



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

GDAPS(UM)를 이용한
태풍진로예보오차 원인 평가

Assessment of Tropical Cyclone Track Forecast Errors using
GDAPS(UM)

濟州大學校 大學院

環境工學科

金 東 振

2013 年 6 月

석사학위논문

GDAPS(UM)를 이용한
태풍진로예보오차 원인 평가

Assessment of Tropical Cyclone Track Forecast Errors using
GDAPS(UM)

指導教授 許 喆 九

金 東 振

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

2013年 6月

金 東 振의 工學 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長	李 起 浩 ①
委 員	許 喆 九 ①
委 員	宋 尙 根 ①

濟州大學校 大學院

2013年 6月

목 차

목 차	i
List of Tables	ii
List of Figures	iii
Abstrat	vi
I 서론	1
II 이론적 배경	3
2.1. 태풍과 태풍의 진로예측 방법	3
2.2. 태풍의 진로예측 모델	4
2.3. GDAPS(UM)	5
2.4. 개념모델(Conceptual Model)	7
III 연구방법	19
3.1. 분석자료 및 기간	19
3.2. 분석사례 선정방법	19
3.3. 개념모델을 이용한 태풍진로예보오차 원인 평가	20
IV 결과 및 고찰	21
4.1. 2012년 진로예보오차 특성	21
4.2. 열대관련 진로오차 원인 평가	27
4.3. 중위도관련 진로오차 원인 평가	35
V 결론	48
참고문헌	50

List of Tables

Table 1. Basic models for consensus of typhoon forecast in KMA.	5
Table 2. Main operational atmospheric prediction model in KMA.	6
Table 3. Area of 70% probability (km) of typhoon center position at 24, 48, 72, 96, 120-h later, respectively by KMA.	0. 2
Table 4. Summary of the typhoons in 2012.	2 2
Table 5. Summary of the mean track error (km) during the typhoon season in 2012.	2
Table 6. Error mechanisms for large 72-h track forecast errors by GDAPS (UM) during the typhoon season in 2012.	62
Table 7. Cases of tropical-related erroneous sources (RMT, RTF, DCI, ICI, and RVS-t) of GDAPS(UM) 72-h forecasts during the typhoon season in 2012.	72
Table 8. Cases of midlatitude-related erroneous sources (MSEs, RVS) of GDAPS (UM) 72-h forecasts during the typhoon season in 2012.	3

List of Figures

Fig. 1. Synoptic patterns and synoptic regions for western North Pacific typhoons. 8

Fig. 2. Conceptual model of DCI in which a TC circulation interacts with another cyclone (C) to cause a counterclockwise (Northern Hemisphere) rotation of the axis between the cyclone centers. 1

Fig. 3. Conceptual model of ICI on (a) an eastern TC (ICIE) or (b) a western TC (ICIW). 11

Fig. 4. Conceptual model of Excessive RMT influencing the forecast track of a TC embedded in the Rossby wave train of a western cyclone to the northwest. 2

Fig. 5. Conceptual model of an RTF in which two initially east-west-oriented TCs change to a more poleward track in a reverse-oriented monsoon trough. B

Fig. 6. Schematics of the Midlatitude System Evolutions (MSEs) that may lead to large TC track errors.51

Fig. 7. Conceptual model of the RVS. Plan view of the 500-hPa environmental flow (a : analysis, c : forecast) and vertical cross section along the vertical wind shear vector through the TC with different vertical extents (b : analysis, d : forecast).71

Fig. 8. Schematics of two stages of baroclinic cyclone interaction (BCI) with a recurving TC that is potentially undergoing extratropical transition	8· 1
Fig. 9. Characteristics of error mechanisms by GDAPS(UM) during the typhoon season in 2012.	32
Fig. 10. Occurrence frequency according to error distance (km) by GDAPS (UM) during the typhoon season in 2012.	52
Fig. 11 Error mechanisms of Tropical-related error sources by GDAPS (UM) during the typhoon season in 2012.	82
Fig. 12. Comparisons between analysis tracks by KMA and forecast tracks up to 72 hours by GDAPS(UM) for No. 13 KAI-TAK initiated at 00 UTC 13 Aug 2012.	92
Fig. 13. 500hPa streamlines for KAI-TAK initiated at 0000UTC 13 Aug 2012. (a)-(d) the 00, 24, 48 and 72-h GDAPS(UM) forecast fields; (e)-(h) the 00, 24, 48 and 72-h verifying analyses, respectively. Isotach shading starts at 25 kt and the increment is 5 kt.	133
Fig. 14. Comparisons between analysis tracks by KMA and forecast tracks up to 72 hours by GDAPS(UM) for No. 14 TEMBIN (left) and No. 15 BOLAVEN (right) initiated at 0000UTC 26 Aug 2012.	23
Fig. 15. 500hPa streamlines for TEMBIN and BOLAVEN initiated at 0000UTC 13 Aug 2012. (a)-(d) the 00, 24, 48 and 72-h GDAPS(UM) forecast fields; (e)-(h) the 00, 24, 48 and 72-h verifying analyses, respectively. Isotach shading starts at 25 kt and the increment is 5 kt.	43

Fig. 16. Error mechanisms of Midlatitude-related error sources by GDAPS (UM) during the typhoon season in 2012.	73
Fig. 17. Comparisons between analysis tracks by KMA and forecast tracks up to 72 hours by GDAPS(UM) for SANBA initiated at 0600UTC 14 Sep 2012.	8
Fig. 18. 500hPa streamlines for SANBA initiated at 0600UTC 14 Sep 2012. (a)-(d) the 00, 24, 48 and 72-h GDAPS(UM) forecast fields; (e)-(h) the 00, 24, 48 and 72-h verifying analyses, respectively. Isotach shading starts at 25 kt and the increment is 5 kt.	9 4
Fig. 19. Comparisons between analysis tracks by KMA and forecast tracks up to 72 hours by GDAPS(UM) for JELAWAT initiated at 1800UTC 24 Sep 2012.	11
Fig. 20. 500hPa streamlines for JELAWAT initiated at 1800UTC 24 Sep 2012. (a)-(d) the 00, 24, 48 and 72-h GDAPS(UM) forecast fields; (e)-(h) the 00, 24, 48 and 72-h verifying analyses, respectively. Isotach shading starts at 25 kt and the increment is 5 kt.	13 4
Fig. 21. Comparisons between analysis tracks by KMA and forecast tracks up to 72 hours by GDAPS(UM) for MARIA initiated at 0600UTC 15 Oct 2012.	4
Fig. 22. 500hPa streamlines for MARIA initiated at 0006UTC 15 Oct 2012. (a)-(d) the 00, 24, 48 and 72-h GDAPS(UM) forecast fields; (e)-(h) the 00, 24, 48 and 72-h verifying analyses, respectively. Isotach shading starts at 25 kt and the increment is 5 kt.	7 4

Abstract

After the Joint Typhoon Warning Center (JTWC) began issuing official five-day tropical cyclone (TC) forecasts in 2003, the Korea Meteorological Administration (KMA) started issuing official five-day forecasts of TCs in May 2012 after 2 year of beta test. Forming a selective consensus (SCON) by proper removal of a likely erroneous track forecast is hypothesized to be more accurate than the non-selective consensus (NCON) of all model tracks that are used for the five-day forecasts. Conceptual models describing large track error mechanisms, which are related to known tropical cyclone motion processes being misrepresented in the dynamical models, are applied to forecasts during the 2012 western North Pacific typhoon season by the Global Data Assimilation and Prediction System (GDAPS (UM N512 L70)). This model tracks are consensus members used in making KMA's five-day forecasts and thus knowledge of its track error tendencies would be useful in forming a SCON forecast. All 72-h track errors greater than 320 km are examined following the approach developed by Carr and Elsberry (2000a, b).

Tropical influences caused 37% (47 times / 126 erroneous forecasts) of the GDAPS (UM N512 L70) large track forecast errors primarily because an incorrect beta effect-related process depicted by the model contributed to the erroneous forecasts. Midlatitude influences accounted for 63% (79 times / 126 error cases) in the GDAPS (UM N512 L70) erroneous forecasts mainly due to an incorrect forecast of the midlatitude system evolutions. It is proposed that KMA will be able to issue more reliable TC track information if a likely model track error is recognized by optimum use of conceptual models by Carr and Elsberry (2000a, b) and a selective consensus track is then the basis for an improved warning.

I 서 론

북서태평양에서 발생하는 중심부근최대풍속 17m/s 이상의 열대저기압(Tropical cyclone, TC)을 태풍(Typhoon, TY)으로 정의하고 있으며, 태풍은 예측이 가능한 기상현상 중에서 가장 많은 재산과 인명 피해를 안겨주는 자연재해이다. 이렇게 막대한 피해를 동반하게 되는 태풍의 예보는 크게 진로예보와 강도예보 및 태풍으로 인한 강풍·풍랑·호우·해일 등의 부수적인 예보로 구분된다(기상청 예보업무규정, 2012). 그 중에서도 우리나라 기상청의 국가태풍센터에서 가장 주안점을 두는 것이 태풍의 진로예보이며, 태풍의 진로예보 정확도 향상에 매우 많은 노력을 하고 있다.

태풍의 진로예측은 여러 복합적인 환경요소들을 고려해야 하는 매우 어려운 판단과정이다. 이러한 복잡한 문제들을 해결하기 위해 태풍의 이동 메커니즘을 이해하는 계통적접근법(Systematic Approach, SA)이 제시되었다(Carr and Elsberry, 1997). 이 후 SA를 근간으로 북서태평양에서 발생하는 태풍의 경로와 이에 관련된 주변 중관환경과의 관계를 분석하여 태풍이 이동할 수 있는 환경구조를 중관패턴과 중관지역으로 구분하였다(Carr and Elsberry, 1999). Carr와 Elsberry는 중관패턴과 중관지역의 전이과정을 설명하는 메커니즘인 개념모델(Conceptual model)을 개발하였으며, 개념모델을 이용하여 미국 해군에서 현업운영중인 NOGAPS(U.S. Navy Operational Global Prediction System)와 GFDN(U.S. Navy version of Geophysical Fluid Dynamical Laboratory model)의 1997년 북서태평양 태풍진로예보오차 사례들에 대하여 진로오차 원인을 밝혔다(Carr and Elsberry, 2000a and 2000b).

Kehoe 등(2007)은 Carr와 Elsberry의 개념모델을 이용하여 2004년 북서태평양에서 발생한 태풍에 대한 NOGAPS와 GFDN의 진로예보에 대해서 96-h과 120-h의 태풍진로오차 원인을 연구하였다. Payne 등(2007)은 2005년 북서태평양 태풍시즌의 NOGAPS, GFDN, UKMO(United Kingdom Meteorological Office)와 NOAA(National Oceanic and Atmospheric Administration)의 GFS(Global Forecast

System)에 대해서 96-h와 120-h의 진로예보오차를 개념모델을 이용하여 평가하였다. 함 등(2003)은 개념모델을 이용하여 GSM(Global Spectral Model)기반의 GDAPS(Global Data Assimilation and Prediction System)에 대한 성향을 연구하는 등, 개념모델은 역학모델의 특성을 분석하는 방법으로 이용되고 있다.

Goerss(2000)는 태풍의 진로예보의 경우 성능이 좋은 여러 모델들의 결과를 평균한 컨센서스(Multi model ensemble, consensus) 방법이 72-h 태풍중심위치에 가장 좋은 예보를 제공한다고 발표하였다. 이후 컨센서스 방법은 모델들의 예측결과에 대한 범위(Spread)가 좁은 경우에 보다 더 정확하다는 것을 보였으며 넓은 범위를 좁힐 객관적인 방법론이 제기되었다(Carr and Elsberry, 2000a and 2000b).

전지구모델들의 특성에 대한 지식기반이 있다면 태풍예보에 잘못된 정보라고 의심되는 임의의 모델을 배제한 선택적 컨센서스(Selective consensus, SCON)를 구성하여 범위를 좁힐 수 있고, SCON은 역학 모델들의 단순 컨센서스 보다 더 정확한 정보를 제공할 수 있다. 모델지식기반 SCON을 구성하기 위해서는 컨센서스를 구성하는 모델들의 특성 분석이 필요하고, 모델들의 성향을 분석하는 하나의 방법으로 개념모델이 이용되고 있다.

우리나라의 기상청에서는 태풍의 진로예보 방법으로 컨센서스 기반 SCON을 활용하고 있다. 하지만 SCON을 구성하기 위한 체계적인 가이드언스가 부재하고 컨센서스를 구성하고 있는 모델들의 특성 연구가 부족한 실정이다. 따라서, 기상청의 공식 전지구예보모델인 GDAPS(UM(Unified Model))의 태풍진로예보오차 원인에 대해서 개념모델을 이용하여 진로오차 메커니즘을 규명하고 GDAPS(UM)에 대한 모델지식기반 가이드언스를 제공하여 국가태풍센터의 태풍예보 SCON 구성에 객관적인 가이드언스로 활용된다면 보다 더 정확한 태풍예보에 이바지할 수 있을 것이다.

본 연구에서는 GDAPS(UM)의 태풍진로예측의 정확도를 높이고 정확한 모델 지식기반 태풍예보 SCON을 구성하는데 중요한 기초자료를 얻기 위하여 GDAPS(UM)가 모의한 72-h 태풍진로예측을 우리나라 기상청 국가태풍센터에서 분석한 태풍중심위치와 비교하였다. 중심위치 비교결과 진로오차가 국가태풍센터의 72-h 태풍위치 70%확률범위 320km 이상인 사례들을 분석대상 진로예보오차로 선정하고 Carr와 Elsberry(2000a,b)의 개념모델을 이용하여 진로오차의 원인을 평가하였다.

II 이론적 배경

2.1. 태풍과 태풍의 진로예측 방법

2.1.1 태풍

열대 해상에서 발생하는 전선을 갖지 않는 대류권내 저기압성 순환을 열대저기압으로 총칭하며, 태풍은 북태평양 서부에서 발생하는 열대저기압 중에서 중심 부근의 최대풍속이 17m/s 이상의 강한 폭풍우를 동반하고 있는 것을 말한다(태풍백서, 2011).

세계기상기구(World Meteorological Organization, WMO)에서는 태풍 중심부근의 최대풍속(maximum sustained wind speed, MSWS)에 따라 TD(Tropical Depression, $MSWS < 17m/s$), TS(Tropical Storm, $17m/s \leq MSWS < 25m/s$), STS(Severe Tropical Storm, $25m/s \leq MSWS < 33m/s$), TY(Typhoon, $MSWS \geq 33m/s$)로 분류하고 있으며, TS 등급 이상부터 태풍의 호수와 이름을 붙이고 있다. 그러나 우리나라 기상청은 중심부근의 최대풍속이 17m/s 이상인 TS 단계부터 태풍으로 분류하고 있으며, 태풍이 발생하면 발생시점을 기준으로 향후 5일간의 태풍의 진로 및 강도에 대한 예보를 수행하고 있다(기상청 예보업무규정, 2012).

2.1.2 태풍의 진로예측 방법

태풍예보는 강수량 기온 등 다른 기상예보와 마찬가지로 수치모델의 정확도에 의존하기 때문에 수치모델의 정확도 향상이 태풍예보의 정확도 향상을 의미한다. 태풍예보가 일반 기상예보와 다른 점은 한 국가의 수치모델 뿐 아니라 성능이 좋은 다른 나라의 모델 결과를 사용할 수 있는 점이다. 따라서 모델 결과들을 실시간으로 확보하고 가용한 자원을 어떤 방법으로 최적화하느냐에 따라 예보 성과가 달라진다(태풍백서, 2011).

태풍예보도 많은 발전이 이루어졌으며 역학적인 수치모델들이 발전을 거듭함으로써 통계적이고 경험적인 방법론에서 역학적인 가이던스 활용방법론으로 변천되었다. 또한

여러 모델들을 활용하는 앙상블 기법의 발달은 태풍 진로예측의 현저한 발전에 기여하고 있다(Carr and Elsberry, 1994).

태풍의 진로예측 방법은 하나의 모델에서 여러 종류의 초기조건을 달리하여 모델을 수행하는 단일모델 앙상블 기법(Single model ensemble)과 여러 모델들의 예측결과를 평균한 컨센서스(Multi model ensemble, consensus) 방법으로 나뉠 수 있다(태풍백서, 2011), 기상청 국가태풍센터에서는 컨센서스 방법을 기반으로 SCON 또는 모델들에 가중치를 다르게 부여하는 컨센서스 방법을 시도하고 있다(기상청 태풍예보업무매뉴얼, 2013).

2.2. 태풍의 진로예측 모델

여러 모델의 개별적 예측성과 모델들의 예측치를 단순 평균한 값을 하나의 예측으로 한 비교 결과에서 컨센서스 방법인 모델 평균값이 예측성이 뛰어났다는 보고가 있는 후(Goerss, 2000), 여러 태풍센터에서는 컨센서스 방식으로 예측능력을 향상시키고 있고 이에 대한 추가 연구도 계속되고 있다(Lee and Wong, 2002; Jeffries and Fukada, 2002). 실제로 우리나라 기상청은 많은 수의 모델결과를 외국에서 수신하고 예보에 활용하고 있으며, Table 1과 같이 정기적으로 수신되고 성능이 우수하다고 검증된 모델들의 단순평균을 예보의 첫 단계로 사용하고 있다(기상청 태풍예보업무매뉴얼, 2013).

Table 1의 GDAPS(UM)는 우리나라 기상청 공식 현업 역학모델, NOGAPS는 미국 해군의 현업 역학모델, GFS는 미국 NOAA의 현업 역학모델, ECMWF는 유럽에서 중기 예보를 위해 사용하는 현업 역학모델, JGSM은 일본 기상청의 현업 역학모델, TEPS는 일본 기상청의 앙상블 모델이다. 각 모델들은 매년 개선을 통하여 발전되고 있으며 개선 결과를 공유하고 있다(WMO). 이렇게 성능이 좋은 각국의 모델들을 태풍예보에 유용하게 활용하는 점은 컨센서스 방법의 장점이며, 우리나라 기상청은 공식 현업 모델인 GDAPS(UM)의 예보장을 태풍예보의 기본으로 사용하고 있다(기상청 태풍예보업무매뉴얼, 2013).

Table 1. Basic models for consensus of typhoon forecast in KMA.

ID	NAME	ORGANIZATION
GDAPS(UM)	Global Data Assimilation and Prediction System (UM)	KMA
NOGAPS	Navy Operational Global Atmospheric Prediction System	U. S. Navy
GFS	Global Forecast System	NOAA
ECMWF	European Centre for Medium-Range Weather Forecast	ECMWF
JGSM	Japanese Global Spectral Model	JMA
TEPS	Typhoon Ensemble Prediction System	JMA

2.3. GDAPS(UM)

우리나라 기상청은 2010년 5월부터 일본의 GSM(Global Spectral Model) 기반 GDAPS(Global Data Assimilation and Prediction System)에서 영국기상청(United Kingdom Meteorological Office) 통합모델(Unified Model, UM) 기반 수치예보시스템을 도입하여 GDAPS (UM N320 L50)를 공식적인 현업운영 모델로 바꾸었다. 영국기상청 통합모델 도입을 계기로 수치예보의 정확도가 획기적으로 향상되었으며 특히, 2011년 5월부터는 현재 영국에서 운영 중인 통합모델 최신버전과 같은 수준의 해상도를 가진 고해상도 전지구예보모델(GDAPS (UM N512 L70), GDAPS(UM))을 구축하고 운영함으로써 수치예보의 정확도가 한층 더 개선되었다(KMA, 2011 and 2012).

Table 2에서 보여 지듯이, GDAPS(UM)는 기상청의 공식적인 전지구예보모델로써 중기예보를 목적으로 수평 격자간격 25km의 전지구 영역에 연직 80km까지 70층에 대한 물리과정을 252시간까지 모의하는 역학모델이다(KMA, 2012). GDAPS(UM)는 단기 및 중기예보뿐만 아니라 태풍예보에도 종관패턴 및 종관지역에 대한 전이과정을 설명할 수 있는 예보장들을 제공하고 있기 때문에 GDAPS(UM)에 대한 태풍진로예보오차 특성분석은 태풍의 예보정확도 향상에 기여할 것이다.

Table 2. Main operational atmospheric prediction model in KMA.

<i>Summary</i>			
Purpose	Model (domain)	Resolution	Target Length
Medium-range forecast	UM(Global)	N512 L70	252 hours
<i>Configuration</i>			
Analysis resolution	N512L70 (horizontal resolution : ~25km)		
Analysis domain top	80km		
Analysis method	4DVAR		
Data Base	ODB(Observation Data Base) from ECMWF		
Pre-process	OPS(Observation Processing System) from UK Met Office : Quality control and reformation of observation data		
<i>Dynamics</i>			
Basic equation	Non-hydrostatic finite difference model with full equation.		
Prognostic variables	Horizontal and vertical wind components, potential temperature, pressure, density, specific humidity, specific cloud water.		
Integration domain	Global		
Horizontal grid	Spherical latitude-longitude grid with Arakawa C-grid staggering of variables. Resolution : 0.234° latitude and 0.352° longitude.		
Vertical grid	70 levels (surface~80km). Hybrid- η vertical coordinate with Charney-Phillips grid staggering of variables.		
Time integration	Two time-level semi-Lagrangian advection with a pressure correction semi-implicit time stepping method using a Helmholtz solver to include non-hydrostatic terms. Model time step = 600 sec.		
Forecast range	252 hours.		
<i>Physics</i>			
Horizontal diffusion	Second-order diffusion of winds, specific humidity and potential temperature.		
Vertical diffusion	Second-order diffusion of winds only between 500 and 150 hPa in the tropics (equatorward of 30°).		
Cloud	Prognostic cloud fraction and condensate cloud scheme (PC2, Wilson et al, 2008).		
Precipitation	Wilson and Ballard (1999) single-moment bulk microphysics scheme, coupled with the PC2 cloud scheme. Prognostic rain Abel and Shipway (2007) rain fall speeds		
Convection	Modified mass-flux convection scheme with convective available potential energy (CAPE) closure, momentum transports and convective anvils based on Gregory and Rowntree (1990).		
Radiation	Edwards-Slingo (1996) radiation scheme with non-spherical ice spectral files. 6 absorption bands in the SW, and 9 bands in the LW.		
Boundary Layer	First order non-local boundary layer scheme of based on Lock et al. (2000)		
Gravity wave drag	Orographic scheme including a flow blocking scheme which represents the effects of sub-grid orography. Non-orographic spectral scheme which represents the effect of gravity waves in the stratosphere and mesosphere.		
Land surface	Joint UK Land Environment Simulator (JULES) 4 layer soil model using van Genuchten (1980) soil hydrology		

2.4. 개념모델(Conceptual Model)

태풍은 종관패턴과 종관지역(Synoptic pattern and region)의 전이과정을 거치며 이동하게 되는데, 전이과정에 대한 메커니즘은 열대관련 개념모델(Tropical related conceptual model)과 중위도관련 개념모델(Midlatitude related conceptual model)로 설명할 수 있다. 모델에서 모의하는 전이과정 메커니즘이 실제에 비해 과대하게 발생하거나 과소하게 발생하는 경우 또는 전이과정 메커니즘이 발생하지 않을 경우 모델이 모의하는 진로예측에는 오차가 발생하게 된다. 그러한 진로오차 원인은 개념모델의 전개과정 정도를 이용하여 모델에서 과대모의(Excessive, E-)하는지 또는 과소모의(Insufficient, I-)로 구분하여 설명할 수 있다(Carr and Elsberry, 2000a,b).

2.4.1 종관패턴과 종관지역

종관환경에 대한 분류는 FNMOOC(Fleet Numerical Meteorology and Oceanography Center)의 NOGAPS 분석을 근거로 개발되고 수정되었으며, 태풍의 이동을 지배하는 고기압을 주변고기압(Peripheral anticyclone)으로 정의하고 있다(Carr and Elsberry, 1994; Carr and Elsberry, 1999).

태풍은 주변고기압과 태풍사이에 형성된 지향류(Environmental steering flow)를 따라 이동하는 특성이 있으며, 태풍의 이동을 지배하는 지향류는 태풍자체의 순환을 배제시킨 주변고기압의 평균대기층 유선(주로 500hPa streamline)이다. Fig. 1은 태풍과 주변고기압(A 또는 B)의 구조적인 특성에 따라 4종류의 종관패턴으로 구분하여 태풍의 이동과정을 도식화한 것이다. Fig. 1에서 보면, 종관패턴은 태풍의 북쪽에 주변고기압이 위치하는 S(Standard) 종관패턴, 태풍의 남동쪽 고기압이 발달하며 태풍의 북쪽 진로에 영향을 미치는 P(Poleward) 종관패턴, 열대지역의 Gyre 순환의 영향을 받는 G(Gyre) 종관패턴, 마지막으로 태풍이 중위도로 진입하며 남쪽 주변고기압의 영향을 받는 M(Midlatitude) 종관패턴으로 구분된다. 또한, 각 종관패턴 내에서 태풍의 이동특성에 따라 종관지역으로 세분되며, 종관지역은 태풍이 열대지역에서 동진하는 EW(Equatorial Westerlies) 종관지역, 서진하는 TE(Tropical Easterlies), 적도 방향으로 이동하는 EF(Equatorward Flow), 극 방향으로 이동하는 PF(Poleward Flow) 종관지역, 그리고 중위도에서 동진하는 MW(Midlatitude Westerlies) 종관지역으로 구분하여 설명하고 있다(Carr and Elsberry, 1999).

WESTERN NORTH PACIFIC SYNOPTIC PATTERNS AND REGIONS

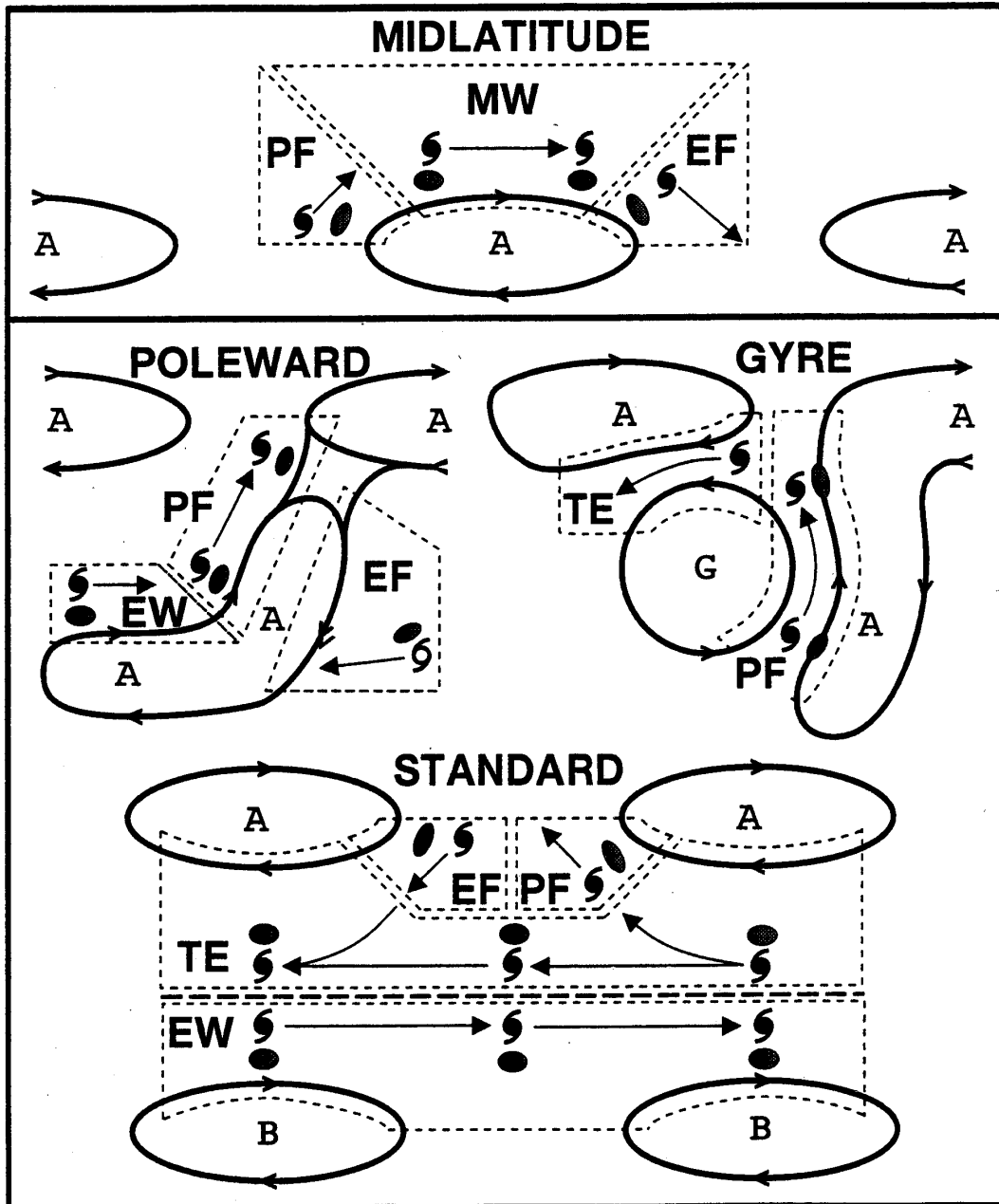


Fig. 1. Synoptic patterns and synoptic regions for western North Pacific typhoons.

1) S 종관패턴(Standard synoptic pattern)

Fig. 1의 하단에 표시된 바와 같이, S 종관패턴에서 아열대고기압 축은 대체로 동서방향이다. 아열대고기압 축은 경도 상으로 약간 기울어 질 수 있으며 중위도 순환의 다양한 흐름은 아열대고기압 축의 북쪽에서 이루어진다. S 패턴에서는 TE, PF, EF, EW의 4종류의 종관지역으로 구분된다.

2) P 종관패턴(Poleward synoptic pattern)

P 종관패턴은 Fig. 1 가운데 왼쪽에서 보여 지듯이 태풍 북쪽에서 아열대고기압축의 균열이 생기고 주변고기압은 태풍의 동쪽에 위치하여 남쪽으로 확장되어 있다. P 패턴의 형성은 로스비파 분산(Rossby wave dispersion)으로 남동쪽 고기압이 확장하며 형성될 수 있다. 또한, 이런 P 패턴은 역몬순골(Reverse-oriented monsoon trough)을 표현할 수 있는 대표적인 패턴이라 할 수 있으며, EW, PF, EF 3종류의 종관지역으로 구분된다.

3) G 종관패턴(Gyre synoptic pattern)

태풍을 이동시키는 지향류에서 Monsoon Gyre(MG)로 알려진 거대한 순환이 관련된 G 종관패턴이 Fig 1의 가운데 오른쪽에 제시되어 있다. G 종관패턴에서 MG는 주로 동서방향 고기압의 남동쪽과 남북방향 고기압의 서쪽에 위치하는데, 남북방향 고기압의 서쪽에 위치한 MG는 마치 P 종관패턴에서 규모가 큰 태풍 형태와 유사하다. G 종관패턴은 PF 종관지역과 TE 종관지역으로 구분된다.

4) M 종관패턴(Midlatitude synoptic pattern)

Fig 1의 위에서 보여주고 있는 M 종관패턴에서 태풍은 아열대고기압의 북서측면을 따라 북쪽으로 이동하며 중위도로 진입하게 된다. 일반적으로 태풍은 아열대고기압 북서측면의 PF 종관지역을 거쳐 MW 종관지역으로 전이하며 온대저기압으로 변질과정을 밟게 되지만, 대륙고기압이 확장하며 주변고기압으로 작용할 때 태풍은 EF 종관지역에서 남동지향류의 영향을 받기도 한다. 중위도 순환은 매우 복잡하기 때문에 M 종관패턴을 기본으로 폭넓고 다양한 중위도 순환 형태에 응용해야 한다.

2.4.2 열대관련 개념모델

열대관련 개념모델은 두 태풍의 상호작용(Binary cyclone interaction)과 베타효과와 관련된 과정(Beta effect-related processes)으로 나누어 설명할 수 있다 (Carr and Elsberry, 1997; Carr and Elsberry, 2000a).

1) 두 태풍의 상호작용

두 태풍의 상호작용은 직접적으로 진로에 영향을 미치는 DCI(Direct Cyclone Interaction)와 간접적인 영향으로 진로에 영향을 미치는 ICI(Indirect Cyclone Interaction)로 나뉜다(Carr and Elsberry, 2000a).

(1) DCI

Fig. 2의 DCI 개념모델은 사이클론(태풍, 열대저압부, 저기압 등)과 태풍이 반시계방향으로 회전을 하다가 훨씬 큰 하나의 순환으로 병합되는 과정을 도식화 하여 설명하고 있다. 모델에서 DCI 메커니즘을 실제보다 과대하게 모의(E-DCI) 또는 불충분하게 모의(I-DCI)하는 경우에 진로오차가 발생하게 된다.

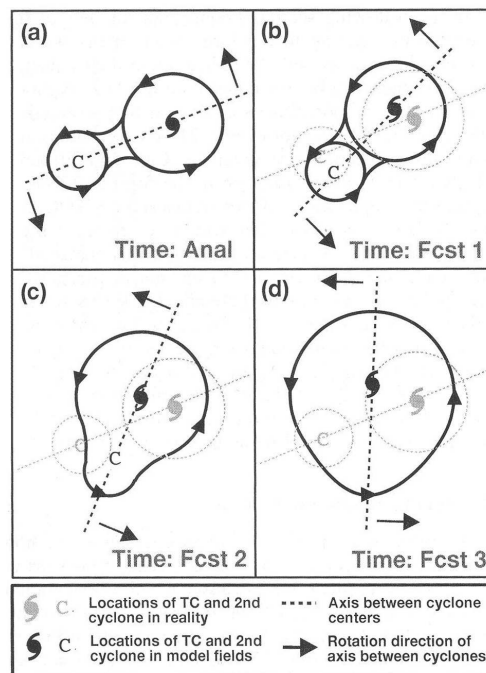


Fig. 2. Conceptual model of DCI in which a TC circulation interacts with another cyclone (C) to cause a counterclockwise (Northern Hemisphere) rotation of the axis between the cyclone centers.

(2) ICI

ICI는 사이클론과 태풍이 서로 간접적인 영향을 미치는 개념모델로 Fig. 3에서 보여주고 있으며, 태풍의 위치에 따라 ICIE(a)와 ICIW(b)로 구분된다. ICIE는 Fig. 3(a)에서 보여 지듯이 동쪽 태풍의 진로가 서쪽 사이클론의 영향을 받는 것을 말한다. E-ICIE는 주변고기압이 동쪽 태풍을 화살표로 표시된 실제진로보다 파선의 화살표처럼 적도방향의 진로로 모의할 때 발생하며, I-ICIE는 점선의 화살표와 같이 극방향의 진로로 모의할 때 발생한다. 이러한 상황은 모델에서 북서쪽 사이클론의 영향으로 고기압을 너무 강하게 모의하였거나 동쪽 태풍을 너무 작게 모의하였을 경우에 나타난다.

Fig. 3(b)는 서쪽 태풍이 동쪽 사이클론에 의해 진로의 영향을 받는다는 ICIW의 개념모델이다. I-ICIW는 모델에서 서쪽 태풍이 화살표의 실제진로보다 점선 화살표처럼 극방향의 진로를 취할 것으로 모의될 때 발생하며, E-ICIW는 모델에서 서쪽 태풍이 실제보다 파선 화살표와 같이 남쪽 진로로 모의될 때 발생한다. ICIW와 관련된 진로 오차원인은 동쪽 사이클론이 서쪽 태풍에 관련된 주변고기압의 발달을 잘못 모의하기 때문이다.

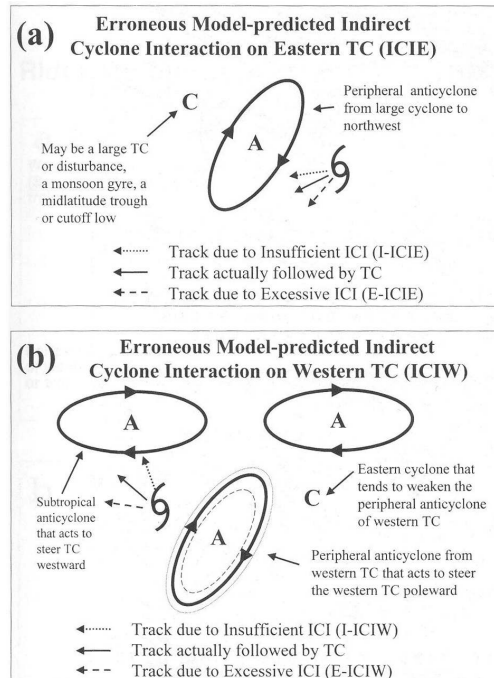


Fig. 3. Conceptual model of ICI on (a) an eastern TC (ICIE) or (b) a western TC (ICIW).

2) 베타효과와 관련된 과정(Beta effect-related processes)

베타효과와 관련된 진로오차 메커니즘은 RMT(Ridge Modification by the TC), RTF(Reverse Trough Formation)로 구분되며 베타효과(Beta effect propagation and Rossby wave train generation)와 관련이 있다(Carr and Elsberry, 1997; Carr and Elsberry, 2000a).

(1) RMT

Fig. 4는 북반구에서 로스비파열 내의 에너지가 서쪽 저기압성 순환에서 고기압 순환인 남동쪽으로 이동하면서 태풍과 태풍의 주변고기압 수평규모가 커지게 되는 RMT 과정을 보여주고 있다. 모델에서 E-RMT가 발생하면 북반구에서 에너지의 남동쪽 전파가 실제보다 왕성하게 이루어지고, Fig. 4b의 두꺼운 화살표로 표시한 진로처럼 태풍이 북쪽으로 방향을 바꾸는 전환시점이 실제보다 빠르게 발생하게 된다. 한편, I-RMT가 발생하면 에너지가 남동쪽으로 실제보다 약하게 전파되어 로스비파에 묻혀있는 태풍은 북쪽으로 진로로 방향을 바꾸기는 하지만, 전환시점이 실제보다 느리게 발생하거나 전환시점이 없는 경우도 있다.

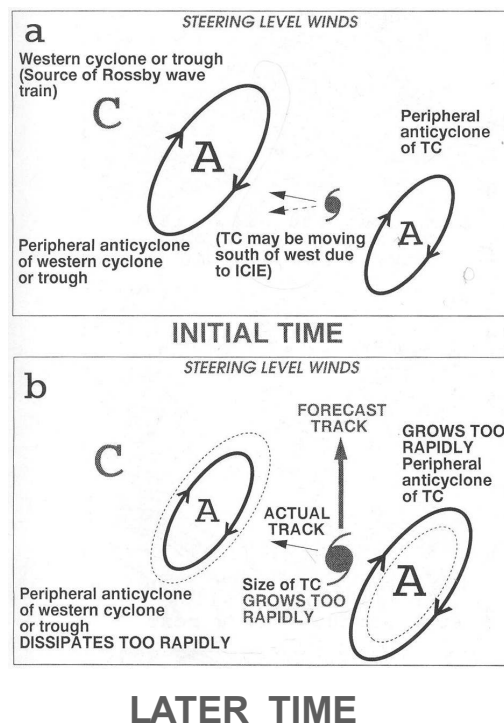


Fig. 4. Conceptual model of Excessive RMT influencing the forecast track of a TC embedded in the Rossby wave train of a western cyclone to the northwest.

(2) RTF

태풍이 두 개 발생하여 동쪽 태풍이 서쪽 태풍과 비슷한 위도 상에 위치해 있을 때 거의 동시에 전향하는 RTF 개념모델을 Fig. 5에서 보여주고 있다. Fig. 5(a)에서 두 태풍은 각각의 주변고기압의 영향을 받고 있다. 하지만, Fig. 5(b)에서 보여 지듯이 로스비파열과 관련 있는 두 태풍의 주변고기압은 구조적으로 하나의 고기압으로 합병되어 규모가 큰 고기압을 형성한다. 이러한 과정이 나타나면, 두 태풍은 역몬순골에 위치하며 동시 또는 거의 동시에 전향하는 경향이 있다. 수치모델이 E-RTF를 모의하면 RTF 과정은 실제보다 먼저 또는 잘못된 방식으로 나타나며, 모의된 태풍의 진로는 실제와 비교하여 볼 때 북쪽 편이를 보인다. 모델이 I-RTF를 모의하면 태풍의 북쪽 진로전환이 너무 늦게 모의되거나 전혀 모의되지 않는다.

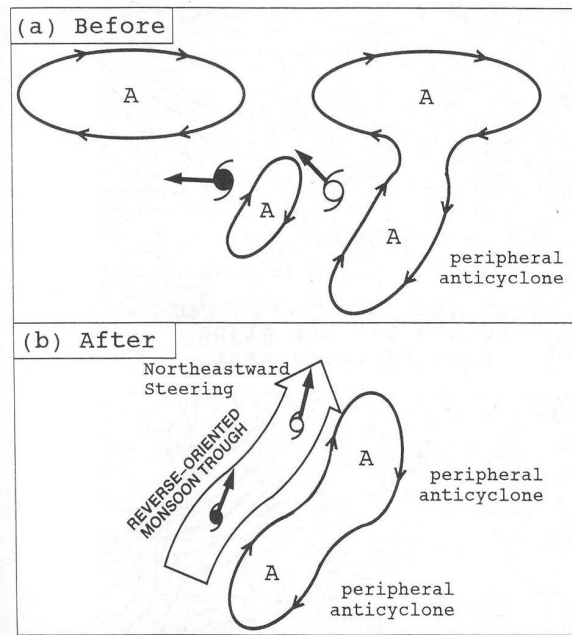


Fig. 5. Conceptual model of an RTF in which two initially east-west-oriented TCs change to a more poleward track in a reverse-oriented monsoon trough.

2.4.3 중위도관련 개념모델

중위도관련 개념모델은 태풍이 중위도로 진입하면서 편서풍대의 영향을 받는 중위도시스템의 진화과정(Midlatitude system evolutions, MSEs)과 연직시어의 영향을 받는 RVS(Response to vertical wind shear), 그리고 온대저기압으로 변질되는 과정에서 발생하는 BCI(Baroclinic cyclone interaction)로 구분된다(Carr and Elsberry, 2000b).

1) MSEs

MSEs의 기본적인 개념은 중위도순환(cyclones, troughs, anticyclones, ridges)의 발달, 소멸, 그리고 움직임 때문에 태풍의 이동에 관련된 지향류가 변하는 것이다. Fig. 6은 중위도 저기압의 진화과정과 고기압의 진화과정을 통하여 MSEs의 4가지 종류에 대한 개념모델을 도식화하여 보여주고 있다. MCG(Midlatitude cyclogenesis)는 Fig. 6의 a에서 b의 과정처럼 중위도의 골이 발달하며 태풍의 진로에 영향을 미치게 되고, MCL(Midlatitude cyclolysis)은 MCG의 반대과정으로 중위도 골이 약화되면서 태풍의 진로에 영향을 주는 개념모델이다. MAG(Midlatitude anticyclogenesis)는 중위도 능이 강화되며 태풍의 진로에 영향을 미치는 과정으로 Fig. 6의 c에서 d의 과정으로 도식화 하여 보여주고 있으며, MAL(Midlatitude anticyclolysis)은 MAG의 역 과정으로 설명하고 있다.

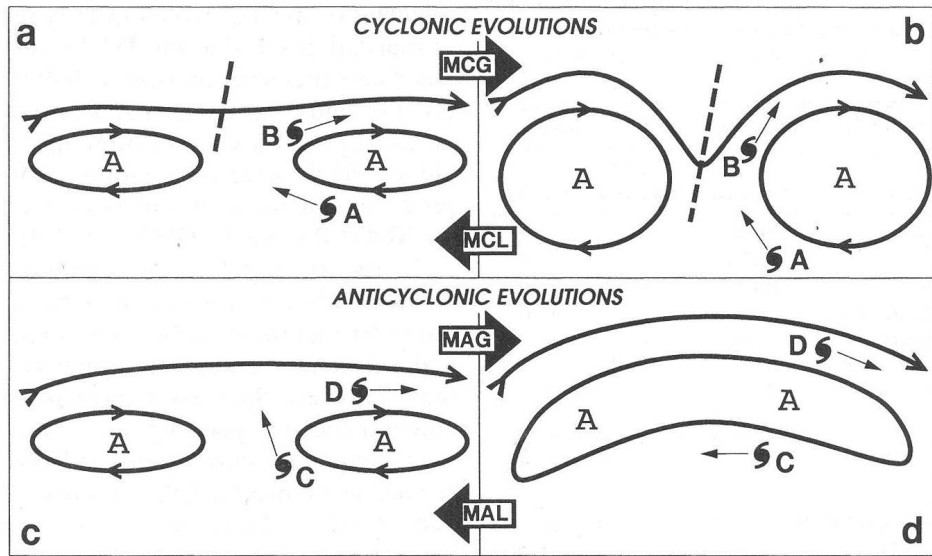


Fig. 6. Schematics of the Midlatitude System Evolutions (MSEs) that may lead to large TC track errors.

MCG가 발생하면, Fig. 6a에서 아열대고기압 축의 남쪽 S/TE에서 서진 하던 A 태풍은 Fig. 6b에서 보여 지듯이 중위도 골이 발달하면서 기압능이 분리되고 태풍 주변의 바람장은 보다 더 북쪽으로 향하는 지향류로 바뀌게 된다. 수치모델에서 MCG가 실제보다 강하게 또는 약하게 발생하면 상당한 진로예보오차를 발생시킬 수 있으며, 실제보다 강하게 모의하는 경우 E-MCG, 실제보다 약하게 모의하는 경우 I-MCG로 구분한다. MCL은 MCG의 반대 프로세스로서, Fig. 6b에서 Fig. 6a로 변화하는 진화과정이고, E-MCL과 I-MCL로 구분된다.

Fig. 6의 c에서 d로 진화하는 MAG가 발생하면, 세력이 다소 약한 아열대고기압 남동쪽 S/PF에서 북서진하고 있던 Fig. 6c의 C 태풍은 Fig. 6d처럼 중위도 능이 발달하면서 태풍 C의 북쪽 주변고기압 세력이 강화되어 태풍은 서쪽으로 진로를 바꿀 수도 있으며, 더한 경우 남서쪽으로 진로를 바꾸는 경우도 있다. 수치모델에서 MAG가 실제보다 강하게 또는 약하게 발생하는 정도를 분석하면 E-MAG와 I-MAG로 구분할 수 있다. MAL은 MAG의 반대 프로세스로서 Fig. 6d에서 Fig. 6c로 진화하는 과정이며 E-MAL과 I-MAL로 나뉜다.

MSEs 개념모델은 크게 중위도 능과 관련된 프로세스(Ridge-related process)와 중위도 골과 관련된 프로세스(Trough-related process)의 영향으로 구분할 수 있다.

중위도 능과 관련된 프로세스는 E-MAG, I-MAL, E-MCL, I-MCG로 구분되고, 중위도 골과 관련된 프로세스는 E-MCG, I-MCL, I-MAG, E-MAL로 분류된다.

Fig. 6의 A와 C의 태풍처럼, MSEs 프로세스가 아열대고기압 축의 남쪽 태풍의 움직임을 변화시키는 경우 태풍은 열대지역에 위치해 있지만 태풍 움직임을 변화에 영향을 미치는 메커니즘은 중위도에서 진행되고 있기 때문에 중위도관련 메커니즘으로 지정된다. 태풍의 위치에 따라 중위도 순환과 관련하여 진로에 다양한 변화가 나타날 수 있고, 중위도 순환의 폭과 편향에 따라서도 진로가 변화할 수 있다. 따라서 Fig. 6에서 제시된 4종류의 MSEs 개념모델은, 상황에 맞게 응용할 수 있어야 한다.

2) RVS

태풍의 상층에 연직시어가 존재할 때 실제 태풍과 모델이 모의하는 태풍 사이에 연직구조의 깊이와 그와 관련된 강도가 상당히 차이가 나는 경우 RVS 메커니즘이 발생하게 되며, 진로예보오차가 발생하는 과정을 Fig. 7에서 보여주고 있다. Fig. 7의 a와 c는 상층 평면유선도(500hPa streamline)이며 b와 d는 시어가 존재하는 바람벡터의 연직단면도이다. Fig. 7b에서처럼 모델이 모의하는 태풍의 구조가 실제 태풍의 구조와 차이가 나고 연직 시어에 반응하게 되면, Fig. 7a의 모델모의 태풍과 실제 태풍의 이동속도는 차이가 나게 된다. 모델이 모의하는 태풍의 연직구조와 실제 태풍의 연직구조 사이의 차이는 Fig. 7d와 같이 예보시간이 길어질수록 더 커지게 되고, 그 결과 Fig. 7c에서 볼 수 있듯이 모델에서 모의하는 태풍은 실제 태풍에 비해 이동속도의 차이가 발생하며 오차가 발생하게 된다.

I-RVS는 Fig. 7b에서 점선으로 표시한 실제 태풍 구조와 비교하여 볼 때, 모델이 모의하는 Fig. 7b의 파선으로 나타낸 태풍의 연직구조가 너무 깊고 곧바로 서 있을 때이며, Fig. 7c의 파선처럼 모델에서 제시하는 진로예보가 Fig. 7c의 점선으로 표현된 실제 진로에 비해 빠르게 모의된다. 반면에, E-RVS는 Fig. 7b 점선의 실제 태풍 구조와 비교하여 Fig. 7b 파선의 모델모의 태풍의 연직구조가 너무 얇고 심하게 기울어 있을 때이며, Fig. 7c 점선으로 표현된 모델모의 태풍이동속도가 Fig. 7c 파선의 실제 진로에 비해 느리게 모의되고, 결국은 상층과 하층간의 순환이 분리되기도 한다.

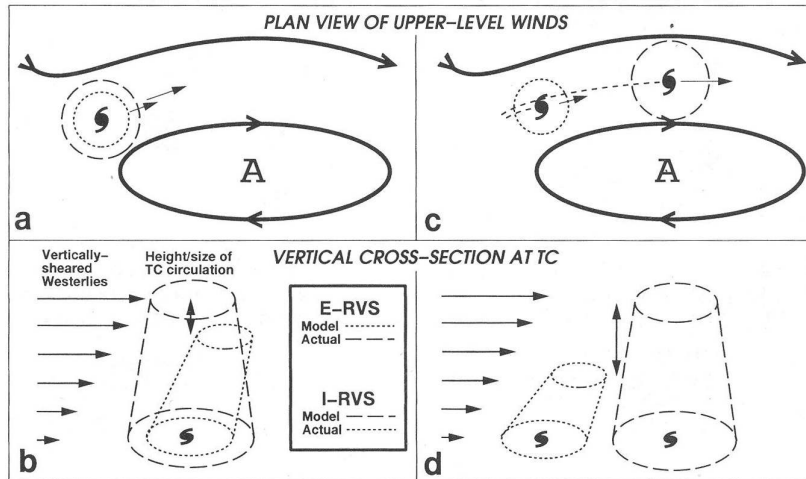


Fig. 7. Conceptual model of the RVS. Plan view of the 500-hPa environmental flow (a : analysis, c : forecast) and vertical cross section along the vertical wind shear vector through the TC with different vertical extents (b : analysis, d : forecast).

3) BCI

태풍이 온대저기압으로 변질되는 전이과정을 Fig. 8에서 BCI 개념모델로 보여주고 있는데, 이때 태풍이 온대저기압으로 변질되는 전이과정을 모델에서 과대(E-BCI) 또는 과소(I-BCI)하게 모의하였을 때 상당한 예보오차가 발생한다.

Fig. 8a를 보면, 태풍이 온대저기압으로 변질되는 전이과정에서 북쪽 또는 북서쪽에 중위도 골이 위치하고 태풍은 동쪽 아열대고기압축의 가장자리에 있으며 상층 제트 최대풍역이 태풍의 북동쪽(또는 북서쪽)에 위치하게 된다. 제트 최대풍역의 오른쪽 입구(또는 왼쪽 출구)는 상층 발산이 강해지는 지점으로 해당지역 대기 하층에 수렴역과 저기압을 유발시키며 Fig. 8b에서처럼 북동진 하고 있는 태풍을 가속 시킨다. BCI는 태풍의 진로에 관여하는 중위도 골의 기울기와 방향에 따라 다양한 이동방향과 이동속도를 유발시킨다. Fig. 8d의 E-BCI는 태풍이 온대저기압으로 변질되는 과정을 실제보다 과대 또는 잘못 모의할 때 북쪽 편이를 보이며, Fig. 8d의 I-BCI는 태풍이 온대저기압으로 변질되는 과정을 실제보다 과소모의 또는 전혀 모의하지 않을 때 남쪽 편이를 보이게 된다.

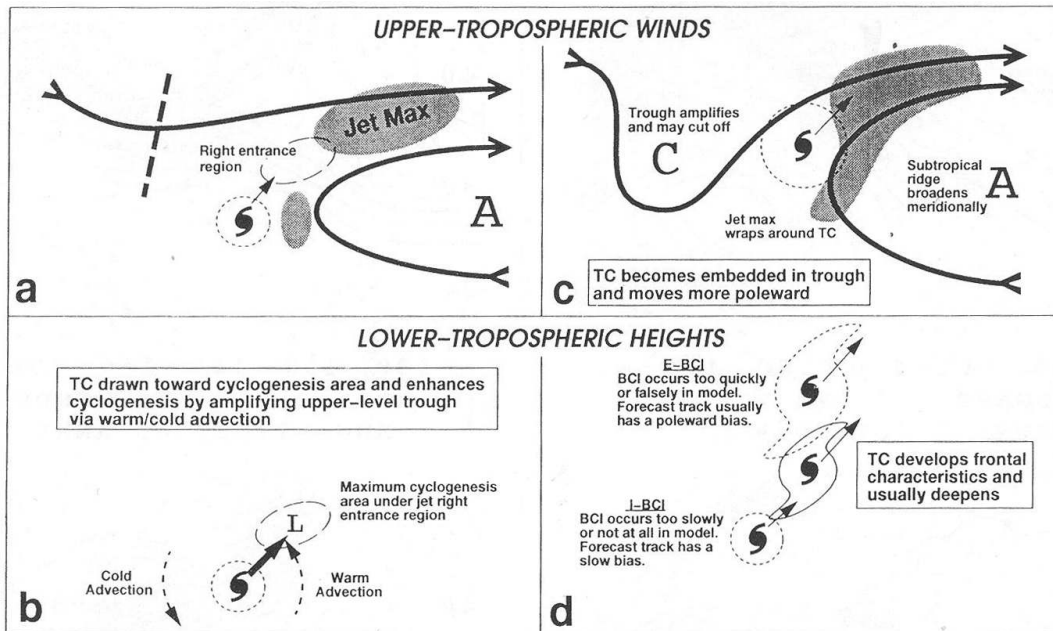


Fig. 8. Schematics of two stages of baroclinic cyclone interaction (BCI) with a recurving TC that is potentially undergoing extratropical transition.

III 연구방법

3.1. 분석자료 및 기간

본 연구에서는 우리나라 기상청 현업에서 사용 중인 GDAPS(UM)의 태풍진로 예측자료를 기상청 국가태풍센터가 분석한 태풍중심위치와 비교하여 72-h 진로 예보오차가 320km 이상인 사례들을 분석자료로 선정하였다.

분석기간은 2012년 3월 29일 00UTC에 발생한 제1호 태풍의 예보시점부터 2012년 12월 27일 12UTC에 열대저압부로 약화된 제25호 태풍까지이다. GDAPS(UM)는 매일 00, 06, 12, 18UTC 4회 예보장을 생산하며, 00UTC와 12UTC에는 최대 252-h 진로예보를 수행하지만 06UTC와 18UTC에는 72-h까지만 진로예보를 수행한다. 따라서, 가능한 최대의 동일기준 예보오차를 평가하기 위해 72-h 진로예보자료에 대하여 분석하였다. 진로예보오차 메커니즘 규명을 위한 분석장은 GDAPS(UM)의 200hPa, 500hPa, 850hPa Stream Line and Isotach 00-h FCST를 이용하고, 예보장은 GDAPS(UM)의 200hPa, 500hPa, 850hPa Stream Line and Isotach 06-h부터 72-h까지 예보장을 이용하였다.

3.2. 분석사례 선정방법

Table 3은 기상청 국가태풍센터에서 2010년부터 2012년까지 최근 3년간의 예보오차를 평가하여 2013년부터 사용하고 있는 태풍위치 70%확률범위이다(기상청 태풍예보업무매뉴얼, 2013). 본 연구에서는 국가태풍센터의 태풍위치 70%확률범위를 참조하여 GDAPS(UM)가 모의한 72-h 예보 중 320km 이상의 오차가 발생한 사례를 진로예보오차 분석사례로 선정하였다.

Table 3. Area of 70% probability (km) of typhoon center position at 24, 48, 72, 96, 120-h later, respectively by KMA.

TAU	24-h	48-h	72-h	96-h	120-h
Area of 70% probability (km)	140	230	320	460	550

3.3. 개념모델을 이용한 태풍진로예보오차 원인 평가

2012년 GDAPS(UM)에서 발생한 진로예보오차사례들에 대한 원인을 규명하기 위해 분석장과 예보장의 전개과정에 대한 비교를 통하여 진로예보오차 원인을 Carr와 Elsberry의 개념모델에 적용시켜 평가하였다.

진로예보오차 사례들은 발생지역에 따라 열대관련 개념모델과 중위도관련 개념모델로 분류하여 적용하였다. 열대관련 진로오차 원인은 두 태풍의 상호작용과 베타효과와 관련된 과정으로 구분하였고, GDAPS(UM)가 관련된 개념모델을 과대모의 또는 과소모의 하는지에 대하여 평가하였다. 중위도관련 진로오차 원인은 MSEs와 RVS, 그리고 BCI로 구분하여 GDAPS(UM)가 각각의 개념모델을 과대모의 또는 과소모의 하는지 평가하였다. RVS의 경우 중위도관련 오차 메커니즘으로 분류하였는데, 전구모델의 분해능(Resolution)이 향상됨에 따라 열대지역에서도 RVS에 의한 오차가 발생하여 열대지역에서 발생하는 경우 RVS-t(tropical), 중위도지역에서 발생하는 경우 RVS-m(midlatitude)으로 구분하였다(Carr and Elsberry, 2000b).

사례분석의 경우, 열대지역에서 발생하는 오차 메커니즘 중에서 두 태풍의 상호작용 중 오차사례가 많이 발생한 E-DCI와 베타효과와 관련된 과정에서 오차사례가 많이 발생한 E-RMT 사례를 선정하여 분석하였고, 중위도지역에서 발생하는 오차 메커니즘 중에서는 MSEs가 오차원인의 대부분을 차지하여, MSEs 중에서 중위도능과 관련된 E-MAG와 중위도 골과 관련된 E-MCG 사례를 분석하였으며, I-MCG의 경우 MSEs 사례 중에서 가장 많이 발생하여 추가 분석하였다. 사례로 분석한 5가지 메커니즘은 2012년 가장 빈번하게 발생한 5가지 진로예보오차 메커니즘이며, 500hPa Stream Line and Isotach를 이용하여 개념모델의 전개과정을 설명하였다.

IV 결과 및 고찰

4.1. 2012년 진로예보오차 특성

Table 4에 2012년 북서태평양에서 발생한 태풍과 기상청이 발표한 태풍정보 횡수, GDAPS(UM)가 생산한 72-h 이상의 예보횡수 및 기간, 그리고 GDAPS(UM)에서 발생한 진로예보오차 횡수를 정리하여 나타냈다. 여기서 보면, 2012년 GDAPS(UM)에서 발생한 72-h 진로예보오차는 총 25개의 태풍 중 17개의 태풍에서 126회 나타났다. Table 4의 4번째 열 괄호안의 수치는 2012년 국가태풍센터가 발표한 태풍정보횡수로써 총 650회이며, 4번째 열의 수치는 GDAPS(UM)가 수행한 72-h 이상의 태풍예보횡수이며 299회로 조사되었다. GDAPS(UM)가 수행한 299회의 예보 중에서 Table 4의 5번째 열에서 보여주는 수치는 72-h 태풍위치 70%확률범위 320km 기준을 넘어서며 발생한 진로예보오차로서 126회 나타났다. 25개의 태풍 중에서 GDAPS(UM)가 모의한 4개의 태풍(1205, 1206, 1208, 1220)은 잘못된 진로예보가 발생하지 않았고, 또 다른 4개의 태풍(1207, 1212, 1219, 1225)은 첫 예보시점 기준으로 72-h 이전에 온대저기압으로 변질되거나 열대저압부로 약화 즉, 태풍이 소멸되어 평가에서 제외하였다.

Carr와 Elsberry(2000a, b)의 개념모델을 이용하여 GDAPS(UM) 진로예보오차 원인을 평가한 본 연구에서, GDAPS(UM)가 언제 또는 어디서 열대저기압 이동 방향을 지배하는 상호작용을 부적절하게 모의하고 있는지 진단한 결과를 나타낸 Fig. 9를 보면, 가장 빈번하게 발생한 진로예보오차 메커니즘은 I-MCG로 분석되었다. Fig. 9에서 볼 수 있듯이, I-MCG 다음으로 빈번하게 발생한 진로예보오차 메커니즘은 E-RMT, E-MCG, E-MAG, E-DCI, E-MAL, I-ICIE, I-RMT, I-MAL, E-RVS-m, I-RTF 및 E-RVS-t 순으로 분석되었다. 그 중에서 가장 빈번하게 발생한 다섯 개의 진로오차 메커니즘 즉, I-MCG, E-RMT, E-MCG, E-MAG, E-DCI에 대한 사례분석을 통하여 오차 원인을 밝혔다.

Table 4. Summary of the typhoons in 2012.

TY No.	Name	Starting times of affected model runs	No. of forecasts	No. of error cases
1201	PAKHAR	00 UTC 29 Mar - 00 UTC 02 Apr	5* (17)	3**
1202	SANVU	00 UTC 22 May - 03 UTC 28 May	11 (26)	8
1203	MAWAR	06 UTC 01 Jun - 06 UTC 06 Jun	8 (21)	3
1204	GUCHOL	06 UTC 12 Jun - 00 UTC 20 Jun	17 (32)	3
1205	TALIM	18 UTC 17 Jun - 21 UTC 20 Jun	1 (14)	0
1206	DOKSURI	12 UTC 26 Jun - 00 UTC 30 Jun	2 (15)	0
1207	KHANUN	06 UTC 16 Jul - 03 UTC 19 Aug	0 (19)	-
1208	VICENTE	12 UTC 21 Jul - 18 UTC 24 Aug	2 (14)	0
1209	SAOLA	00 UTC 28 Jul - 06 UTC 03 Aug	13 (26)	6
1210	DAMREY	12 UTC 28 Jul - 06 UTC 03 Aug	11 (28)	1
1211	HAIKUI	00 UTC 03 Aug - 12 UTC 09 Aug	15 (27)	2
1212	KIROGI	00 UTC 08 Aug - 00 UTC 10 Aug	0 (9)	-
1213	KAI-TAK	00 UTC 13 Aug - 06 UTC 18 Aug	10 (22)	9
1214	TEMBIN	00 UTC 19 Aug - 15 UTC 31 Aug	24 (53)	6
1215	BOLAVEN	06 UTC 20 Aug - 21 UTC 29 Aug	25 (42)	14
1216	SANBA	00 UTC 11 Sep - 00 UTC 18 Sep	16 (34)	4
1217	JELAWAT	18 UTC 20 Sep - 06 UTC 01 Oct	31 (43)	20
1218	EWINIAR	12 UTC 24 Sep - 00 UTC 30 Sep	10 (23)	5
1219	MALIKSI	06 UTC 01 Oct - 06 UTC 04 Oct	0 (13)	-
1220	GAEMI	12 UTC 01 Oct - 12 UTC 06 Oct	9 (21)	0
1221	PRAPIROON	12 UTC 07 Oct - 06 UTC 19 Oct	34 (48)	12
1222	MARIA	12 UTC 14 Oct - 18 UTC 18 Oct	6 (18)	6
1223	SON-TINH	18 UTC 23 Oct - 06 UTC 29 Oct	10 (23)	1
1224	BOPHA	18 UTC 26 Nov - 06 UTC 09 Dec	39 (51)	23
1225	WUKONG	00 UTC 25 Dec - 12 UTC 27 Dec	0 (11)	-
Total			299 (650)	126

* the number of forecasts when the analyzed track position by KMA was available at least up to 72-h forecasts.

() the number with the official typhoon information services to the public.

** the number of forecasts when the model was affected by erroneous forecasts.

No large error case in 1205, 1206, 1208, and 1220;

and early dissipation before 72 h, in 1207, 1212, 1219, and 1225.

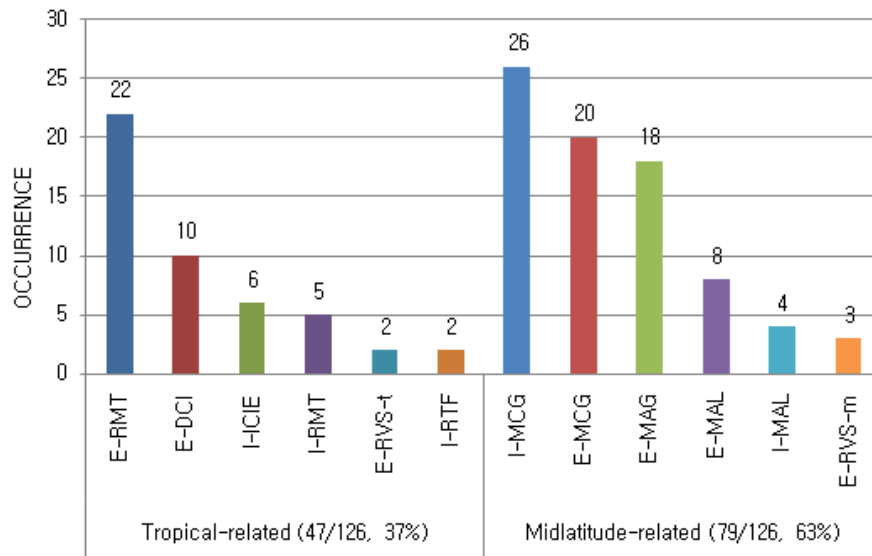


Fig. 9. Characteristics of error mechanisms by GDAPS(UM) during the typhoon season in 2012.

Table 5는 2012년 GDAPS(UM)의 태풍별 72-h 평균진로오차와 진로예보오차가 발생한 사례들에 대한 평균진로오차를 나타낸 것으로서, 2012년 GDAPS(UM)에서 수행한 21개의 태풍 299회의 진로예측 중에서 72-h 평균진로오차는 331km로 분석되어 태풍위치 70%확률범위(Table 3) 320km 보다 큰 특성을 보였다. Table 5에서 보면, GDAPS(UM)에서 발생한 72-h 진로예보오차에 선정된 126사례의 평균진로예보오차는 541km로 분석되어 태풍위치 70%확률범위보다 221km 크게 나타났다. GDAPS(UM)의 72-h 예보와 비교하여 진로예보오차 발생확률이 가장 높은 태풍은 제22호 태풍으로 6회의 예측정보 중 6회 모두 오차가 발생하며 평균진로예보오차 628km를 보였다. 72-h 평균진로예보오차가 가장 크게 발생한 태풍은 비록 10회 예측정보 중 단 1회의 진로오차만 발생하였지만 제23호 SON-TINH에서 I-MAL(Table 8)로 인하여 808km의 진로오차가 나타났다.

GDAPS(UM)에서 발생한 진로예보오차 범위별 발생빈도를 Fig. 10에 나타냈다. 여기서 보면, 200~320km의 진로예보오차 빈도가 72회로 가장 많이 발생하였고, 100~200km의 오차 빈도가 그 다음으로 64회 나타나서 320 km 이내의 예보오차 빈도가 많이 발생하였다.

Table 5. Summary of the mean track error (km) during the typhoon season in 2012.

TY No.	Mean track error	Mean track error of error cases
1201	338 (5 [*])	426 (3 ^{**})
1202	454 (11)	534 (8)
1203	227 (8)	379 (3)
1204	242 (17)	585 (3)
1205	254 (1)	
1206	304 (2)	
1207		
1208	275 (2)	
1209	284 (13)	442 (6)
1210	203 (11)	385 (1)
1211	186 (15)	340 (2)
1212		
1213	539 (10)	565 (9)
1214	258 (24)	499 (6)
1215	366 (25)	491 (14)
1216	236 (16)	511 (4)
1217	440 (31)	610 (20)
1218	477 (10)	717 (5)
1219		
1220	183 (9)	
1221	375 (34)	735 (12)
1222	628 (6)	628 (6)
1223	179 (10)	808 (1)
1224	345 (39)	425 (23)
1225		
Mean (Total)	331 (299)	541 (126)

(^{*}) the number of forecasts when the analyzed track position by KMA was available at least up to 72-h forecasts.

(^{**}) the number of forecasts when the model was affected by erroneous forecasts.

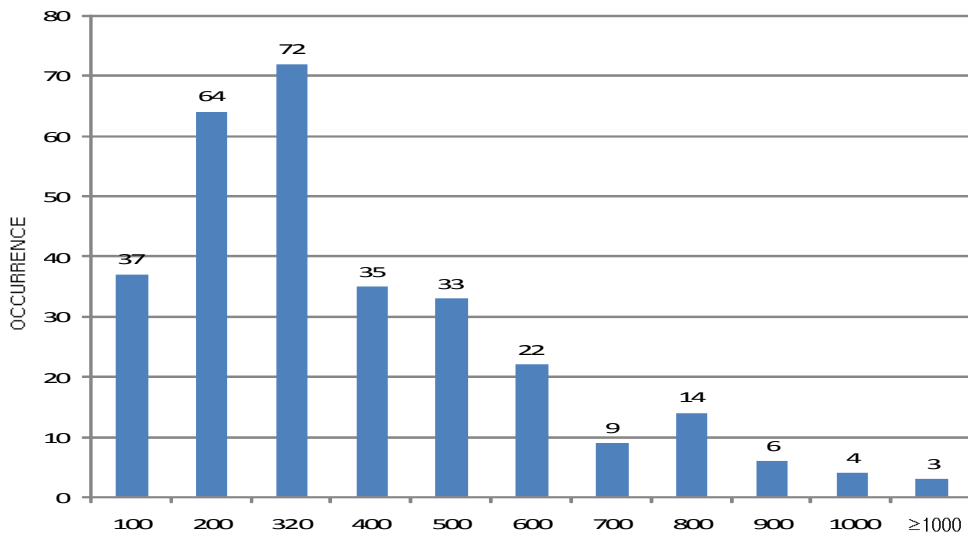


Fig. 10. Occurrence frequency according to error distance (km) by GDAPS (UM) during the typhoon season in 2012.

2012년 GDAPS(UM)에서 발생한 진로예보오차 메커니즘을 열대관련 개념모델과 중위도관련 개념모델로 구분하여 Table 6에 나타냈다.

Table 6에서 보면, 2012년 북서태평양 열대관련 진로오차 원인은 GDAPS(UM)의 72-h 태풍진로예보오차에서 37%(47회/126회)를 차지하였으며, RMT, DCI, ICIE, RTF, RVS-t로 분석되었다. RMT 진로오차 메커니즘은 GDAPS(UM)에서 로스비파열 내의 에너지가 태풍의 서쪽 저기압성 순환에서 고기압 순환인 남동쪽으로 이동하는 과정에서 주변고기압을 잘못 모의하면서 발생하였고(Fig 13), 4.2에서 사례분석을 통하여 오차 원인을 분석하였다. DCI 진로오차 메커니즘의 경우, 두 개의 태풍이 반시계방향으로 회전하는 과정을 GDAPS(UM)가 실제보다 과대모의하면서 발생하였고(Fig 15), 4.2에서 오차 원인을 밝혔다. ICIE 진로오차 메커니즘은 사례분석을 하지는 않았지만 GDAPS(UM)에서 중위도 골을 깊게 모의하고 그에 동반된 주변고기압도 강하게 모의되면서 태풍을 이끄는 지향류가 실제보다 강하게 형성되며 오차가 발생하였다. E-RVS-t의 경우에도 사례분석을 제시하지는 않았지만 열대지역에서 약화되며 소멸되는 태풍의 연직구조를 GDAPS(UM)가 실제보다 약하게 모의할 때 발생하였고, 실제 태풍은 연직구조를 유지하고 있었다.

Table 6. Error mechanisms for large 72-h track forecast errors by GDAPS(UM) during the typhoon season in 2012.

Error mechanism	Acronym	Excessive	Insufficient
Tropical related conceptual model			
Ridge modification by TC	RMT	22	5
Direct cyclone interaction	DCI	10	
Indirect cyclone interaction on Eastern TC	ICIE		6
Reverse trough formation	RTF		2
Response to vertical wind shear	RVS-t	2	
Midlatitude related conceptual model			
Midlatitude cyclogenesis	MCG	20	26
Midlatitude anticyclogenesis	MAG	18	
Midlatitude anticyclolysis	MAL	8	4
Response to vertical wind shear	RVS-m	3	
Total		83	43

Table 6에 제시된 바와 같이 2012년 중위도지역에서 발생 또는 중위도 시스템과 관련하여 발생하는 GDAPS(UM)의 72-h 진로예보오차 메커니즘은 63%(79회/126회)를 차지하였으며, MCG, MAG, MAL, RVS-m으로 분석되었다. MCG 진로오차 메커니즘은 GDAPS(UM)에서 S 종관패턴 또는 P 종관패턴에 위치하여 있던 태풍이 M 종관패턴으로 전이하면서 전개되는 중위도 골의 진화 과정을 잘못 모의하면서 발생하였다(Fig 18, Fig 22). MAG 진로오차 메커니즘은 GDAPS(UM)가 대륙고기압의 발달을 과대 모의하면서 태풍의 북쪽 또는 북서쪽에서 강화된 대륙고기압이 주변고기압의 역할을 하였기 때문에 진로오차가 발생하였다(Fig 20). 4.3에서는 MSEs 중 가장 빈번하게 발생한 I-MCG, E-MAG, E-MCG 사례분석을 통하여 오차 원인을 밝혔다. 한편, MAL 진로오차 메커니즘은 태풍의 북쪽에 위치한 주변고기압이 두 개의 셀로 나뉘면서 북쪽으로 이동하여 오차가 발생하였는데 사례를 분석하지는 않았지만 실제 고기압은 GDAPS(UM)에서 모의한 것처럼 약화되지는 않았다. E-RVS-m의 경우에는 E-RVS-t와 마찬가지로 GDAPS(UM)가 모의하는 태풍이 중위도 편서풍에 반응하며 온대저기압으로 변질되는 과정에서 연직 구조를 잘못 모의할 때 발생하였으며, 사례를 제시하지 않았지만 실제 태풍은 중위도 편서풍에 의한 연직시어에 강하게 반응하지 않으면서 대칭적인 연직구조를 유지하고 있었다.

4.2. 열대관련 진로오차 원인 평가

열대지역에서 발생하는 태풍의 진로예보오차는 베타효과(Beta-effect)가 관련된 프로세스(RMT, RTF)와 두 태풍의 상호작용(DCI, ICI)으로 구분하여 설명할 수 있으며, 최근 전지구 역학모델들의 분해능이 향상됨에 따라 연직시어에 관련된 진로오차 메커니즘(RVS-t)도 나타나고 있다(Carr and Elsberry, 2000a).

Table 7은 2012년 북서태평양에서 GDAPS(UM)가 잘못 모의하며 발생한 열대관련 진로예보오차 원인을 나타낸 것으로, 8개의 태풍에서 47회의 오차가 발생하여 전체 진로예보오차 126회 중에서 37%를 차지하였다.

Table 7. Cases of tropical-related erroneous sources (RMT, RTF, DCI, ICI, and RVS-t) of GDAPS(UM) 72-h forecasts during the typhoon season in 2012.

TY No.	Name	Mechanism	Occurrence
1204	GUCHOL	E-RVS-t	2
		E-RMT	1
1209	SAOLA	I-RMT	5
		E-DCI	1
1210	DAMREY	E-DCI	1
1213	KAI-TAK	E-RMT	9
1214	TEMBIN	E-DCI	4
		I-RTF	2
1215	BOLAVEN	E-RMT	10
		E-DCI	4
1221	PRAPIROON	E-RMT	2
1224	BOPHA	I-ICIE	6
Total			47

열대관련 진로오차 원인은 베타효과와 관련된 과정과 두 태풍의 상호작용 그리고 연직시어에 관련된 과정으로 분석되었으며 Fig. 11에서 각 메커니즘별 발생 횟수로 구분하여 나타냈다. 여기에서 보면, 47회의 열대관련 진로오차 원인 중에서 베타효과와 관련된 과정이 29회 발생하여 62%를 차지하였으며, 그 중 E-RMT 22회, I-RMT 5회, I-RTF 2회 발생하였다. 베타효과관련 진로오차 메커니즘은 로스비파열 내의 에너지가 서쪽 저기압성 순환에서 고기압 순환인 남동쪽으로 이동하는 과정을 GDAPS(UM)가 잘못 모의했기 때문에 발생하였고, 4.2에서 가장 많이 발생한 E-RMT에 대한 사례 분석을 통하여 진로오차 원인을 확인 할 수 있었다.

두 태풍의 상호작용과 관련한 진로오차 메커니즘은 Fig. 11에서 보여 지듯이 16회 발생하여 34%를 차지하였고, E-DCI가 10회, I-ICIE가 6회 발생하였다. 두 태풍의 상호작용에서 두 개의 태풍이 반시계방향으로 회전을 하다가 훨씬 큰 하나의 순환으로 병합되는 과정의 DCI와 동쪽 태풍의 진로가 서쪽 사이클론의 영향을 받는 I-ICIE 과정을 GDAPS(UM)가 잘못 모의하면서 오차가 발생하였고, 4.3에서 빈번하게 발생한 E-DCI 사례분석을 통하여 오차원인을 알 수 있었다.

한편, E-RVS-t의 경우 사례분석에서는 제외하였지만 GDAPS(UM)가 모의하는 태풍이 열대지역에서 약화되며 소멸되는 과정의 연직 구조를 잘못 모의할 때 2회 발생하여 4%를 차지하였다.

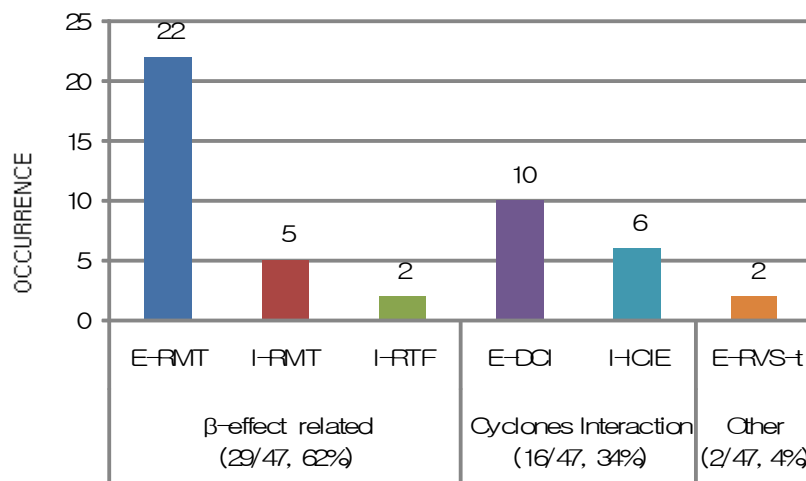


Fig. 11 Error mechanisms of Tropical-related error sources by GDAPS (UM) during the typhoon season in 2012.

1) 베타효과(β -effect)와 관련된 과정

E-RMT 사례

Fig. 12는 제13호 태풍 KAI-TAK에 대해서 우리나라 기상청에서 분석한 태풍 진로와 GDAPS(UM)가 예측한 72-h 진로를 비교하여 나타낸 것이다. 여기서 보면 GDAPS(UM)가 모의한 진로가 실제 KAI-TAK의 진로보다 북동쪽으로 편향되었음을 알 수 있다. Fig. 12에 제시된 바와 같이 KAI-TAK은 서북서진의 진로를 보여, GDAPS(UM)의 진로예측은 북동쪽 편이를 보였다. KAI-TAK 사례는 진로예보에 과도한 베타효과전파(Excessive-Beta effect propagation, E-BEP)의 영향으로 E-RMT 메커니즘이 발생하였으며, Fig. 13에서 전개과정을 보였다.

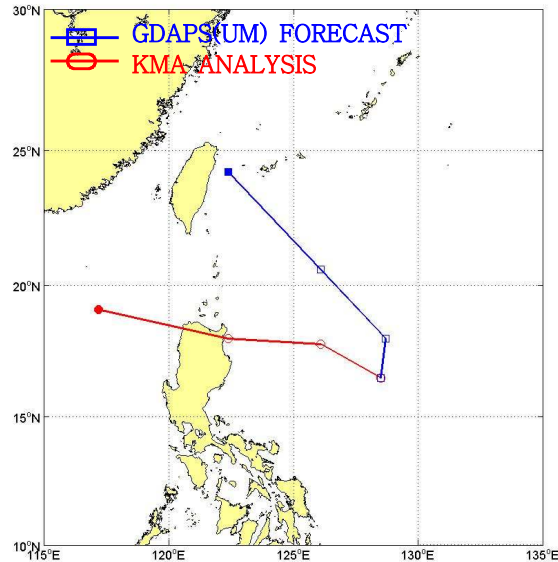


Fig. 12. Comparisons between analysis tracks by KMA and forecast tracks up to 72 hours by GDAPS(UM) for No. 13 KAI-TAK initiated at 00 UTC 13 Aug 2012.

GDAPS(UM)가 모의한 72-h까지 예보장을 분석장과 비교하여 진로예보오차 메커니즘이 발생하는 과정을 보이기 위해 Fig. 13에서 유선장을 같은 시간대별로 구분하여 비교할 수 있게 나타냈다. Fig. 13의 왼쪽 열은 GDAPS(UM) 72-h까지의 유선 예보장이며 오른쪽 열은 유선 분석장으로 00, 24, 48, 72까지 행별로 구분하여 같은 시각에 대한 예보장과 분석장을 비교분석 할 수 있도록 구성하였다.

2012년 8월 13일 00UTC Fig. 13(a)의 GDAPS(UM) 초기장과 Fig. 13(e)의 분석장에서 태풍의 북서쪽에 저기압성 순환이 존재하고 있다. 또한, 태풍의 북쪽에 최대풍역이 형성되면서 태풍의 진로에 영향을 미치는 주변고기압은 북쪽의 아열대 고기압으로 KAI-TAK은 S/TE에서 주변고기압에 의해 형성된 서진 지향류의 영향을 받고 있다.

24시간 후 Fig. 13(b) GDAPS(UM) 예보장에서 KAI-TAK은 대칭성이 전시간에 비해 왜곡되어 있고, Fig. 13(f) 분석장의 태풍과 비교해 볼 때 수평규모도 크게 모의되고 있다.

48시간 후 Fig. 13(c) GDAPS(UM) 예보장에서도 KAI-TAK은 대칭성이 상당히 왜곡되어 있고 남동쪽 주변고기압이 변형되면서 S/PF로 전이하여 서북서진 지향류의 영향을 받고 있다. 하지만 Fig. 13(g)의 분석장에서는 태풍이 대칭성을 유지하고 있으며 태풍의 북쪽에 최대풍역이 형성되어 S/TE에서 전이하지 않고 지속적인 서진 지향류의 영향을 받고 있다.

72시간 후 Fig. 13(d)의 예보장을 보면, KAI-TAK은 대칭성이 상당히 왜곡되면서 두 개의 저기압성 순환으로 분리되어 있고 여전히 S/PF에서 서북서진 지향류의 영향을 받고 있다. 한편, Fig. 13(h) 분석장에서는 태풍이 대칭성을 계속 유지하고 있고 태풍의 북쪽에 최대풍역이 형성되어 S/TE에서 지속적으로 서진 지향류의 영향을 받고 있다. Fig. 13(d)의 예보장에서 두 개의 순환으로 분리된 저기압성 순환장은 하층순환(850hPa streamline, 보여주지 않음)에서 하나의 순환으로 유지되고 있고 하층순환 중심부근이 500hPa streamline의 중심과 거의 일치하면서 연직시어도 크지 않아 RVSS로 분류하지 않고 로스비파 전파에 의한 RMT로 분석하였다.

모델장에서 저기압성 순환규모와 대칭성이 왜곡되는 차이는 지속적으로 북쪽편이를 유발시켜 BEP의 영향을 받았음을 시사하고 있다. 모델장의 태풍규모가 분석장의 태풍규모 보다 다소 크게 모의되고, 모델장의 태풍 남동쪽 유선의 조밀도가 분석장의 유선조밀도 보다 높은 것을 유의할 필요가 있다. 또한, 모델장에서 모의하는 태풍 남동쪽의 주변고기압의 세력이 분석장의 주변고기압 세력 보다 크다는 것은 BEP와 극 쪽으로 편이된 예보를 암시하고 있다.

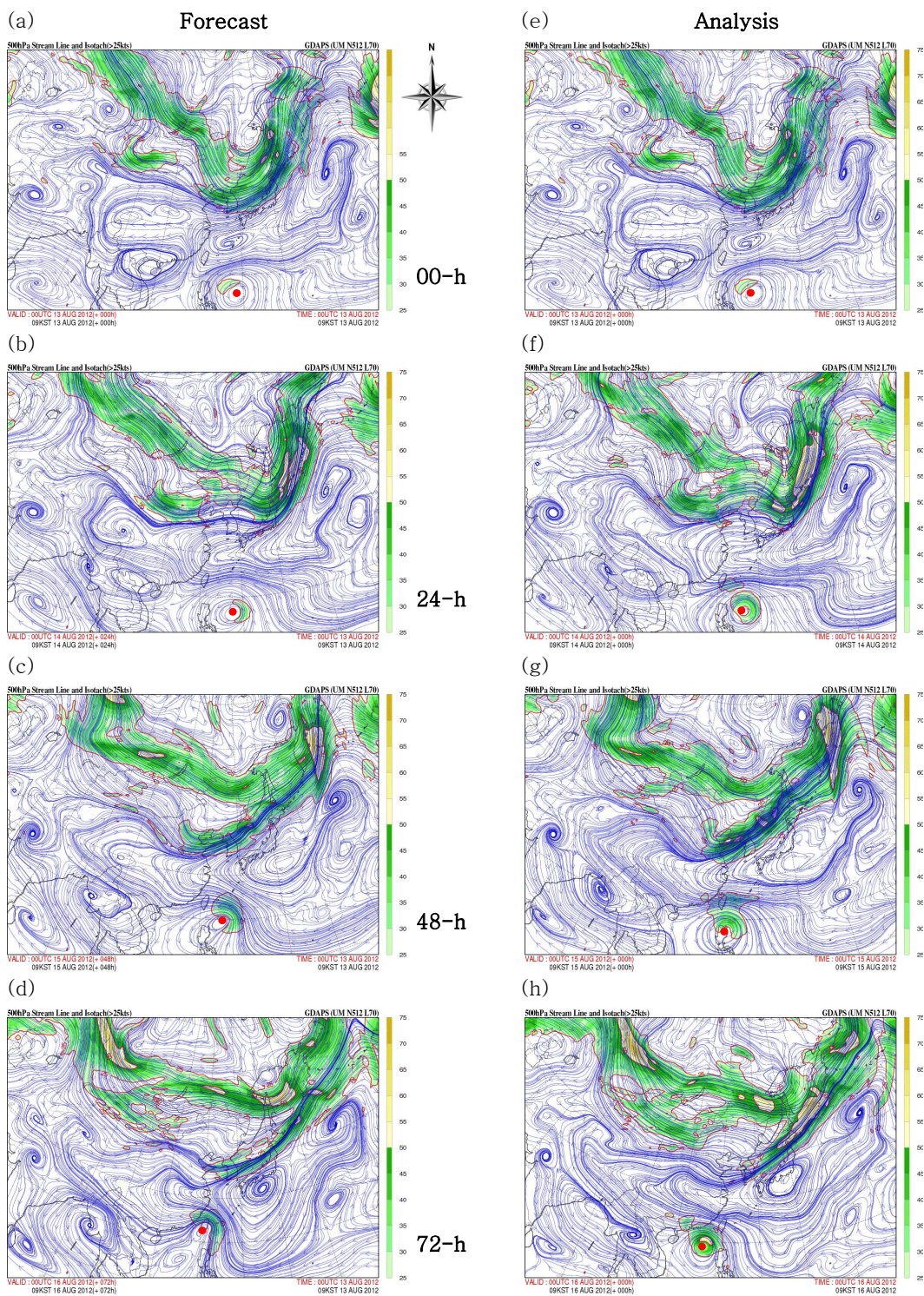


Fig. 13. 500hPa streamlines for KAI-TAK initiated at 0000UTC 13 Aug 2012. (a)-(d) the 00, 24, 48 and 72-h GDAPS(UM) forecast fields; (e)-(h) the 00, 24, 48 and 72-h verifying analyses, respectively. Isotach shading starts at 25 kt and the increment is 5 kt.

2) 두 태풍의 상호작용

E-DCI 사례

2012년 제14호 태풍 TEMBIN과 제15호 태풍 BOLAVEN은 서로 상호작용을 하며 반시계방향의 회전을 하였는데, Fig. 14에서 TEMBIN과 BOLAVEN의 실제 진로와 GDAPS(UM)가 모의한 72-h 진로를 비교하여 나타냈다. Fig. 14의 왼쪽에서 보여 지듯이 TEMBIN은 실제 진로에 비해 동쪽 편이, Fig. 14의 오른쪽에서 BOLAVEN은 서쪽편이를 보여 GDAPS(UM)에서 E-DCI 메커니즘이 발생하였고, Fig. 15에서 E-DCI 메커니즘 발생 과정을 보였다.

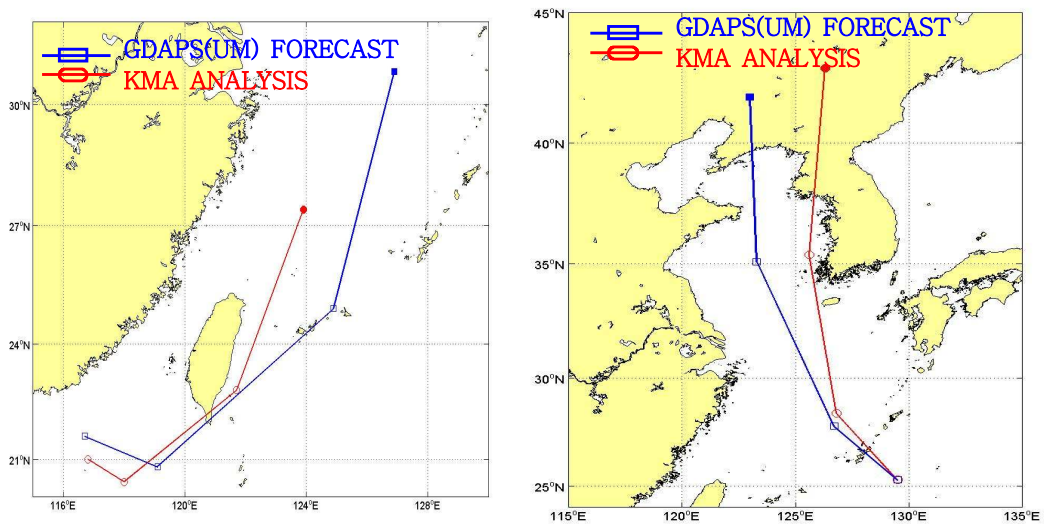


Fig. 14. Comparisons between analysis tracks by KMA and forecast tracks up to 72 hours by GDAPS(UM) for No. 14 TEMBIN (left) and No. 15 BOLAVEN (right) initiated at 0000UTC 26 Aug 2012.

Fig. 15는 TEMBIN과 BOLAVEN의 DCI 메커니즘을 확인하기 위해 GDAPS(UM) 예보장과 분석장을 비교한 것으로서 구성은 Fig. 13과 같다.

2012년 8월 26일 00UTC Fig. 15(a) 모델초기장과 Fig. 15(e) 분석장의 유선장을 살펴보면, TEMBIN과 BOLAVEN은 서로 영향권 내에 위치하여 있음을 알 수 있으며, TEMBIN은 P/EW에서 BOLAVEN을 중심으로 역회전 할 수 있는 위치에 있다. BOLAVEN은 TEMBIN에 비해 규모가 크기 때문에 상호작용의 영향을 덜 받고 TEMBIN은 BOLAVEN에 비해 규모가 작아서 역회전 반경이 더 넓

은 위치에 있다.

24시간 후 Fig. 15(b) GDAPS(UM) 예보장에서 TEMBIN은 BOLAVEN의 영향과 태풍의 남동쪽에 형성된 북동지향류의 영향으로 역회전 하고 있다. 하지만, Fig. 15(f)의 분석장에서 TEMBIN은 BOLAVEN의 영향을 받고 있지만 예보장에 비해 멀리 떨어져 있다. 특히, BOLAVEN은 TEMBIN의 영향을 거의 받지 않고 S/PF에서 북서지향류의 영향을 받고 있다.

Fig. 15(c)에서 보여 지듯이, 48시간 후 GDAPS(UM) 예보장 TEMBIN과 BOLAVEN의 회전축은 북-남남동쪽으로 기울어져 TEMBIN은 대만 동쪽해상 P/PF에서 북북동진, BOLAVEN은 서해상 S/PF에서 북북서진 지향류의 영향을 받고 있다. 하지만 Fig. 15(g) 분석장을 살펴보면, 두 태풍의 회전축은 북-남남서쪽으로 기울어져 GDAPS (UM)가 모의한 DCI에 비해 상호작용이 활발하게 일어나지 않았다. 한편, 분석장의 종관환경이 예보장과 비슷하기는 하지만 예보장에서 두 태풍의 상호작용이 분석장 보다 활발하게 일어나서 종관패턴과 종관지역의 구조가 조금 변화한 것을 알 수 있다.

72시간 후 중위도골-BOLAVEN-TEMBIN으로 이어진 거대한 역문순골(Reverse-oriented monsoon trough)을 Fig. 15(d) GDAPS(UM) 예보장에서 분석할 수 있다. 또한, TEMBIN은 저기압성 순환이 매우 약해져 있고 BOLAVEN과 상호작용의 결과로 제주도 남동쪽까지 역회전하여 P/PF에서 북진 지향류의 영향을 받고 있으며, BOLAVEN은 TEMBIN과 상호작용 없이 P/PF에서 북북동진 지향류의 영향을 받고 있다. Fig. 15(h)의 분석장에서도 중위도골-BOLAVEN-TEMBIN의 역문순골이 형성되어 있지만 예보장의 TEMBIN 위치와 차이가 있다. 또한, TEMBIN은 예보장과 달리 저기압성 순환을 유지하면서 BOLAVEN과의 상호작용 없이 P/PF에서 북진 지향류의 영향을 받고 있고, BOLAVEN도 P/PF에서 북북동진 지향류의 영향을 받고 있다.

두 태풍이 이동하면서 GDAPS(UM)가 모의하는 종관패턴과 종관지역의 전이 과정은 분석장과 비슷하게 진행되어 RTF로 이어졌고, 두 태풍의 주변고기압이 구조적으로 합쳐져서 동쪽에 하나의 거대한 고기압을 형성하면서 거의 동시에 비슷한 방향으로 이동하였지만 진행과정에서 두 태풍의 상호작용을 모델에서 실제보다 과대 모의하였기 때문에 E-DCI가 발생한 사례로 분석하였다.

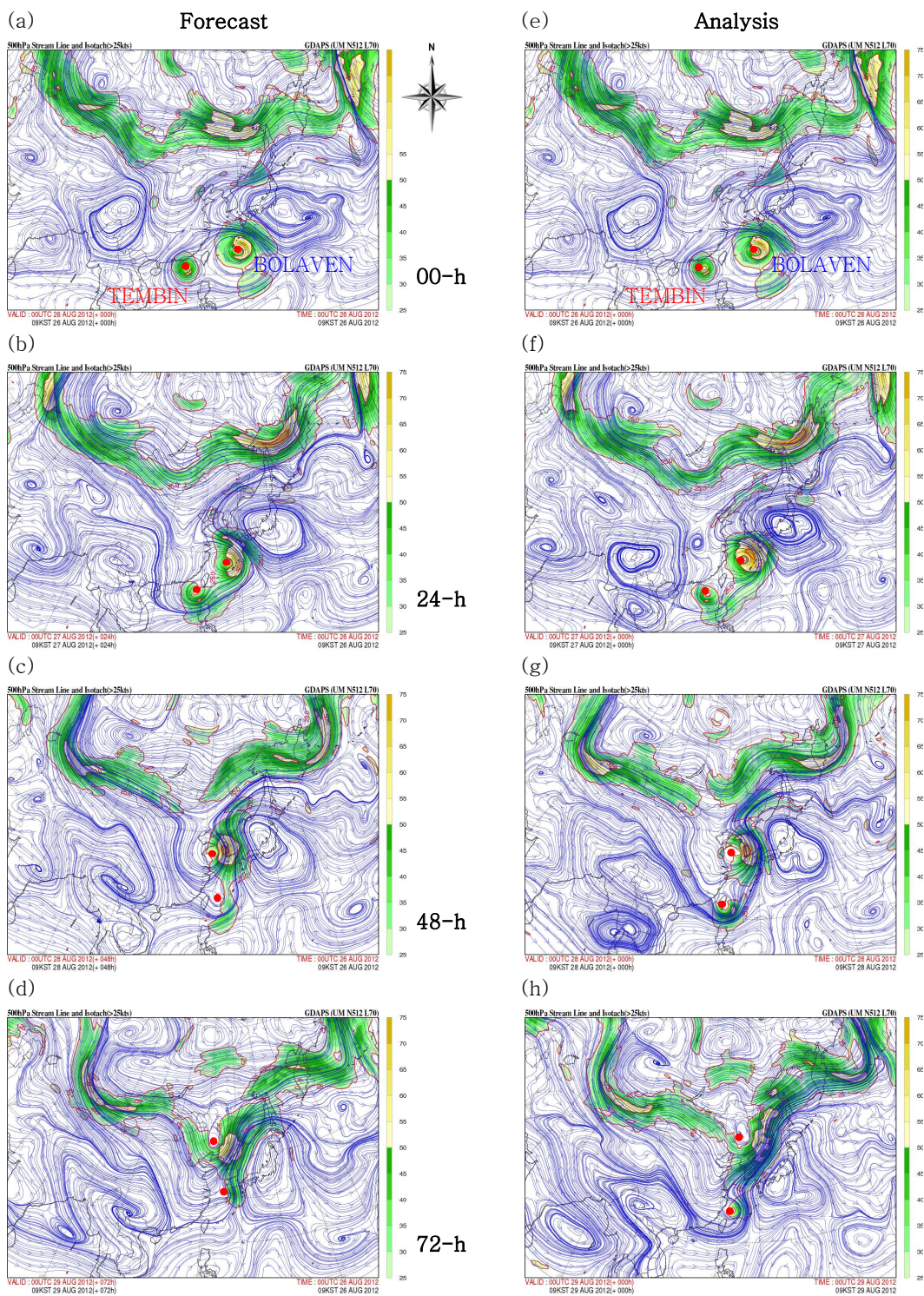


Fig. 15. 500hPa streamlines for TEMBIN and BOLAVEN initiated at 0000UTC 13 Aug 2012. (a)-(d) the 00, 24, 48 and 72-h GDAPS(UM) forecast fields; (e)-(h) the 00, 24, 48 and 72-h verifying analyses, respectively. Isotach shading starts at 25 kt and the increment is 5 kt.

4.3. 중위도관련 진로오차 원인 평가

태풍이 극 방향으로 이동하기 시작하면, 열대지역에서 중위도지역으로 전이는 대략 2~3일 사이에 이루어진다. 왜냐하면 태풍은 아열대고기압 근처 또는 북쪽에 위치해 있기 때문에 이동방향은 중위도 순환(cyclones, troughs, anticyclones, ridges)의 직접적인 영향을 받는데, 중위도 순환 자체는 태풍과 관계없이 이루어진다. 모델에서 잘못 예측되는 중위도 순환의 발달과 소멸 및 움직임은 태풍의 진로예측에 부정적인 영향을 끼치며, 모델의 진로오차를 유발하는 메커니즘은 중위도 골과 관련된 진로오차 메커니즘(E-MCG, I-MCL, I-MAG, E-MAL)과 중위도 능과 관련된 진로오차 메커니즘(I-MCG, E-MCL, E-MAG, I-MAL)으로 구분된다(Carr and Elsberry, 2000b).

2012년 태풍시즌에 GDAPS(UM)에서 중위도관련 개념모델로 진로예보오차가 발생한 사례들을 태풍별로 분류하여 Table 8에 나타냈다. 여기서 보면, 중위도관련 진로오차 메커니즘은 11개의 태풍에서 79회 발생하여 전체 진로예보오차 메커니즘의 63%를 차지하였다. 비록 중위도 관련 진로오차 메커니즘이 차지하는 부분이 2004(83% for NOGAPS, Kehoe et al., 2007)와 2005(88% for NOGAPS, Payne et al., 2007) 시즌의 연구와 직접적인 비교는 어렵지만, 여전히 전구 역학모델에서 중위도 시스템의 진화과정을 모의하는데 어려움이 있다는 것을 시사해 준다.

Table 8. Cases of midlatitude-related erroneous sources (MSEs, RVS) of GDAPS(UM) 72-h forecasts during the typhoon season in 2012.

TY No.	Name	Error Mechanism	Occurrence
1201	PAKHAR	I-MAL	3
1202	SANVU	I-MCG	5
		E-RVS	3
1203	MAWAR	E-MCG	2
		I-MCG	1
1211	HAIKUI	E-MAG	2
1216	SANBA	I-MCG	4
1217	JELAWAT	E-MAG	10
		I-MCG	10
1218	EWINIAR	E-MCG	5
1221	PRAPIROON	E-MAG	5
		I-MCG	5
1222	MARIA	E-MCG	6
1223	SON-TINH	I-MAL	1
1224	BOPHA	E-MAL	8
		E-MCG	7
		E-MAG	2
Total			79

Fig. 16은 GDAPS(UM)에서 중위도관련 진로오차 원인으로 발생한 메커니즘을 그래프로 나타냈다. 여기서 보면, 중위도에서 발생한 79회의 진로오차 메커니즘 중에서, 중위도 능과 관련된 프로세스는 48회 발생하여 61%를 차지하였고, I-MCG 26회, E-MAG 18회, I-MAL이 4회 발생하였다. 결국 태풍이 열대해상에서 중위도로 진입하면서 편서풍대의 영향을 받는 중위도 시스템의 진화과정을 GDAPS(UM)가 잘못 모의하면서 오차가 발생하였다. Fig. 18에서 GDAPS(UM)에서 발생하는 중위도 골의 과소모의 메커니즘을 I-MCG 사례분석을 통하여 진

화과정을 보였으며, Fig. 20에서는 고기압의 과대모의를 확인하기 위해서 E-MAG의 사례도 분석하였다.

Fig. 16에서 제시하는 바와 같이, 중위도 골과 관련된 프로세스는 28회 발생하여 35%를 차지하였고, E-MCG 20회, E-MAL 8회 순으로 나타났다. Fig. 22에서는 GDAPS(UM)에서 중위도 골과 관련된 프로세스 중 가장 빈번하게 발행한 E-MCG의 사례에 대하여 모델의 중위도 골 과대모의 과정을 보였다.

중위도 지역에서 E-RVS-m 진로오차 메커니즘은 Fig. 16에서 알 수 있듯이, GDAPS(UM)에서 3회 발생하여 4%를 차지하여 사례분석에서는 제외하였지만, E-RVS-m의 경우에도 E-RVS-t와 마찬가지로 GDAPS(UM)가 모의하는 태풍이 중위도 편서풍에 반응하며 온대저기압으로 변질되는 과정에서 연직 구조를 잘못 모의할 때 발생하였다. 하지만 실제 태풍은 중위도 편서풍에 의한 연직시어에 강하게 반응하지 않으면서 대칭적인 연직구조를 유지하고 있었다.

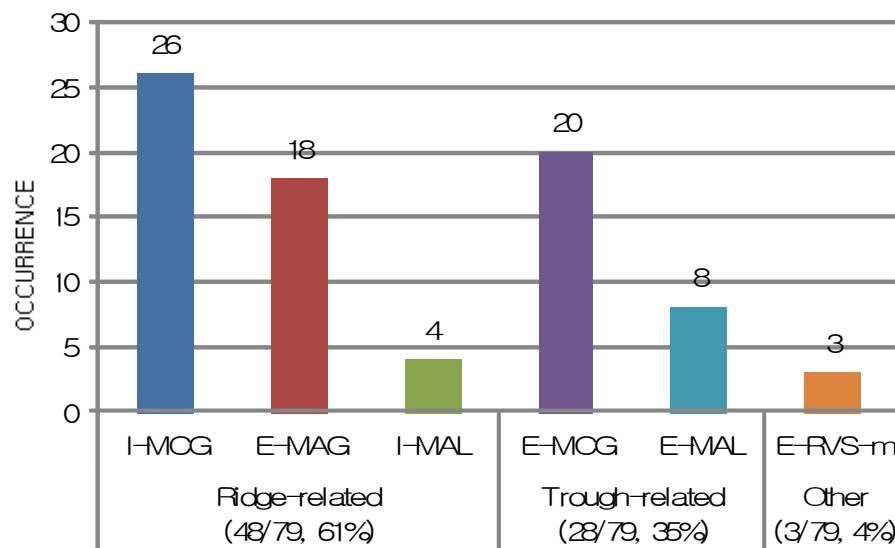


Fig. 16. Error mechanisms of Midlatitude-related error sources by GDAPS (UM) during the typhoon season in 2012.

1) 중위도 능과 관련된 진로오차 메커니즘

(1) I-MCG 사례

2012년 태풍시즌동안 중위도 능과 관련하여 가장 빈번하게 발생한 진로오차 메커니즘은 I-MCG였으며, GDAPS(UM) 예보장에서 26회의 진로예보오차가 I-MCG로 인해 나타났다(Table 6). 이러한 I-MCG 진로오차 메커니즘의 사례로서 2012년 9월 14일 06UTC SANBA에 대한 GDAPS(UM) 예보를 예로 들었으며, 제16호 태풍 SANBA는 제15호 태풍 BOLAVEN과 제14호 태풍 TEMBIN에 이어 세 번 연속으로 한반도에 직접적인 영향을 미쳤다(기상청 2012년 한반도 영향 태풍 분석, 2012).

Fig. 17은 제16호 태풍 SANBA의 실제진로와 GDAPS(UM)가 모의한 72-h 진로를 비교한 것으로서, 모델에서 모의하는 진로는 실제 진로와 비교하여 볼 때 남동쪽 편이를 보였다.

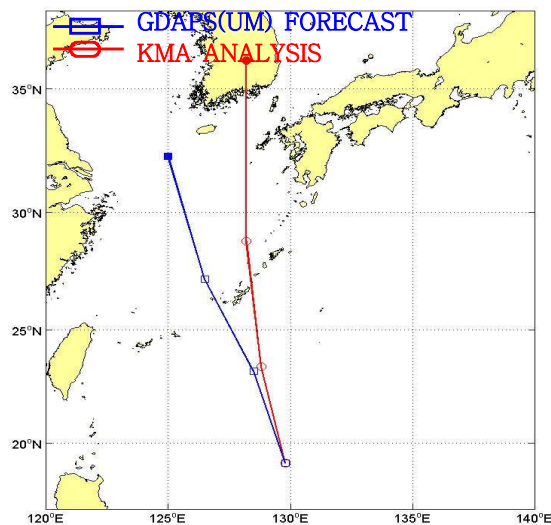


Fig. 17. Comparisons between analysis tracks by KMA and forecast tracks up to 72 hours by GDAPS(UM) for SANBA initiated at 0600UTC 14 Sep 2012.

Fig. 17에서 보여 지는 것처럼 GDAPS(UM)에서 모의한 태풍의 진로가 남동쪽 편이를 보인 원인은 I-MCG 메커니즘으로 진로오차가 발생하였기 때문이며, 모델의 예보장과 분석장을 비교한 Fig. 18에서 확인 할 수 있고, Fig. 18의 구성은 Fig. 13과 같다.

Fig. 18(a)와 Fig. 18(e)는 2012년 9월 14일 06UTC 모델 초기장과 분석장으로, 여기에서 보면 SANBA는 변형된 P 종관패턴에 위치하여 있다. 일반적으로 P 종관패턴 내에서 PF 종관지역은 태풍의 남동쪽에 최대풍역이 위치하여 북동진 지향류의 영향을 받는다(Fig. 1). 하지만 Fig. 18(a)와 (e)에서, 변형된 P/PF에 위치한 SANBA는 북쪽 고기압세력이 발달하면서 태풍의 동쪽에 최대풍역이 형성되어 북~북북서진 지향류의 영향을 받고 있고, 태풍의 북서쪽에는 중위도 골이 접근하고 있다.

24시간 후 Fig. 18(b)의 GDAPS(UM) 예보장에서 SANBA는 최대풍역이 태풍의 북동쪽으로 이동하여 주변고기압과 상호작용하며 만들어내는 북서진 지향류의 영향을 받기 시작하였다. 한편, 분석장의 SANBA는 Fig. 18(f)에서 보여지는 바와 같이, 종관상황은 예보장과 비슷하지만 북쪽 고기압 세력이 예보장에 비해 조금 약화되어 있고 최대풍역이 여전히 태풍의 동쪽에 형성되어 북진 지향류의 영향을 지속적으로 받고 있다. 이때, 예보장과 분석장에서의 중위도 골은 120°E 화남지방까지 진출하였지만 태풍의 진로에는 아직 영향을 미치지 못하고 있다.

Fig. 18(c)의 48시간 후 GDAPS 예보장에서 SANBA 북쪽의 고기압 세력은 약화되지 않고 중위도 골은 태풍의 진로에 영향을 미치지 못하며 빠져나가고 있다. 또한, 태풍은 북북서진 지향류의 영향을 받고 있으며 태풍의 서북서쪽에 중위도 2차 골이 접근하고 있다. 하지만, Fig. 18(g) 분석장에서 SANBA 북쪽 고기압은 약화되고 중위도 골은 태풍을 끌어들이 수 있을 만큼 깊게 침투하였음을 확인할 수 있으며, SANBA는 중위도골의 영향을 받아 가속될 수 있는 환경에 위치해 있다.

72시간 후 Fig. 18(d)에서 보여 지는 GDAPS(UM) 예보장의 SANBA는 서쪽에서 접근하는 중위도 2차 골의 영향을 받기 직전에 위치하여 있지만 북쪽에서 빠져나가는 중위도 골의 영향은 받지 못하고 있다. 한편, Fig. 18(h)에서 보여 지는 바와 같이 분석장의 SANBA는 중위도 골에 완전히 흡수된 것을 확인할 수 있고, 북진하면서 이동속도가 빨라지며 중위도 골과 합쳐져 온대저기압으로 변질과정을 거치고 있다.

Fig 18의 예보장과 분석장의 72-h 동안 전개과정을 종합해 보면, GDAPS(UM)가 중위도 골의 발달을 과소 모의하였기 때문에 SANBA는 중위도 편서풍지대로 이동할 수 없어 이동방향 및 이동속도에 큰 오차가 발생한 사례로 분석되었다. 따라서, I-MCG를 진로예보오차 메커니즘으로 지정하였다.

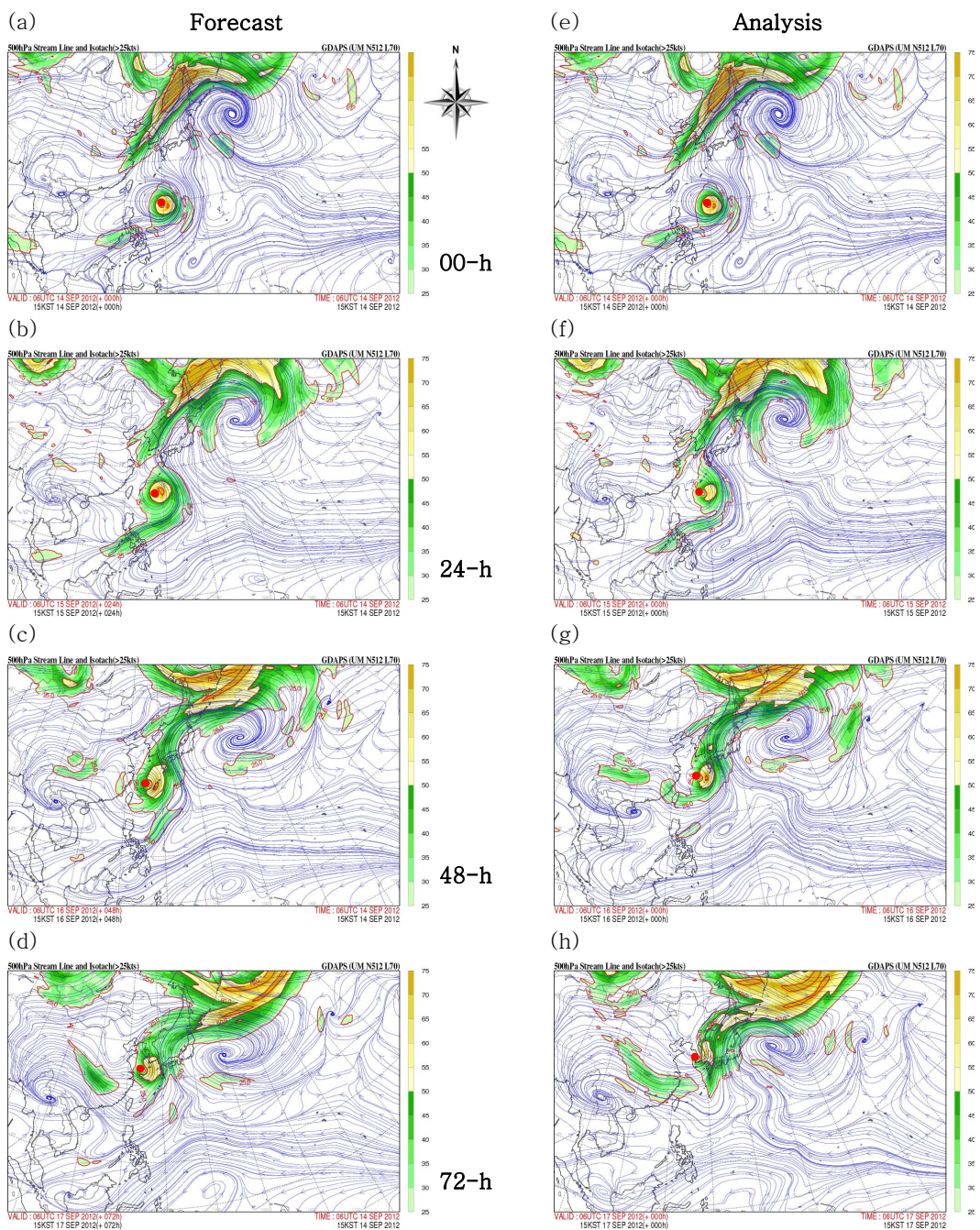


Fig. 18. 500hPa streamlines for SANBA initiated at 0600UTC 14 Sep 2012. (a)-(d) the 00, 24, 48 and 72-h GDAPS(UM) forecast fields; (e)-(h) the 00, 24, 48 and 72-h verifying analyses, respectively. Isotach shading starts at 25 kt and the increment is 5 kt.

(2) E-MAG 사례

중위도 능과 관련된 프로세스와 관련하여 2012년 태풍시즌 동안 두번째로 빈번하게 발생한 진로예보오차 메커니즘은 E-MAG이며, GDAPS(UM)에서 18회의 진로예보오차가 E-MAG 메커니즘 때문에 발생하였다(Table 6).

Fig. 19는 제17호 태풍 JELAWAT의 진로와 GDAPS(UM)가 예측한 72-h 진로를 비교하여 나타낸 것으로서, GDAPS(UM)가 모의한 태풍의 진로는 실제 JELAWAT의 진로와 비교하여 볼 때 남동쪽 편이가 발생하였음을 알 수 있다.

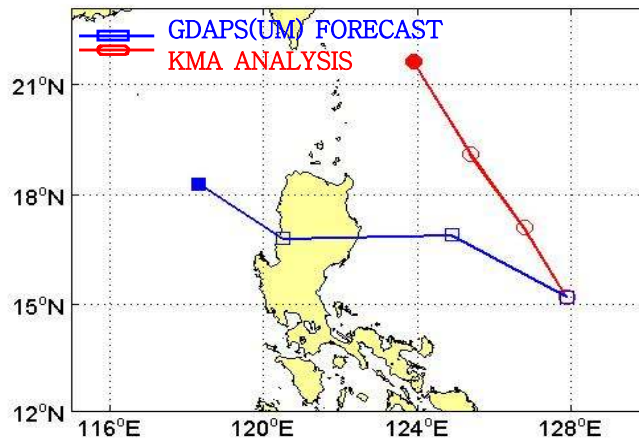


Fig. 19. Comparisons between analysis tracks by KMA and forecast tracks up to 72 hours by GDAPS(UM) for JELAWAT initiated at 1800UTC 24 Sep 2012.

Fig. 19에 제시된 바와 같이, GDAPS(UM)가 예측한 2012년 9월 24일 18UTC 제17호 태풍 JELAWAT의 진로가 실제에 비해 남동쪽 편이를 보인 이유는 모델이 북서쪽에서 확장하는 대륙고기압을 과대 모의하면서 진로오차가 발생하였기 때문이며, Fig. 20의 GDAPS(UM) 예보장과 분석장의 전개과정 분석을 통하여 확인할 수 있다. Fig. 20은 Fig. 13과 같은 방법으로 동일한 시각의 예보장과 분석장을 비교할 수 있도록 구성하였다.

2012년 9월 24일 18UTC에 Fig. 20(a)의 모델 초기장과 Fig. 20(e)의 분석장을 살펴보면, JELAWAT은 종관패턴을 정하기가 매우 어려운 위치에 있다. JELAWAT의 북동쪽에는 제18호 태풍 EWINIAR가 활동하고 있고 두 태풍 사이에 약한 고기압성 흐름이 형성되어 있다. JELAWAT은 북동쪽에 최대풍역이 위치하여 북서진 지향류의 영향을 받고 있지만 지향류가 뚜렷하지 않고 강도가 매

우 약하여 태풍의 이동에 큰 영향을 미치지 못하는 못하고 있다. JELAWAT 북서쪽의 대륙고기압과 남동쪽의 북태평양고기압 세력이 비슷하여 주변고기압을 정의하기 어려운 환경구조가 형성되면서 JELAWAT은 베타효과로 인해 지향류의 영향을 거의 받지 않고 자체적으로 매우 느리게 북서진하고 있다(Elsbery et al., 1989).

24시간 후 Fig. 20(b)에서 보여 지는 GDAPS(UM) 예보장의 대륙고기압은 주변고기압으로서 역할을 하기 시작하여 JELAWAT의 북서쪽에 최대풍역이 형성되어 있고, JELAWAT은 서~서남서진 지향류의 영향을 받고 있다. 하지만 Fig. 20(f)의 분석장에서는 대륙고기압과 북태평양고기압의 세력이 여전히 비슷하여 태풍의 주변고기압을 정의하기 어려운 상황이고, JELAWAT은 계속 자체 베타효과로 느리게 북서진하고 있다.

Fig. 20(c)의 48시간 후 GDAPS(UM) 예보장을 보면, 대륙고기압은 JELAWAT의 북쪽에서 확장하여 계속 주변고기압의 역할을 하고 있으며, JELAWAT은 S/TE에서 서~서남서진 지향류의 영향을 받고 있다. 한편, Fig. 20(g) 분석장에서 대륙고기압은 확장하기는 하였지만 태풍의 남동쪽 북태평양고기압 세력도 여전히 강하게 버티고 있어 태풍은 북서진 지향류의 영향을 받는 종관환경에 놓여 있다.

72시간 후 Fig. 20(d) 예보장에서 JELAWAT 북쪽의 고기압은 다소 분리되는 모습을 분석할 수 있지만 여전히 세력을 유지하며 태풍을 서쪽으로 이동시키고 있다. 또한, JELAWAT 남동쪽 고기압 세력도 강화되면서 북진 요소도 태풍의 이동에 영향을 미치기 시작하고 있다. 하지만, Fig. 20(h)의 분석장에서는 JELAWAT 북쪽의 대륙고기압이 두 개의 셀로 분리되고 있음을 확인할 수 있고, 태풍의 북쪽에는 중위도 골이 접근하고 있다. 두 개로 분리된 셀 중에서 오른쪽 셀은 남쪽의 북태평양고기압과 병합되어 주변고기압으로서 태풍의 이동에 영향을 미치기 시작하였으며, 태풍은 중위도 골의 영향을 받기 직전단계로 M 종관패턴으로 전이되는 종관환경에 위치해 있다. 이후과정을 보여주지는 못하였지만 JELAWAT은 실제로 중위도 골의 영향을 받으면서 M 패턴으로 전이하고 PF 지역에서 북동진 하였다.

이 사례는 GDAPS(UM)가 대륙고기압의 확장을 과대모의하여 JELAWAT의 주변고기압으로 역할을 하면서 태풍의 진로에 오차가 발생하였기 때문에 E-MAG 사례로 선정하였다.

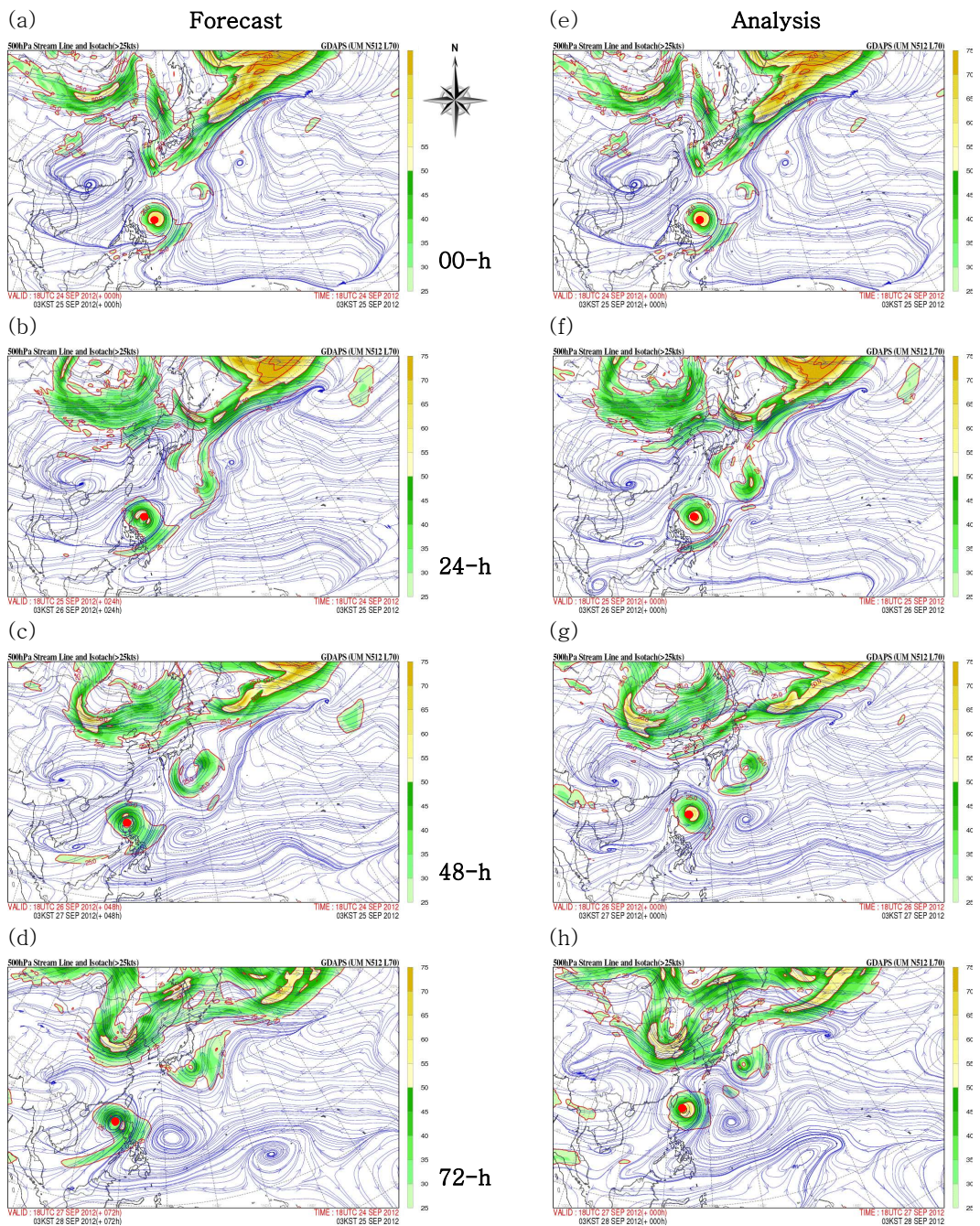


Fig. 20. 500hPa streamlines for JELAWAT initiated at 1800UTC 24 Sep 2012. (a)-(d) the 00, 24, 48 and 72-h GDAPS(UM) forecast fields; (e)-(h) the 00, 24, 48 and 72-h verifying analyses, respectively. Isotach shading starts at 25 kt and the increment is 5 kt.

2) 중위도 골과 관련된 진로오차 메커니즘

E-MCG 사례

2012년 태풍시즌 북서태평양에서 GDAPS(UM)의 중위도 골과 관련된 프로세스에서 가장 빈번하게 발생한 메커니즘은 E-MCG로서 20회 발생하였다(Table 6). 2012년 제22호 태풍 MARIA의 경우, Table 8에서 제시된 바와 같이 GDAPS(UM)에서 6회의 진로예보오차가 발생하였으며 모두 E-MCG 메커니즘에 의해 진로예보오차가 발생하였기 때문에 분석사례로 지정하였다.

2012년 제22호 태풍 MARIA의 진로와 GDAPS(UM)가 예측한 72-h 진로를 비교하여 Fig. 21에 나타냈다. Fig. 21에 보여 지는 바와 같이, GDAPS(UM)가 모의한 MARIA의 진로는 실제 태풍의 진로와 비교하여 북쪽 편이가 나타났다. Fig. 21에서처럼 GDAPS(UM)가 모의한 MARIA의 진로가 실제에 비해 북쪽 편이를 보인 이유는 모델이 중위도 골의 발달을 과대모의 하였기 때문이며, 태풍이 E-MCG 메커니즘으로 인해 중위도 시스템에 빠르게 편입되며 진로오차가 발생하는 과정을 Fig. 22에서 예보장과 분석장의 비교를 통하여 나타냈다. Fig. 22의 구성도 이전 사례분석처럼 같은 시각의 예보장과 분석장을 비교하여 진로예보오차 메커니즘 발생과정을 보였다.

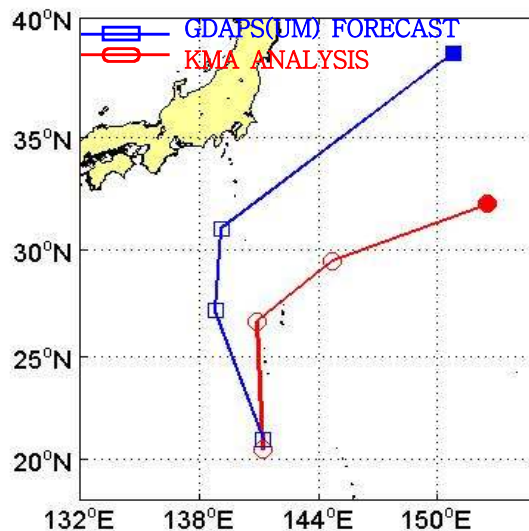


Fig. 21. Comparisons between analysis tracks by KMA and forecast tracks up to 72 hours by GDAPS(UM) for MARIA initiated at 0600UTC 15 Oct 2012.

Fig. 22의 (a)와 (e)는 2012년 10월 15일 06UTC GDAPS(UM) 초기장과 분석장을 보여주는 것으로서 태풍의 동쪽 북태평양고기압이 주변고기압의 역할을 하고 있다. 주변고기압의 영향으로 MARIA의 북동쪽에 최대풍역이 형성되어 있고 태풍은 S/PF에서 북서 지향류의 영향을 받고 있음을 확인할 수 있다. 한편, MARIA의 서쪽에 제21호 태풍 PRAPIROON이 위치하고 있고 PRAPIROON의 북서쪽에 중위도 골이 접근하고 있다.

24시간 후 MARIA는 Fig. 22(b)의 GDAPS(UM) 예보장에서 M/PF으로 전이하며 북동진향류의 영향을 받고 있고 중위도 골은 여전히 110°E 부근에서 서진하고 있다. Fig. 22(f)의 분석장에서도 예보장과 비슷한 상황이 전개되고 있다. 예보장과 분석장에서의 중위도 골은 태풍의 진로에 아직 영향을 미치지 못하고 있음을 알 수 있으며 PRAPIROON도 MARIA의 진로에 직접적인 영향을 주지 않고 있다.

Fig. 22(c)에서 보여 지는 48시간 후 GDAPS(UM) 예보장의 중위도 골은 130°E 까지 진출하며 매우 발달하였고 MARIA는 중위도 골에 합류되면서 북쪽으로 이동하였다. 즉, 중위도 골이 MARIA를 끌어 올리며 북쪽으로 이동시켰고, MARIA는 전시간에 비해 깊어진 M/PF에 위치하여 있다. 하지만 Fig. 22(g)의 분석장에서 중위도 골은 120°E 부근에서 서진하고 있고 MARIA는 중위도 골의 영향을 받을 수 없는 상태이다. 결국, MARIA는 중위도 골의 영향을 받지 못하고 M/MW으로 전이하여 태풍의 남쪽에 형성된 동~동북동진 지향류의 영향을 받고 있다.

72시간 후 Fig. 22(d)의 GDAPS(UM) 예보장에서 MARIA는 순환구조가 완전히 와해되어 중위도 골에 흡수되어 있고 중위도 골을 따라 빠르게 북동진 하고 있다. 하지만 Fig. 22(h)에서 보여 지는 분석장에서 중위도 골은 130°E 부근에서 PRAPIROON에 영향을 미치며 중위도로 끌어올리고 있지만 MARIA는 여전히 중위도 골의 영향을 받지 못하고 있다. 분석장에서 MARIA는 약하기는 하지만 저기압성 순환구조를 유지하고 있으며 보여주지는 못하였지만 지상일기도 및 대기 하층 일기도에서는 MARIA의 저기압성 구조를 명확하게 분석할 수 있었다.

GDAPS(UM) 예보장에서 잘못 모의된 중위도 골의 발달은 태풍을 중위도 흐름에 빠르게 묻히게 하면서 진로예보는 Fig. 21에서처럼 북쪽 편이를 보였다. 그러나 분석장에서 중위도 골은 태풍을 중위도 흐름에 묻히게 할 만큼 발달하지

않았고 결국 GDAPS(UM)가 과대모의한 중위도 골의 진화과정 때문에 진로예보 오차가 발생하여 E-MCG 메커니즘으로 지정하였다.

2012년 태풍시즌 GDAPS(UM) 예보장에서 E-MCG가 중위도 골과 관련하여 가장 빈번하게 발생하는 진로오차 메커니즘이기는 하지만, I-MCG 역시 2012 시즌 GDAPS(UM) 예보장에서 중위도 능과 관련하여 가장 많이 발생하는 진로오차 메커니즘으로 나타났다(Table 6). 그러므로, GDAPS(UM)에서 E-MCG와 I-MCG 모두 잘못 모의되어 진로예보오차를 발생시켰기 때문에 예보관들은 분명한 가이드를 제공할 수 없을 것으로 사료된다. 따라서, GDAPS(UM)에서 E-MCG가 정말로 발생할지를 판단하여 SCON에 포함여부를 결정하는데, 각 예보상황들을 좀더 세밀하고 깊게 고려할 필요가 있다.

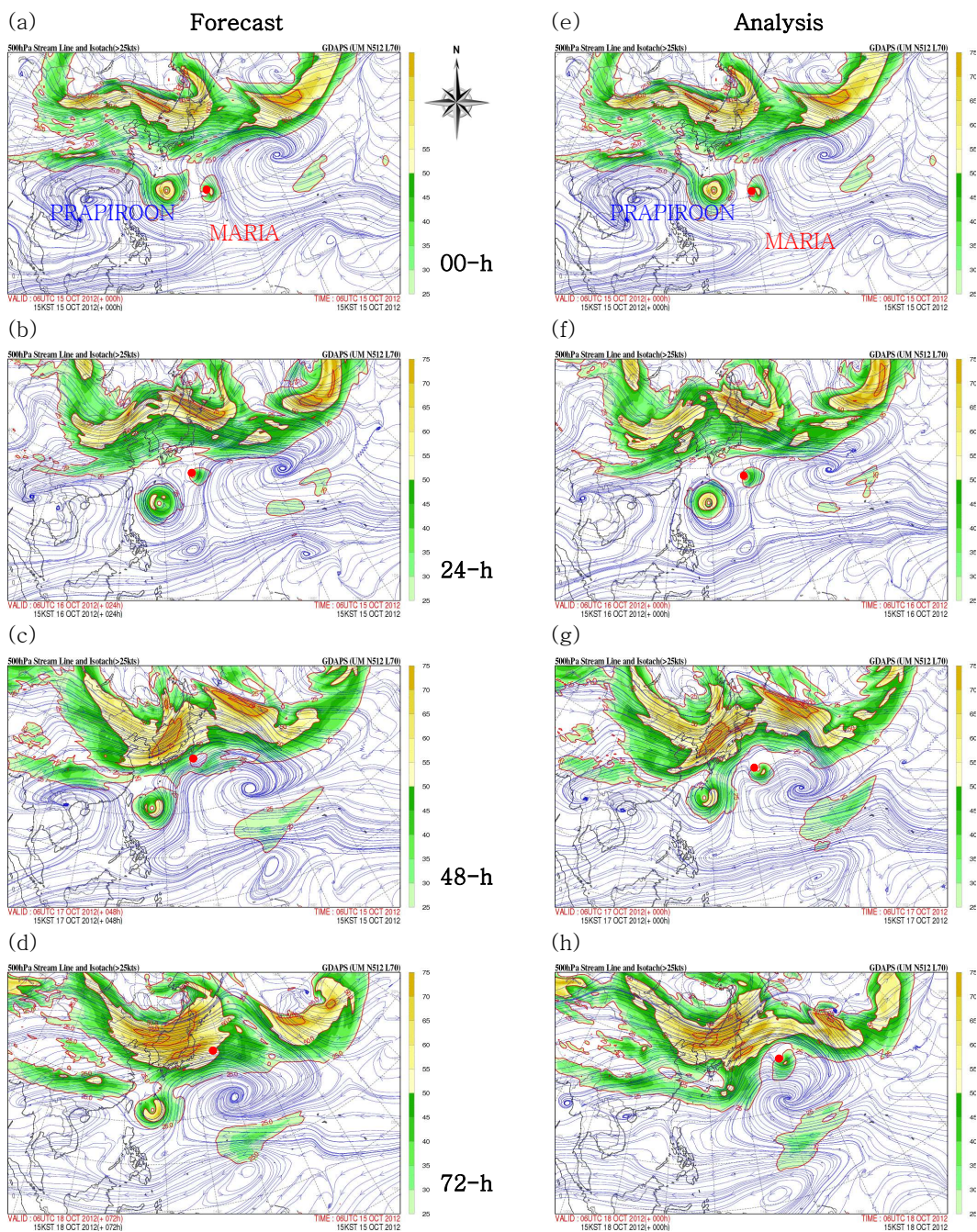


Fig. 22. 500hPa streamlines for MARIA initiated at 0006UTC 15 Oct 2012. (a)–(d) the 00, 24, 48 and 72-h GDAPS(UM) forecast fields; (e)–(h) the 00, 24, 48 and 72-h verifying analyses, respectively. Isotach shading starts at 25 kt and the increment is 5 kt.

V 결 론

GDAPS(UM)는 기상청에서 현업운영중인 공식 전지구예보모델이며 태풍예보를 비롯한 대부분의 예보에 활용되고 있다. 본 연구에서는 보다 더 정확한 태풍의 진로예보를 생산하기 위해 개념모델을 이용하여 2012년 GDAPS(UM)에서 발생한 진로예보오차 원인을 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

2012년 북서태평양에서는 25개의 태풍이 발생하였으며, GDAPS(UM)가 모의한 17개의 태풍에서 진로예보오차가 발생하였다. GDAPS(UM)는 17개의 태풍에서 299회의 예보를 생산하였고, 그 중에서 진로예보오차 사례는 126회 발생하였다. GDAPS(UM)의 72-h 평균진로오차는 331km로 분석되어 태풍위치 70%확률범위 320km 보다 큰 특성을 보였다. 하지만, 오차 범위 분석에서 200~320km의 오차 빈도가 72회로 가장 많이 발생하였고, 100~200km의 오차 빈도가 그 다음으로 64회 발생하여 320km 이내의 오차 빈도가 많은 부분을 차지하였다.

2012년 열대관련 진로오차 원인은 126회 중 47회 발생하여 37%를 차지하였다. 열대관련 진로오차 중에서 베타효과과정을 잘못 모의한 사례가 63%를 차지하였는데, 베타효과와 관련된 진로오차 사례는 6개의 태풍에서 29회 발생하였다. RMT가 27회, RTF가 2회 발생하여 태풍의 주변고기압 변형을 잘못 모의하는 사례가 대부분을 차지하였기 때문에 태풍이 열대지역에 있을 때 GDAPS(UM)가 모의하는 주변고기압의 발달과정을 실황과 다른 모델들의 모의 경향과 비교하여 분석하여야 한다.

2012년 중위도관련 진로오차 원인은 126회 중 79회가 발생하여 63%를 차지하였다. 79회의 중위도관련 진로오차 원인 중에서 중위도 능과 관련된 프로세스가 61% 차지하고, 중위도 골과 관련된 프로세스가 35%를 차지하여 오차 원인의 대부분이 중위도시스템의 진화과정을 잘못 모의하여 발생하였으며, 그 외 연직시어와 관련한 진로오차 메커니즘이 4%를 차지하였다. 중위도관련 진로오차 원인 중에서 골과 관련된 E-MCG와 능과 관련된 I-MCG가 가장 빈번하게 발생하였기 때문에 두 메커니즘에 대해서는 GDAPS(UM)의 추세를 분석하여 근본적으로 중위도 골과 능 어느 것과 관련이 있는지 세밀하고 깊게 고려할 필요가 있다.

E-MAG 메커니즘은 중위도관련 진로오차 메커니즘 중에서 세 번째로 많이 발생하였는데, 대부분 GDAPS(UM)가 대륙고기압을 과대 모의하였기 때문에 분석되었다.

본 연구 이후 GDAPS(UM)에 대한 연구가 지속적으로 이루어지고 더 나아가 태풍진로예보에 활용하는 전구모델들의 특성에 대한 연구가 이루어져 태풍진로예보에 대한 가이드언스가 구축된다면 보다 더 정확한 태풍예보가 생산될 수 있을 것이라고 기대한다.

참고문헌

- Carr, L. E., III, and R. L. Elsberry, 1994: Systematic and integrated approach to tropical cyclone track forecasting. Part I. Approach overview and description of meteorological basis. NPS Tech. Rep. NPS-MR-94-002, 273 pp.
- Carr, L. E., III, and R. L. Elsberry, 1995: Monsoonal Interactions Leading to Sudden Tropical Cyclone Track Changes. *Mon. Wea. Rev.* **123**, 265-289
- Carr, L. E., III, and R. L. Elsberry, 1997: Models of tropical wind distribution and beta-effect propagation for application to tropical cyclone track forecasting. *Mon. Wea. Rev.*, **125**, 3193-3209.
- Carr, L. E., III, and R. L. Elsberry, 1999: Systematic and integrated Approach to tropical cyclone track forecasting: Part III. Tech Rep. NPS-MR-00-002. Naval Postgraduate School, Monterey, CA 93943
- Carr, L. E., III, and R. L. Elsberry, 2000a: Dynamical tropical cyclone track forecast errors. Part I: Tropical region errors. *Wea.Forecasting*,**15**,641-661.
- Carr, L. E., III, and R. L. Elsberry, 2000b: Dynamical tropical cyclone track forecast errors. Part II: Midlatitude circulation influences. *Wea.Forecasting*,**15**,662-681.
- Cooper, G. A., and R. J. Falvey, 2009: 2008 annual tropical cyclone report. Chapter 1: Western North Pacific Ocean tropical cyclones, NMFC/JTWC, Hawaii, 6-46. [available at <http://www.usno.navy.mil/NOOC/nmfc-ph/RSS/jtwc/atcr/2008atcr/2008atcr.pdf>]
- Elsberry, R. L., 2005: A global technique for tropical cyclone track prediction — The systematic approach. Classroom notes, Dept. of Meteorology, Naval Postgraduate School, Monterey, CA 93943-5114, 54 pp.

- Kehoe, R. M., 2005: Characteristic errors in 120-h tropical cyclone track forecasts in the western North Pacific. M. S. thesis, Dept. of Meteorology, Naval Postgraduate School, 91 pp. [available at <http://www.dtic.mil/cgi-bin/GetTRDoc?AD=ADA432822&Location=U2&doc=GetTRDoc.pdf>]
- Jeffries, R. A., and E. J. Fukada, 2002: Consensus approach to track forecasting. *Extended abstracts, Fifth Int. Workshop on Tropical Cyclones*, Cairns, Australia, World Meteorological Organization, TP3.2.
- Kehoe, R. M., M. A. Boothe, and R. L. Elsberry, 2007: Dynamical tropical cyclone 96- and 120-h track forecast errors in the western North Pacific. *Wea. Forecasting*, **22**, 520-538.
- Payne, K. A., 2006: Evaluation of causes of large 96-h and 120-h track errors in the western North Pacific. M.S. thesis, Dept. of Meteorology, Naval Postgraduate School, 89 pp. [available at <http://www.dtic.mil/cgi-bin/GetTRDoc?AD=ADA457588&Location=U2&doc=GetTRDoc.pdf>]
- Payne, K. A., R. L. Elsberry, and M. A. Boothe, 2007: Assessment of western North Pacific 96- and 120-h track guidance and present forecastability. *Wea. Forecasting*, **22**, 1003-1015.
- 권혁조, 원성희, 2001: Systematic Approach 방식에 의거한 북서태평양 태풍진로의 특성 분석. 한국기상학회지, **37**(2), 89-108
- 함숙정, 권혁조, 2003: GDAPS의 태풍 진로 예측에 관한 모델 성향. 한국기상학회지, **13**(1), 104-105
- 기상청, 2011: 태풍백서, 345pp.
- 기상청, 2012: 기상청 훈령 제727호 예보업무규정, 28pp.
- 기상청, 2012: 2012년 한반도 영향 태풍 분석, 167pp.
- 기상청, 2013: 태풍예보업무매뉴얼, 135pp.

감사의 글

어린 시절 텔레비전에서 일기도를 그려가며 내일의 날씨 예보를 설명하는 예보관의 모습을 보며 기상에 대한 꿈을 키워온 한 소년은 이제 그 꿈에 대해서 과학적으로 접근하려고 노력하고 있습니다.

짧지 않은 대학원 생활이었지만 마무리 하며 지난 시간들을 돌이켜보니 아쉬운 부분이 더 많이 남는 듯합니다. 제가 이렇게 대학원 과정을 마치기까지 힘이 되어주고 도움을 주신 많은 분들께 지면을 빌어 감사의 말씀을 드리하고자 합니다.

먼저 본 논문이 완성되기까지 세심한 배려와 지도로 저를 이끌어 주신 허철구 지도교수님께 머리 숙여 깊이 감사를 드립니다. 그리고 논문 심사과정에서 이기호 교수님과 송상근 교수님의 세심하며 명철한 제안과 배려에도 깊은 감사의 마음을 드립니다. 또한, 대학원 과정에서 지도해 주신 감상규 교수님, 조은일 교수님, 김진근 교수님께도 감사를 표하고 싶고, 고승희 선생님을 비롯한 대학원생들에게도 감사의 마음을 전하고 싶습니다.

현업을 수행하면서 공부를 지속할 수 있도록 격려해주신 이종호 국가태풍센터장님을 비롯한 장기호, 박상욱, 김지영 연구관님과 윤왕선 사무관님께 감사하다는 말을 전하고 싶고, 같이 현업을 수행하며 항상 서로 배려해 주시는 정상부, 오임용 계장님, 차유미 연구사님에게도 감사의 마음을 드리며, 이외 국가태풍센터 내 모든 분들께도 감사의 마음을 전합니다.

본 논문에 대한 이론적 배경을 지도하여주신 미국에 계신 Russell L Elsberry 교수님께 감사드리며, 교수님께 지도 받도록 인도하여 주신 차은정 연구관님께도 감사의 뜻을 전하고 싶습니다.

본 논문이 작성되기까지 심신을 수련하여 주신 강태진 사무관님과 허택산 사무관님, 그리고 흥표 형, 승민 형, 보경, 정만, 재훈에게 감사드리고, 항상 든든한 버팀목이 되어주는 대준, 민영, 용국에게도 감사의 마음을 전하며, 금융권에서 지원을 아끼지 않는 준에게도 고마운 마음을 전합니다.

제가 이 자리에 있기까지 모든 것을 희생하시는 어머니와 하늘에 계신 아버지에게 감히 감사하다는 말을 드리고, 항상 힘이 되어주는 누나, 은숙, 동수, 재수 씨 그리고 조카 은지, 유나, 지민에게 고맙다는 말을 전하고 싶습니다. 마지막으로 사랑하는 내 아내와 아들 건우에게 감사와 함께 이 모든 영광을 드리며, 고마운 분들의 뜻을 잊지 않고 늘 노력하며 남을 배려하는 마음으로 살아가도록 노력하겠습니다.