



저작자표시-비영리-동일조건변경허락 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

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

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



동일조건변경허락. 귀하가 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공했을 경우에는, 이 저작물과 동일한 이용허락조건하에서만 배포할 수 있습니다.

- 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](#)

이학석사학위논문

태풍의 약화 시
한국에서의 시공간적 강수량 분포



2011년 2월

부경대학교 대학원

환경 대기 과학과

황호성

이학석사학위논문

태풍의 약화 시 한국에서의 시공간적 강수량 분포

지도교수 변희룡

이 논문을 석사 학위논문으로 제출함.



2011년 2월

부경대학교 대학원

환경 대기 과학과

황호성

황호성의 이학석사 학위논문을 인준함.

2011년 2월 25일



주 심 이학박사 김 재 진



위 원 이학박사 변 희 룡



위 원 이학박사 오 재 호



목 차

그림 목차	iii
표 목차	vii
Abstract	1
1. 서론	3
2. 자료 및 분석방법	8
2.1. 자료	8
2.2. 분석방법	10
2.2.1. 약화 태풍의 구분	10
2.2.2. 태풍 접근 시점의 정의	12
3. 한반도 주변에서 약화되는 태풍의 특성	13
3.1. 태풍의 약화 시점	13
3.2. 태풍의 이동 경로	13
3.3. 태풍의 이동 속도	16
3.4. 약화 태풍의 월별 빈도	18
4. 태풍의 복상에 따른 시공간적 강수 분포	19
4.1. 공간적 강수 분포	19
4.2. 시간적 강수 분포	27
5. 강수에 영향을 주는 기상 요소	29
5.1. 잠재와도와 온도골의 이류	29
5.2. 제트에 의해 유도되는 상층 발산	30
5.3. 태풍 전면 상승기류의 발달	32

6. 시간에 따른 태풍 주변 강수 영역 35
6.1. 강수영역의 분포 35
6.2. 특정 강우강도의 비율 38
7. 요약 및 결론 41
참고문헌 44



그림 목차

Fig. 1. Location of 61 observing stations used to obtain precipitation data for this study.	9
Fig. 2. Points of tropical cyclones(TCs) weakened around Korea(32-36°N, 122-132°E) during the period 1979-2008, and their tracks for (a) WEC(weakened to extratropical cyclone), (b) WTD(weakened to tropical depression).	11
Fig. 3. Mean path of TC(interval 6hr) from approaching time point(-12hr) of TC and 500hPa mean geopotential height(gpm) at approaching time point for (a) WEC and (b) WTD.	15
Fig. 4. Moving speed of TC for WEC and WTD from the approaching time point(-12hr) of tropical cyclone to 48 hours later.	17
Fig. 5. Monthly frequency of TCs weakened to extratropical cyclone (WEC) and tropical depression(WTD).	18
Fig. 6. Precipitation accumulated over 48 hours from approaching time point (-12hr) of tropical cyclone for (a) WEC, (b) WTD and (c) their difference (WEC-WTD). The dashed lines indicate negative value.	19
Fig. 7. 48hours accumulated precipitation of several major stations from the approaching time point(-12hr) of tropical cyclone for (a)WEC, (b)WTD. Solid straight line indicates mean precipitation(Table 3) of 61 stations.	22

Fig. 8. Verification using t-test(significance level=0.1) for the precipitation difference shown Fig. 6c. The closed circles denote differing areas, whereas the open circles denote similar areas for precipitation. Henceforth, Region 1 and Region 2 are designated as described above. 23

Fig. 9. Precipitation accumulated over 48 hours from approaching time point(-12hr) for each TC in (a) Region 1 and (b) Region 2 for WEC and WTD. Box plot of the precipitation is also illustrated. 24

Fig. 10. Precipitation in (a)Region 1(Fig. 8), (b)Region 2(Fig. 8) each latitude as TCs approach Korea. The numbers over bars denote accumulated precipitation time(hr). 26

Fig. 11. Time evolution of 3 hours accumulated precipitation(bars) from the approaching time point(-12hr) of tropical cyclone to 48hours later for (a) the Region 1 and (b) the Region 2(Fig. 8). The lines indicate distance between the TC center and Seoul or Gwangju(star-marked point in illustration). The solid straight line indicates the mean time(+7.7hr) that TCs were weakened to extratropical cyclone and the dashed straight line indicates mean time(+24hr) that TCs were weakened to tropical depression. 28

Fig. 12. 300-200hPa potential vorticity(shaded every 0.2 PVU starting at 0.4 PVU where $1 \text{ PVU} = 10^{-6} \text{ K kg}^{-1} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$), 850hPa temperature(dashed lines, °C) and mean location of TC at the approaching time point(-12hr) of tropical cyclone for (a)WEC, (b)WTD. 29

Fig. 13. 200hPa jet stream(shaded every 5 m s^{-1} starting at 30 m s^{-1}), 200hPa divergence(thick contours, every $3 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ starting at $3 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$) and 850hPa convergence(thin contours, every $-2 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ starting at -

$2 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$) at the approaching time point(-12hr) of tropical cyclone for (a)WEC, (b)WTD. The dashed line is used for vertical cross section in Fig. 14 and Fig. 15 31

Fig. 14. Vertical cross section over the dashed straight line in Fig. 13 for (a) WEC and (b) WTD. The shaded area indicates the ascending current (hPa hr^{-1}). The thick lines and thin lines indicate divergence (10^{-6} s^{-1}) and convergence (10^{-6} s^{-1}), respectively. The square box indicates the location of Korea. 33

Fig. 15. Conceptual map of vertical cross section field(Fig. 14) between TC and Korea at the approaching time point(-12hr) of tropical cyclone for (a)WEC, (b)WTD. Each D200, C850 and C1000 mark indicate region of 200hPa divergence, 850hPa convergence and 1000hPa divergence, respectively. JET mark represents upper level jet stream and dotted circles denote ascending current. Thick vertical arrows represent relative scale of the real vertical velocities at 700hPa and these real values(hPa hr^{-1}) show below of all the arrows. 34

Fig. 16. Rainfall intensity(mm hr^{-1}) over 48 hours from the approaching time point(-12hr) of the representative TC NEIL(9905) of WTD(from 0600UTC July 26 to 0300UTC July 28 in 1999, interval 3hours) using Tropical Rainfall Measuring Mission(TRMM) data. This TC was weakened to tropical depression at '+24 hr', 1800UTC July 27. 36

Fig. 17. Same as Fig. 16 but for representative TC MINDULLE(0407) of WEC(from 0600UTC July 3 to 0300UTC July 5 in 2004). This TC was weakened to extratropical cyclone at '+06 hr', 0000UTC July 4. ... 37

Fig. 18. Time evolution of area proportion of detected rainfall intensity above (a) 5 mm hr^{-1} or (b) 1 mm hr^{-1} within the northern 800km radius of

the center of NEIL(Fig. 16) and MINDULLE(Fig. 17). The solid and dashed straight lines indicate the extratropical transition time point and weakening time point, respectively, of each TC. 39

Fig. 19. Time evolution of 3 hr precipitation(bars) from the approaching time point(-12hr) of each tropical cyclone(MINDULLE and NEIL) to 48 hours later for (a) the Region 1 and (b) the Region 2(Fig. 8). The lines indicate the distance between the TC center and Seoul or Gwangju(star-marked point in illustration). The solid straight line indicates the time(+6hr) that TC MINDULLE was weakened to extratropical cyclone and the dashed straight line indicates the time(+24hr) that TC NEIL was weakened to tropical depression. 40

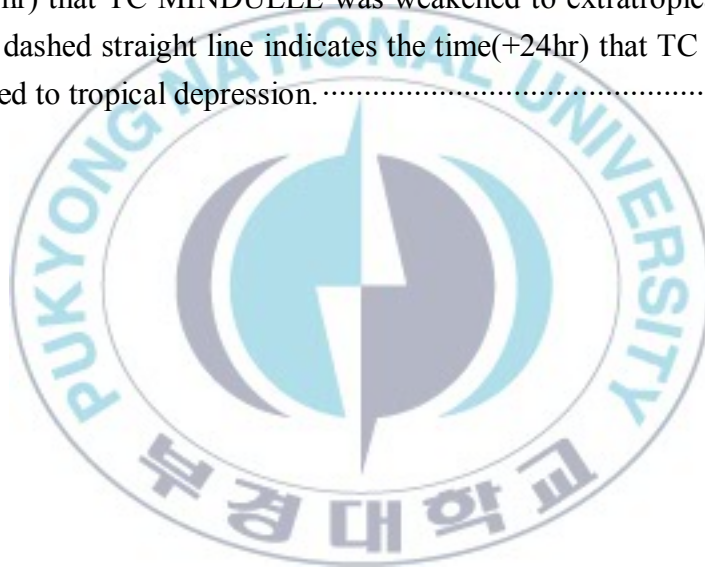
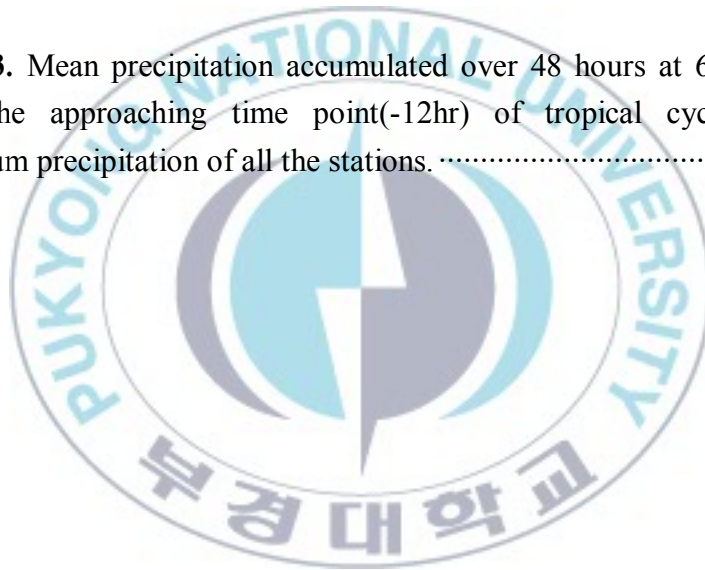


표 목차

Table 1. Definition of the affecting time point and approaching time point of TC. 12

Table 2. Weakened time point of all TCs for WEC and WTD. The time indicates the time difference between weakened and affecting time point of TC(in Table 1). 14

Table 3. Mean precipitation accumulated over 48 hours at 61 stations from the approaching time point(-12hr) of tropical cyclone and maximum precipitation of all the stations. 20



Spatiotemporal distribution of precipitation in Korea related to weakening of tropical cyclones

Ho Seong Hwang

Department of Environmental Atmospheric Sciences, Graduate School,
Pukyong National University

Abstract

Spatiotemporal characteristics of precipitation in Korea, associated with the weakening of Tropical Cyclones(TCs) around the Korean Peninsula($32-36^{\circ}\text{N}$, $122-132^{\circ}\text{E}$) over the last 30 years(1979-2008), were investigated. Weakened TCs are classified as WEC(Weakened to Extratropical Cyclone) and WTD(Weakened to Tropical Depression).

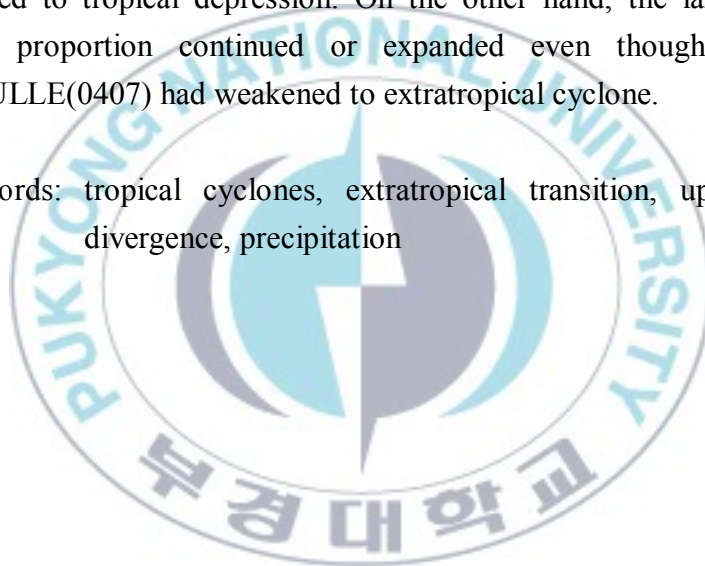
In WEC, precipitation was evenly distributed all over the Korean Peninsula and the greater precipitation was recorded in the southern coast. In WTD, the most precipitation was recorded in the southern coast but low precipitation was recorded in the central and inland areas of Korea. The difference of precipitation between WEC and WTD was not statistically significant in Region 2(Jeollanam-do, Gyeongsangnam-do, southeastern part of Gyeongsangbuk-do, Jeju-do); however, the precipitation resulting from WEC was greater than that resulting from WTD in Region 1(central area of Korea, Jeollabuk-do, inland of Gyeongsangbuk-do).

In WEC, the developed upper-level potential vorticity(PV) and low-level temperature trough shifted to the northwest of TCs approaching Korea. In addition, an upper-level jet stream and strong divergence field were observed to the northeast of the TCs. It was assumed that these meteorological factors had induced baroclinic instability and diabatic

process, which created a large precipitation area around the TCs. However, the intense PV, temperature trough, jet stream were not observed in WTD, which created a small precipitation area around the TCs.

In addition, spatial proportions of heavy rainfall area around the representative TC events for WEC and WTD(MINDULLE 0407 and NEIL 9905, respectively) are discussed on the basis of data obtained from the Tropical Rainfall Measuring Mission(TRMM). The heavy rainfall proportion had decreased from before the TC NEIL(9905) was weakened to tropical depression. On the other hand, the large heavy rainfall proportion continued or expanded even though the TC MINDULLE(0407) had weakened to extratropical cyclone.

Key words: tropical cyclones, extratropical transition, upper level divergence, precipitation



1. 서론

태풍이 중위도로 북상한 후 약화될 때는 열대성 저압부(Tropical Depression, TD)나 온대저기압(Extratropical Cyclone, EC)으로 약화된다. 열대성 저압부는 태풍과 열적, 역학적 성질은 같지만 중심 주변 최대풍속이 17m s^{-1} 미만인 열대성 저기압(Tropical Cyclone, TC)이다. 그러나 온대저기압은 태풍과 열적, 역학적 성질이 전혀 다르다. 따라서 태풍이 온대저기압으로 약화되는 것을 온대저기압화 또는 온저화(Extratropical Transition)라 칭하며 특별히 달리 취급하기도 한다.

이러한 온대저기압화의 개념에 대한 연구로써, Sekioka(1956a, b)는 열대저기압이 중위도의 온대저기압과 함께 하나의 저기압으로 합성되면 온대저기압의 특성을 가지게 되며 더욱 강화된다는 단편적인 결론을 내렸다. 이후 Matano and Sekioka(1971)는 북서태평양의 온대저기압화를 지상기압을 이용하여 2가지로 분류하였다. 첫째는 태풍이 북상할 때 중위도의 기압골이나 전선과 상호 작용하여 그 전선 상에서 온대저기압으로 변질된다는 것이다. 둘째는 태풍이 중위도의 온대저기압과 결합하여 하나의 온대저기압으로 생성되는 것이다. Brand and Guard(1978)는 위의 두 가지 경우 외에 또 다른 온저화 유형을 소개하였다. 태풍이 중위도로 북상하여 전향점으로부터 점차 온저화가 진행된다고 하였다. 그런데 위의 연구들은 2차원적인 개념에 불과하였다. 이후 많은 연구에 의해

3차원적인 개념이 도입되었는데 태풍 주변 상층 발산과 잠재와도(Potential Vorticity, PV) 이류가 태풍이 온대저기압으로 변질되는데 상당히 큰 역할을 한다고 하였다(DiMego and Bosart 1982; Sinclair 1993; Foley and Hanstrum 1994; Klein *et al.* 2000 ; Harr *et al.* 2000b). 그 외 태풍과 성층권 잠재 소용돌이도와의 상호작용에 의해 따뜻하고 습한 태풍중심으로 차고 건조한 공기가 침투되어 온대저기압화가 진행된다는 연구도 있다(Browning *et al.*, 1998). Klein *et al.*(2000)은 북서태평양에서 6~10월에 발생한 태풍의 온대저기압화의 단계를 변환단계(Transformation)와 재 강화 단계(Re-intensification)의 두 단계로 구분하였다. 변환단계를 차고 건조한 공기가 태풍중심으로 파고 들어가는 시점으로 하였으며, 이후 24~72시간(평균 48시간)을 재 강화 단계로 구분하였다. Hart and Evans(2001)에 의하면, 북대서양에서 재 강화된 허리케인 중 60%는 20°N 남쪽에서 발생하였고, 재 강화되지 않은 허리케인의 90%는 20°N 북쪽에서 발생하였다. 이는 태풍 자체에 축적된 에너지가 온대저기압화 시 잠재적인 에너지원으로써 효율적으로 공급이 이루어진다고 보는 것이다.

Rodgers *et al.*(1994) 은 SSM/I(Special Sensor Microwave/Imager)를 이용하여 태풍주변 대류밴드의 형태와 강우강도와의 상관성에 대해 조사를 하였으며, 태풍이 중위도로 접근할 때 중위도의 상하층 바람시어, 수분속, 해수면 온도 등의 주변 요소들이 변함에 따라 태풍에 의한 강수의 구조 및 강도를 변화시킨다고 하였다. Shi *et*

al.(1997) 은 태풍이 중위도로 접근 시 태풍의 북동쪽에 상층 200hPa 제트 류의 입구 및 기압골이 위치할 때, 태풍중심에서의 상승기류가 강해지며 태풍주변 상대습도가 증가하여 강우강도가 강해진다고 하였다. 그러나 여기서 분석된 내용은 하나의 태풍에 대해서 이루어졌다. Harr *et al.*(2000a)에 의하면, 태풍이 온대저기압으로 변질되면 강우강도는 약해지지만 강수범위는 넓어진다. 본 연구에서는 이러한 특징이 한국이라는 고정된 지점에서의 시공간적 강수 분포에는 어떠한 영향을 주는지 분석한다. 태풍이 한반도 주변에서 온대저기압으로 약화 될 경우 강수범위가 넓어지면 강수누적 시간이 길어질 수가 있기 때문에 열대저압부로 약화 될 때보다는 강수가 급격히 줄어들지는 않을 것이다.

다음의 두 연구자는 다른 이전 연구에 비해 태풍에 의한 강수 시에 공간적 분포에 대해 면밀히 다루었다. Ritchie(2005)는 북서태평양 지역 태풍이 온대저기압화가 진행될 시, 재 강화된 경우와 소멸한 경우에 있어 태풍중심 주변 방위 별로 공간적인 강수를 비교하였다. 재 강화된 경우 모든 방향에서 강수가 더 많이 나타났으며, 태풍중심의 북서 방향에서 차이가 가장 많이 났다. 강수뿐만 아니라 PV 이류 역시 북서쪽에서 가장 차이가 많이 났다. 한편, Atallah(2007)는 미국 동안에 허리케인이 상륙하여 주 강수대가 허리케인의 오른쪽에 형성되는 경우와 왼쪽에 형성되는 경우를 구분하여 PV 및 연직 바람시어를 비교하였다. 전자의 경우는

온대저기압화가 진행되어 가는 과정으로써 PV가 허리케인 중심에서 진행방향 왼쪽으로 이동해 가며 주 강수대도 동시에 이동하였다. 그런데 아쉽게도 Atallah *et al.*(2007)의 연구는 시간적 개념을 고려하지 않고 단순히 공간적인 누적강수분포의 결과만을 가지고 미국 동안에 상륙한 누적 허리케인 경로의 왼쪽에서 비가 왔는지 오른쪽에서 왔는지에 초점을 맞추었다. 누적 허리케인 경로와 누적 강수를 사용했기 때문에 실제로 강수가 허리케인의 왼쪽에서 온 것인지 전면에서 온 것인지 구분할 수가 없는 아주 커다란 단점이 발견되었다. 본 연구에서는 한반도 주변에서 온대저기압으로 약화되는 태풍과 열대성 저압부로 약화되는 태풍에 의한 한국 강수의 공간적 분포뿐만 아니라 시간적인 분포의 특징을 비교, 분석하고자 한다.

우리나라와 같은 중위도 지역에서는 여름철 온난 습윤한 공기가 중위도 기상현상과 상호 작용하기 때문에 집중호우가 발생하기 좋은 조건을 형성하게 된다(Chen and Yu, 1988; Hong, 1992; Lee, 1989). 양진관과 오주덕(2001)은 1996년에서 2000년까지 한반도에 영향을 준 태풍마다 한반도의 어느 지역에 많은 강수가 나타났는지에 대해 사례를 나누었다. 사례별로 상하층의 수렴, 발산 및 북태평양고기압의 특징들을 조사하였다. 이들은 80mm이상의 강수에 대해서만 다루었고 시간적 강수분포는 배제하였다. 김진석과 유재훈(2001), 장용환(2001)은 강원영동 및 경북동해안 지역에 태풍에

의한 호우를 동반한 사례를 통해 중관 기상조건들에 대해 연구를 하였다. 하층의 수렴, 바람분포 및 수분속등에서 원인을 찾았다. 권혁조와 김지영(2005)은 처음으로 한반도 영향태풍의 온저화 시 시간에 따른 공간적 강수의 특징을 입체적으로 분석하였다. 태풍이 온대저기압화가 진행될 때 시간의 흐름에 따라 태풍 주변의 와도 및 온도장을 분석하여 태풍이 온대저기압으로 약화될 때 태풍전면에서는 강수가 많을 수 있다는 것을 보여줬다. 이는 태풍 MINDULLE(0407) 하나의 사례를 선정하여 연구가 이루어졌으며 태풍 주변의 강수를 분석하였을 뿐 한반도 내에서 나타나는 강수는 고려되지 않았다.

본 연구에서는 한반도 주변에서 약화되는 태풍과 관련하여 나타나는 한국에서의 시공간적 강수분포의 특징에 대해 조사한다. 우선 최근 30년(1979-2008년)간 한반도 주변에서 약화되는 23개의 태풍 중 온대저기압으로 약화되어 변질되는 경우와 열대성 저압부로 약화되어 소멸해가는 경우의 2가지로 구분한다(2장). 각각의 태풍 자체 특성을 먼저 비교한 다음(3장), 시공간적인 강수 특징을 비교, 분석한다(4장). 그리고 각각의 강수 특징을 중관 기상장과 연관시켜 설명한다(5장). 그리고 온대저기압으로 약화된 사례와 열대성 저압부로 약화된 사례에서 분석된 내용들이 앞 장에서 분석한 것들을 뒷받침 하는지에 대해 조사하였다(6장). 마지막으로 본 연구의 결과들을 요약하여 정리하였다(7장).

2. 자료 및 분석방법

2.1. 자료

1979 ~ 2008년(30년) 동안 한반도 주변(32~36°N, 122~132°E)에서 약화된 23개 태풍의 위경도 위치 및 강도에 대한 정보를 Regional Specialized Meteorological Center(RSMC) Tokyo의 Best Track 자료로부터 얻었다(<http://www.jma.go.jp/en/typh>). 한국 시간강수량은 위의 분석기간 동안 유용한 기상청 소속 61곳 관측지점의 값을 이용하였다(Fig. 1). 500hPa 지위고도장, 200hPa 제트류, 200hPa 발산역, 850hPa 수렴역, 300-200hPa 잠재와도장, 850hPa 온도장 및 상승기류를 분석하기 위해 NCEP-NCAR(National Center for Environmental Prediction - National Center for Atmospheric Research) 위경도 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$, 6시간 간격 재분석 자료를 이용하였다(Kalnay *et al.*, 1996, <http://www.esrl.noaa.gov>). 그리고 온대저기압으로 약화된 태풍 MINDULLE(0407)와 열대성 저압부로 약화된 NEIL(9905) 각각의 태풍 주변 강우강도의 분포를 분석하기 위해 TRMM(Tropical Rainfall Measuring Mission) 위성의 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$, 3시간 간격 강우강도(mm hr^{-1}) 자료를 사용하였다(<http://trmm.gsfc.nasa.gov>).

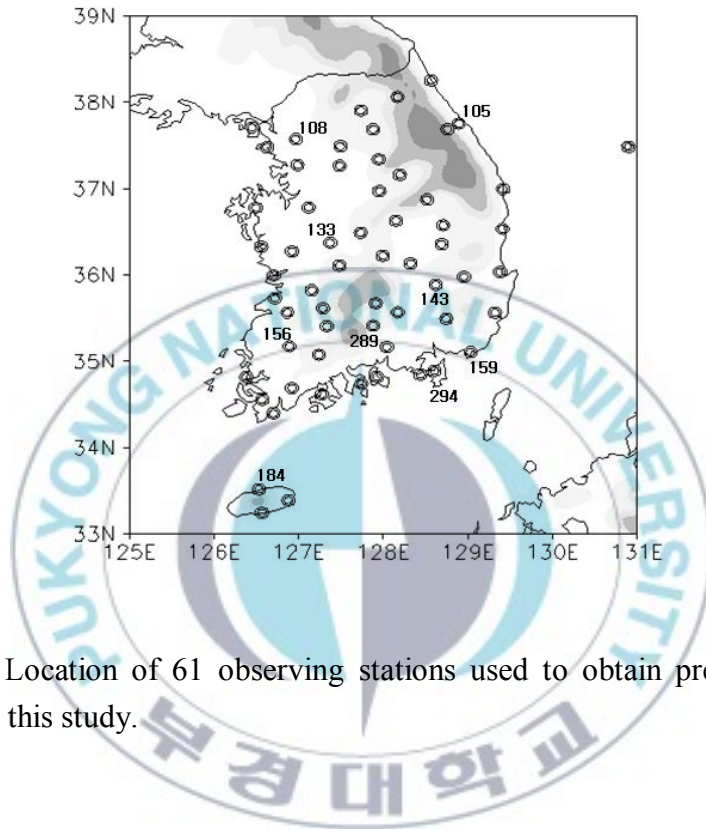


Fig. 1. Location of 61 observing stations used to obtain precipitation data for this study.

2.2. 분석방법

본 연구에서 주로 쓰일 태풍과 관련된 약어를 먼저 설명하면, TC(Tropical Cyclone)는 열대성 저기압, EC(Extratropical Cyclone)는 온대성 저기압, ET(Extratropical Transition of TC)는 TC의 온대저기압화를 의미한다. 그리고 TC는 TD, TS, STS, TY로 구분하는데 태풍 중심 주변 최대 풍속이 34kts 미만인 TC는 TD (Tropical Depression, 열대성 저압부), 최대 풍속 34-47kts 인 TC는 TS(Tropical Storm, 열대 폭풍), 최대 풍속 48-63kts인 TC는 STS(Severe Tropical Storm, 강한 열대 폭풍) 그리고 64kts 이상인 TC를 TY(Typhoon, 태풍)라 한다. 현재 한국과 일본에서는 TS, STS, TY 모두 태풍으로 칭하고 있다.

2.2.1. 약화 태풍의 구분

최근 30년 동안(1979-2008년) 북서태평양에서 발생한 태풍 중 한반도 주변(32-36°N, 122-132°E)에서 약화된 태풍은 23개이다. 이 중에서 온대저기압으로 약화된 경우(14개, Weakened to Extratropical Cyclone(WEC))와 열대성 저압부로 약화된 경우(9개, Weakened to Tropical Depression(WTD))의 2가지로 구분하였다(Fig. 2). 각각의

경우에 대해 한국에서 나타나는 강수의 시공간적 분포를 비교, 분석하였다.

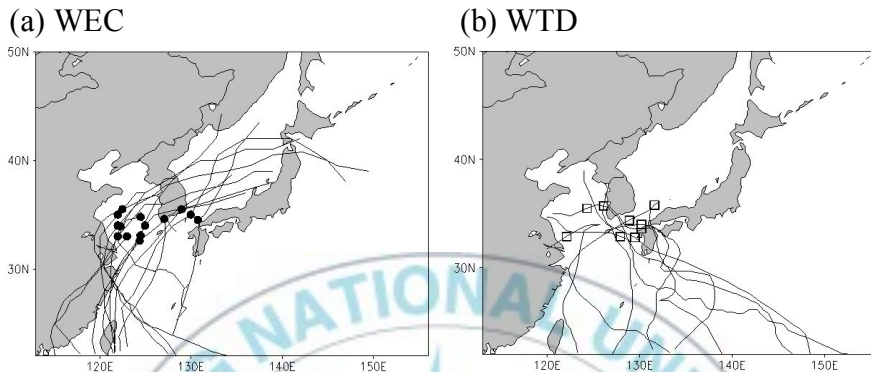


Fig. 2. Points of tropical cyclones(TCs) weakened around Korea(32-36°N, 122-132°E) during the period 1979-2008, and their tracks for (a) WEC(weakened to extratropical cyclone), (b) WTD(weakened to tropical depression).

WEC와 WTD에 적용된 예를 아래와 같이 나타내었다. 굵은 글씨의 구간이 본 연구에서 사용된 TC의 약화 구간이다.

- WEC(Weakened to Extratropical Cyclone)

TY -> STS -> **TS** -> **EC**->소멸

TY -> STS -> TS -> **TD** -> **EC**->소멸

- WTD(Weakened to Tropical Depression)

TY->STS->**TS**->**TD**->소멸

2.2.2. 태풍 접근 시점의 정의

태풍이 한반도로 북상할 때 위도 32°N를 통과하는 첫 시점을 한반도에 영향을 주는 시점(Affecting time point)으로 정의하였다(Table 1). 그리고 이 시점으로부터 12시간 전을 TC의 접근 시점(Approaching time point)으로 하였다. 위도 32°N를 영향시점 기준으로 한 것은 한반도 영향 태풍의 기준인 위도 32°N-40°N, 경도 120°E-138°E(기상청, 1996)의 범위를 고려하였기 때문이다. 본 연구에서는 WEC와 WTD의 경우에 있어서 각각의 접근시점에 나타나는 주변 기상장의 차이를 비교하고 이러한 차이와 강수분포와는 어떠한 관련성을 가지는지 분석하였다.

Table 1. Definition of the affecting time point and approaching time point of TC.

	Definition
Affecting time point (0 hour)	First time which TC begins to pass northward 32°N, latitude criterion of TC affecting Korea
Approaching time point (-12 hours)	12 hours before the affecting time point

3. 한반도 주변에서 약화되는 태풍의 특성

3.1. 태풍의 약화 시점

WEC와 WTD 태풍 각각의 평균적인 약화시점은 한반도 영향 시점에서부터 +7.7시간, +24.0시간으로 나타난다(Table 2). WTD의 약화 시점이 WEC의 약화 시점보다 현저히 늦게 나타난다.

3.2. 태풍의 이동 경로

WEC의 경우 TC의 한반도 접근 시 평균 경로는 중국 상해 부근에서 북동진하여 한반도를 가로지르며 동해로 빠져나간다(Fig. 3a). WTD의 경우 TC의 한반도 접근 시 평균 경로는 일본 규슈 남쪽 해상에서 북서진하여 한반도를 가로지르지 않으며 동해로 빠져나가지도 않는다(Fig. 3b). TC 접근 시점(-12시간)의 TC주변 500hPa 지위고도장에서 뚜렷한 차이가 있음을 볼 수 있다. WEC의 경우는 아열대 기압능이 TC 동쪽에서 남동-북서로 늘어서 있으며, TC 서쪽에 기압골이 뚜렷하게 위치하는 것을 볼 수가 있다(Fig. 3a). 즉, 태풍의 진행방향을 북동쪽으로 유도하고 있는 형태이다. WTD의 경우는 아열대 기압능이 TC 북동쪽에서 동서로 늘어서 있으며,

기압골은 보이지 않는다(Fig. 3b). 이는 태풍의 이동속도를 느리게 하고 있다.

Table 2. Weakened time point of all TCs for WEC and WTD. The time indicates the time difference between weakened and affecting time point of TC(in Table 1).

WEC			WTD		
TC number	TC name	Time (hour)	TC number	TC name	Time (hour)
8007	IDA	+0	7911	JUDY	+30
8403	ALEX	+12	8110	OGDEN	6
8505	HAL	+6	9112	GLADYS	+42
8520	BRENDA	+12	9209	IRVING	0
8605	NANCY	+6	9211	KENT	+24
8906	ELLIS	+3	9407	WALT	+9
9005	OFELIA	+12	9413	DOUG	+72
9015	ABE	0	9905	NEIL	+24
9507	JANIS	0	9908	PAUL	+9
9809	YANNI	9	mean		+24.0
9917	ANN	+30			
0102	CHEBI	0			
0407	MINDULLE	+6			
0515	KHANUN	+12			
mean		+7.7			

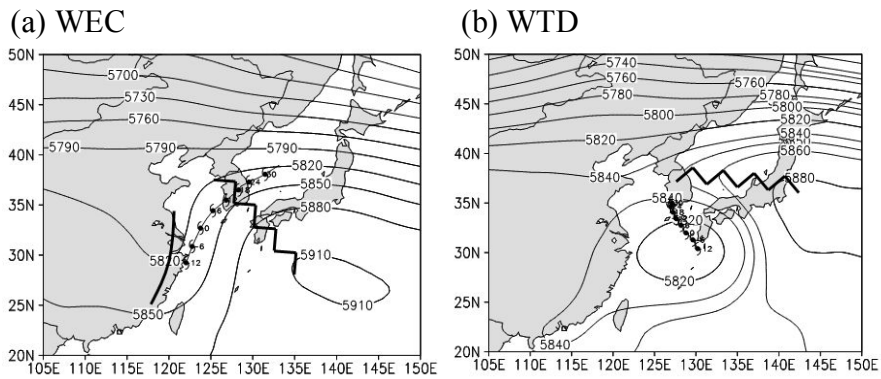
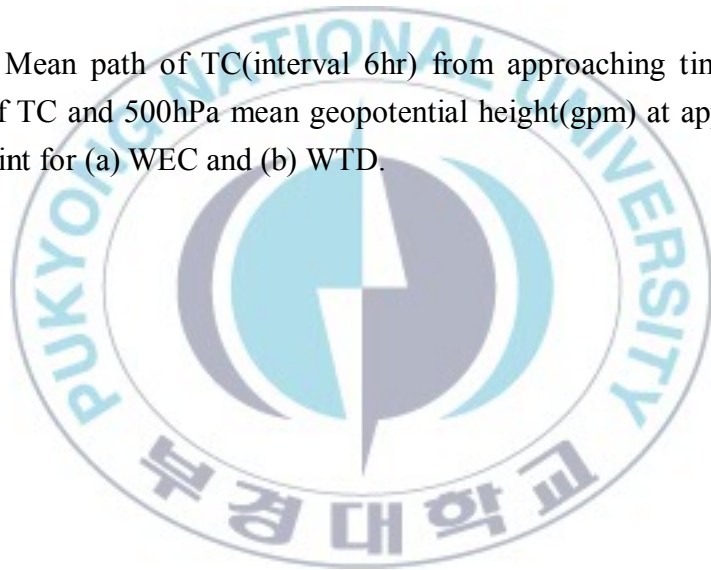


Fig. 3. Mean path of TC(interval 6hr) from approaching time point(-12hr) of TC and 500hPa mean geopotential height(gpm) at approaching time point for (a) WEC and (b) WTD.



3.3. 태풍의 이동 속도

WEC는 온대저기압으로 변질될 때 중위도 편서풍의 영향으로 빠른 속도로 북동진 하는 것을 알 수가 있다(Fig. 3a, Fig. 4). WTD는 열대성 저압부로 약화될 때 중위도의 편서풍보다는 TC 전면 기압능의 영향을 받아 느린 속도로 이동한다(Fig. 3b, Fig. 4). 태풍의 접근 시점(-12시간)부터 45시간 동안 WEC의 평균 이동속도는 33m s^{-1} 이며, WTD의 평균 이동속도는 15m s^{-1} 로 WEC가 WTD 보다 2배 정도 빠르다. WEC의 이동속도는 TC 접근 시점 이후 조금씩 증가하다가 +3시간에 이를 때 속도가 가장 빨리 나타났다. 이 후 서서히 감소하다 +21시간째에 가장 느리게 이동하였으며 이후 급격히 증가하는 경향을 보인다. WTD의 이동속도는 TC 접근 시점부터 서서히 감소하는 경향을 보이다가 +27시간째에 가장 느리게 이동하였으며 이후 증가하는 모습을 보인다.

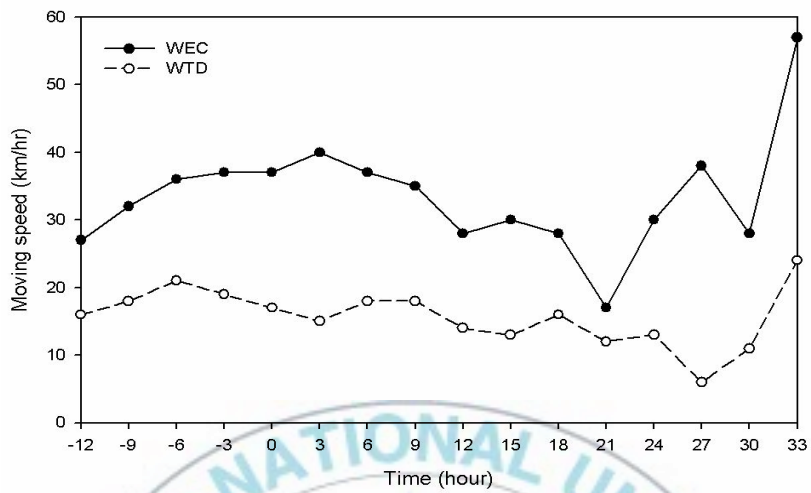
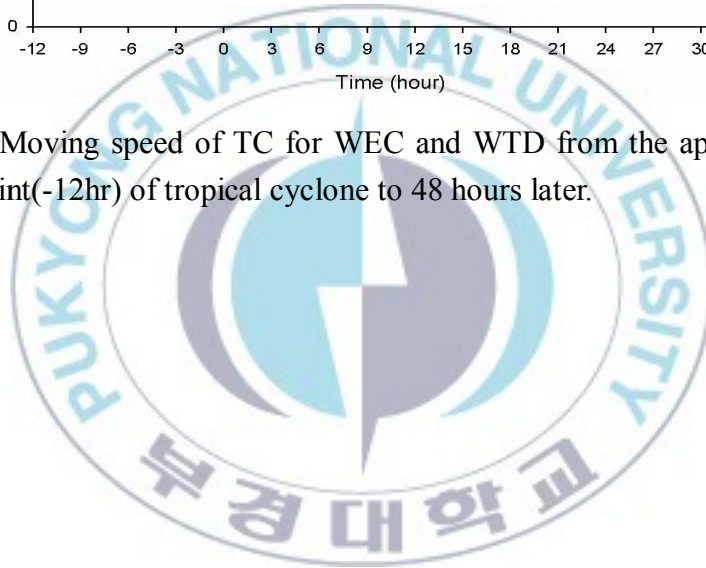


Fig. 4. Moving speed of TC for WEC and WTD from the approaching time point(-12hr) of tropical cyclone to 48 hours later.



3.4. 약화 태풍의 월별 빈도

500hPa 지위장의 특징에서 알 수 있듯이 WTD일 때 아열대 기압능이 위도 35°N 이상에서 나타나는 것은 한여름의 기압패턴을 의미한다(Fig. 3b). 실제로 WTD의 발생은 실제로 30년간(1979-2008년) 7월과 8에만 나타났으며 8월에 가장 많은 빈도를 나타냈다(Fig. 5). 반면 WEC의 발생빈도는 8월에 가장 낮게 나타났으며 6월과 9월에 높게 나타났다. 다음 장부터는 WEC와 WTD의 구분을 결정짓는 주요 기상장들이 한국 강수에 어떠한 영향을 주게 되는지 분석한다.

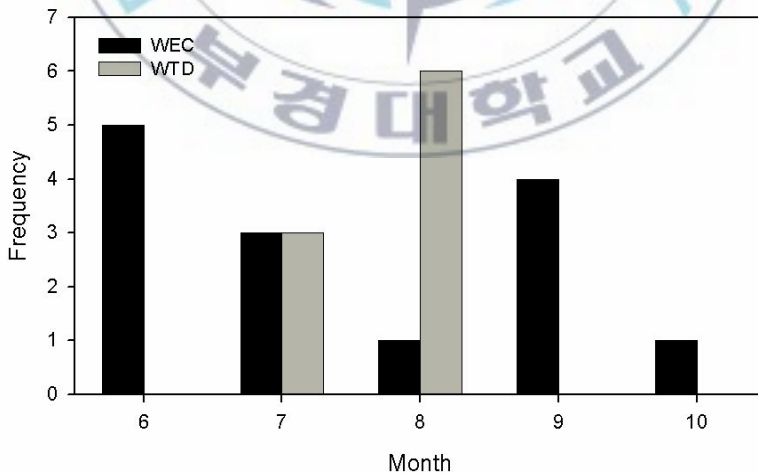


Fig. 5. Monthly frequency of TCs weakened to extratropical cyclone(WEC) and tropical depression(WTD).

4. 태풍의 북상에 따른 시공간적 강수 분포

4.1. 공간적 강수 분포

TC의 접근 시점(-12시간)부터 48시간 누적강수량을 분석한 결과, WEC의 경우 남부지방에 가장 많으며 전국적으로 골고루 분포한다(Fig. 6a). 전국 61개 지점 평균 강수량은 63.3mm, 가장 많은 양을 기록한 산청에서는 110.3mm로 나타났다(Table 3). WTD에서는 남부지방과 동해안 지역에만 강수가 많이 나타나며 중부지방 및 내륙에서는 매우 적은 강수량을 기록하였다(Fig. 6b). 61개 지점 평균 강수량은 39.2mm, 가장 많은 양을 기록한 거제에서는 115.0mm로 나타났다(Table 3).

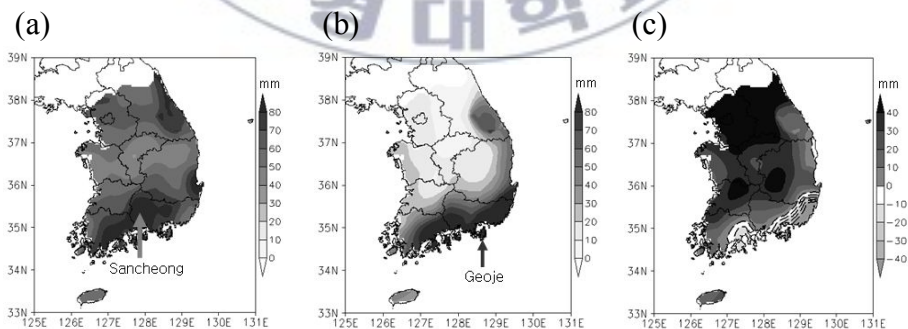


Fig. 6. Precipitation accumulated over 48 hours from approaching time point(-12hr) of tropical cyclone for (a) WEC, (b) WTD and (c) their difference(WEC-WTD). The dashed lines indicate negative value.

Table 3. Mean precipitation accumulated over 48 hours at 61 stations from the approaching time point(-12hr) of tropical cyclone and maximum precipitation of all the stations.

	WEC	WTD
Mean precipitation of 61 stations	63.3 mm	39.2 mm
Maximum precipitation and station	110.3 mm Sancheong(289)	115.0 mm Geoje(294)

주요 7개 지점(서울, 강릉, 대전, 대구, 광주, 부산, 제주)을 비교한 결과, WEC에서는 7개 지점 모두 전국 61개 지점 평균과 비슷한 강수량을 나타냈다(Fig. 7a). 반면 WTD에서는 서울과 대전이 전국 평균보다 20~25mm 적게 나타났으며 부산은 전국 평균보다 60~70mm나 많이 나타났다(Fig. 7b).

WEC와 WTD간의 강수 차이는 중부지방 및 내륙지역을 중심으로 나타난다(Fig. 6c). 이러한 강수차이를 T-test(유의수준 0.1)를 통해 강수차이를 검증하였다(Fig. 8). 검은 색 원으로 된 지점들은 WEC가 WTD 때보다 강수량이 많다는 것을 의미하며, 흰색 원으로 된 지점들은 강수차이가 나지 않음을 의미한다. 한편, WEC보다 WTD가

훨씬 많다고 판정된 지점은 한 곳도 나타나지 않았다. 따라서, 그림에서와 같이 WTD보다 WEC일 때 강수가 많은 지역을 1지역(Region 1)으로 지정하였으며, 강수차이가 나지 않은 지역을 2지역(Region 2)으로 지정하였다(Fig. 8). 태풍별로 각 지점 평균된 강수량을 비교한 결과 2지역보다 1지역에서 뚜렷이 WEC와 WTD간 차이가 나는 것을 확인할 수도 있다(Fig. 9).



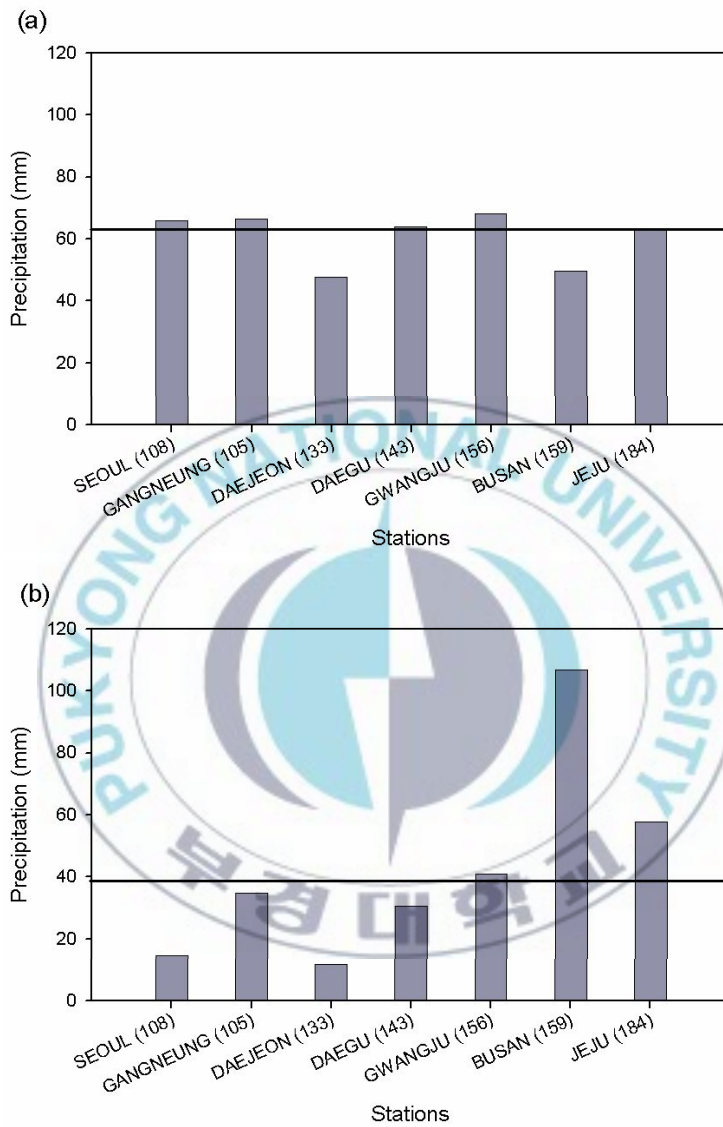


Fig. 7. 48hours accumulated precipitation of several major stations from the approaching time point(-12hr) of tropical cyclone for (a)WEC, (b)WTD. Solid straight line indicates mean precipitation(Table 3) of 61 stations.

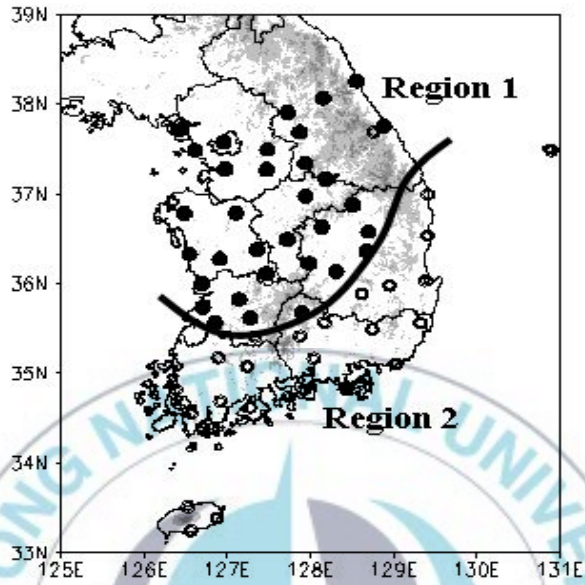


Fig. 8. Verification using t-test(significance level=0.1) for the precipitation difference shown Fig. 6c. The closed circles denote differing areas, whereas the open circles denote similar areas for precipitation. Henceforth, Region 1 and Region 2 are designated as described above.

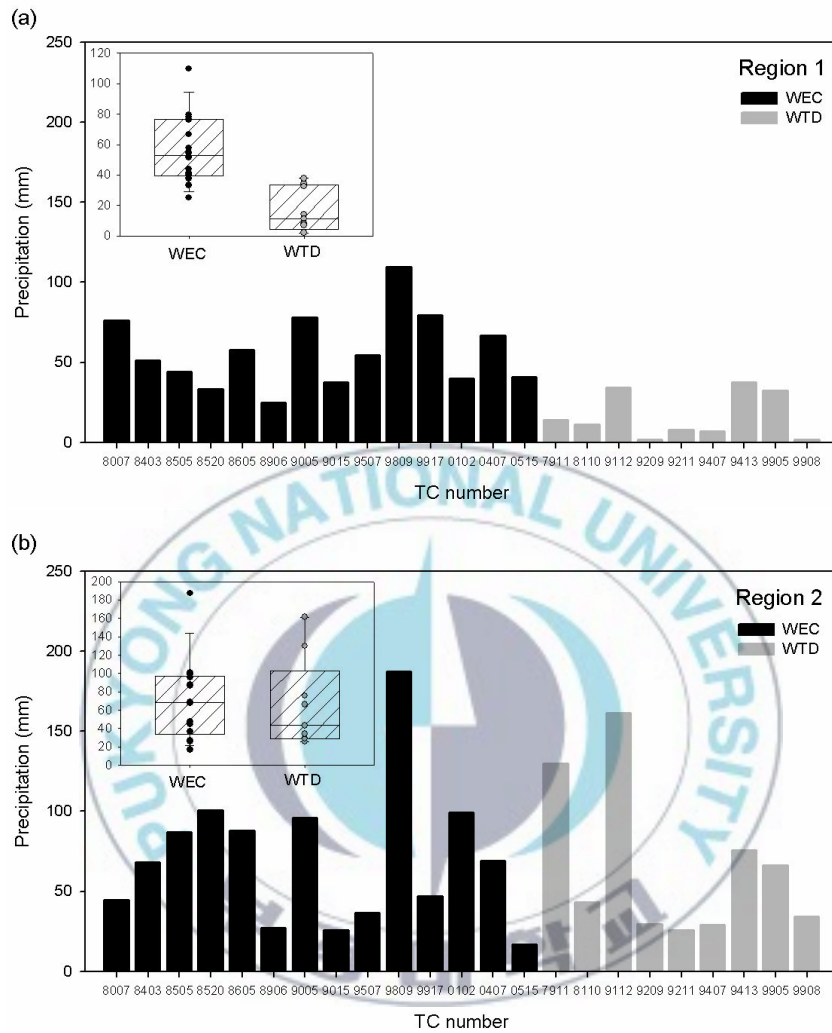


Fig. 9. Precipitation accumulated over 48 hours from approaching time point(-12hr) for each TC in (a) Region 1 and (b) Region 2 for WEC and WTD. Box plot of the precipitation is also illustrated.

TC의 이동속도가 빠를 때보다 느릴 때 강수영역에 더욱 노출되기 때문에 강수량이 더 많을 수 있다. 그러나 WEC의 TC 이동속도가 WTD의 TC 이동속도보다 더 빠름에도 불구하고(Fig. 4) 1 지역에서는 WEC일 때 강수량이 더 많이 나타난다(Fig. 8). 물론 TC경로를 보면 (Fig. 3), WEC일 때는 한반도를 통과하지만, WTD의 경로에서는 한반도를 통과하지 않은 형태를 취하기 때문인 것으로도 보이나, TC가 위치한 위도대별 강수량을 보면 1지역에서의 WEC와 WTD간 강수차이의 원인이 TC의 경로 때문이 아님을 알 수 있다(Fig. 10). 2지역에서는 태풍이 접근할수록 WEC보다 WTD에서 더 많은 양의 강수가 나타나지만(Fig. 10b), 1지역에서는 태풍이 접근할 때(TC의 위치 30~34°N) TC가 WEC, WTD 모두 동 위도대에 위치할 때에 강수량을 보면, WEC가 WTD보다 누적 강수시간 같거나 짧더라도 강수량이 WTD보다 많다(Fig. 10a). 즉 1지역의 강수는 TC의 이동속도나 경로와는 상관이 적다는 것을 의미한다. 이러한 강수 차이가 나는 원인이 무엇인지 다음 장에서 살펴본다.

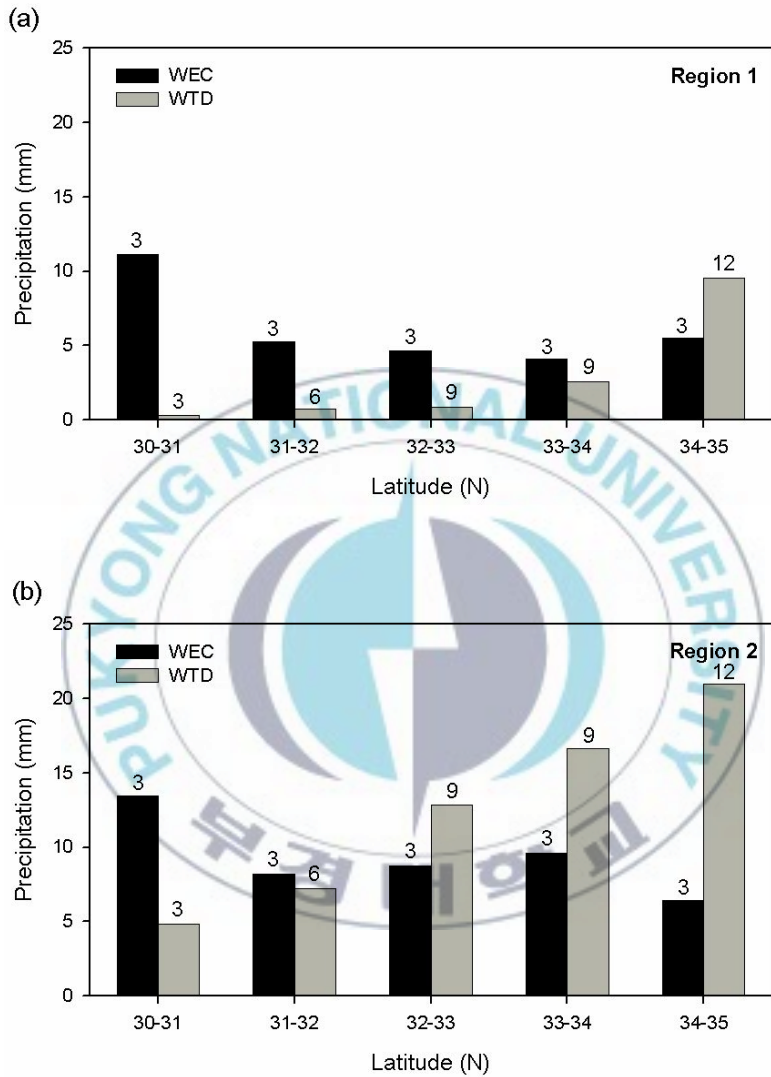


Fig. 10. Precipitation in (a)Region 1(Fig. 8), (b)Region 2(Fig. 8) each latitude as TCs approach Korea. The numbers over bars denote accumulated precipitation time(hr).

4.2. 시간적 강수 분포

WTD의 경우 1지역, 2지역 모두 TC가 접근함에 따라 서서히 강수량이 증가하는 것이 뚜렷하다(Fig. 11). 반면 WEC의 경우에는 1지역, 2지역 모두 TC가 한반도에 접근하는 초기(-12 ~ +9시간)에 많은 강수가 집중된다. 이 시간 동안 TC와 한반도간 거리는 WEC와 WTD가 서로 평균적으로 비슷하나 강수량은 WEC일 때 훨씬 많다.

WEC가 WTD보다 이동속도가 빠르며, 동 위도대에 대해서 누적시간이 짧더라도 강수량이 많은 것은(Fig. 4, Fig. 10a) 태풍의 직접적인 원인이라기보다는 태풍이 약화되면서 에너지가 강수로 전환되는 비단열 과정에 의한 영향으로 보인다. 다음 장에서는 비단열 과정을 잘 나타내는 잠재와도의 이류와 그 외 기상장의 특징을 WEC와 WTD를 비교하여 분석하도록 한다.

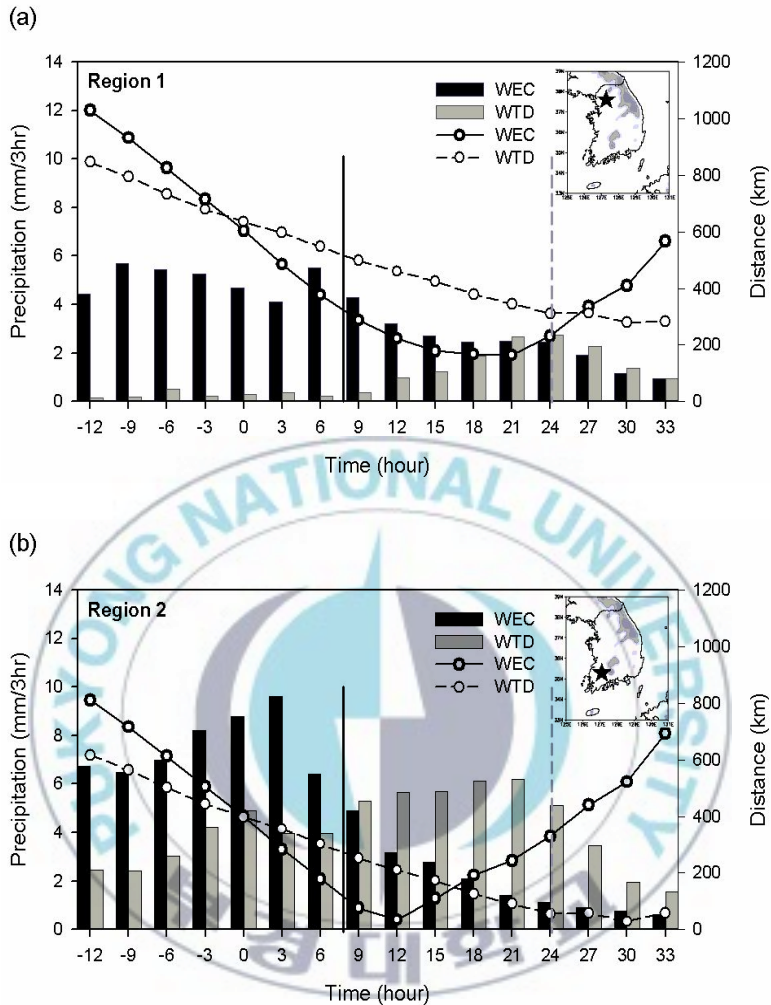


Fig. 11. Time evolution of 3 hours accumulated precipitation(bars) from the approaching time point(-12hr) of tropical cyclone to 48hours later for (a) the Region 1 and (b) the Region 2(Fig. 8). The lines indicate distance between the TC center and Seoul or Gwangju(star-marked point in illustration). The solid straight line indicates the mean time(+7.7hr) that TCs were weakened to extratropical cyclone and the dashed straight line indicates mean time(+24hr) that TCs were weakened to tropical depression.

5. 강수에 영향을 주는 기상 요소

5.1. 잠재와도와 온도골의 이류

태풍 접근시점(-12시간)에 발달된 300-200hPa 잠재와도와 850hPa 온도골이 WEC에서는 태풍 북서쪽에 위치하고 있어 태풍전면 경압 교란 및 비단열 가열을 발달시키는 조건을 갖추고 있다(Fig. 12a). 이에 반해 WTD에서는 태풍전면에 발달된 잠재와도나 온도골이 존재하지 않는다(Fig. 12b).

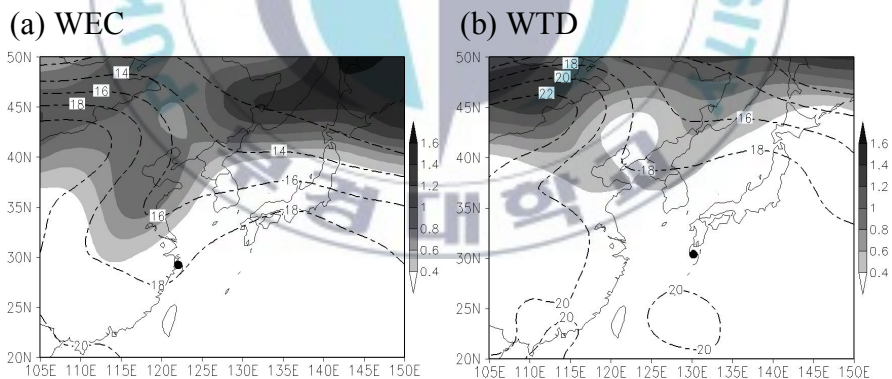


Fig. 12. 300-200hPa potential vorticity(shaded every 0.2 PVU starting at 0.4 PVU where $1 \text{ PVU} = 10^{-6} \text{ K kg}^{-1} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$), 850hPa temperature(dashed lines, $^{\circ}\text{C}$) and mean location of TC at the approaching time point(-12hr) of tropical cyclone for (a)WEC, (b)WTD.

5.2. 제트에 의해 유도되는 상층 발산

전선 및 온대저기압은 상층 제트로부터 에너지를 공급받아 증폭될 때 더욱 발달한다(Newton and Trevisan, 1984). 그리고 태풍이 중위도로 접근 시 태풍의 북동쪽에 상층 200hPa 제트류의 입구 및 기압골이 위치할 때, 태풍중심에서의 상승기류가 강해지며 태풍주변 상대습도가 증가하여 강우강도가 강해진다(Shi *et al.*, 1997; Kim *et al.*, 2006). 한편 Shapiro and Kennedy(1981), Holton(1992), Ziv and Paldor(1999)는 제트 입구의 우측에서 상층 발산구역이 유도되는 것을 비지균 성분과 와도의 이류로써 증명하였다. 태풍이 온대저기압으로 변질될 때는 보통 상층 제트를 동반하는데 태풍의 접근시점(-12시간)에 WEC에서는 상층 제트를 태풍의 북동쪽에 동반하고 있다(Fig. 13a). WEC의 경우 제트 입구 남쪽으로 발산역이 유도되며 이 지역은 TC의 전면에 해당된다. 제트 입구 남쪽으로 강한 발산역이 유도되며 이 지역은 TC의 전면에 해당된다. 따라서 태풍 전면에서 강한 강수가 넓은 영역에서 형성되어 한반도는 이러한 환경에 오랫동안 노출되어 많은 강수량을 기록하였다. 반면 WTD에서는 WEC에서 나타난 상층 제트나 강한 상층발산역이 보이지 않는다(Fig. 13b). 다만 태풍 중심 부근에 약한 상층 발산만 있을 뿐이며, 태풍 전면에서 약한 강수가 좁은 영역에서 형성되어

한반도는 약한 강수에 단시간 동안 노출되어 적은 강수를 기록하였다.

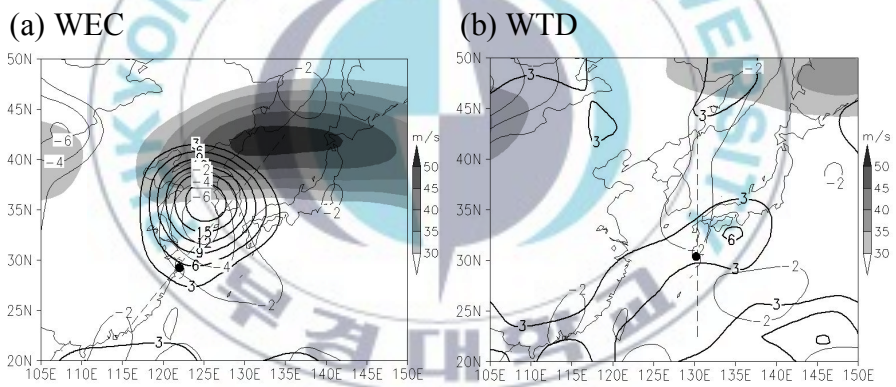


Fig. 13. 200hPa jet stream(shaded every 5 m s^{-1} starting at 30 m s^{-1}), 200hPa divergence(thick contours, every $3\times 10^{-6}\text{ s}^{-1}$ starting at $3\times 10^{-6}\text{ s}^{-1}$) and 850hPa convergence(thin contours, every $-2\times 10^{-6}\text{ s}^{-1}$ starting at $-2\times 10^{-6}\text{ s}^{-1}$) at the approaching time point(-12hr) of tropical cyclone for (a)WEC, (b)WTD. The dashed line is used for vertical cross section in Fig. 14 and Fig. 15.

5.3. 태풍 전면 상승기류의 발달

태풍이 온대저기압으로 약화되는 WEC의 경우 태풍전면의 넓고 강한 발산역에 의해 상승기류 역시 태풍 전면의 넓은 영역에서 강하게 발달한다(Fig. 14a). 반면 WTD의 경우는 태풍을 지속적으로 약화만 시키게 되는 주변 기상장에 의해 상승기류가 좁은 영역에서 약하게 나타난다(Fig. 14b). Fig. 15는 태풍의 접근시점에 태풍과 한반도 사이에 존재하는 상층 발산, 하층 수렴, 700hPa 실제 상승속도를 나타낸 모식도이다. WTD보다 WEC일 때 더 큰 700hPa 상승속도가 더 넓은 범위에서 나타나는 것을 보여준다.

따라서 WTD의 경우 태풍이 북상함에 따라 태풍 주변 강우영역이 점차 좁아지면서 약화되는 주변 기상조건에 의해 한국에서의 강수 역시 태풍과 가까운 2지역(Fig. 8)에서만 많이 나타나고 태풍과 거리가 먼 1지역(Fig. 8)에서는 상당히 적은 양이 나타난 것으로 판단된다. 반면 WEC의 경우는 태풍이 북상함에 따라 태풍 주변 강우영역이 넓고 강하게 형성되는 주변 기상 조건에 의해 한국에서의 강수 역시 2지역 뿐만 아니라 1지역에서도 강수가 많았던 것으로 판단된다. 태풍의 북상 시 태풍주변 실제 강수영역을 다음 장에서 확인한다.

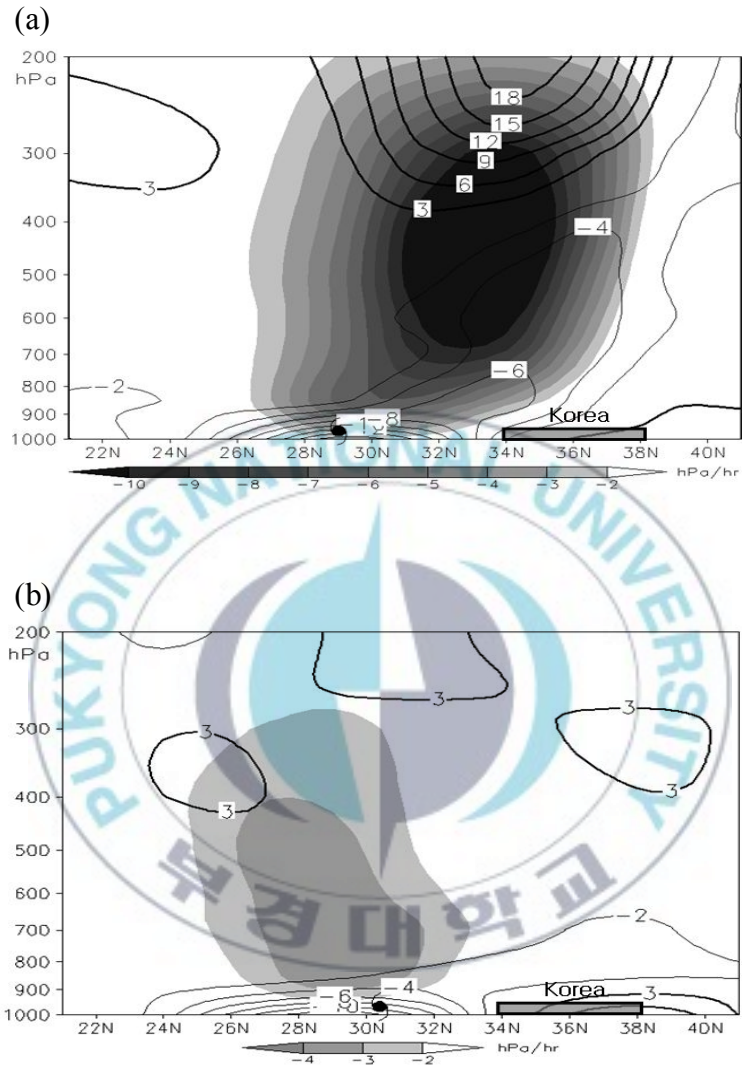


Fig. 14. Vertical cross section over the dashed straight line in Fig. 13 for (a) WEC and (b) WTD. The shaded area indicates the ascending current (hPa hr^{-1}). The thick lines and thin lines indicate divergence (10^{-6} s^{-1}) and convergence (10^{-6} s^{-1}), respectively. The square box indicates the location of Korea.

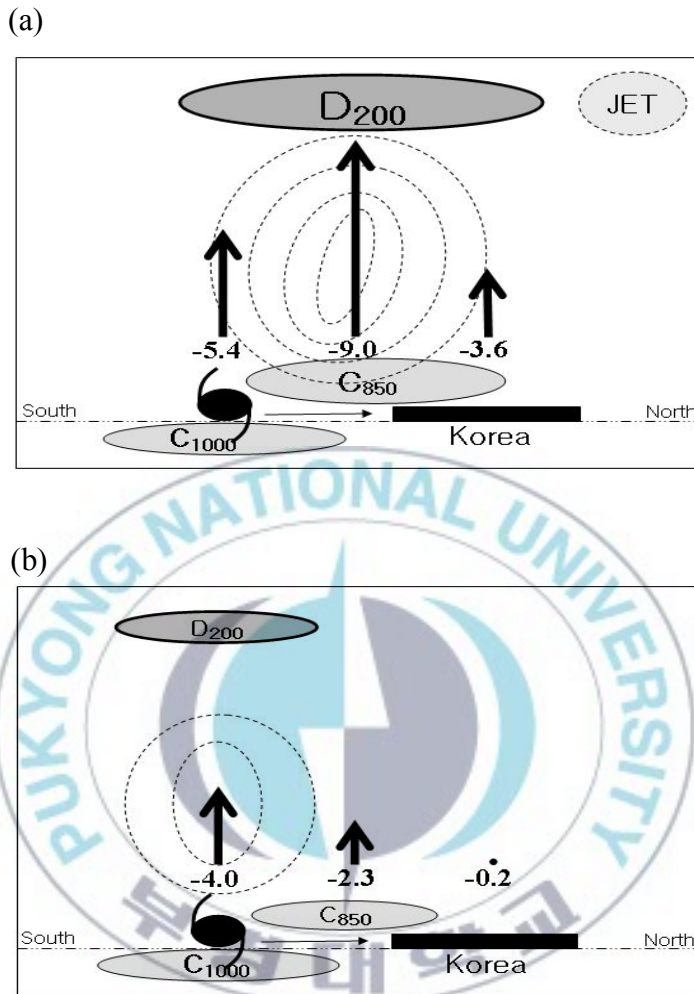


Fig. 15. Conceptual map of vertical cross section field(Fig. 14) between TC and Korea at the approaching time point(-12hr) of tropical cyclone for (a)WEC, (b)WTD. Each D200, C850 and C1000 mark indicate region of 200hPa divergence, 850hPa convergence and 1000hPa divergence, respectively. JET mark represents upper level jet stream and dotted circles denote ascending current. Thick vertical arrows represent relative scale of the real vertical velocities at 700hPa and these real values(hPa hr^{-1}) show below of all the arrows.

6. 시간에 따른 태풍 주변 강수 영역

WEC와 WTD의 대표 사례를 통해 태풍 주변 특정 강우강도 영역이 시간에 따라 어떻게 변화하는지 분석하였다. 사례는 TRMM위성 강수자료가 제공되는 1998년도 이후 태풍 중에서 정하였으며, WEC 사례는 0407호 태풍 ‘민들레’, WTD 사례는 9905호 태풍 ‘네일’ 로 정하였다.

6.1. 강수영역의 분포

태풍 접근 시점부터 3시간 간격 별로 태풍 주변의 강수영역을 보면 ‘네일’ (WTD) 의 경우 점차 약화되는 것이 뚜렷하다(Fig. 16). 반면 ‘민들레’ (WEC) 의 경우는 태풍전면의 강수영역이 넓은 영역에서 지속되고 있다(Fig. 17). 강수영역에 대한 수치는 다음 장에서 확인한다.

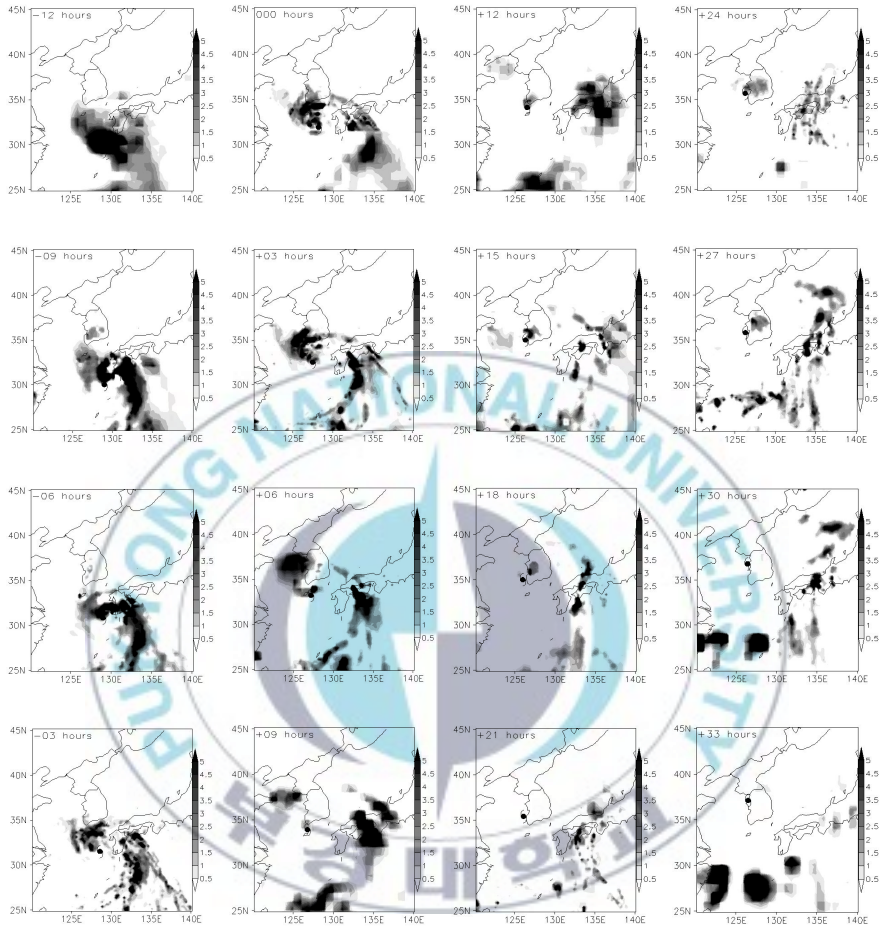


Fig. 16. Rainfall intensity(mm hr^{-1}) over 48 hours from the approaching time point(-12hr) of the representative TC NEIL(9905) of WTD(from 0600UTC July 26 to 0300UTC July 28 in 1999, interval 3hours) using Tropical Rainfall Measuring Mission(TRMM) data. This TC was weakened to tropical depression at '+24 hr', 1800UTC July 27.

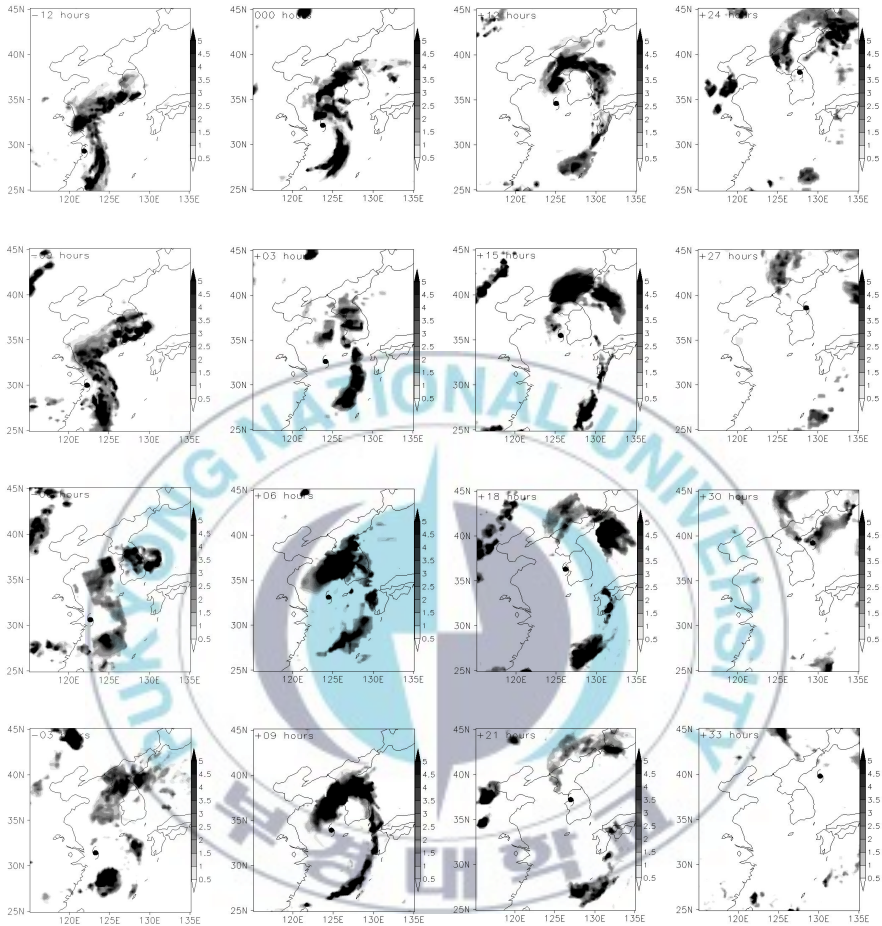


Fig. 17. Same as Fig. 16 but for representative TC MINDULLE(0407) of WEC(from 0600UTC July 3 to 0300UTC July 5 in 2004). This TC was weakened to extratropical cyclone at '+06 hr', 0000UTC July 4.

6.2. 특정 강우강도의 비율

Fig. 18은 Fig. 16, Fig. 17 각각의 태풍 주변의 강수영역을 수치적으로 확인하기 위해 태풍중심 800km 북쪽반경 내에서의 특정 강우강도의 영역 비율을 시간에 따라 나타낸 것이다. ‘네일’ (WTD) 의 경우 5 mm hr^{-1} , 1 mm hr^{-1} 의 강우강도에 대한 영역은 모두 태풍이 북상할수록 지속적으로 감소한다. ‘민들레’ (WEC) 의 경우는 5 mm hr^{-1} , 1 mm hr^{-1} 의 강우강도에 대한 영역은 모두 태풍이 북상할수록 조금씩 증가하다가 약 +18시간째부터 감소한다. 두 사례에서 시간에 따른 한국 강수량의 분포(Fig. 19) 역시 평균적 분포(Fig. 11)와 비슷한 경향을 보인다.

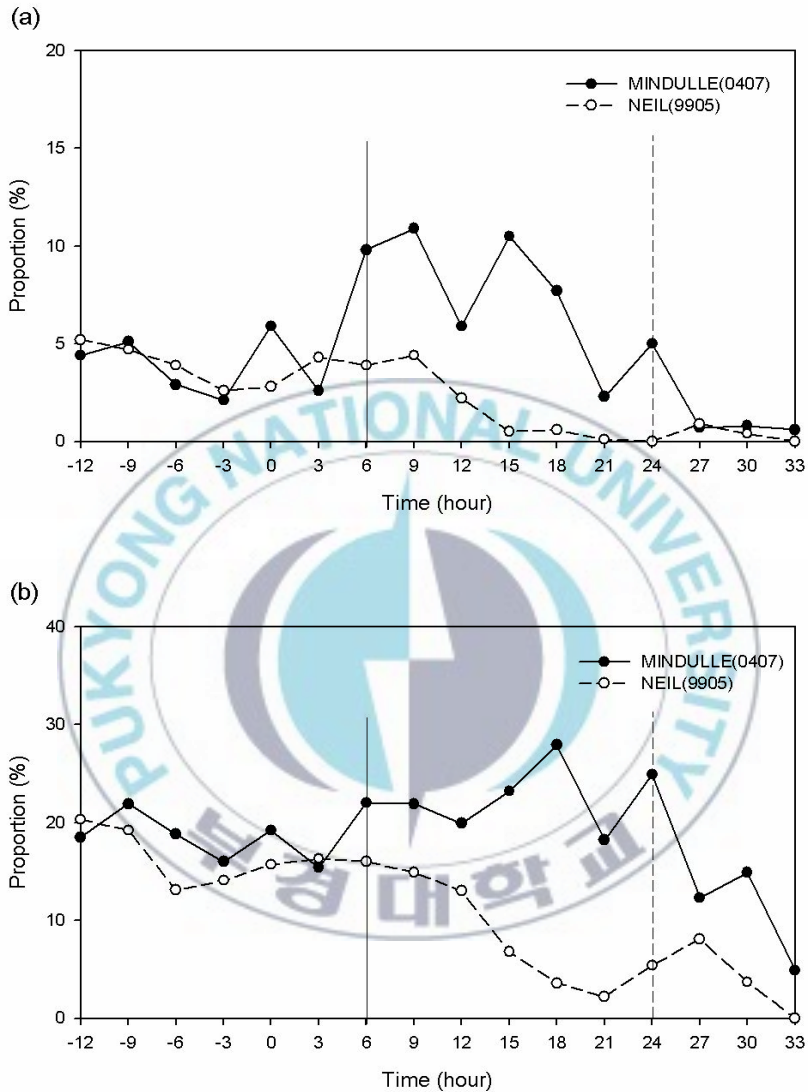


Fig. 18. Time evolution of area proportion of detected rainfall intensity above (a) 5mm hr⁻¹ or (b) 1mm hr⁻¹ within the northern 800km radius of the center of NEIL(Fig. 16) and MINDULLE(Fig. 17). The solid and dashed straight lines indicate the extratropical transition time point and weakening time point, respectively, of each TC.

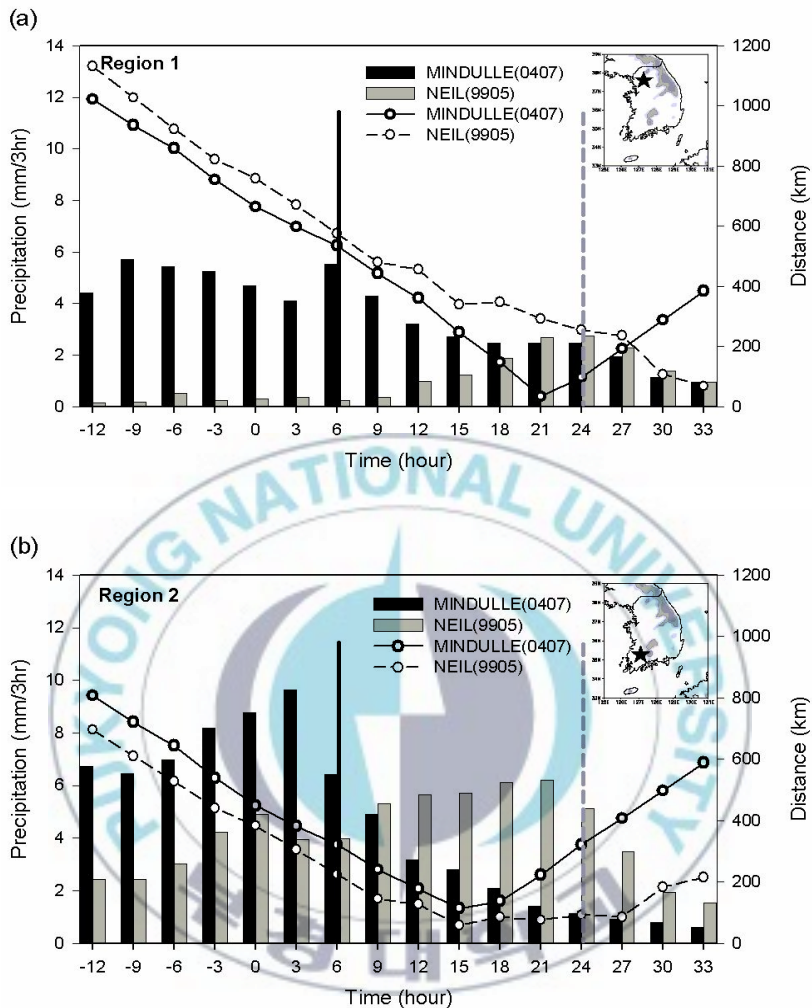


Fig. 19. Time evolution of 3 hr precipitation(bars) from the approaching time point(-12hr) of each tropical cyclone(MINDULLE and NEIL) to 48 hours later for (a) the Region 1 and (b) the Region 2(Fig. 8). The lines indicate the distance between the TC center and Seoul or Gwangju(star-marked point in illustration). The solid straight line indicates the time(+6hr) that TC MINDULLE was weakened to extratropical cyclone and the dashed straight line indicates the time(+24hr) that TC NEIL was weakened to tropical depression.

7. 요약 및 결론

최근 30년간(1979~2008년) 한반도 주변(32~36°N, 122~132°E)에서 약화되는 태풍과 관련하여 나타나는 한국 지역 강수의 시공간적 분포 및 특징을 분석하였다. 태풍의 약화 유형은 온대저기압으로 약화되는 TC(Weakened to Extratropical Cyclone, WEC)와 열대저압부로 약화되는 TC(Weakened to Tropical Depression, WTD)로 구분하였다.

태풍에 의한 강수량의 공간분포를 보면, WEC의 경우 강수량은 전국에 걸쳐 골고루 분포하였으며 남해안에 가장 많았다. WTD의 경우 강수량은 남해안에 가장 많았으나 중부 및 내륙지역은 적었다. 그리고 WEC와 WTD의 강수차이를 통계적으로 검증한 결과 Region 2(전라남도, 경상남도, 경상북도 남동부 지역, 제주도)에서는 차이가 없었으나 Region 1(중부지방, 전라북도, 경상북도 내륙)에서는 WTD보다 WEC일 때 강수가 더 많은 것으로 나타났다.

태풍의 접근시 시간에 따른 강수량은 WEC일 때는 Region 1, Region 2 모두 태풍이 접근할 때부터 많았으며, WTD일 때는 Region 1, Region 2 모두 태풍이 한반도에 근접해서야 증가하기 시작했다. 그러나 Region 1에서는 그 양이 WEC일 때보다 훨씬 적어 뚜렷한 차이를 보였다.

태풍 접근 시점에 주변 기상장을 분석한 결과 WEC의 경우 태풍 북서쪽에 상층의 발달된 잠재와도와 하층의 온도골이 위치하고

있었으며, 상층 제트에 의해 유도된 강한 발산역이 태풍의 북동쪽에 위치하고 있었다. 이로 인해 태풍 전면에서 경압교란과 비단열 과정이 발달되고 강한 강수영역이 넓게 형성되어 한반도 전역에 영향을 주었다. 그러나 WTD의 경우에는 WEC에서 발견된 강한 잠재와도나 온도골, 상층제트가 태풍 주변에 존재하지 않았으며 아열대 고기압이 태풍 전면에 위치하였다. 따라서 태풍 주변 강수역이 넓은 영역에 유도하지 못하여 강수역이 Region 2(주로 남부지방)에만 영향을 주었다.

사례를 통하여 태풍 주변에 특정 강우강도(5mm hr^{-1} 및 1mm hr^{-1})의 영역비율을 TRMM 위성 강수자료를 통하여 비교한 결과 WTD 사례에서는 태풍이 열대성저기압으로 약화되기 전부터 지속적으로 강수영역이 감소하는 반면 WEC 사례에서는 태풍이 온대저기압으로 약화되더라도 넓은 강수영역이 일정시간 지속되었다.

결론적으로 태풍이 온대저기압으로 약화될 때와 열대저압부로 약화될 때는 기상학적인 배경의 차이가 있는 것은 분명한 사실이지만 본 연구에서는 이러한 기상학적 배경과 한국에서의 시공간적 강수 특징과의 관련성에 대해 비교한 것에 중점을 두었다. 이 연구에서는 약화되는 태풍들에 대해 전반적인 강수분포의 시공간적 특징을 분석하였다. 약화되는 태풍뿐만 아니라 강한 태풍과 강수량과의 관계 및 특징과 다양한 사례에 대한 연구를 통해 태풍에

의해 유도되는 강수패턴을 이해하기 위해 앞으로도 더 많은 연구가 이루어져야 할 것이다.



참고문헌

- 국가태풍센터, 2009: 태풍예보업무매뉴얼, 64pp.
- 권혁조, 김지영, 2005: 태풍 민들레의 온대저기압화 과정에 대하여, *대기*, 15(1), 17-25.
- 기상청, 1996: 태풍백서. 261pp.
- 김진석, 유재훈, 2002, 태풍전면에서의 강원도 영동지방 집중호우 연구, *대기* 12(3), 140~143.
- 양진관, 오주덕, 2001: 호우 현상을 초래하는 태풍 전면 수렴대 분석. *대기*, 11(3), 165-168.
- 장용환, 2002: 태풍주변 하층기류에 의한 동해안지방 집중호우 진단, *대기*, 12(3), 456-459.
- Atallah, E. H., L. F. Bosart, and A. R. Aiyyer, 2007: Precipitation distribution associated with landfalling tropical cyclones over the eastern united states. *Mon. Wea. Rev.*, 135, 2185-2206.
- Brand, S., and C. P. Guard, 1978: Extratropical storm evolution from tropical cyclones in the western North Pacific Ocean. Tech. Rep. TR 78 02, Naval Environmental Prediction Research Facility, 20 pp. [Available from Naval Research Laboratory/Marine

Meteorology Division, 7 Grace Hopper Avenue, Stop 2,
Monterey, CA 93943-5502.]

Browning, K. A., G. Vaughan, and P. Panagi, 1998: Analysis of an extratropical cyclone after its reintensification as a warm core extratropical cyclone. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **124**, 2329-2356.

Chen, G. T. J., and C. C. Yu, 1988: Study of low-level Jet and extremely heavy rainfall over northern Taiwan in the Mei-Yu season. *Mon. Wea. Rev.*, **116**, 884-891.

DiMego, G. J., and L. F. Bosart, 1982a: The transformation of tropical storm Agnes into an extratropical cyclone. Part I: The observed fields and vertical motion computations. *Mon. Wea. Rev.*, **110**, 385-411.

—————, and —————, 1982b: The transformation of tropical storm Agnes into an extratropical cyclone. Part II: Moisture, vorticity, and kinetic energy budgets. *Mon. Wea. Rev.*, **110**, 412-433.

Foley, G. R., and B. N. Hanstrum, 1994: The capture of tropical cyclones by cold fronts off of the west coast of Australia. *Wea. Forecasting*, **9**, 577-592.

- Harr, P. A., R. L. Elsberry, 2000: Extratropical transition of tropical cyclones over the western North Pacific. Part I: Evolution of Structural Characteristics during the Transition Process. *Mon. Wea. Rev.*, **128**, 2613–2633.
- , P. A., R. L. Elsberry and T. F. Hogan, 2000: Extratropical transition of tropical cyclones over the western North Pacific. Part II: The impact of midlatitude circulation characteristics. *Mon. Wea. Rev.*, **128**, 2634–2653.
- Hart, R. E. and J. L. Evans, 2001: A climatology of the extratropical transition of Atlantic tropical cyclones. *J. Climate*, **14**, 546–564.
- Holton, J. R., 1992: *An Introduction to Dynamic Meteorology*. 2d ed. Academic Press, 507 pp.
- Hong, S. Y., 1992: Numerical simulation of a heavy rainfall event occurred over Korea. Ph. D. Thesis, Seoul National University.
- Kalnay, E., Kanamitsu, M., Kistler, R., Collins, W., Deaven, D., Gandin, L., Iredell, M., Saha, S., White, G., Woollen, J., Zhu, Y., Chelliah, M., Ebisuzaki, W., Higgins, W., Janowiak, J., Mo, K. C., Ropelewski, C., Wang, J., Leetmaa, A., Reynolds, R., Roy Jenne and Dennis Joseph, 1996, The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project.

Bulletin of American Meteorological Society, **77**, 437-471.

Kim, J.-H., C.-H. Ho, and M.-H. Lee, 2006: Large increase in heavy rainfall associated with tropical cyclone landfalls in Korea after the late 1970s, *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L18706, doi:10.1029/2006GL027430.

Klein, P. M., P. A. Harr, and R. L. Elsberry, 2000: Extratropical transition of western North Pacific tropical cyclones: An overview and conceptual model of the transformation stage. *Weather and Forecasting*, **15**, 373-396.

Lee, D. K., 1989: An observational study of the northern hemisphere summertime circulation associated with the wet summer and the dry summer in Korea. *J. Korean Meteor. Soc.*, **25(4)**, 205-219.

Matano, H., and M. Sekioka, 1971: Some aspects of the extratropical transformation of a tropical cyclone. *J. Meteor. Soc. Japan*, **49**, 736-743.

Newton C. W. and A. Trevisan, 1984: Clinogenesis and frontogenesis in jet-stream waves. Part I: Analytical

relations to wave structure. *J. Atmos. Sci.*, **41**, 2717-2734.

Ritchie, E. A., 2005, Simulated precipitation structure of the extratropical transition of tropical cyclones, *11th Conference on Mesoscale Processes*, Albuquerque, NM, USA.

Rodgers, E., J. -J. Baik, and Harold F. P., 1994: The environmental influence on tropical cyclone precipitation. *J. Appl. Meteor.*, **33**, 573-593.

Sekioka, M., 1956a: A hypothesis on complex of tropical and extratropical cyclones for typhoon in the middle latitudes. I. Synoptic structure of Typhoon Marie passing over the Japan Sea. *J. Meteor. Soc. Japan*, **34**, 276-287.

—————, 1956b: A hypothesis on complex of tropical and extratropical cyclones for typhoon in the middle latitudes. II. Synoptic structure of Typhoons Ouisse, Kezia, and Jane passing over the Japan Sea. *J. Meteor. Soc. Japan*, **34**, 336-345.

—————, 1957: A hypothesis on complex of tropical and extratropical cyclones for typhoon in the middle

latitudes. III. Examples of typhoon not accompanied by extratropical cyclone in the middle latitudes. *J. Meteor. Soc. Japan*, **35**, 170-173.

Shapiro, M. A., and P. J. Kennedy, 1981: Research aircraft instruments of jet stream geostrophic and ageostrophic winds. *J. Atmos. Sci.*, **38**, 2642-2652.

Shi, J. J., S. Chang, and S. Raman, 1997: Interaction between Hurricane Florence(1988) and an upper-tropospheric westerly trough. *J. Atmos. Sci.*, **54**, 1231-1247.

Sinclair, M. R., 1993: Synoptic-scale diagnosis of the extratropical transition of a southwest Pacific tropical cyclone. *Mon. Wea. Rev.*, **121**, 941-960.

Ziv B. and N. Paldor, 1999: The divergence fields associated with time-dependent jet streams. *J. Atmos. Sci.*, **56**, 2717-2734.

감사의 글

기상학의 철로가 완성된 연구실에서 공부를 할 수 있게 승차시켜 주시고 오로지 목적지를 향해서만 달려가도록 새로운 삶을 살게 해주신 변희룡 교수님께 깊은 감사를 드립니다. 여러 가지로 부족한 저의 논문이 완성되기까지 사랑이 담긴 채찍과 담금을 아끼지 않으셨던 변희룡 교수님의 은혜로 이루어졌다 하더라도 과언이 아니라 생각합니다.

다른 곳이 아닌 방재기상연구실이라는 곳에서 저의 미래를 키워 나갈 수 있어서 너무나 행복했습니다. 많은 선배님들의 가르침과 조언이 있었기에 여기까지 온 것 같습니다. 항상 감사하는 마음을 잊지 않고 살겠습니다. 연구실원들이 좀 더 좋은 여건에서 공부할 수 있도록 초석을 만들어 주신 임병환, 임장호 두 선배님께 진심으로 감사를 드립니다. 그리고 늘 섬세하게 배려해주시고 친누나처럼 챙겨주시는 고혜영 선배님께 진심으로 감사를 드립니다. 그리고 철없는 저에게 많은 것을 가르쳐 주신 6기 선배님들께 가슴 깊이 감사하다는 말씀을 드립니다. 울산 공항에 있을 때 연구실 후배라고 항상 먼저 챙겨 주시고 많이 일깨워 주신 강경아 선배님께 진심으로 감사하다는 말씀을 드립니다. 기상청에 입사한 후 같이 근무하지는 않았지만 먼저 안부를 물어봐 주시고 동생처럼 챙겨 주신 박준혁 선배님께도 감사를 드립니다. 그리고 대한민국 공군 기상 장교 출신인 정환근 선배님과 한상은 선배님께서서는 실험실에 오실 때마다 브리핑실에서 일기도를 보시고 항상 왜 그런지 질문을 해주시고 공부를 하라고 하셨던 것들을 하나하나 잊지 않고 있습니다. 감사를 드립니다. 그리고 연구실에서 함께 생활하시면서 각각의 3가지 색깔을 가지신 MDR 6기 BEST 3 김기훈, 서동일, 최기선 선배님께 최고의 감사하다는 말씀을 드립니다. 아무것도 모르고 철없는 저에게 먼저 손을 내밀어 주시고 실수를 하더라도 이해해 주시고

잘못하면 나무라주시고 늘 좋은 방향으로 인도해주셔서 깊이 감사를 드립니다. 기상학에 대해 무지하였던 저에게 하나하나 원리를 일깨워 주시고 생각하는 공부를 하게 해주셔서 깊이 감사를 드립니다. 그리고 태풍이란 주제로 논문을 쓸 수 있도록 도와주신 국가태풍센터에 계신 최기선 선배님께 다시 한번 감사의 말씀을 드립니다.

제가 잘하면 잘하는 데로 기뻐해주시고 못하면 못하는 데로 이끌어주시고 항상 센스없다고 나무라시는 센스있는 선배인 상민이형에게 감사를 드립니다. 그리고 같이 생활하면서 칭찬을 마다하지 않으셨던 9기 민아누나와 같이 생활은 하지 않았지만 늘 친숙하게 대해주시고 격려해주시는 또 다른 9기 민선이 누나, 보연이 누나, 유미 누나, 혜숙이 누나에게도 감사드립니다. 그리고 옆에서 힘내라고 항상 응원해준 파트타임으로 석사과정을 같이 하였던 동갑내기 빠른 79년생 기철이 형과 동갑이라고 다른 사람보다 먼저 챙겨주고 좋은 논문 쓰라고 응원해준 태희에게도 감사를 드립니다.

어떻게 논문을 써야 한다고 항상 방향을 제시해주고 많은 도움을 준 도우에게 고마움을 전합니다. 그리고, 학번은 낮지만 나이가 많다고 늘 친근하게 형, 오빠라고 불러주던 도우, 민혁이, 유원이, 정훈이, 화정이, 유경이, 수정이, 선영이, 영임이에게도 고마움을 전합니다.

그리고 힘들 때나 기쁠 때 항상 늘 옆에 있어주었던 동기 갑영이에게 고마운 마음과 사랑하는 마음 모두 전하고 싶습니다. 그리고 함께 공부하고 많은 도움을 줬던 동기 아정이, 윤선이, 수진이에게도 고마움을 전합니다.

그리고 후배지만 훌륭하고 배울 것이 많은 연구실 후배 순주, 지현이, 성호, 진아, 수빈이, 신우, 희경이, 정은이, 지선이, 지윤이, 미경이, 보라, 현정이, 진경이, 하림이, 태웅이, 소라, 민규, 상아, 수정이에게도 고맙고, 앞으로 더 밝은 미래가 펼쳐지길 진심으로 바란다. 눈에 띄게 발전한 석사 졸업동기

수빈이, 지선이의 많은 도움을 통해 여기까지 온 것 같아 고맙구나.

연구실 외 많은 학교 선배님들과 후배들의 관심과 응원에 진심으로 감사를 드립니다.

마지막으로 저를 낳아주시고 길러주신 부모님께 깊은 감사를 드립니다. 부족한 아들이지만 항상 믿어주시고 자신감을 가지라며 독려하여주셔서 여기까지 온 것 같습니다. 항상 관심을 아끼지 않고 동생의 마음을 먼저 생각하는 하나밖에 없는 우리형에게도 고마움을 전합니다. 그리고 항상 응원해주시는 친지분들께도 진심으로 감사를 드립니다.

다시 한번 변희룡 교수님의 큰 가르침에 진심으로 경의를 표하며, 논문이 완성되고 석사학위를 받기 까지 도움을 주신 김동호 전 국가태풍센터장님, 김용수 전 태풍항사과장님, 이동일 전 슈퍼컴퓨터운영과장님, 김한준 전 울산공항기상대장님, 정해순 김포공항기상대장님을 비롯한 함께 근무하신 기상청 직원분들과 도움을 주신 모든 분들께 감사를 드리며 끝으로 여러분들 가정의 화목과 행복을 빕니다.