2mm 더 큰 값을 보였으나, 30위까지의 태풍으로 가는 변동 폭은 대부분이 85mm 이하로 더 적었다 (Fig. 12.(a), Fig. 13.(a), 검은색 실선).

$R^2$  는 RMSE 분석 결과에 비해 앞선 분석과 비슷한 경향을 보였으며, 하위권 태풍으로 갈수록 기준태풍과의 누적강수량의 상관도가 점점 낮아졌다 (Fig. 13.(b), 검은색 실선). 마찬가지로, 유사진로 1위 태풍들의 상관도인 0.2에서 하위권 태풍들로 갈수록 0.1 이하의 낮은 상관도를 보였다.

Fig. 13.(a) 회색실선은 EMR 분석의 결과를 나타낸다. 앞선 분석과 비슷한 경향으로, 기준태풍과의 강수량의 오차가 순위에 따른 양상블 개수에 따라 점점 줄어드는 것을 확인할 수 있었다. 하지만 최소 오차에 대한 양상블 개수를 찾았을 때는 28° N분석과는 차이가 있었다. 이 클러스터링 범위의 경우, 14위까지의 누적강수량에 대하여 양상블을 하여 기준태풍과의 오차를 구하였을 때 전체 오차에서 53.85mm의 가장 작은 값을 보였으며, 이는 유사진로 1위 태풍과 기준태풍과의 RMSE값인 약 76.16mm보다 약 23mm감소한 오차 값을 보였다 (Fig. 12.(a), 회색 실선).

28° N부터 클러스터링한 결과에서 가장 좋은 값을 보였던 9위 까지 양상블 평균한 누적강수량과 기준태풍의 누적강수량 오차는 32° N 분석결과에서는 55.16mm로, 14위까지의 양상블 평균 누적강수량 오차 값보다 약 1.3mm 큰 오차 값을 보였다. 23위를 기점으로 다시 55mm 이상의 누적강수량 오차 값이 점점 증가하는 것을 볼 수 있었다.

$R^2$  는 18위까지 양상블 평균하였을 때 기준태풍과의 누적 강수량 상관도가 가장 좋은 값을 보였으며, 상관도는 0.35의 값을 보였다. 본 분석에서 가장 누적강수량 오차가 적었던 14위까지의 양상블 평균 누적강수량 상관도는 약 0.34로, 가장 좋은 값을 보인 18위까지의 결과와 거의 차이가 없는 상관도 값을 보였다.

하지만, SMR 분석보다는 좋은 결과 값인 것을 볼 수 있었다. 특히, 유사진로 1 위 태풍들에 대한 상관도 보다 0.14~15 증가한 것을 확인할 수 있었다(Fig. 12.(b), Fig. 13.(b) 회색 실선).

Fig 12와 13에서 나타난 결과 값에 대하여 종합적으로 정리하였을 때, 두 클러스터링 범위 모두 SMR 방법에 대한 분석결과보다는 EMR 분석에서 기준태풍과 유사진로 태풍의 RMSE 값이 적은 것을 확인할 수 있었으며, EMR 분석이 누적강수량을 예측하는 데 있어서 더 좋은 결과 값을 얻을 수 있는 방법이라는 것을 알 수 있었다.

Fig. 14는 클러스터링 범위 별로 결과 값이 좋았던 EMR 분석에 대하여 기준태풍과 유사진로 태풍들의 분석에 대한 결과를 비교해 본 결과이다.

$R^2$  는 두 클러스터링 범위가 차이가 거의 없다는 것을 확인할 수 있었지만, RMSE는 28° N범위로 클러스터링 하여 얻은 유사진로 태풍들에 대한 앙상블 평균 누적강수량에 대한 오차보다 상대적으로 한반도 근처로 클러스터링을 하여 얻은 32° N 위도에서의 유사진로 결과 값에 대한 누적강수량 RMSE가 절대적인 최솟값에 대하여 비교했을 때(9위, 14위) 약 0.6mm 더 작은 것을 확인할 수 있었다 (Fig. 14, 실선). 이 결과를 토대로, IV-1.2)에서 EMR 분석방법에 대하여 강도 보정을 하기 전과 후 비교분석한 결과를 서술하였다.

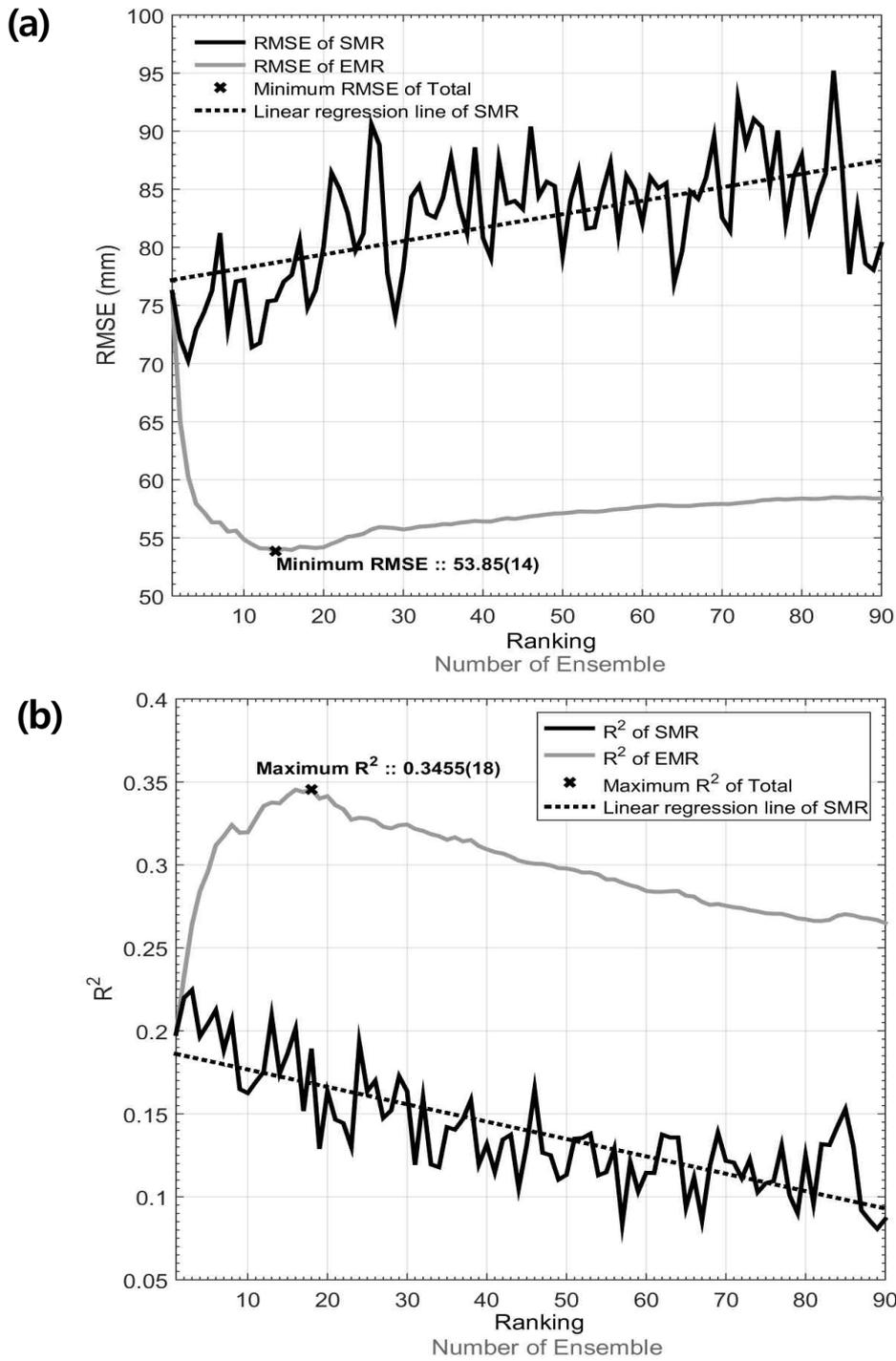


Fig. 13. Same as in Fig. 12 but for clustering range latitude 32–40° N.

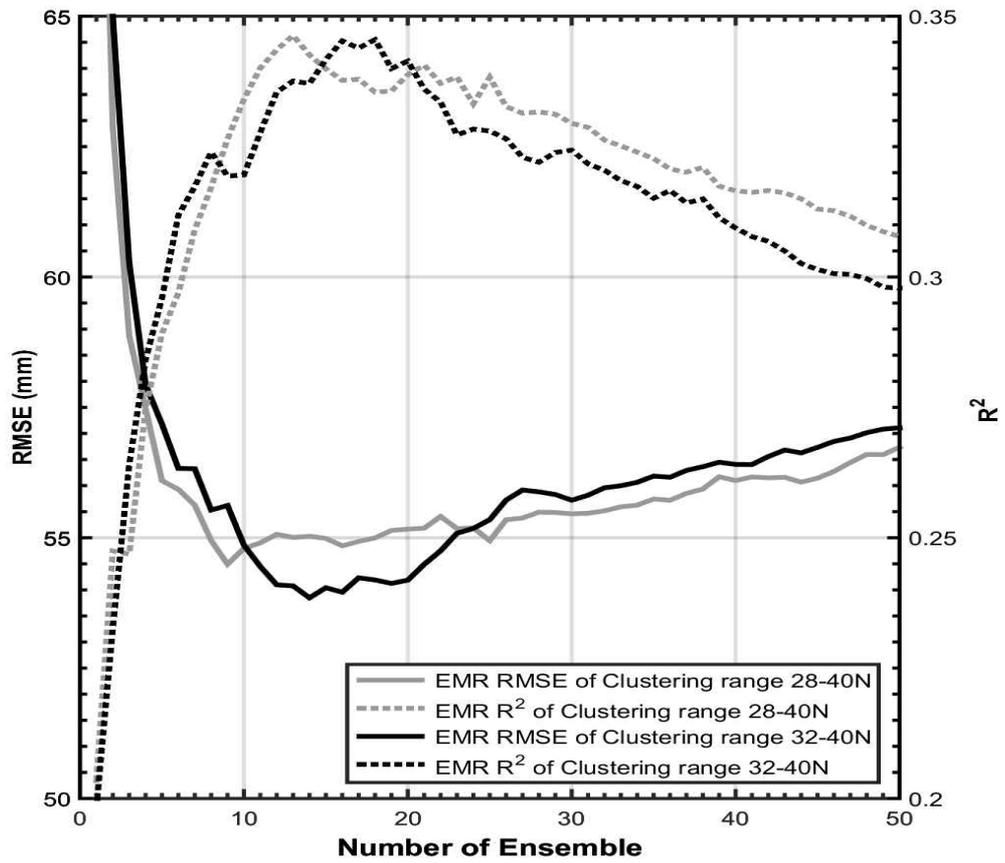


Fig. 14. Comparison clustering range latitude 28–40° N (black line) and 32–40° N (gray line) of EMR analysis. black and gray line is RMSE (solid line) and R<sup>2</sup> (dashed line), respectively.

## 2) 강도 보정

본 연구에서는 누적강수량에 대한 오차를 줄이기 위해 기존태풍과 유사진로 태풍의 강도차이와 누적강수량 Bias의 상관관계를 분석하였고, 이에 대하여 상관관계가 보였기 때문에 강도보정효과를 넣어 분석을 하였다. 보정을 위하여 2가지의 클러스터링 범위 별로 보정 식을 구하였고, 이에 대한 누적강수량 보정을 해주었다.

Fig. 15는 각각 클러스터링 범위에 대한 식 (2)와 (3)의 보정 식으로 구한 누적 강수량 Bias에 대하여 강도 보정을 하기 전과 후의 EMR 분석의 RMSE와  $R^2$  대한 결과를 보여준다. 전체적으로 강도보정을 한 경우 두 클러스터링 범위에 따른 결과 값이 개선이 된 것을 확인 할 수 있었다.

Fig. 15.(a)에서 진로만을 고려했을 경우 최소 오차 값은 14위까지 이상불 했을 경우이며, 53.85mm의 오차 값을 보였다. 하지만 강도보정을 해준 후, 16위까지 이상불을 했을 경우 53mm의 최소 오차 값을 보였다. 진로만을 고려했을 경우에 16위 이상불 누적강수량 오차는 53.95mm의 값을 보였으며, 같은 이상불 개수 에서 강도 보정을 해준 후 1mm 줄어드는 결과를 보였다. 최소 오차 값을 나타낸 14위와 비교했을 때도 0.85mm 줄어드는 값을 보여 주었다.

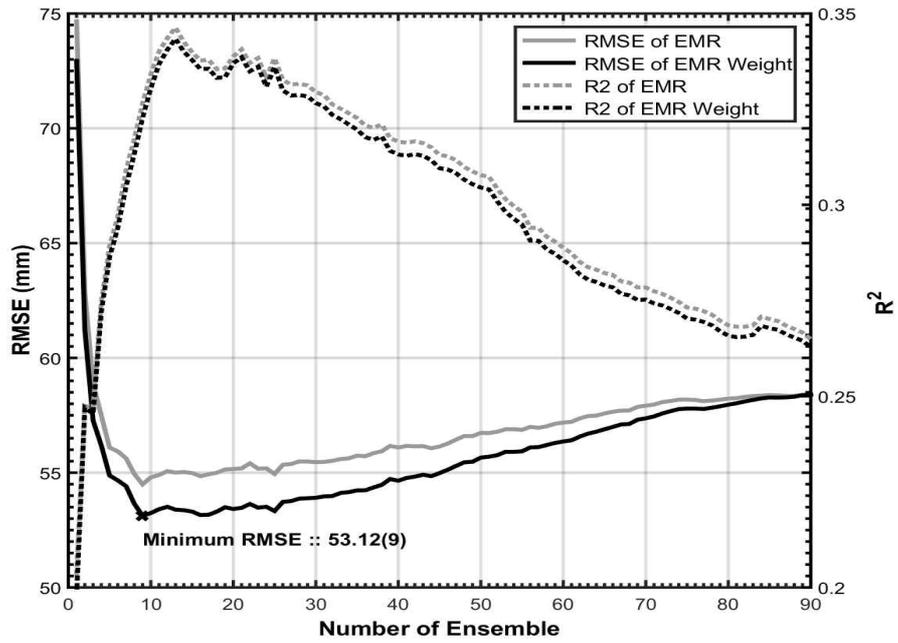
$R^2$  는 앞의 결과와 마찬가지로, 0.05 이내의 값을 보이며 비슷한 경향을 보였다(검은색 점선). 이 결과를 클러스터링 범위 별로 비교해 봤을 때, 클러스터링 범위가 28° N에 대한 유사진로태풍의 결과 값 들이 보정을 해 주었을 때, 강도 보정 전보다 더 많이 개선된 결과를 보였지만, 절대 값으로 봤을 때는 32° N에 대한 유사진로태풍의 결과 값들이 더 적은 오차 값을 보인 것을 확인할 수 있었다. 특히, 16위까지 이상불 평균하여 강도 보정을 해주었을 경우 기존태풍과의 RMSE값이 최소 오차 값을 보였다.

결과적으로, 32° N에 대한 분석 중 강도보정을 통해 가중치를 넣어줬을 때 16위까지의 이상불 누적강수량의 RMSE가 가장 좋은 값을 얻었으며,  $R^2$  는 전체적으로 약 0.35의 결과를 보였다. 본 연구에서는 보정 전과 후의 결과가 차이가 거의 없었던 상관도의 결과보다는 상대적으로 더 개선된 RMSE 결과의 초점을 맞추어서 누적강수량 통계모델을 구성하였다 (Fig. 16).

위의 결과를 토대로 통계모델 구성은 가장 결과 값이 좋았던 강도 보정 후의 32° N로 클러스터링한 유사진로 태풍 16위까지를 ‘최적의 앙상블 개수’라 정하였다. 통계모델 구성과 누적강수량 예측에 대한 대략적인 모식도는 Fig. 16에 설명되어 있다.

IV-2장에서는 구성된 통계 모델을 토대로 과거 태풍에 대하여 각 지역별 누적강수량 오차에 대하여 평균적으로 분석하고, IV-3장에서 한반도에 영향을 준 2015년 태풍에 대하여 예측 실험을 하였다.

(a)



(b)

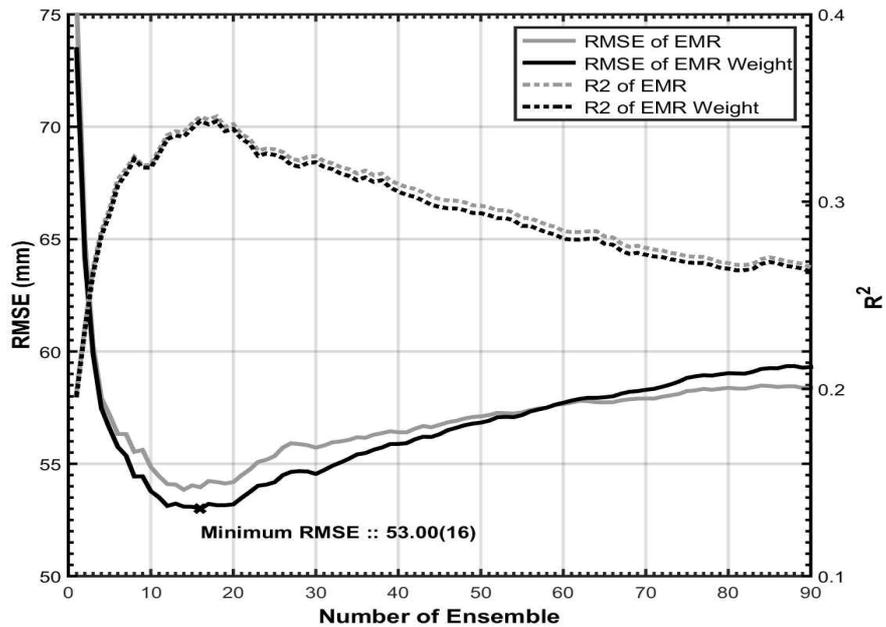
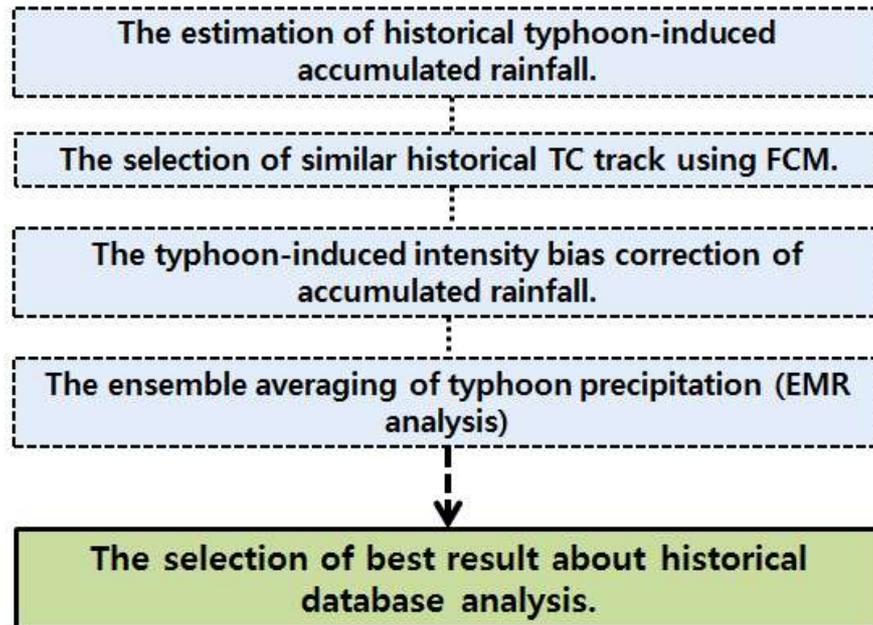


Fig. 15. Comparison after (gray line) and before (black line) correction of intensity bias. black and gray line is RMSE (solid line) and  $R^2$  (dashed line), (a) and (b) is clustering latitude range of  $28-40^\circ$  N and  $32-40^\circ$  N, respectively.

## Statistical Analysis about historical database



## Model setting

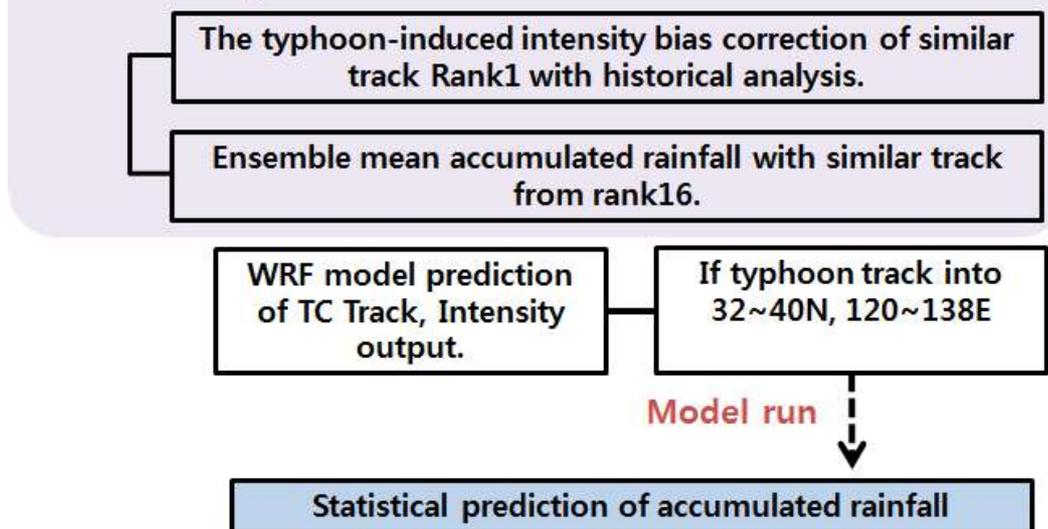


Fig. 16. The block diagram of procedure for statistical prediction of accumulated rainfall.

## 2. 과거 태풍에 대한 누적강수량 오차 분석

앞서 분석한 내용들을 토대로 구성된 TAR모델에 대하여 2015년 태풍에 대한 예측 실험 전, 오차분석을 위해 91개의 과거 태풍에 대하여 관측 값에 대한 평균 누적강수량과 Standard deviation(STD, 식 (6))을 구하였고, 이와 비교를 위해 각 관측과 모델로 예측한 누적강수량의 차이에 대하여 Bias(식(1) 참고)와  $R^2$  (식(5) 참고) 그리고 Mean absolute error(MAE, 식(7))와 MAE에 대한 누적강수량의 STD를 Fig. 17과 Table 4에 나타내었다.

$$STD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (T_i - \bar{T})^2}{n}} \quad \text{식 (6)}$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |T_i - F_i| \quad \text{식 (7)}$$

식(6)은 본 연구에서 사용된 STD의 식을 나타낸다.  $n$ 은 분석에서 사용된 태풍의 개수 즉 91개를 의미하며,  $\bar{T}$ 는 각 지점에 대하여 91개 태풍에 대한 관측 또는 관측 값과 모델 예측 값의 차이에 대한 평균값을 의미한다.  $T_i$ 는  $T_{1...n}$ 까지 관측 또는 관측 값과 모델 예측 값의 차이를 나타낸다. 식 (7)에서  $F_i$ 는 통계모델 예측 값을 의미한다.

Fig. 17(a)와 (b)는 각각 91개의 과거태풍에 대한 평균 누적강수량과 이에 대한 STD를 나타낸다. 지역별로 보면 태풍이 가장 많이 지나가는 전라도와 경상도 특히 남해안 지역에 평균적으로 100mm이상의 비가 내렸으며, 이에 따른 STD도 평균 누적강수량에 따라 증가하는 것을 알 수 있었다. Table 3 (a),(b)에서 지역별 관측 값과 이에 대한 STD와의 차이에 대한 절대 값들을 보면, 강원도 지역에서 다른 지역에 비해 큰 STD를 보였다. 강원도 지역의 100, 105지점을 보면 알 수 있듯이 평균적인 강수량이 많은 지역일수록 STD가 커지는 것

을 확인할 수 있었다.

MAE는 관측 값과 모델 예측 값의 강수량 차이에 대한 절대 값으로, Fig.17(c)와 Table 3의 (c)를 보면 전체적으로 10~39mm의 MAE를 나타낸 것을 알 수 있었다. 행정구역별로 봤을 때, 태풍의 영향으로 비가 다른 지역에 비해 많이 오지 않은 경기도 서울지역의 MAE는 적었으나, 태풍의 영향을 많이 받는 전라도와 경상도는 지역별로 다른 것을 알 수 있었다. 하지만 전라도 지역은 많은 비의 양에도 불구하고, 관측 값과 예측 값의 오차가 적은 것을 확인할 수 있었다. MAE에 대한 STD 또한 관측 값과 마찬가지로, 강원도 지역에서 평균 강수량이 많은 지역일수록, MAE도 커지기 때문에 STD도 커졌다 (Fig.17(c), Table 3.(c)).

bias는 전체적으로 15mm이하의 양의 값을 보였고, 태풍 피해가 가장 많은 남해안 지역에서 다른 지역에 비해 높은 bias를 나타냈다. 강원도 지역의 105지점에 대해서만 -0.41의 음의 bias인 것을 제외 하고는 전체적으로 양의 값이 나왔기 때문에 예측 값이 관측 값에 비해 과소모의 되었다는 것을 알 수 있다 (Fig.17(d), Table 3.(d)).

관측 값과 예측 값에 대해서 지점별로 상관도를 분석하기 위해  $R^2$  를 분석하였다. 그 결과 평균 상관도가 좋았던 ASOS 지점은 경상도의 산청지역(289) 지역으로, 0.3의  $R^2$  값을 보였다. 이 지역은 139.2mm의 누적강수량 관측 평균값을 보여, 다른 지점에 비해 상대적으로 많은 강수량이 평균적으로 내렸고, 이에 대한 관측 값과 예측 값에 대한 MAE가 66mm의 정도를 보였으나 STD가  $\pm 0.76$ 의 값으로 다른 지역에 비해 적은 STD를 보였다.  $R^2$  가 다른 지점에 비해 좋았던 지역들은 MAE에 대한 STD가 적은 값을 보이는 특징을 보였다 (Table 3.(f)).

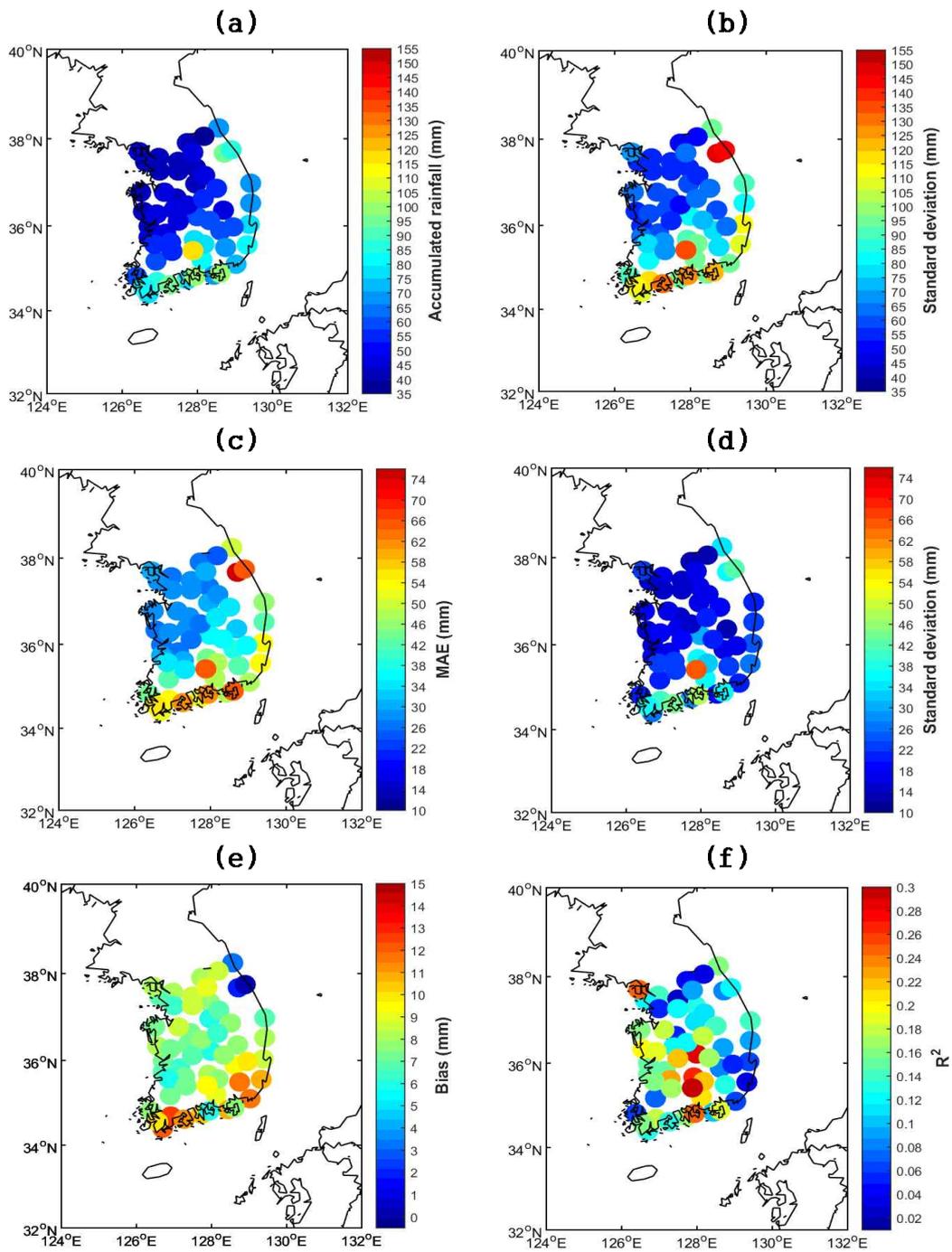


Fig. 17. Map of (a) average observation(OBS) for 91 typhoons, (b) STD about (a), (c) TAR average MAE for 91 typhoons, (d) same as in (b) but for (c), (e) bias between OBS to forecast results by TAR statistical model, (f) same as in (e) but for  $R^2$  .

**Table 3.** List of the results as in Fig.17 : **(a)** OBS, **(b)** OBS minus STD of (a), **(c)**MAE , **(d)** MAE minus STD of (c), **(e)** and **(f)** bias and R<sup>2</sup> in the administrative district(point number 56), respectively.

No.	Administrative district	ASOS point number	OBS $\pm\sigma$ (mm)		MAE $\pm\sigma$ (mm)		bias (mm)	R <sup>2</sup>
			(a)	(b)	(c)	(d)		
1		90	97.29	$\pm 30.10$	33.21	$\pm 16.69$	3.10	0.15
2		100	155.74	$\pm 59.21$	36.59	$\pm 41.29$	1.66	0.07
3		101	47.43	$\pm 14.86$	12.82	$\pm 12.59$	8.49	0.39
4	Kangwondo	105	150.97	$\pm 66.31$	42.28	$\pm 24.11$	-0.41	0.12
5		114	48.85	$\pm 13.62$	15.17	$\pm 11.22$	8.14	0.13
6		211	44.97	$\pm 12.47$	11.90	$\pm 12.28$	8.87	0.02
7		212	58.57	$\pm 19.66$	16.57	$\pm 12.88$	9.52	0.08
8		108	51.23	$\pm 17.41$	16.17	$\pm 10.24$	8.64	0.13
9		112	51.49	$\pm 18.07$	14.97	$\pm 12.76$	7.13	0.11
10	Kyeonggido,	119	48.55	$\pm 16.84$	13.34	$\pm 13.90$	6.59	0.05
11	Seoul	201	65.56	$\pm 27.73$	21.98	$\pm 8.00$	8.50	0.25
12		202	51.39	$\pm 16.58$	13.00	$\pm 15.09$	8.99	0.01
13		203	52.29	$\pm 15.55$	14.46	$\pm 13.08$	8.76	0.11
14		127	53.04	$\pm 16.71$	15.60	$\pm 13.60$	6.10	0.10
15		129	58.04	$\pm 21.47$	17.29	$\pm 10.87$	7.53	0.16
16		131	52.88	$\pm 16.54$	14.09	$\pm 14.62$	7.69	0.04
17	Chungcheongdo	133	53.36	$\pm 14.82$	15.37	$\pm 13.31$	7.28	0.12
18		135	77.87	$\pm 20.71$	29.75	$\pm 6.15$	6.15	0.28
19		221	51.86	$\pm 13.95$	15.89	$\pm 12.81$	7.06	0.11
20		226	47.09	$\pm 9.45$	14.39	$\pm 12.48$	8.04	0.11

Table 3. Continued.

No.	Administrative district	ASOS point number	OBS $\pm \sigma$ (mm)		MAE $\pm \sigma$ (mm)		bias (mm)	R <sup>2</sup>
			(a)	(b)	(c)	(d)		
21		232	55.50	$\pm 16.76$	15.56	$\pm 12.62$	9.02	0.17
22		235	49.04	$\pm 13.72$	14.59	$\pm 11.39$	8.56	0.19
23		236	55.25	$\pm 17.36$	17.04	$\pm 10.75$	7.73	0.19
24	Chungcheongdo	238	51.90	$\pm 12.62$	17.13	$\pm 8.81$	7.05	0.21
25		130	89.66	$\pm 26.82$	20.93	$\pm 25.06$	7.13	0.14
26		138	114.46	$\pm 39.29$	24.40	$\pm 29.91$	9.24	0.06
27		143	73.10	$\pm 16.79$	16.26	$\pm 22.37$	9.76	0.08
28		152	107.74	$\pm 28.68$	26.36	$\pm 28.46$	11.32	0.03
29		159	95.13	$\pm 25.81$	20.77	$\pm 27.64$	12.40	0.06
30		162	92.72	$\pm 25.75$	18.72	$\pm 29.95$	11.37	0.09
31		192	92.78	$\pm 10.68$	35.07	$\pm 13.57$	9.50	0.20
32		272	59.44	$\pm 10.78$	18.03	$\pm 15.71$	8.02	0.14
33		273	60.23	$\pm 11.84$	19.87	$\pm 13.50$	6.43	0.17
34		277	77.61	$\pm 13.36$	21.64	$\pm 19.87$	8.47	0.08
35	Kyeongsangdo	278	54.50	$\pm 12.63$	12.96	$\pm 18.40$	7.97	0.09
36		279	71.11	$\pm 16.62$	20.39	$\pm 16.31$	8.14	0.16
37		281	61.20	$\pm 6.97$	15.38	$\pm 20.09$	10.63	0.05
38		285	92.95	$\pm 17.80$	32.51	$\pm 14.80$	7.87	0.21
39		288	76.54	$\pm 9.65$	22.21	$\pm 18.98$	12.49	0.13
40		289	139.20	$\pm 21.69$	66.63	$\pm 0.76$	9.82	0.30
41		294	123.98	$\pm 25.30$	36.58	$\pm 29.15$	7.84	0.18
42		295	128.73	$\pm 27.48$	48.91	$\pm 14.00$	6.12	0.25

Table 3. Continued.

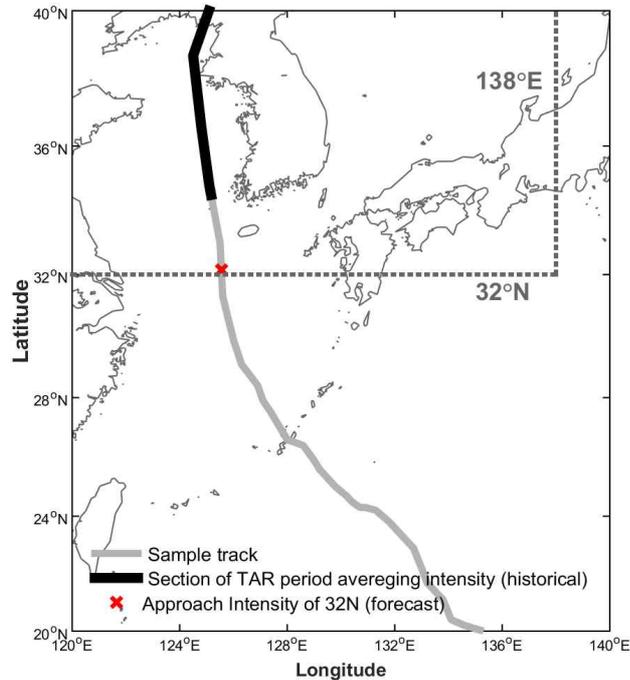
No.	Administrative district	ASOS point number	OBS $\pm \sigma$ (mm)		MAE $\pm \sigma$ (mm)		bias (mm)	R <sup>2</sup> (f)
			(a)	(b)	(c)	(d)		
43	Jeollado	140	49.79	$\pm 15.20$	14.53	$\pm 11.49$	7.51	0.15
44		146	56.92	$\pm 19.10$	15.47	$\pm 10.88$	6.72	0.15
45		156	80.18	$\pm 25.19$	20.49	$\pm 21.63$	7.68	0.07
46		165	89.92	$\pm 35.26$	20.84	$\pm 23.36$	7.80	0.06
47		168	94.49	$\pm 18.67$	27.02	$\pm 24.59$	10.93	0.16
48		170	108.30	$\pm 33.60$	26.36	$\pm 24.87$	13.01	0.13
49		243	61.86	$\pm 20.98$	16.86	$\pm 12.99$	7.11	0.15
50		244	63.04	$\pm 15.50$	21.69	$\pm 8.64$	7.60	0.23
51		245	74.63	$\pm 26.77$	22.55	$\pm 12.17$	6.00	0.15
52		247	67.24	$\pm 17.45$	21.16	$\pm 12.12$	7.61	0.17
53		260	121.24	$\pm 36.08$	39.04	$\pm 15.07$	13.39	0.17
54		261	115.69	$\pm 36.92$	35.21	$\pm 19.85$	10.56	0.15
55		262	134.54	$\pm 39.07$	43.68	$\pm 18.19$	12.08	0.13
56		284	87.96	$\pm 15.35$	35.48	$\pm 7.93$	8.54	0.26

### 3. 2015년 태풍에 대한 예측 실험

2015년 태풍에 대한 누적강수량 예측 실험을 위해, 우리나라에 직접적으로 강수 영향을 준 TC1509 CHANHOM(찬흠)과 TC1515 GONI(고니) 사례를 가지고 크게 두 가지의 실험을 진행하였다. 먼저, RSMC Tokyo에서 제공하는 최적 경로자료를 이용하여 FCM 클러스터링 방법을 이용한 유사진로 순위를 정하여 성능실험을 하였다. 두 번째로는 실제 누적 강수량 예측에 사용하기 위해, TC1515 태풍에 대하여 2015년 8월 20일 1200UTC에서 14일 1200UTC 까지 12시간 간격으로 태풍의 진로와 강도를 예측한 WRF 역학모델 아웃풋 결과를 클러스터링 진로예측과 강도보정에 사용하여 성능실험을 하였다.

2015년 태풍에 대한 누적강수량 예측 실험을 위해, 우리나라에 직접적으로 강수 영향을 준 TC1509 CHANHOM(찬흠)과 TC1515 GONI(고니) 사례를 가지고 크게 두 가지의 실험을 진행하였다. 먼저, RSMC Tokyo에서 제공하는 최적 경로자료를 이용하여 FCM 클러스터링 방법을 이용한 유사진로 순위를 정하여 성능실험을 하였다. 두 번째로는 실제 누적 강수량 예측에 사용하기 위해, TC1515 태풍에 대하여 2015년 8월 20일 1200UTC에서 24일 1200UTC 까지 12시간 간격으로 태풍의 진로와 강도를 예측한 WRF 역학모델 아웃풋 결과를 클러스터링 진로예측과 강도보정에 사용하여 성능실험을 하였다.

앞서 분석한 예측 기준 강도였던 강수기간동안의 평균 강도에 대하여 상관관계를 구하여 Bias 보정을 하였지만, 실제 예측 할 때는 강수시기를 알 수 없기 때문에, 북위32도에 태풍이 도달했을 때의 근접강도를 구하였고, 이를 앞서 구한 보정 식(식 (3) 참고)을 이용해 강도 보정 하여 결과를 산출하였다 (Fig. 18).



**Fig. 18.** Map of section of typhoon-induced intensity using bias correction. Symbol red 'X' is approach intensity of sample track.

모델 구성에 대한 성능실험을 위해 2015년 태풍에 대한 자료를 수집하였다. 2015년 현재까지 국가태풍센터에서 제공하는 한반도 영향 태풍은 총 4개 (TC1509, TC1511, TC1512, TC1515)의 태풍이다. 하지만, 직접적으로 한반도에 강수영향을 준 태풍은 TC1509 찬홈과 TC1515 고니였다 (Fig. 19).

TC1509호 태풍은 6월 29일 06시에 열대저압부로 시작되어, 7월 7일 00시에 10분 최대풍속 65knot이상의 TY급 태풍으로 발달하였다. 이후 강한 강도를 유지하면서 대만 동쪽까지 접근하였고, 60knot의 강도로 우리나라 서해안으로 접근 하였다. 우리나라 근처를 지나가면서 태풍이 약화되긴 했지만, 여전히 50knot이상의 강도로 접근하였다. Fig. 19.(a)는 TC1509호 RSMC Tokyo 최적경로자료와 영향시기의 ASOS 관측 자료로 얻은 누적강수량의 분포를 보여준다. 전라도 남해지역에 250mm-300mm 이상의 많은 비를 뿌렸으며, 태풍의 경로에 따라, 동해보다는 서해지역에 많은 비가 내렸다.

TC1509호 태풍은 우리나라 서해를 통과한 태풍이라면, TC1515호 태풍은 09호태풍 보다 느린 속도로 우리나라 동해안을 통과하였다. 우리나라로 85knot 의 강도로 접근하였고, 우리나라 동해상을 지나면서 급격히 태풍이 소멸되었다. 경상도 지역을 시작으로 비가 내렸고, 강원도 지역에 300mm 이상의 비가 내렸다 (Fig. 19.(b)).

본 연구에서는 이 두 케이스를 구성된 통계모델에 대하여 두 가지의 누적강수량 예측실험을 하였다. 먼저, RSMC Tokyo에서 제공하는 최적경로자료를 사용하여, 태풍 클러스터링을 한 유사진로 태풍을 찾았다. 관측 값이 없다고 생각하고 예측을 하는 것이기 때문에 태풍에 의한 강수시기에 대한 평균 강도가 아닌, 태풍의 근접강도를 산출하여 누적강수량 강도보정을 하였다. 두 번째로는 역학모델로 TC1515호 태풍에 대하여 예측한 진로와 강도 아웃풋으로 예측 실험을 하였다. 위 분석과 마찬가지로 근접강도로 강도에 대하여 보정을 하였고, 누적강수량을 산출하였다. 이에 대하여 각각 ASOS 누적강수량에 대한 관측 자료와의 RMSE와  $R^2$  을 비교하여 예측결과를 확인해 보았다.

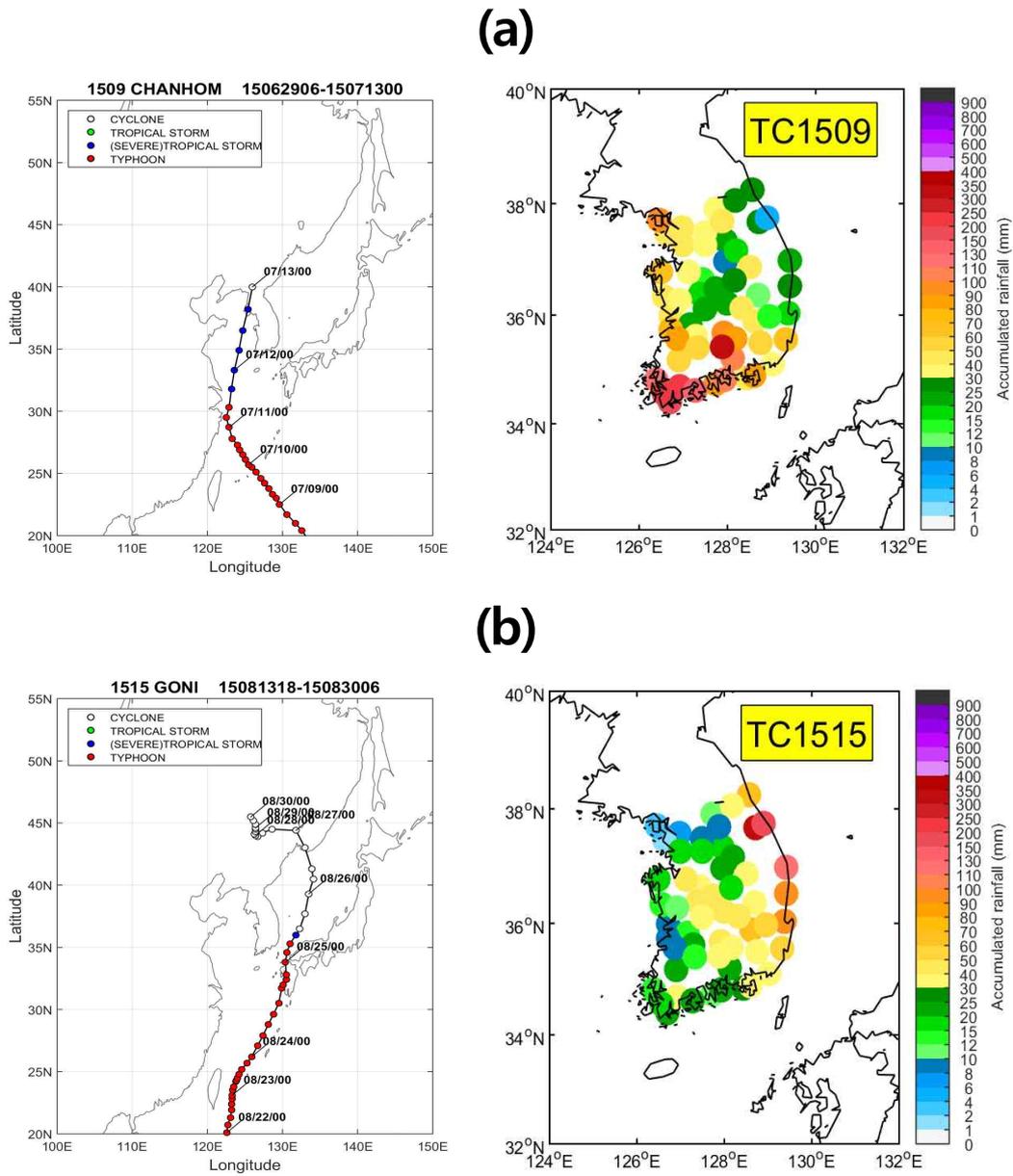


Fig. 19. Typhoon track (left) and map of ASOS observation typhoon-induced accumulated rainfall (right) for (a)TC1509, (b) TC1515.

모델 성능 실험을 위해 먼저, RSMC Tokyo에서 제공한 최적경로자료를 이용하여 두 개의 태풍에 대하여 예측실험을 하였다. 누적강수량에 대한 강도보정은 각 태풍이 북위 32도에 도달 했을 때의 근접 강도를 산출하였고, 보정 식을 사용하여 누적강수량 보정을 하였다. 먼저, 모델 구성에서 최적의 앙상블 개수로 선정된 16개의 각 태풍에 대하여 두 태풍에 대한 유사진로를 찾았다 (Fig. 20, Fig. 21).

Fig. 20은 태풍최적경로 자료에서 얻은 TC1509호에 대한 1위~16위까지의 유사진로를 보여준다. 대부분의 결과가 북위 32~40도 사이의 진로에 대하여 FCM방법에 의한 클러스터링이 제대로 유사진로를 찾은 것을 보여주고 있으며, 특히 유사진로 1위태풍인 2000년 12호 태풍과의 Membership coefficient는 0.3의 값을 보였다. 찾은 유사진로를 토대로 구성된 통계모델로 누적강수량을 예측하였다. 부록에서 TC1509와 1515태풍에 대하여 유사진로 태풍 16개를 찾은 것에 대한 각 순위별 강도 보정 후의 누적강수량에 대한 결과는 Fig. A. 1과 Fig. A. 2를 참고하면 된다. 이 태풍들이 앙상블 평균되어 최종 예측 값을 보여준다.

Fig. 22.(a)는 구성된 통계모델에 대한 TC1509호의 누적강수량 예측 결과를 보여준다. 분석 결과, 전라도 지역에서 관측 값보다 강수량을 적게 모의하긴 했지만, 대부분 지역별로 공간적인 분포가 관측 값과 비슷한 것을 확인할 수 있었다. 분석을 토대로 예측 결과에 대하여 관측 값과의 RMSE와  $R^2$  를 구해보았다. TC1509호 태풍에 대한 관측 값과의 RMSE는 33.2912mm의 값을 보였다.  $R^2$  또한 0.8048의 값을 보이며 ASOS 관측 누적강수량과 높은 상관도를 보였다 (Table 5).

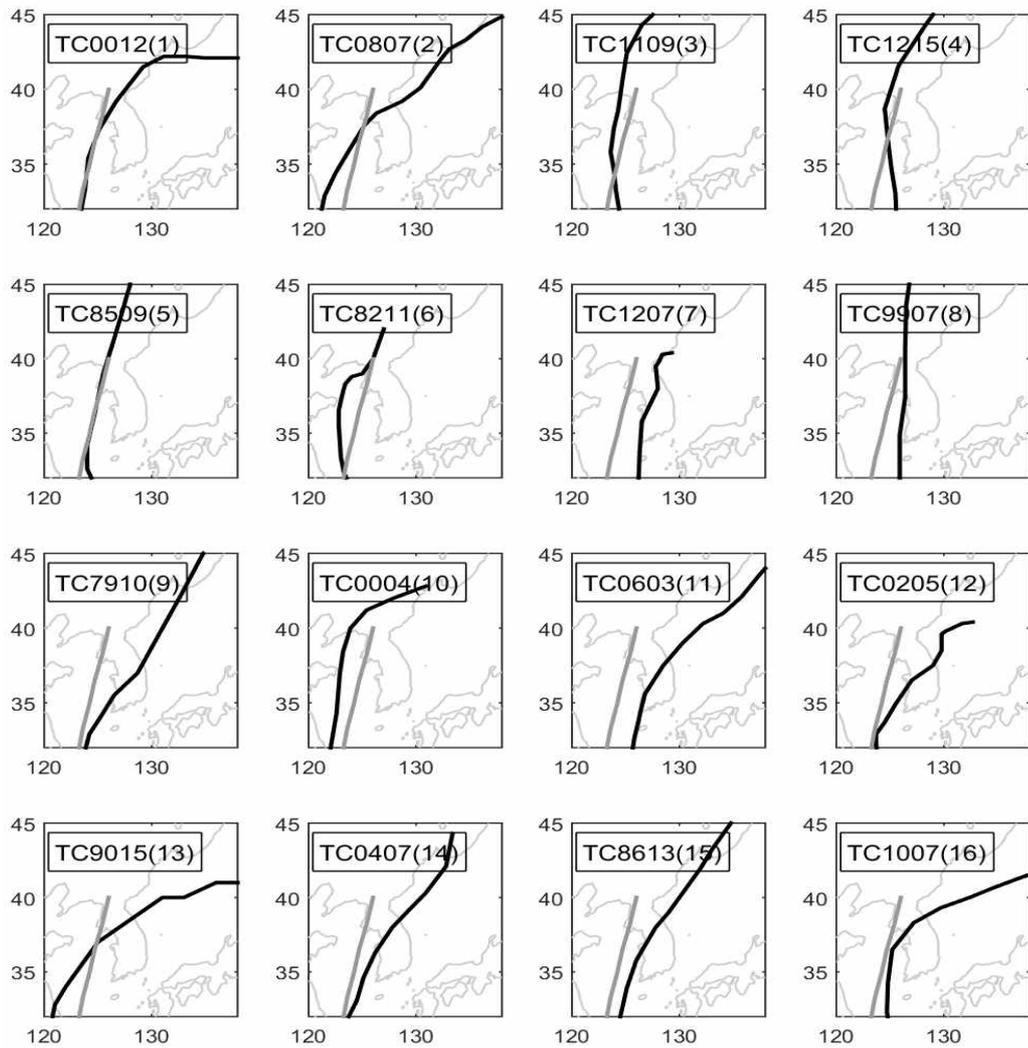
Fig. 21은 Fig. 20과 같은 방법의 분석으로 찾은 TC1515호와 유사진로 1위~16위까지의 태풍 진로를 보여준다. TC1509호와 마찬가지로 대부분이 FCM 방법에 의한 클러스터링이 제대로 유사진로를 찾았으며, 특히 1위와 2위 태풍이 TC1515호 태풍의 유사진로를 거의 잘 모의한 것을 보여준다. 특히 유사진로 1위태풍인 2000년 12호 태풍과의 Membership coefficient는 0.28의 값을 보였다. 이 유사진로들을 토대로 하여 구성된 통계모델로 누적강수량을 예측해 보았다. 그 결과, 전라도 지역에서 관측 값보다 강수량을 과대 모의하긴 했지만,

TC1509호 예측결과와 마찬가지로 대부분 지역별로 공간적인 분포는 거의 비슷한 것을 확인할 수 있었다(Fig. 22.(b)). 1515호 태풍의 예측 결과에 대하여 관측 값과의 RMSE와  $R^2$  를 구해보았다. 그 결과 태풍에 대한 관측 값과의 RMSE는 29.3218mm의 값을 모의하였다.  $R^2$  도 약 0.6의 값을 보였다 (Table 5).

RSMC Tokyo에서 제공하는 최적경로자료를 이용하여 2015년 09호 태풍과 15호 태풍의 예측결과를 종합하자면, 두 태풍 모두 관측 값과의 누적강수량의 오차 값이 약 30mm정도였고, 공간적인 분포가 관측 값과 유사한 것을 확인할 수 있었다.

$R^2$  또한 각각 0.8과 0.6의 값을 보였으며, 구성된 통계모델이 누적강수량을 대부분 잘 예측한 것을 확인할 수 있었다. 본 분석을 기반으로 실제 예측에 사용하기 위하여, TC1515호 태풍에 대한 역학모델의 12시간 간격 진로와 강도 아웃풋을 기반으로 구성된 통계모델에 대하여 누적강수량을 예측하였고 이를 관측 값과 비교하였다.

## TC1509



**Fig. 20.** The high-rank 16 (text in figure) similar tracks (black solid line) with RSMC Tokyo best track of TC1509 (gray solid line) using FCM.

# TC1515

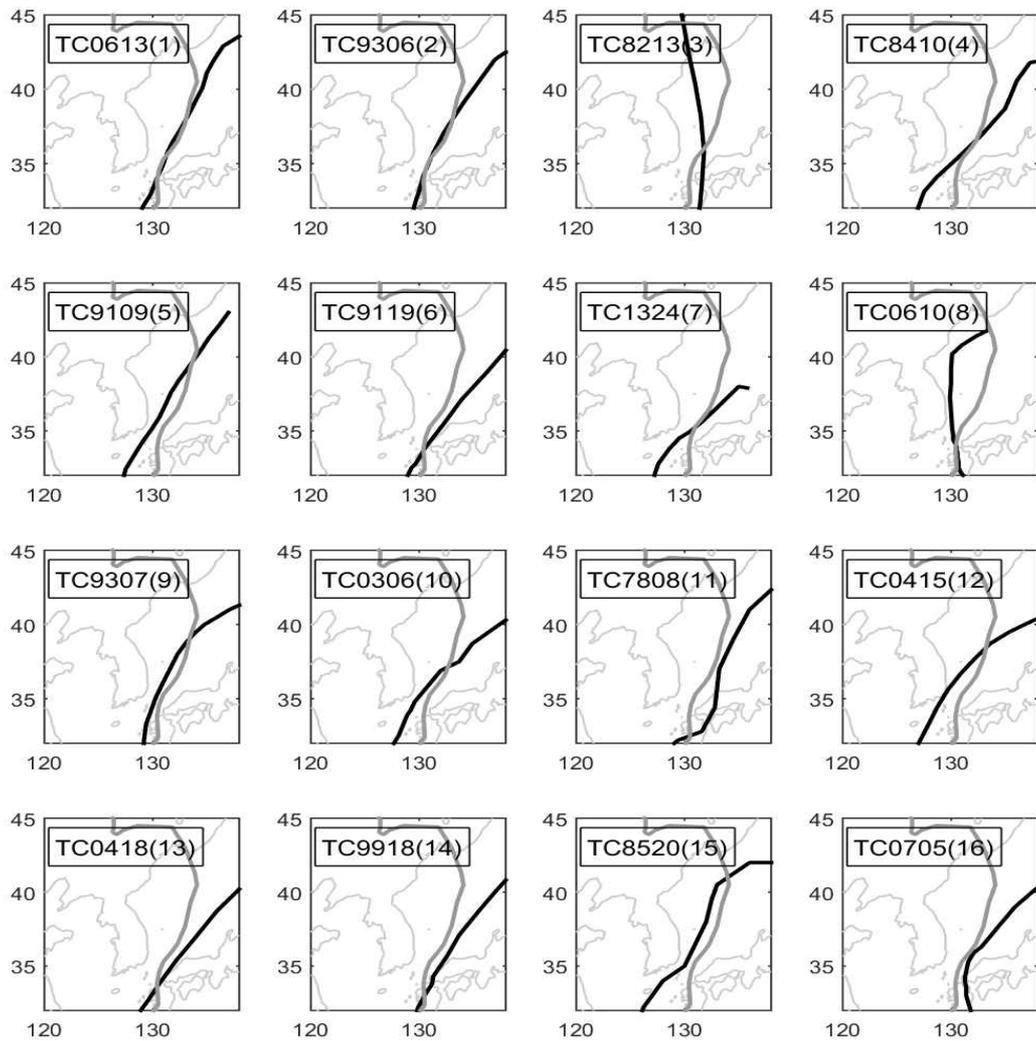
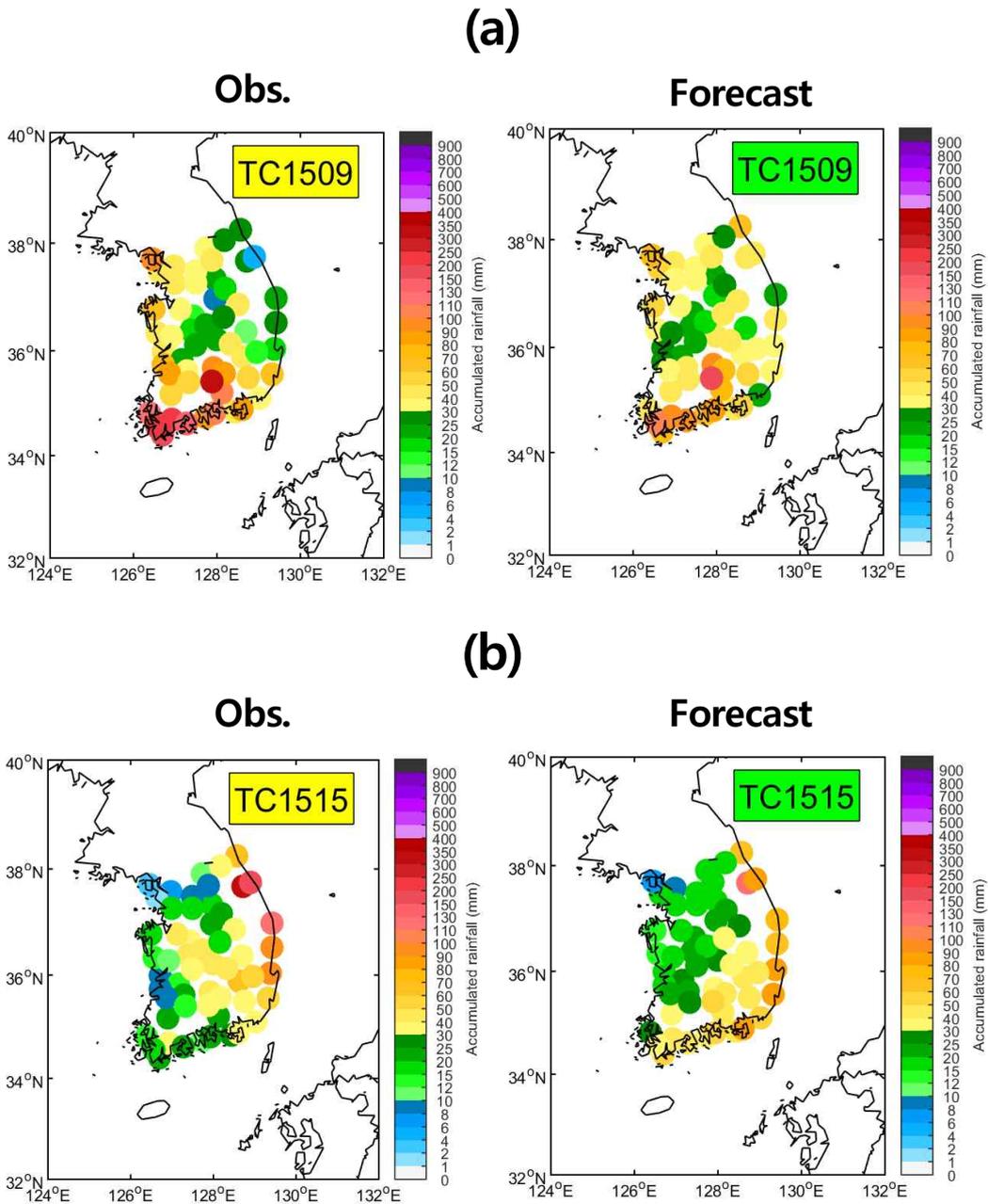


Fig. 21. Same as in Fig. 20 but for TC1515.



**Fig. 22.** Map of ASOS observation typhoon-induced accumulated rainfall (left) and the prediction results used in accumulated rainfall (right) statistical model based on RSMC Tokyo best track for (a)TC1509, (b)TC1515.

다음 분석으로, 실제 실시간 강수예측을 위한 TC1515호에 대하여 8월 20일 12시에서 8월 24일 12시까지 12시간마다 예측한 역학모델의 태풍진로와 강도 예측 아웃풋 결과를 클러스터링 진로예측과 누적강수량에 대한 강도 보정에 사용하였다. 예측한 진로에 대한 유사진로 클러스터링 결과는 부록에 Fig. A. 3을 참고하면 된다. Fig. A. 3.에서는 예측한 진로가 클러스터링 범위인 북위 40도까지 예측이 되지 않은 진로는 클러스터링 결과에서도 유사한 진로를 찾지 못하였다. 하지만 클러스터링 범위에 대하여 아웃풋 결과가 다 나온 예측결과들은 유사한 진로를 잘 찾고 있음을 그림에서 보여주고 있다. 특히 Fig. A. 3.(b)와 Fig. A. 3.(c)에서 유사진로를 제대로 잘 모의하고 있음을 보여주고 있으며, 이는 누적강수량을 예측하는데 큰 역할을 한다.

태풍최적경로 분석과 마찬가지로 누적강수량에 대한 강도보정은 위도 32도에 태풍진로가 접근하였을 때 그 시점의 근접강도를 구하여 보정하였다. 그 후 각 예측시간별로 진로와 강도가 다르기 때문에 각각 누적강수량을 예측하였고, 관측 누적강수량과의 RMSE와  $R^2$  를 비교하였다.

Fig. 23은 수치모델 아웃풋결과와 태풍최적경로 자료와의 진로 차이와 예측한 누적강수량을 나타낸다. 분석 결과, TC1515호의 예측 초기인 8월 20일 12시 예측 결과는 56.25mm RMSE값을 보였으며(Table 4), 상관도가 0.0625의 매우 낮은 값을 보였다. 이는 강도보정을 하는데 있어서 수치모델 근접강도 예측결과가 0.1knot로 불안정한 값을 보였으며, 태풍 진로예측 또한 실제 진로와 221.54 km의 진로오차 값을 보였다. 이러한 클러스터링의 불안정으로 유사진로를 제대로 찾기 못했기 때문에 이러한 결과가 나온 것으로 보인다(Fig. 23.(a)).

8월 21일 00시 예측부터는 수치모델로 태풍진로와 강도가 제대로 모의되면서 강도가 48.1knot로 안정된 예측결과를 보여주었고, 12시간 전 예측결과보다 진로오차가 줄어 든 105.58km의 값을 보이며 이전에 비해 유사진로를 비슷하게 모의하였다(Table 5). 또한 RMSE가 35.18mm로 이전 값에 비해서 오차 값이 많이 줄어든 모습을 보였으며,  $R^2$  값 또한 0.52의 값을 보이며 앞의 결과에 비해 크게 개선되었다(Fig. 23.(b), Table 4).

8월 21일 12시 예측부터는 진로가 전체 클러스터링 범위까지 예측이 가능하도록 예측 아웃풋이 제공 되었고, 강도 또한 46.24knot로 안정된 값을 보여주었

다. 그 결과, 12시간 전보다 5mm정도 개선된 30.6275mm의 관측 누적강수량과의 RMSE값을 보였으며,  $R^2$  또한 0.56의 값을 보였다(Fig. 23.(c), Table 4, Table 5). 하지만, 실제 진로보다 모델 예측결과가 우리나라에서 더 멀리 떨어져 있는 결과를 보이며, 관측 값보다 충청도 지역에서 누적강수량이 약간 과소 모의되는 경향을 보였지만, 전체적인 공간분포는 비슷하게 예측하였다(Fig. 22(b)).

8월 22일 00시에는 RMSE값과  $R^2$  가 28.47mm과 0.61의 결과를 보이며, 예측 결과 중에서 가장 좋은 결과를 보였다. (Fig. 23.(d), Table 4, Table 5). 12시간 전 예측보다 실제 진로와 비슷하게 모의했기 때문에, RMSE와  $R^2$  가 개선됨을 확인할 수 있었다.

Fig. 23.(e)에서 보여준 8월 22일 12시 예측 결과를 보면, 이전의 예측보다 위도 34도 이후에 모델 예측과 실제 진로가 많이 차이나는 것을 확인할 수 있었으며, 이전의 예측 값보다 높은 RMSE값과 낮은 상관도를 보인 것을 확인할 수 있었다(Table 4). 하지만, 여전히 전체적인 공간분포는 관측 누적강수량과 유사한 것을 알 수 있었다.

Fig. 23.(f)는 08월 23일 00시에 대한 예측 결과를 보여준다. 12시간 전 예측과 비슷하게 모델예측진로가 실제진로에 비해 우리나라로 많이 가까이 예측한 것을 보여주고 있으며, 이러한 영향으로 관측누적강수량에 비해 예측 누적강수량 결과가 다른 결과들에 비해 과대 모의되어 RMSE가 48.62의 값을 보인 것을 알 수 있었다. 08월 23일 12시 예측은 모델예측결과가 진로를 다 예측 하지 못했고, 이러한 결과가 클러스터링 분석을 하는데 진로를 제대로 찾지 못했기 때문에, 강원도 지역에서 관측 값에 비해 과소 모의 된 것을 알 수 있었다.

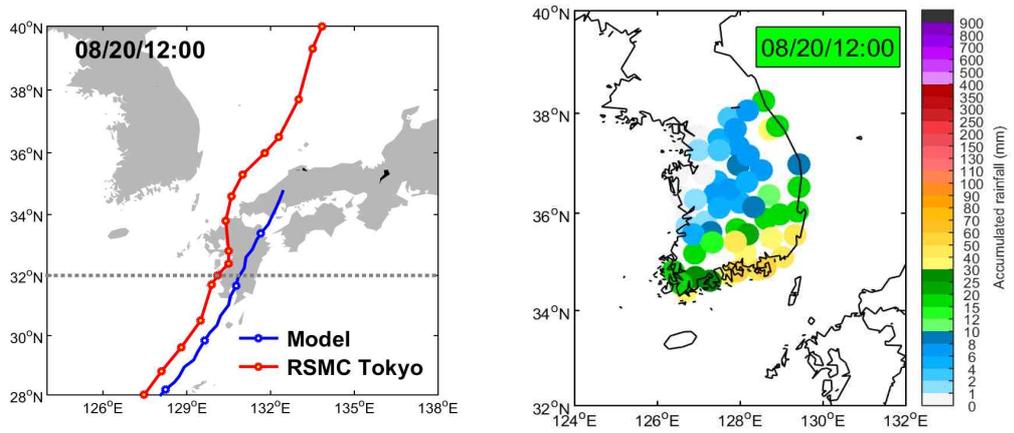
하지만 8월 24일 00시 예측과 12시 예측에서 다시 진로와 강도의 안정을 찾아 누적강수량을 예측하기 위한 유사진로 선정과 강도보정을 제대로 할 수 있었고, RMSE값은 각각 33.08mm와 30.65mm로 앞선 결과보다 낮아진 오차 값을 모의하였다.  $R^2$  값 또한 0.56의 결과를 보이며 12시간 전보다 관측 값과의 누적강수량 상관도가 훨씬 개선된 결과를 보여주었다 (Fig. 23.(h)~(i), Table 4, Table 5). 특히 8월 24일 00시보다는 12시 예측이 실제 진로와 더 가까운 것을 알 수 있었으며, 이는 RMSE값에서 30.65mm로 앞선 분석보다 3mm 줄어든

값을 보였다.

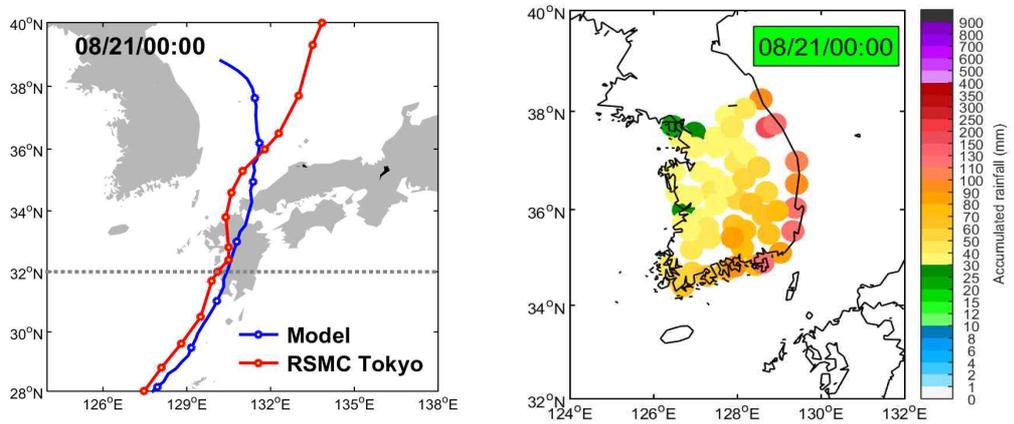
Fig.24는 Fig.23(e)의 결과에 대해 강도 보정을 하기 전과 후에 대하여 비교 분석한 그림이다. Fig.24(a)는 08월 22일 12시 예측결과에 대하여 강도를 보정하기 전의 누적강수량 예측 값을 보여준다. Fig.23(e)에서도 나타나듯이 실제 진로에 비해 모델 예측결과가 한반도의 서해안으로 더 근접하게 예측한 것을 알 수 있다. 그러기 때문에 강도 보정 전에는 충청도 지역의 대부분이 50~60mm의 값을 보이며, 실제 관측 값보다 과대 모의한 것을 알 수 있다(Fig.19(b)). 그러나 Fig.24(b)에서 강도 보정을 한 후에, 전체적인 강수 공간분포가 실제 관측 값과 강도 보정 전에 비해 유사해진 것을 확인 할 수 있었다. 관측 값과의 RMSE도 강도 보정 전에는 40.35mm의 값을 보였으나, 강도 보정 후에 30.33mm로 10mm 감소한 값을 보였으며,  $R^2$  도 0.48에서 0.53으로 개선된 결과 값을 보여주었다.

본 연구에서는 수치모델 태풍진로와 강도 예측결과를 통해 구성된 통계모델을 이용하여 누적강수량 예측실험을 하였다. 수치모델 아웃풋의 강도와 진로가 제대로 예측된 경우, 관측 값과의 RMSE가 적은 오차 값을 보이는 것을 확인할 수 있었고,  $R^2$  또한 높은 값을 보였다. 하지만 진로가 제대로 예측이 되지 못해 진로오차가 컸거나, 강도가 다소 적게 모의 되는 경우는 클러스터링 결과에 대해 유사진로를 제대로 찾지 못했기 때문에 RMSE값이 이전 값에 비해 많이 커진 것을 확인할 수 있었고,  $R^2$  또한 이전 값에 비해 낮은 값을 보였다. 각 결과에 대한 RMSE,  $R^2$  그리고 근접강도와 진로오차에 대한 내용은 Table 4와 5에 자세히 기재되어 있다. Table 4와 5에서도 보여주듯이 진로모의에 결과에 따라 누적강수량을 모의하는 데 있어서 RMSE와  $R^2$  값의 결과를 좌우한다는 것을 확인 할 수 있었다.

(a)



(b)



(c)

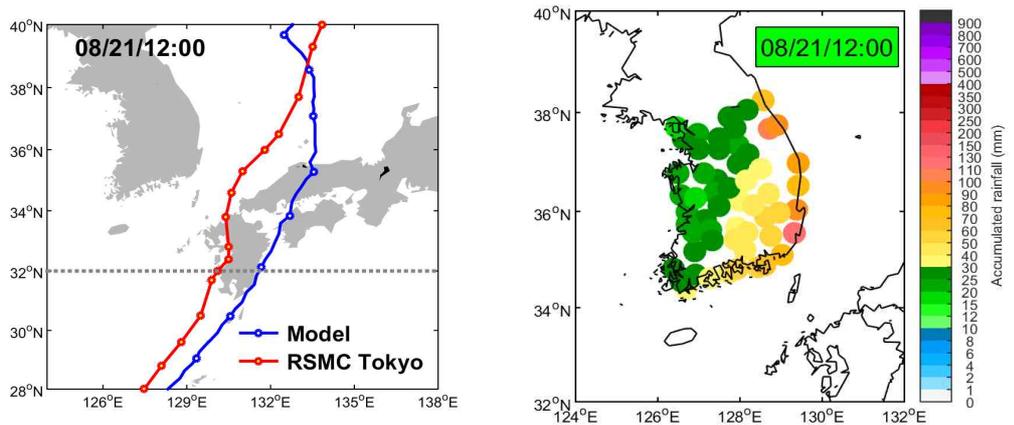
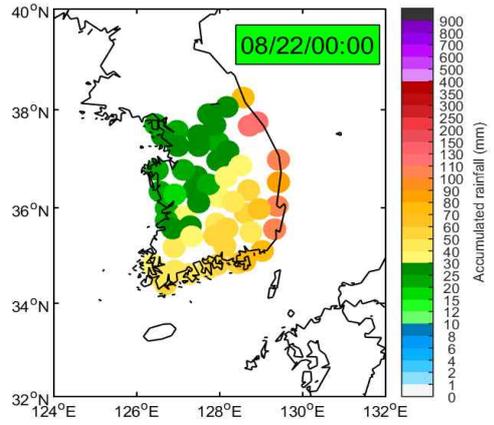
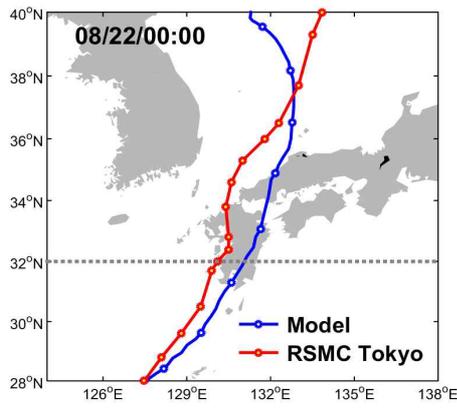
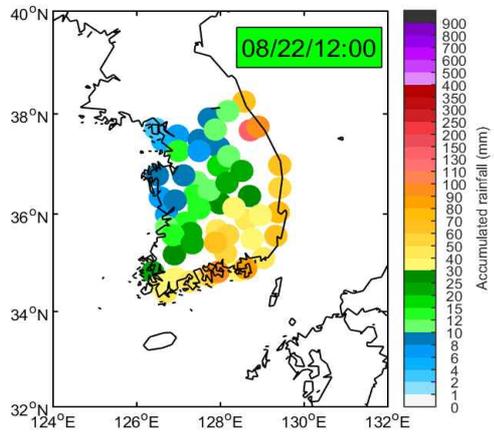
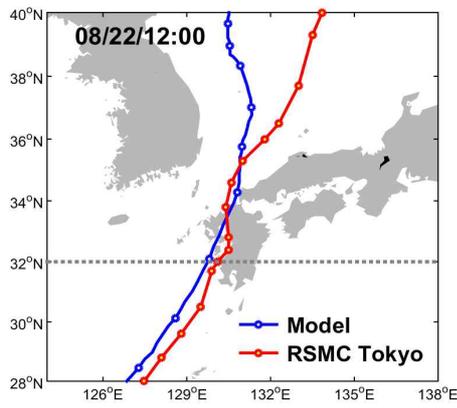


Fig. 23. WRF model output and RSMC Tokyo best track (left) and prediction rainfall (right) by TAR statistical model of (a)~(i) 1200UTC 20 Aug 2015~1200UTC 24 Aug 2015 [prediction intervals of 12 hourly] for TC1515.

(d)



(e)



(f)

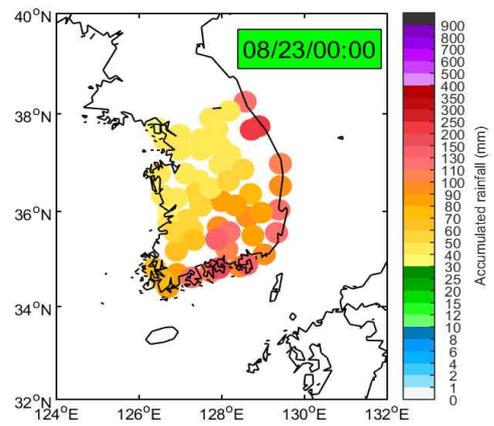
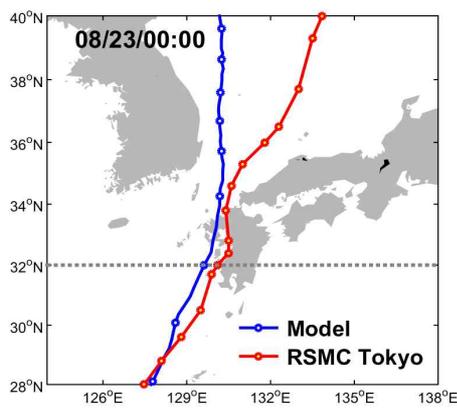
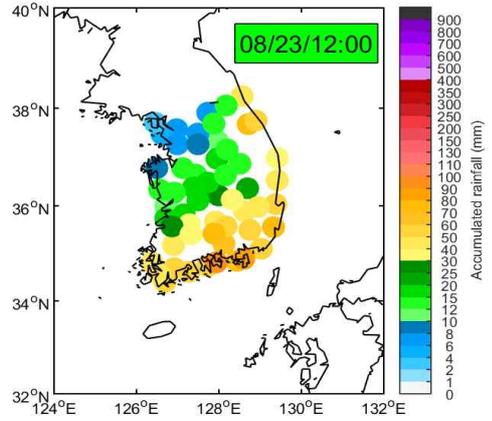
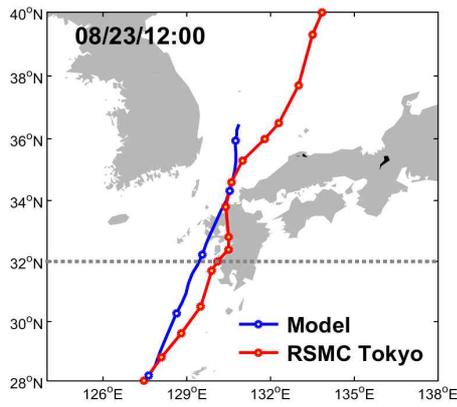
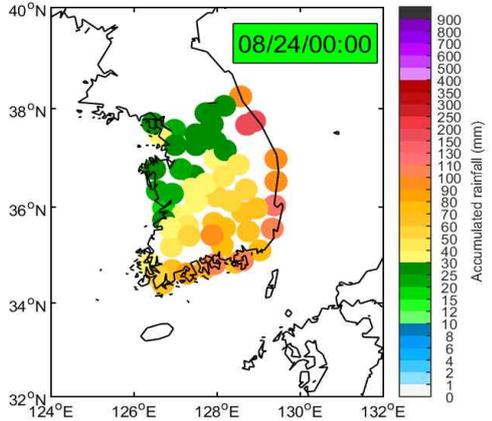
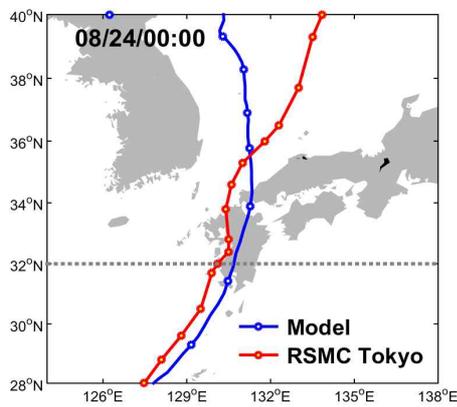


Fig. 23. Continued.

(g)



(h)



(i)

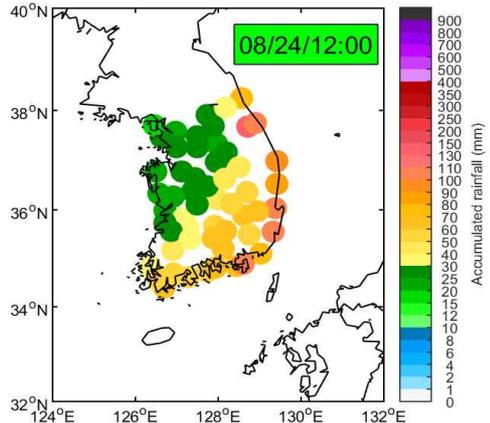
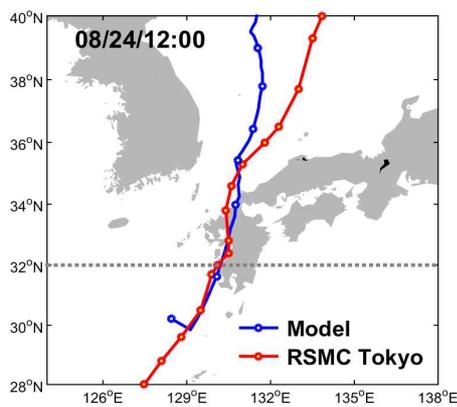


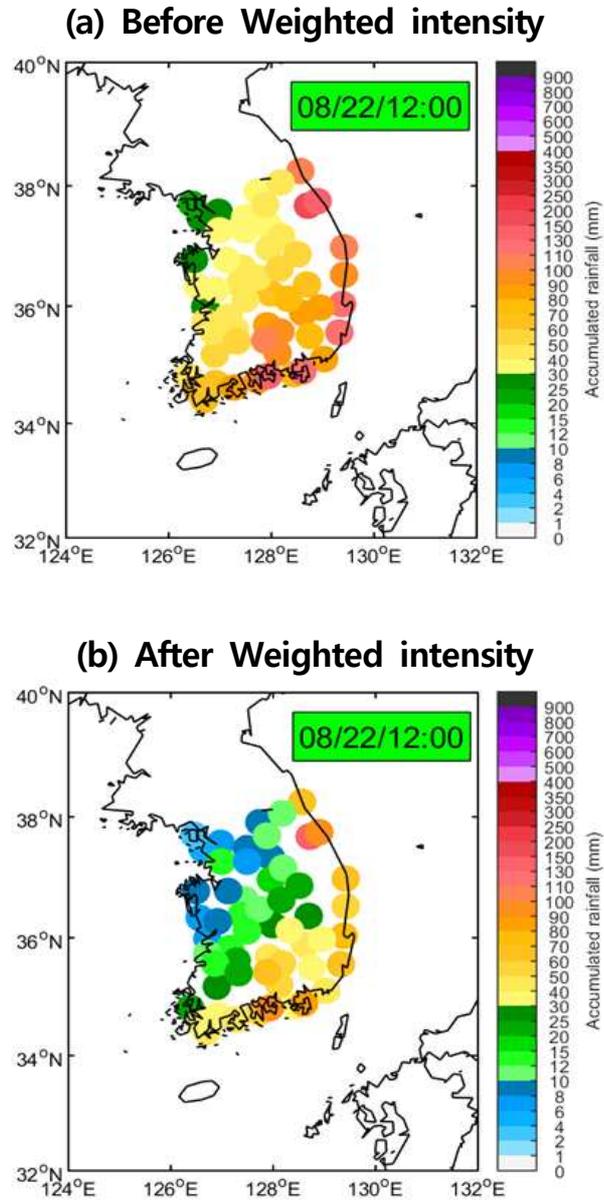
Fig. 23. Continued.

**Table 4.** The hindcast and forecast results for TC1509 and 1515 of developed statistical model in this study.

TC	Forecast time	RMSE(mm)	R <sup>2</sup>
hindcast	1509	33.29	0.80
(RSMC Tokyo)	1515	29.32	0.59
	(a) 08/20/12:00	47.00	0.04
	(b) 08/21/00:00	35.18	0.52
	(c) 08/21/12:00	30.09	0.56
Forecast	(d) 08/22/00:00	28.47	0.61
(Numerical	1515	30.33	0.53
model output)	(e) 08/22/12:00	30.33	0.53
	(f) 08/23/00:00	48.62	0.46
	(g) 08/23/12:00	40.16	0.14
	(h) 08/24/00:00	33.08	0.56
	(i) 08/24/12:00	30.65	0.56

**Table 5.** Same as in Table 4 but for Approach intensity and Track error of between hindcast and forecast track.

TC	Forecast time	Intensity (Knot)	Track error (km)
hindcast	1509	59.1667	–
(RSMC Tokyo)	1515	85	–
	(a) 08/20/12:00	0.1	221.54
	(b) 08/21/00:00	48.1	105.58
	(c) 08/21/12:00	46.24	154.72
Forecast	(d) 08/22/00:00	46.4	99.46
(Numerical	1515	3.29	132.47
model output)	(e) 08/22/12:00	3.29	132.47
	(f) 08/23/00:00	50.62	167.42
	(g) 08/23/12:00	1.54	75.12
	(h) 08/24/00:00	41.97	134.25
	(i) 08/24/12:00	42.28	83.99



**Fig. 24.** The TAR prediction of WRF output (track, intensity) using TAR statistical model. (a) Before and, (b) After weighted intensity of 1200UTC 22 Aug 2015 for TC1515.

## V. 요약 및 결론

본 연구에서는 91개의 과거 한반도 영향태풍(1977~2014년)의 진로, 강도, 강수량 정보를 이용하여 한반도 영향 태풍의 누적강수량 예측통계모델을 개발하였다. 이 모델은 예측하고자 하는 태풍과 가장 유사한 진로를 가진 과거 태풍들을 선택하고, 이들 태풍이 과거에 기록한 누적강수량 정보를 통계 분석하여 한반도에 내릴 수 있는 누적강수량을 예측한다. 예측모델의 구성을 위해 먼저 모든 한반도 영향 태풍에 대해 일기도 및 위성사진 분석을 통해 태풍에 의한 강수기간을 설정하였고 이를 바탕으로 각 태풍별로 56개의 기상관측소(ASOS) 지점에 대한 누적강수량 산출하였다. 유사진로 태풍은 태풍에 의한 강수가 주로 시작되는 범위( $32-40^{\circ}$  N,  $120-138^{\circ}$  E)에 대해 Fuzzy-c Means (FCM) 기반의 클러스터링 방법을 이용하여 유사성이 높은 순서대로 선정되었다. 이렇게 선정된 태풍들은 비록 진로는 유사하지만 태풍의 강도는 실제 태풍과 다를 수 있고, 이에 따른 강수량의 예측도 오차가 커질 수 있다. 이를 보완하기 위하여 본 연구에서는 과거 자료를 이용하여 태풍강도와 누적강수량 사이에 관계식을 구하고, 이를 이용하여 유사태풍 기반으로 구해진 누적강수량을 보정하여 사용하였다. 이와 같은 방법으로 91개의 한반도 영향 태풍에 대해 56개 지점의 누적강수량을 모의해 본 결과, 평균적으로 과거 진로가 가장 유사했던 태풍들의 오차가 상대적으로 낮았다. 또한 유사한 진로를 가진 태풍을 앙상블 평균하여 누적강수량을 구할 경우 오차는 더욱 줄어드는 것을 발견하였다. 실제로 91개 태풍에 대해 앙상블 개수를 증가하며 실험을 해 본 결과, 앙상블 평균을 상위 16위까지 유사진로 태풍을 사용하였을 때 가장 적은 강수 오차 값을 보였다.

본 연구에서 개발한 유사진로 기반 한반도 영향 태풍 누적강수량 통계예측모델(강도보정과 16개 앙상블 평균 사용)을 2015년 한반도 영향 태풍 찬홈(1509)과 고니(1515)에 적용하여 그 정확도를 평가 하였다. 먼저 최적경로 자료를 사용하여 태풍의 예측 정보가 정확했다고 가정하고 두 태풍의 누적강수량을 예측해 보았다. 그 결과, 두 태풍의 오차(RMSE)는 각각 33.3mm와

29.3mm 그리고 상관도( $R^2$ )는 0.8과 0.59를 보였다. 다음으로 실제로 예측된 태풍의 이동경로와 강도 자료들을 사용하여 태풍 고니의 누적강수량을 추정하였다. 이 경우 예측된 태풍의 진로와 강도에 오차가 커질수록 누적강수량의 오차도 함께 커지는 경향이 보였다. 9번의 예측실험에서 나타난 RMSE 범위는 28.5~48.6mm 였고 평균은 35.9mm로 나타났다. 가장 좋은 결과는 8월 22일 00시에 예측결과( $R^2=0.61$ , RMSE=28.5mm)에서 나타났다.

본 연구에서 개발된 통계모델은 역학모델에 비해 시공간적인 해상도가 낮아 언제 어디서 얼마만큼의 강수가 내일 것인가에 대한 자세한 정보는 주지 못한다. 그러나 역학모델의 경우 일반적으로 진로 예측오차가 클 경우, 그 오차만큼 강수량 예측결과도 매우 좋지 않은 것에 비해, 이미 진로오차가 포함된 유사태풍들 정보를 바탕으로 구성된 현재의 누적강수량 통계예측모델은 진로오차에 상대적으로 덜 민감한 장점이 있다.

여름철에 강수가 집중되는 우리나라는 태풍에 의한 강수가 많은 부분을 차지하고 있고, 특히 태풍은 주로 여름 강수가 끝나는 시점(즉 댐의 강수 확보가 최대인 상태)에 한반도에 도달되는 경우가 많아, 본 연구에서 개발된 태풍 시기 누적강수량 예측은 역학 모델의 결과와 함께 매우 중요하다. 이는 수자원 확보와 홍수조절에 크게 활용도가 높을 것을 사료된다.

## 참고문헌

- 고성원, 차은정, 원성희, 양경조, 임명순, 김동호, 2009: 태풍 위치에 의한 한반도 강수량 분포 연구, *한국기상학회 봄 학술대회 논문집*, 2009(4), 12-13.
- 김옥연, 김태국, 오재호, 2002: 중규모 수치모형의 앙상블 기법을 이용한 태풍 ‘루사’의 트랙 모의. *대기*, 12(3), 610-613.
- 김정희, 김태훈, 오재호, Kazuhisa Tsuboki, 2003: 2002년 태풍 ‘루사’의 강수량 수치모의, *대기*, 13(1), 440-441.
- 송혜진, 허창희, 2003: 태풍이 한반도 여름철 2차 우기 발생에 끼치는 영향에 관한 연구, *대기*, 13(1), 362-365.
- 이승욱, 최광용, 2013: 태풍 내습 시 남한의 극한강수현상의 시, 공간적 패턴, *한국지역지리학회지*, 19(3), 384-400.
- 황호성, 차은정, 고성원, 양경조, 원성희, 김동호, 2008: 한반도 영향태풍 진로와 강수분포특징에 관한연구, *Journal of Kosham*, 8, 49-54.
- Cha. E. J., Y. H. Park, H. J. Kwon, 2008: Characteristics of tropical cyclones over the western North Pacific in 2007, *Atmosphere*, 18(3), 183-197.
- Choi. E. S. and I. J. Moon, 2008: The Variation of Extreme Values in the Precipitation and Wind Speed during 56 Years in Korea, *Atmosphere*, 18(4), 397-416.
- Hwang. H. S., H. R. Byun, S. M. Lee, K. S. Choi, and J. S. Lee, 2010: Distribution of Precipitation on the Korean Peninsula Associated with the Weakening of Tropical Cyclones, *Jour. Korean Earth Science Society*, 31(4), 322-334.
- Jeong. Y. Y, I. J. Moon, S. H. Kim, 2013: A Study on Upper Ocean Response to Typhoon Ewiniar (0603) and Its Impact, *Atmosphere*, 23(2), 205-220.

- Kim. H. S, J. H. Kim, C. H. Ho, and P. S. Chu, 2011: Pattern Classification of Typhoon Tracks Using the Fuzzy c-Means Clustering Method., *J. Climate*, **24**, 488-508.
- Kim. J. H., C. H. Ho, M. H. Lee, J. H. Jeong, and D. Chen, 2006: Large increase in heavy rainfall associated with tropical cyclone landfalls in Korea after the late 1970s, *Geophysical Research Letters*, **33**, 1-5.
- Kim. J. Y., and K. H. Seo, 2014: The Development of Ensemble Statistical Prediction Model for Changma Precipitation, *Atmosphere*, **24(4)**, 533-540.
- Lee. D. K., D. E. Jang, T. K. Wee, 1992: Typhoons Approaching Korea, 1960-1989 Part I: Statistics and Synoptic Overview, *Atmosphere*, **28(2)**, 133-148.
- Lee. S. E., and K. H. Seo, 2013: The Development of a Statistical Forecast Model for Changma, *Wea. Forecasting*, **28**, 1304-1321.
- Lim. E. H., T. Y. Lee, 1994: Two-Dimensional Numerical Study of the Terrain Effects on the Development of Cloud and Precipitation for the Middle Part of Korea, *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, **30(4)**, 565-582.
- Lin. I. I., C. C. Wu, and I. F. Pun, Upper-Ocean Thermal Structure and the Western North Pacific Category 5 Typhoons. Part I: Ocean Features and the Category 5 Typhoons' Intensification, *Mon. Wea. Rev.*, **136**, 3288-3306.
- Park. J. S., H. S. Kang, Y. S. Lee, and M. K. Lee, 2011: Changes in the extreme daily rainfall in South Korea, *International Journal of Climatology*, **31**, 2290-2299.

# 부 록

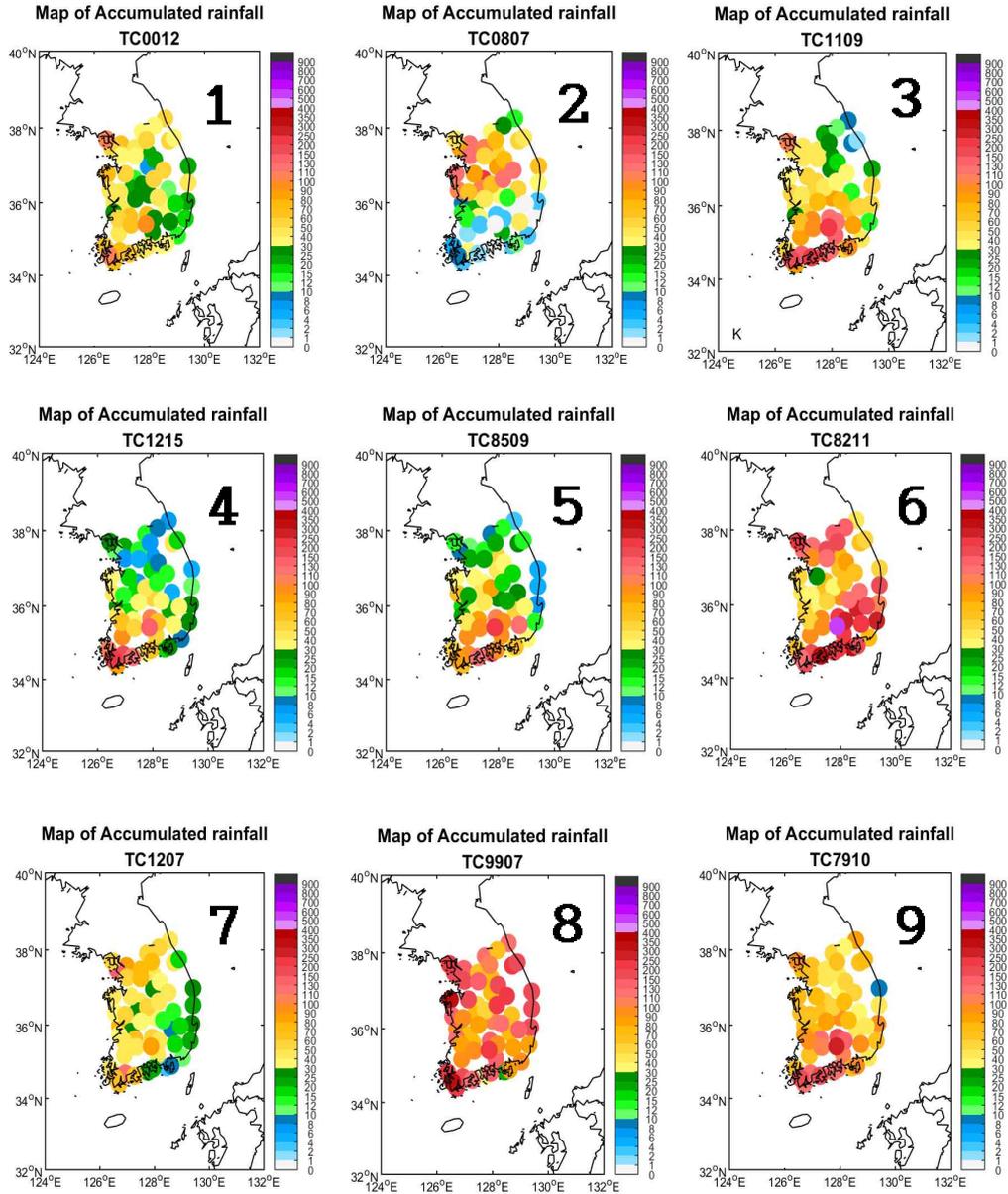


Fig. A. 1. Map of the high-rank 16 (text in figure) similar tracks correction TAR (after weighted) with RSMC Tokyo best track of TC1509.

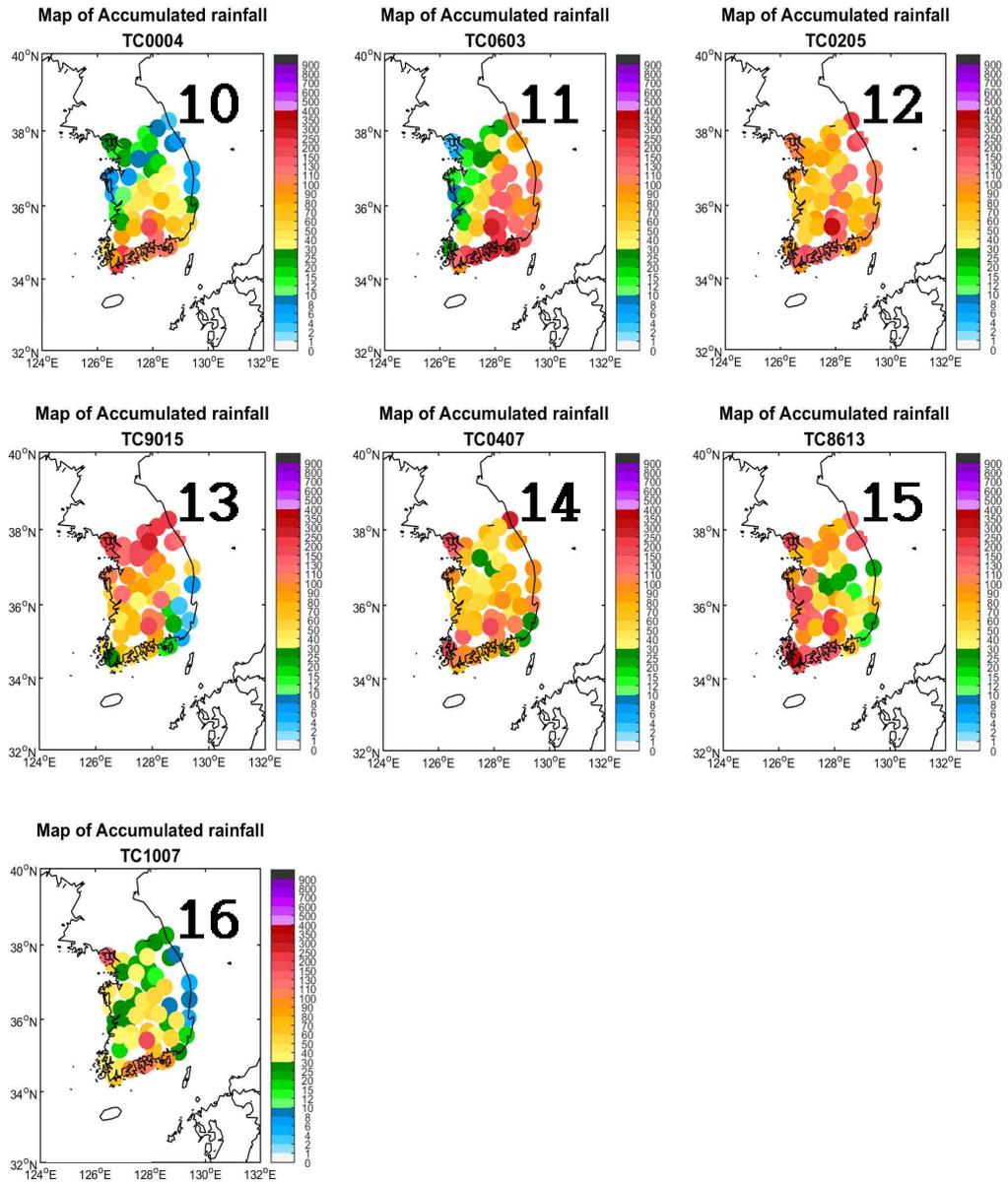


Fig. A. 1. Continued.

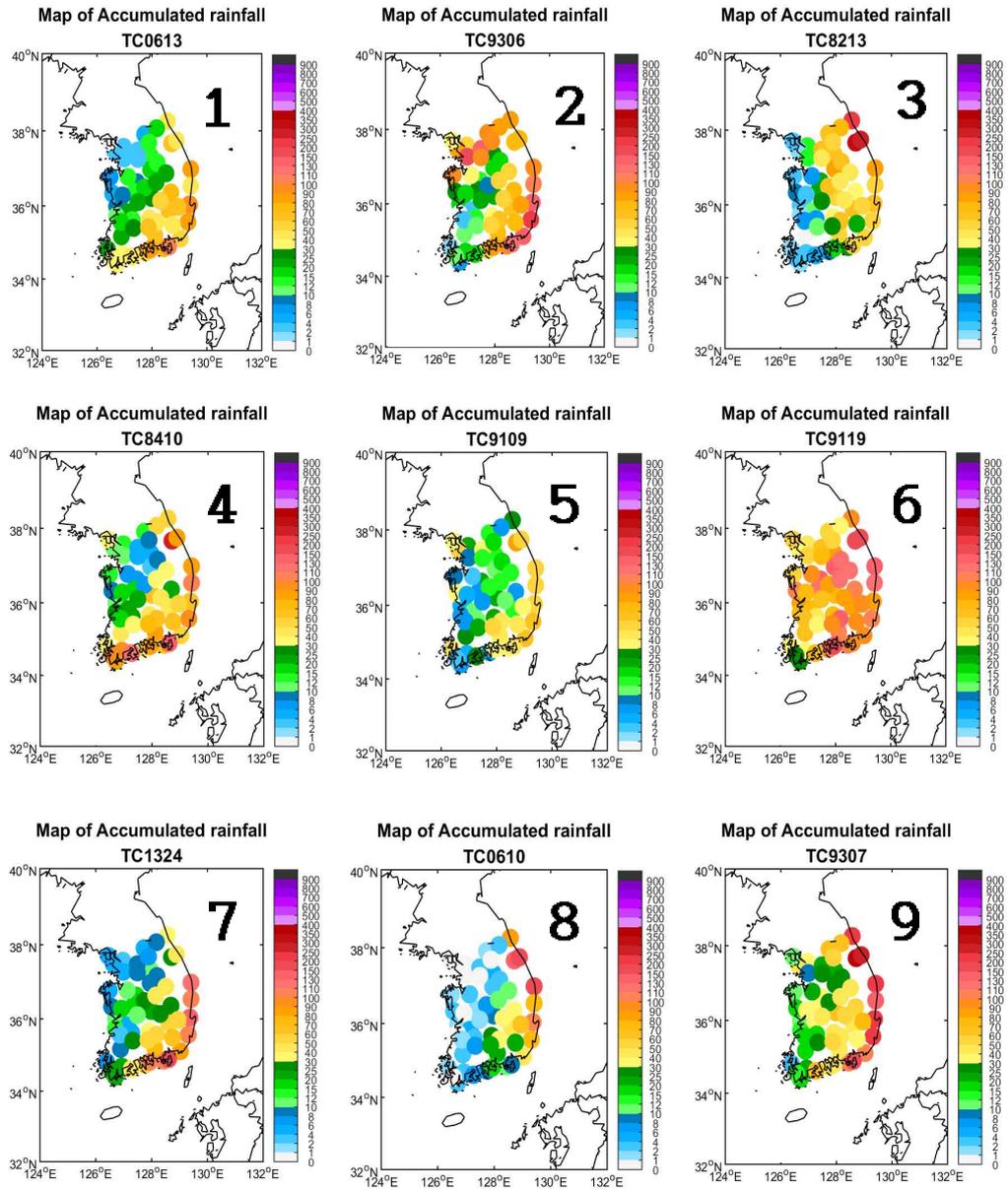


Fig. A. 2. Same as in Fig. A. 1 but for TC1515.

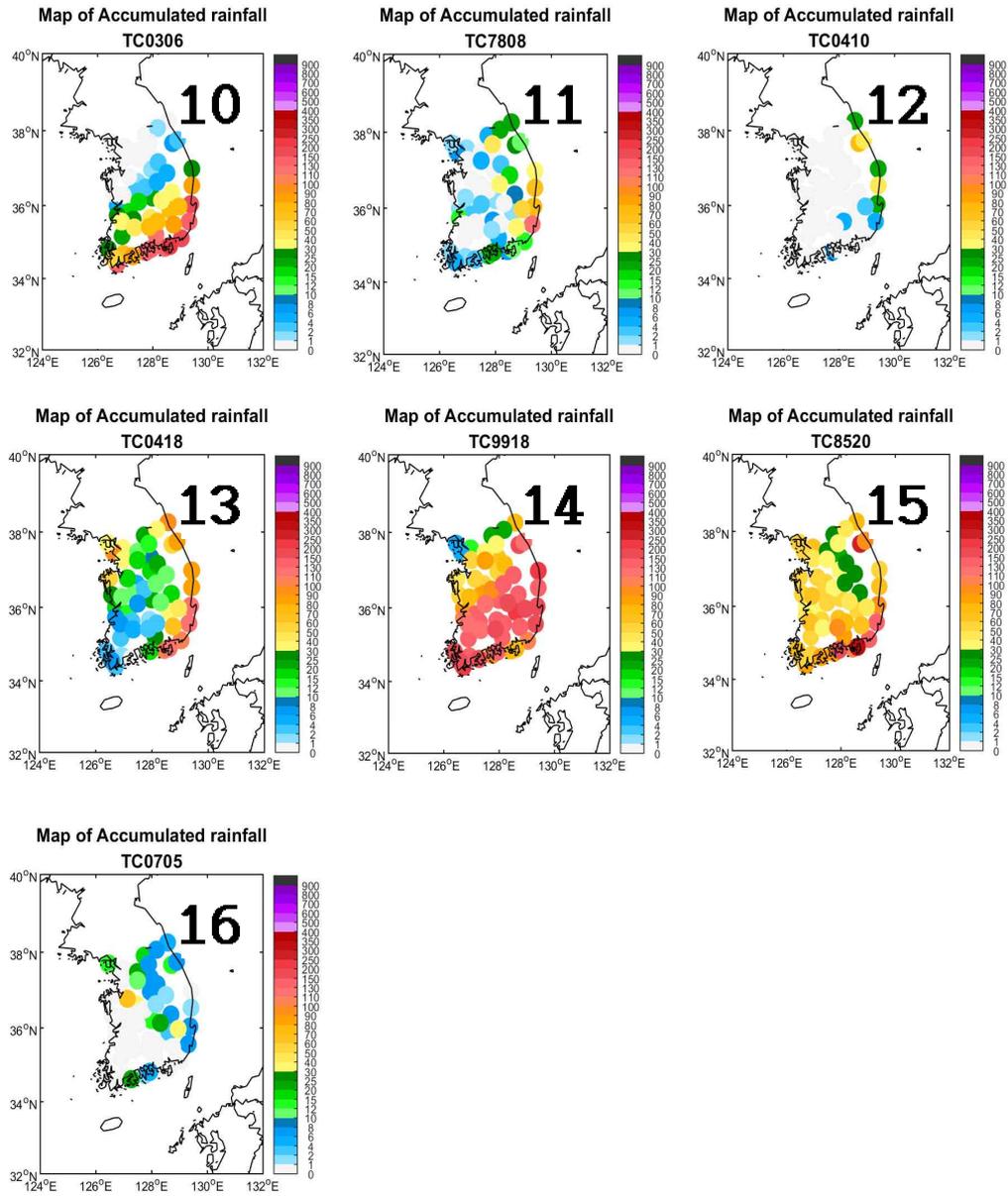


Fig. A. 2. Continued.

(a) 08/20/12:00

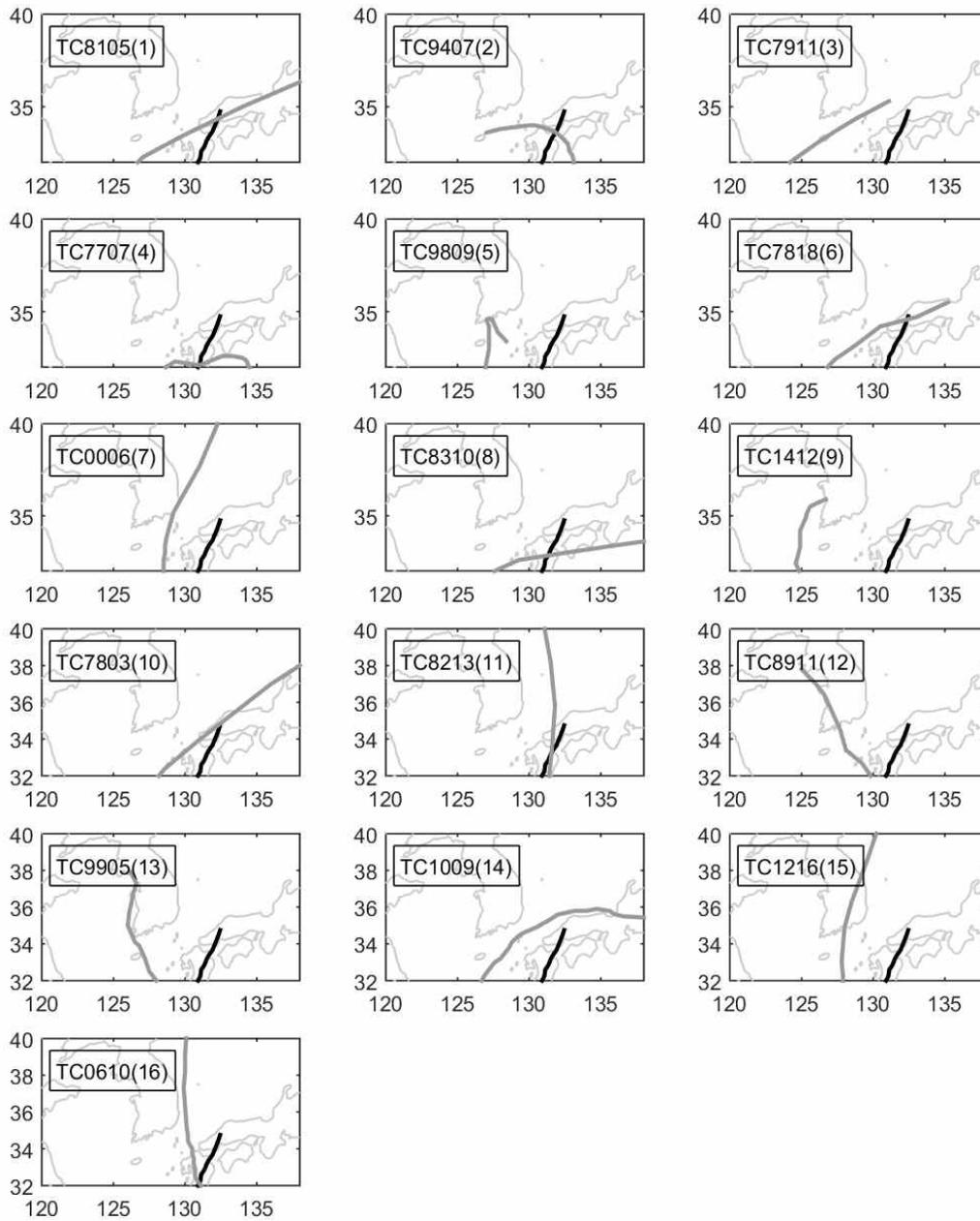


Fig. A. 3. The high-rank 16(text in figure) similar tracks(black solid line) with WRF-forecast track of TC1515 (gray solid line) using FCM. (a)~(i) 1200UTC 20 Aug 2015~1200UTC 24 Aug 2015 [prediction intervals of 12 hourly].

**(b) 08/21/00:00**

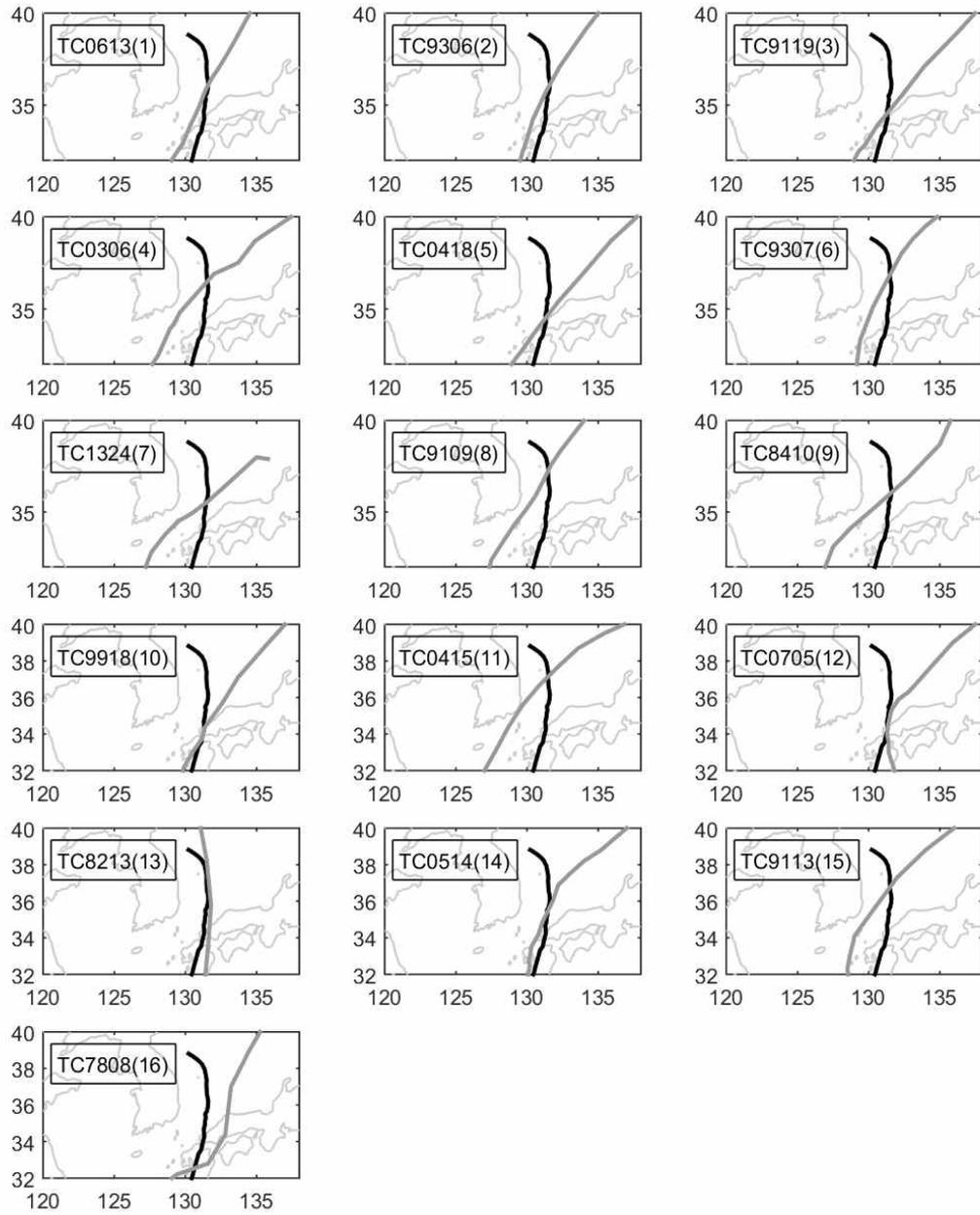


Fig. A. 3. Continued.

(c) 08/21/12:00

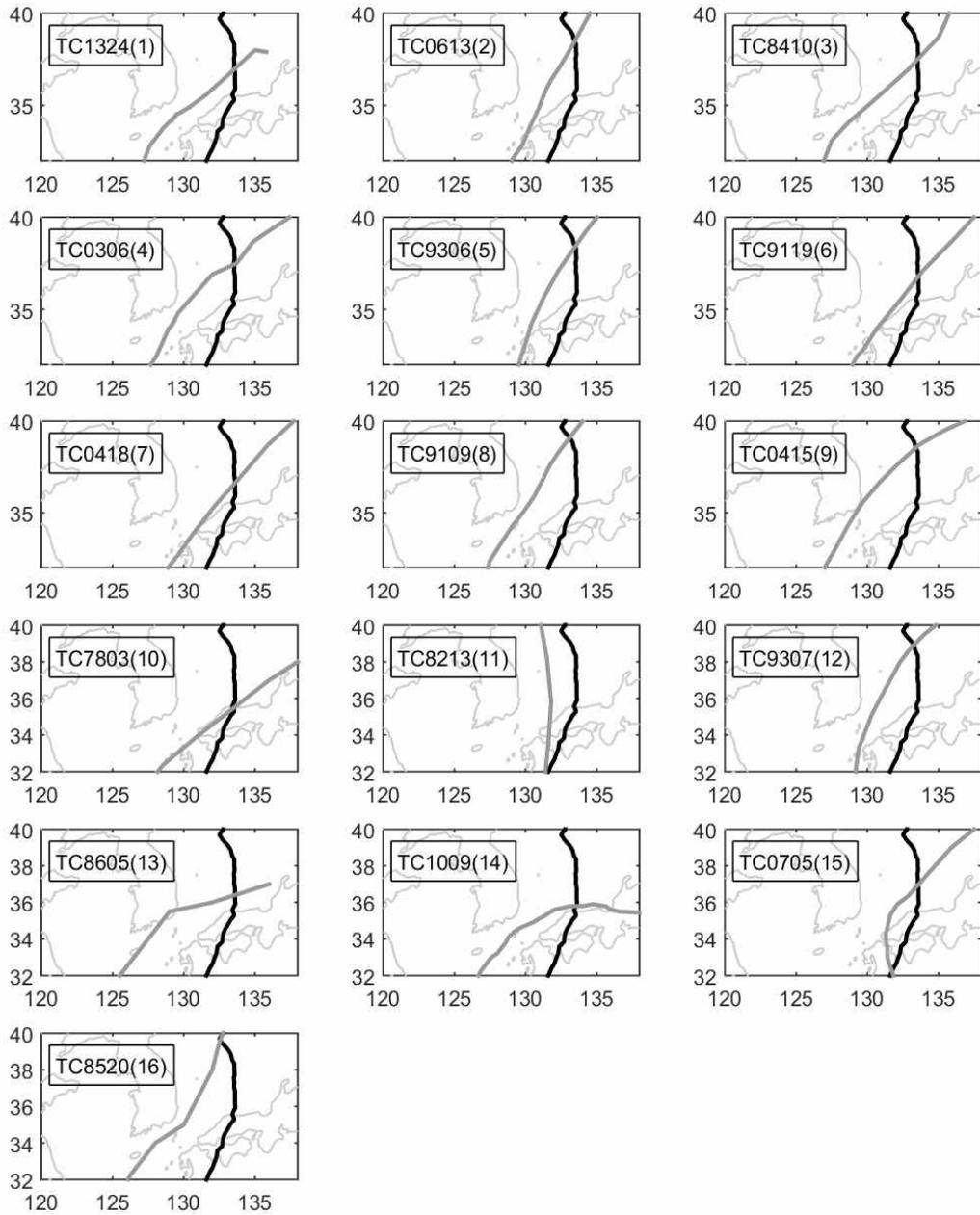


Fig. A. 3. Continued.

(d) 08/22/00:00

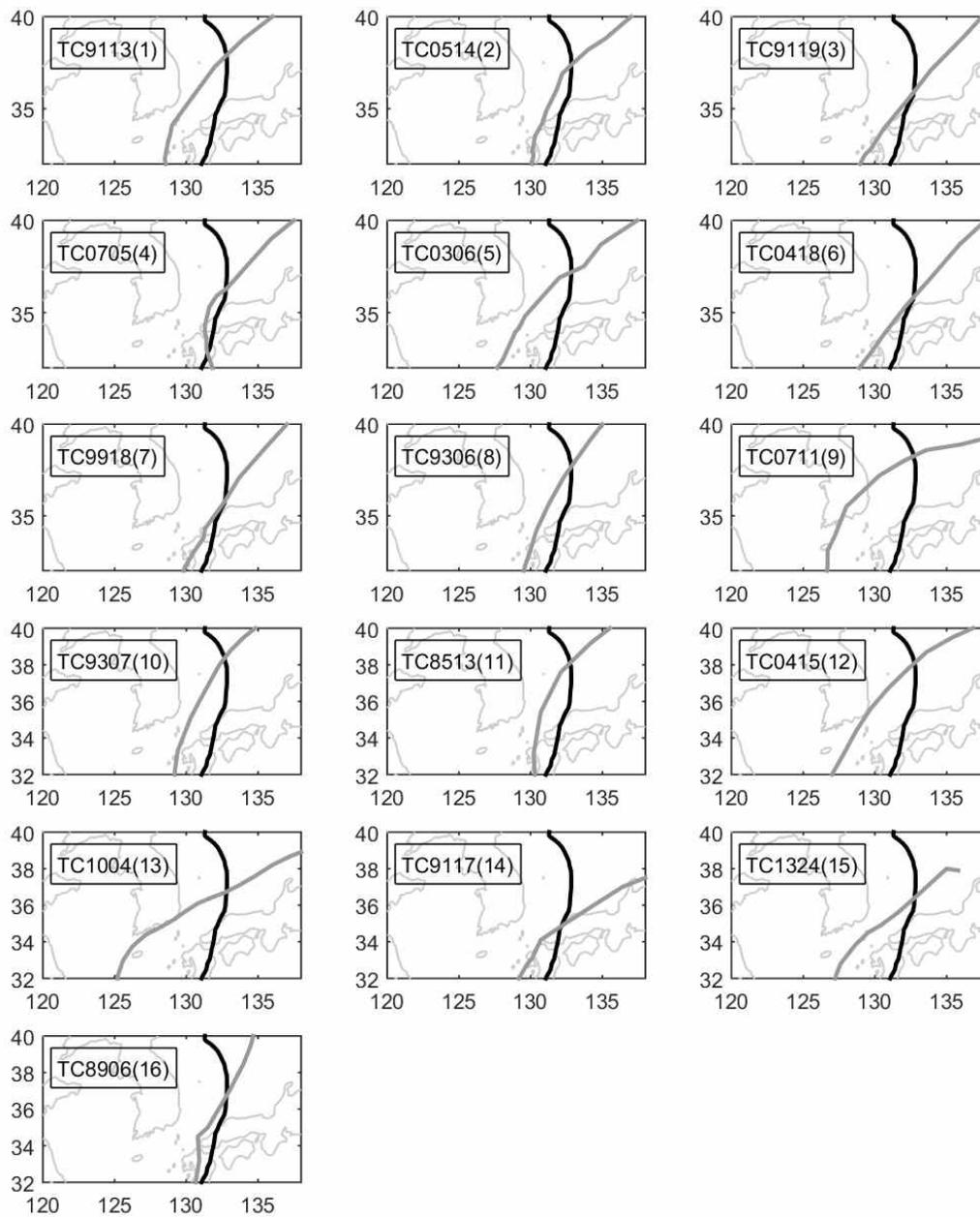


Fig. A. 3. Continued.

**(e) 08/22/12:00**

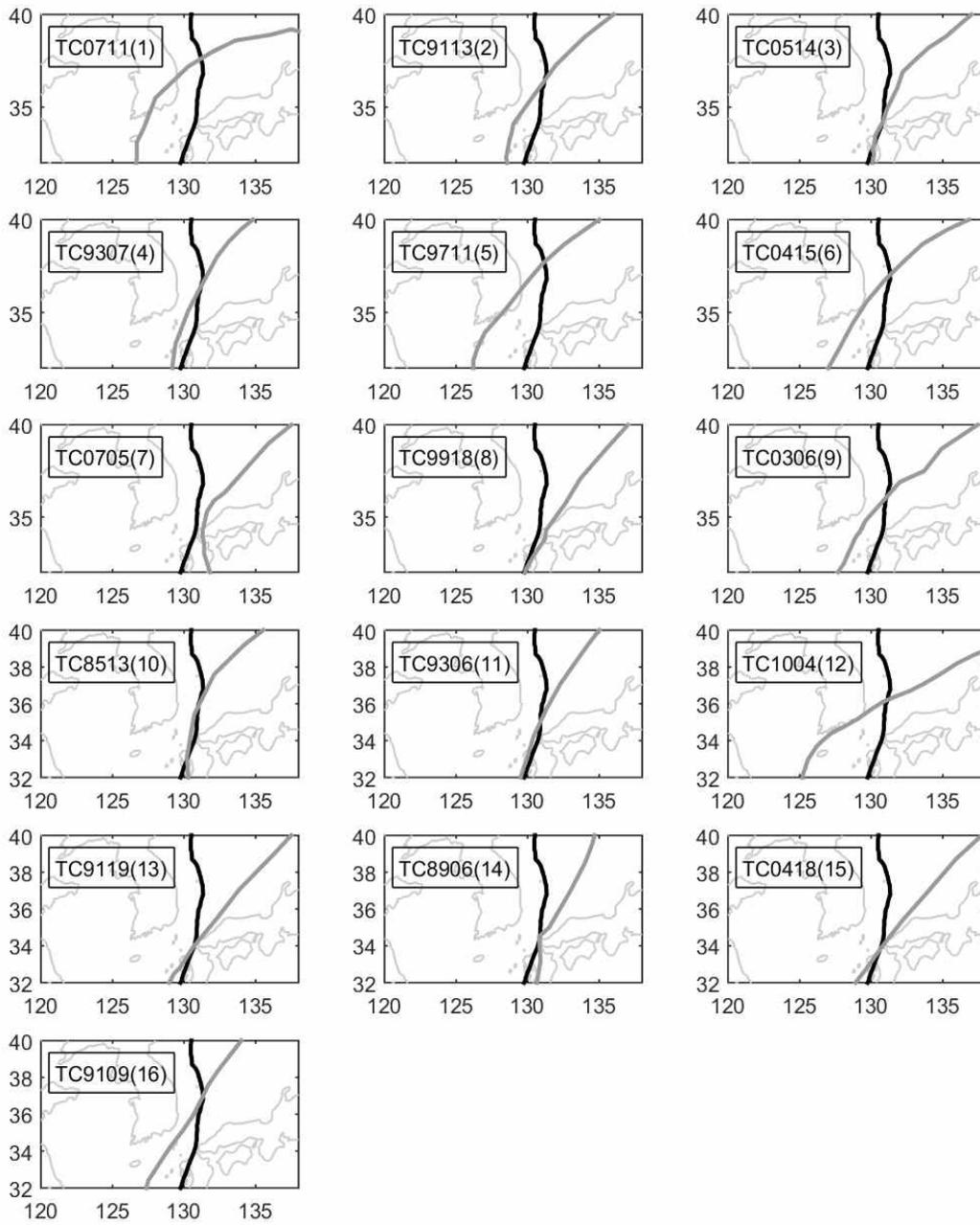


Fig. A. 3. Continued.

**(f) 08/23/00:00**

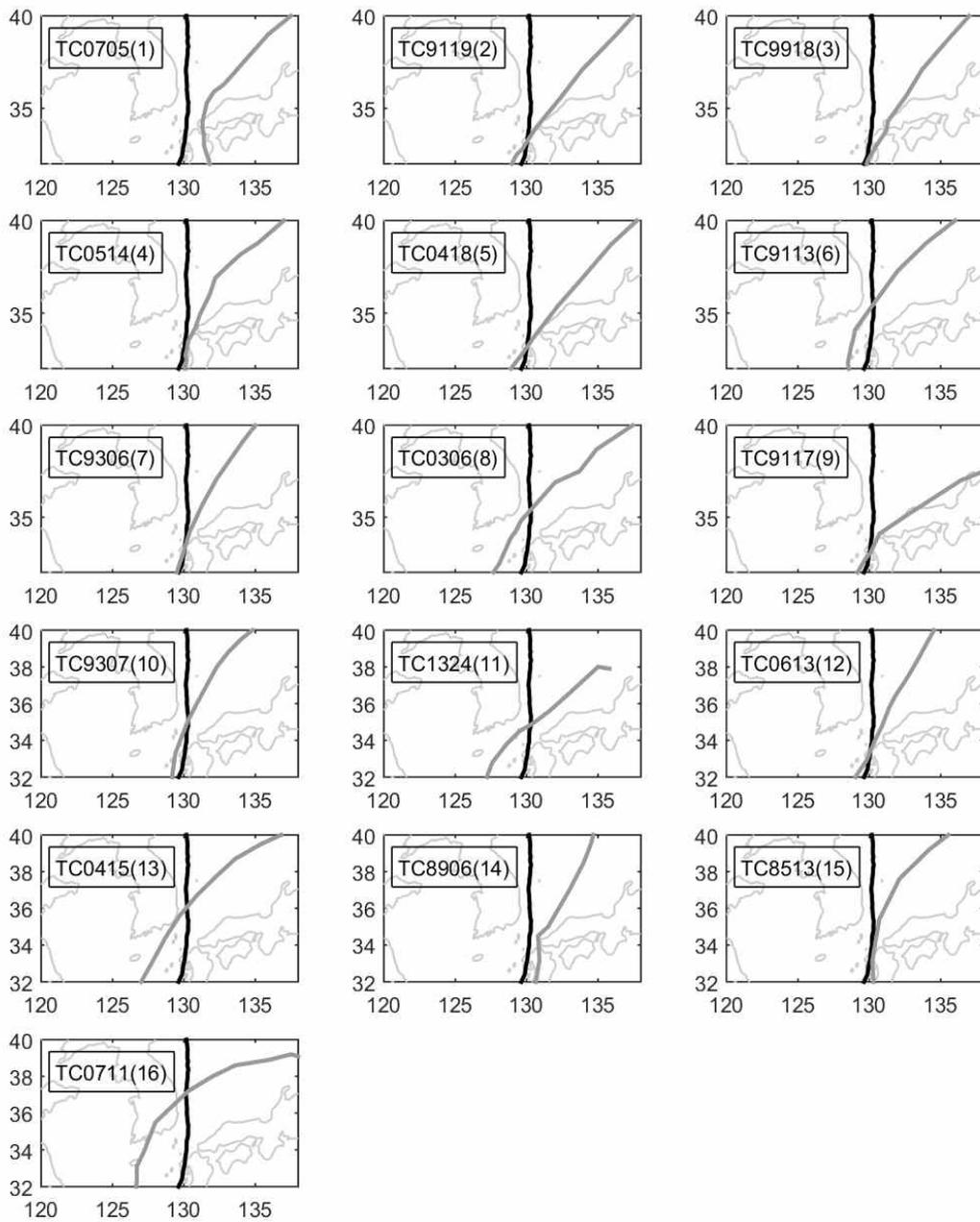


Fig. A. 3. Continued.

(g) 08/23/12:00

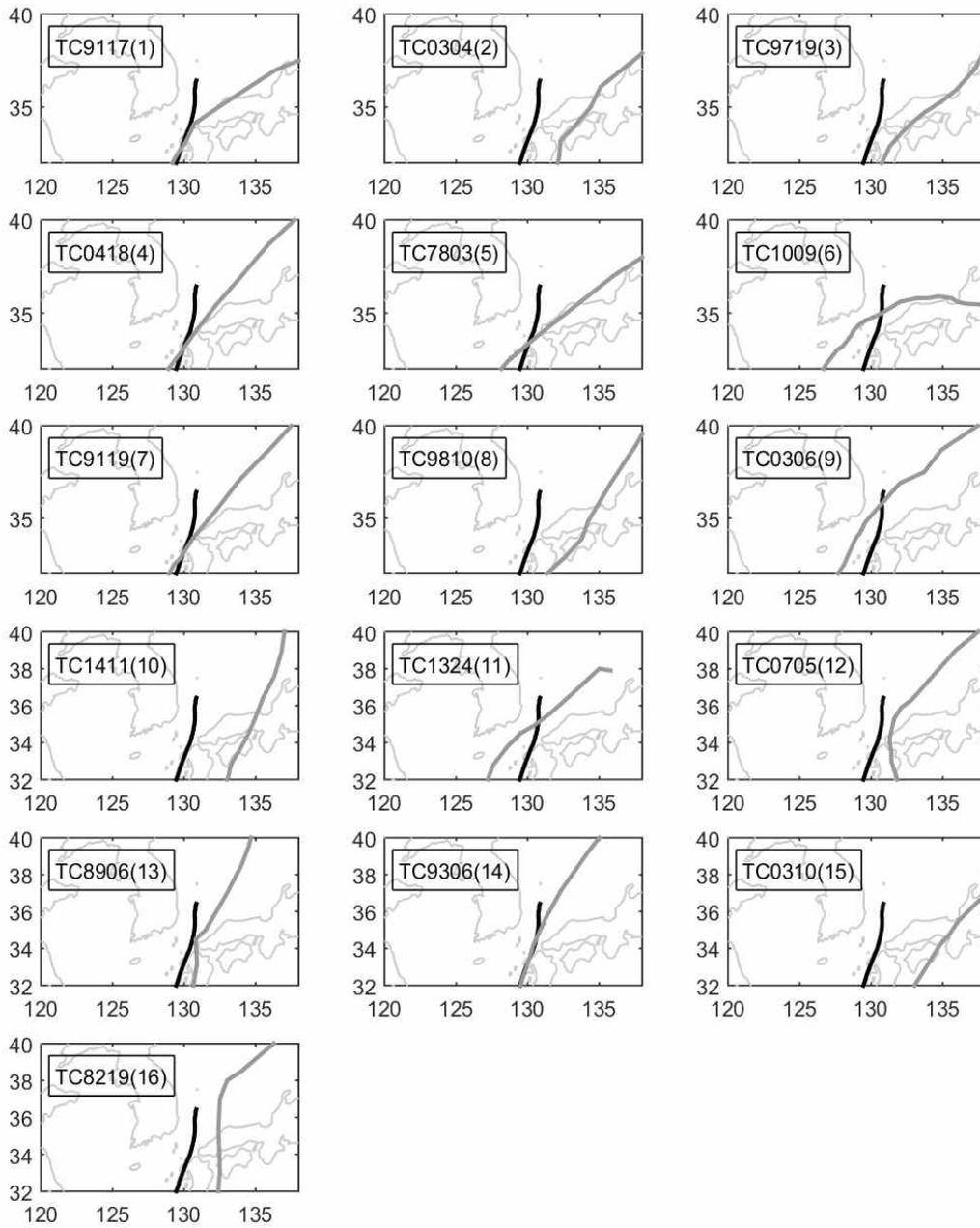


Fig. A. 3. Continued.

**(h) 08/24/00:00**

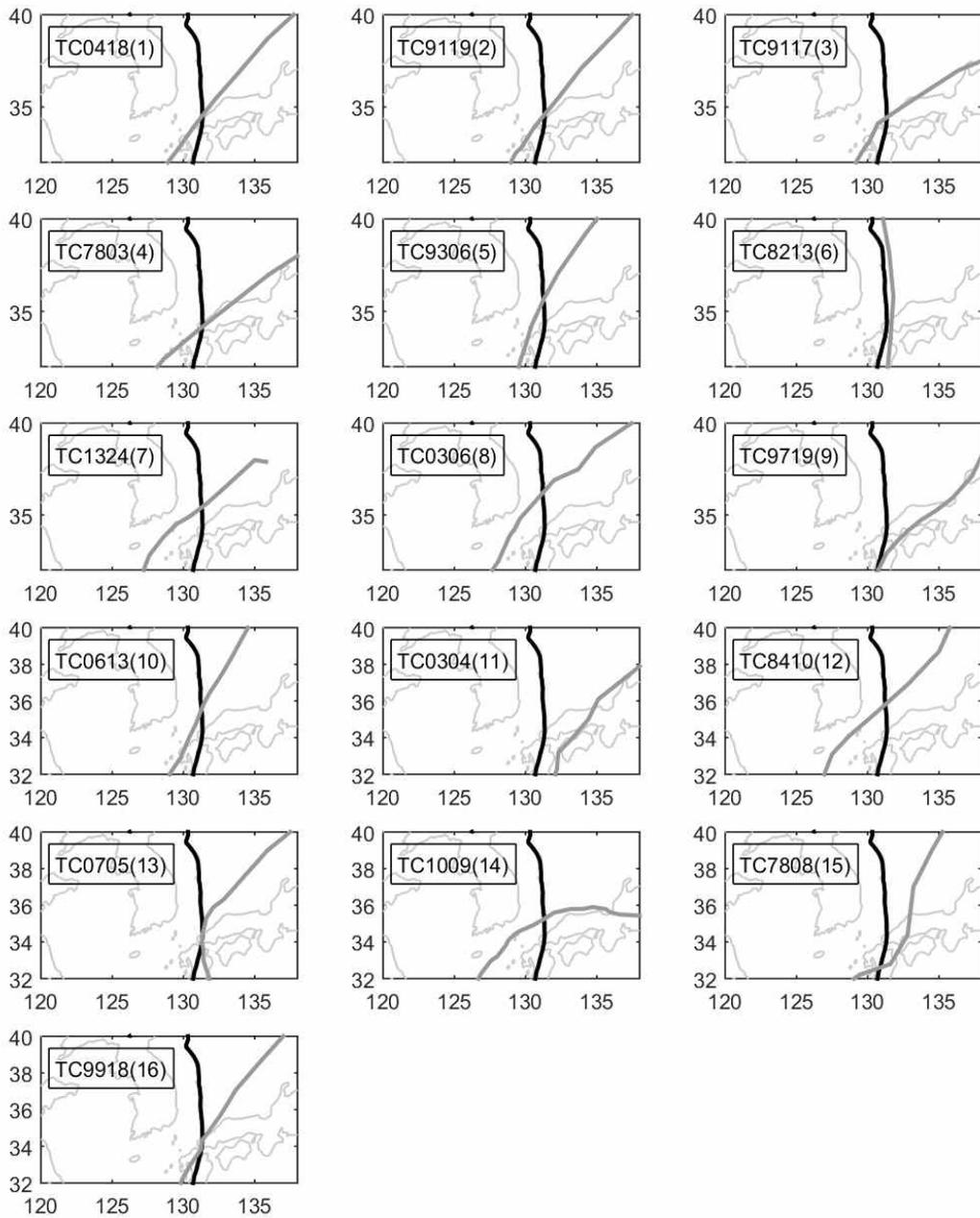


Fig. A. 3. Continued.

**(i) 08/24/12:00**

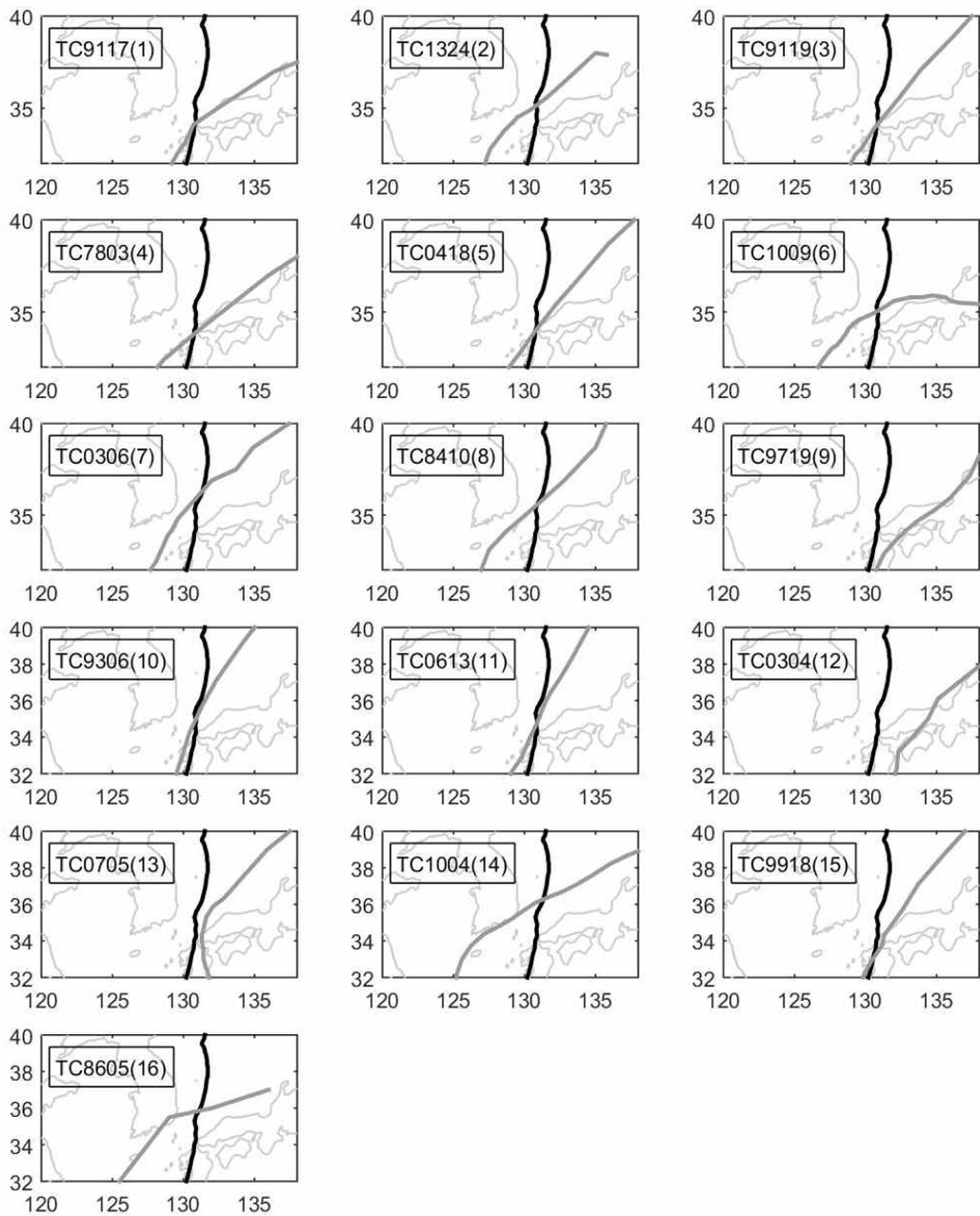


Fig. A. 3. Continued.

## 감사의 글

2년 동안의 석사과정을 마치고 졸업논문을 마무리 하려고 하니 시원섭섭한 마음과 대학원 생활을 하면서 힘든 시기에 버팀목이 되어준 저에게 많은 도움을 주었던 감사한 분들이 생각납니다.

먼저, 학부과정 때부터 거의 3년간 많은 배움과 좋은 지도를 해주신 문일주 교수님께 감사드립니다. 그리고 바쁜 시간 내주셔서 제 논문의 방향에 대해 잘 알려주시고 지도를 열심히 해주신 최광용 교수님과 송상근 교수님께도 감사의 말씀 전합니다. 그 외에도 제 연구에 대해 좋은 얘기를 해주신 방익찬 교수님, 2년 동안 좋은 가르침으로 수업을 해주신 이중호 박사님, 조천호 박사님, 문재홍 교수님, 윤원태 박사님께도 감사의 말씀 전합니다.

그리고 옆에서 많은 힘이 되어준 해양기상학 연구실 선배님 후배님들 성훈오빠, 민영오빠, 철민오빠, 영운언니, 태운오빠, 유정언니, 승용오빠, 희주언니, 우정언니, 문현오빠, 철오빠, 태경언니, 수희언니, 유선언니, 지희, 은별이 세원에게도 정말 감사드립니다. 그리고 석사졸업을 준비하며 함께 고생하고 외롭지 않게 해준 유현오빠와 인체오빠에게도 축하하고 감사한다고 전하고 싶습니다.

그리고 내 옆에서 항상 힘을 준 친구들 지구해양과학과 10학번 동기들, 졸업 후 각자의 길에서 열심히 살고 있는 새미, 도희, 예나, 탄금, 여맹에게도 감사의 말씀 드립니다. 같은 대학원생입장에서 항상 격려해주고 내 얘기 잘 들어준 은옥언니 소연언니에게도 감사의 말씀 드립니다. 또한 학창시절 소중한 내 친구들 예슬이, 다정이, 혜인이, 고지, 혜련이, 혜정이 그리고 항상 연락 먼저해주고 안부 물어주는 재원이와 해경에게도 항상 옆에서 응원해줘서 고맙다고 전하고 싶습니다.

마지막으로 힘든 투쟁 다 받아주고 항상 집에서 나를 응원해준 사랑하는 부모님과 동생들 혜미, 원석에게도 정말 고맙다고 전하고 싶습니다. 졸업 후에도 열심히 배우고 항상 겸손할 줄 아는 사람이 되겠습니다.

2015년 12월

김 혜지