



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

북서태평양 전향 태풍의 특징과
해양반응에 관한 연구

The logo of Jeju National University is a large, faint watermark in the background. It consists of a stylized flame or wave shape in blue, green, and purple, with the text 'JEJU NATIONAL UNIVERSITY 1952' and '제주대학교' (Jeju National University) around it. In the center of the logo is a smaller version of the university's emblem, which includes a book and the text 'JEJU 1952'.

濟州大學校 大學院

海洋氣象學 協同科程

金 敏 永

2011年 2月

碩士學位論文

북서태평양 전향 태풍의 특징과
해양반응에 관한 연구

濟州大學校 大學院

海洋氣象學 協同科程

金 敏 永

2011年 2月

북서태평양 전향 태풍의 특징과 해양반응에 관한 연구

지도교수 문 일 주

김 민 영

이 논문을 이학 석사학위 논문으로 제출함.

2011年 2月

김민영의 이학 석사학위 논문을 인준함.

심사위원장 _____ ㉞

위 원 _____ ㉞

위 원 _____ ㉞

제주대학교 대학원

2011年 2月

Characteristics of recurving typhoons
and their interactions with ocean
in the north Western Pacific

MinYeong Kim

(Supervised by professor Il-Ju Moon)

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

DEPARTMENT OF SCIENCE
GRADUATE SCHOOL
JEJU NATIONAL UNIVERSITY

2011. 2.

목 차

List of Figures	ii
List of Tables	iv
Abstract	v
1. 서론	1
2. 연구 방법 및 자료	5
3. 연구 결과	7
3.1. 전향 태풍의 정의 연구	7
3.2. 북서 태평양 전향 태풍의 통계 분석	11
3.3. 한반도를 지난 전향 태풍의 특징	18
3.4. 전향 태풍의 해양반응 수치 실험	23
4. 요약 및 결론	28
5. 참고 문헌	30

List of Figures

Fig. 1. Climatological distribution of the OHC based on WOA 2005 data set. Red (Blue) box indicates a high (low) OHC region.	5
Fig. 2. Typhoon's tracks satisfying 4 criteria.	8
Fig. 3. Typhoon's tracks satisfying only Chan et al. (1980)'s criterion. ..	9
Fig. 4. Typhoon's tracks satisfying only Li and Chan (1999)'s criterion. .	9
Fig. 5. Typhoon's tracks satisfying only Knaff (2009)'s criterion.	10
Fig. 6. Typhoon's tracks satisfying only a new criterion.	10
Fig. 7. Frequency of recurvature point within $4^{\circ} \times 4^{\circ}$ grid box during 1951-2009 tropical cyclone season in the north western Pacific.	11
Fig. 8. Yearly-mean distribution of recurving typhoons in the north western Pacific region.	13
Fig. 9. Monthly-mean distribution of recurving typhoons in the north western Pacific region.	13
Fig. 10. Distribution of recurving angle for recurving typhoons in the north western Pacific region.	14
Fig. 11. Averaged translation speed of recurving typhoon in the north western Pacific region. Time 0 at the x axis indicates the recurving point.	14
Fig. 12. Distribution of maximum wind speed at the recurving point in the north western Pacific region.	15
Fig. 13. Distribution of maximum wind speed difference between before and after passing a recurving point in the north western Pacific region.	15
Fig. 14. Distribution of maximum intensity occurrence during the lifetime of recurving typhoon in the north western Pacific region.	16

Fig. 15. Same as in Fig. 8, but for the Korean peninsula.	19
Fig. 16. Same as in Fig. 9, but for the Korean peninsula.	20
Fig. 17. Same as in Fig. 10, but for the Korean peninsula.	20
Fig. 18. Same as in Fig. 11, but for the Korean peninsula.	21
Fig. 19. Same as in Fig. 12, but for the Korean peninsula.	21
Fig. 20. Same as in Fig. 13, but for the Korean peninsula.	22
Fig. 21. Vertical temperature profiles for numerical experiments. Red (Blue) indicates high (low) OHC region.	24
Fig. 22. Distribution of wind speed according to radial distance for an idealized typhoon experiment.	25
Fig. 23. Distribution of sea surface cooling produced by a recurving typhoon.	26
Fig. 24. Distribution of sea surface cooling produced by a straight-moving typhoon.	26
Fig. 25. Sea surface cooling averaged within 250 km radius from storm's center after recurvature (+6 hour) according to different translation speeds and recurving angles under the high OHC condition.	27
Fig. 26. Same as in Fig. 25, but the maximum sea surface cooling after the recurvature.	27
Fig. 27. Same as in Fig. 25, but under the low OHC condition.	28
Fig. 28. Same as in Fig. 25, but the maximum sea surface cooling after the recurvature under the low OHC condition.	28

List of Tables

Table 1. A statistics for recurring typhoons classified by different criteria.
..... 8

Table 2. Characteristics of typhoons passed over a high OHC area. 17

Table 3. Characteristics of typhoons passed over a low OHC area. 17



Abstract

Typhoon is known to move with the lowest moving speed during the recurvature. Since the slow-moving typhoons experience a strong air-sea interaction mainly due to the storm's self-induced vertical mixing and upwelling, oceanic conditions prior to and during the recurvature are very important in determining the recurving typhoon intensity. This study aims to investigate characteristics of the recurving typhoon depending on the pre-existing oceanic conditions in the western North Pacific using the JTWC (Joint Typhoon Warning Center) best track and WOA 2005 (World Ocean Atlas 2005) data during 1951–2009. For this, various statistical analyses have been conducted according to the recurvature location, angle and time as well as the moving speed, ocean heat content (OHC) during the recurvature.

A statistical analysis is conducted to investigate behavior of typhoon according to different OHC conditions. The results reveals that the intensity of recurving typhoons was more increased (decreased) than that of straight-moving typhoons under the high (low) OHC conditions. This implies that the recurving typhoons do more interact with ocean than the straight ones simply due to the enhanced wind forcing by recurvature.

A series of numerical experiments is performed to investigate the oceanic response for the typhoons with different recurving angle and moving speed. The result shows typhoons with that small recurving angle and low moving speed produces the biggest sea surface cooling.

Keyword : recurving typhoon, sea surface cooling, ocean heat content

1. 서론

지구 전체의 열적 에너지 불균형을 해소 시키는 기상 현상인 태풍은 바다의 건강한 생태계 유지, 대기 정화, 수자원 확보 등의 많은 순기능을 가지고 있다. 그러나 태풍은 강한 바람, 해일, 호우 등을 동반하여 수많은 인적, 물적 피해를 입히기도 한다. 이러한 태풍은 일반적으로 발생 초기에는 약한 열대 저기압으로서 얼마동안은 적도 부근의 동풍에 밀려 서쪽으로 진행하다가, 점차 북쪽으로 올라오면서 열대 폭풍으로 발달한다. 그 열대 폭풍이 더욱 커져 태풍으로 발달하여 북쪽으로 향하게 되며, 말기에는 전향하여 북동쪽으로 진행하게 된다(태풍 백서, 2009). 여기서 전향점의 위치와 전향 전, 후의 태풍의 이동 성향은 태풍 진로 예보에 매우 중요한 역할을 한다. 북서 태평양에서 발생한 전체 태풍 중 반 정도가 전향하였으며, 한국에 접근한 태풍 중에서는 약 80%가 전향한 태풍이었다(윤순창, 박경선, 1990). 따라서 태풍의 전향 위치를 정확하게 예측하는 것은 한반도에 영향을 미치는 태풍의 이동 경로를 예측하는데 매우 중요하다.

북서 태평양에서 발생한 태풍의 진로와 전향에 관한 여러 연구가 진행되어 왔다. 윤순창과 박경선(1990)은 1945년부터 1988년까지 북서 태평양에서 발생한 전체 전향 태풍과 한국에 접근한 전향 태풍을 분석하였다. 이동규 등(1992)은 1960년부터 1989년까지 중위도에 접근하여 한반도와 그 주변 지역에 영향을 끼친 태풍 76개를 태풍의 위치, 이동하는 방향, 전향하는 정도를 기준으로 하여 진로 유형을 8개로 분류하였다. 박종길 등(2006)은 1954년부터 2003년까지 북서 태평양에서 발생한 전체 태풍 1340개중에서 한반도에 영향을 미친 태풍의 진로를 7가지 유형으로 나누어 분석하였다. 이러한 태풍의 진로 유형에 대한 분석과 전향 태풍에 대한 분류는 전문가의 자의적 판단에 의해 유형이 분류되는 약점이 존재한다.

이에 반해, 일반적으로 방향을 바꾸며 이동 속도가 상당히 느려지는 전향하는 태풍의 정의에 대해 객관적인 기준을 제시한 연구도 있었다. Chan 등(1980)은 전향점에서 태풍 진행 방향과 전향 12시간 후 태풍 진행 방향의 각도가 20도 이상 차이가 날 경우를 오른쪽으로 전향하는 태풍으로 정의하였다. Li와

Chan(1999)은 태풍이 북서쪽으로 진행하다가 북동쪽으로 방향을 바꾸어 진행하는 경우를 전향하는 태풍으로 정의하고 전향 전 72시간과 전향 후 24시간을 분석하였다. 또 다른 연구에서는 몇 가지 기준을 설정하여 전향하는 태풍을 분류하였으며, 그 기준은 다음과 같다(Knaff, 2009). (1) 태풍의 최적 경로가 적어도 72시간 이상 존재하여야 한다. (2) 최적 경로에서 전향점은 최소 경도이어야 한다. (3) 전향한 후에 18시간은 동쪽으로 움직여야 한다. (4) 전향점에서 태풍의 강도는 적어도 17m/s 이상이 되어야 한다. (5) 전향 전과 전향 후 48시간 이내에는 태풍의 중심에서 50km 이내에는 육지가 존재하지 않아야 한다. (6) 전향 후에 태풍은 전향점보다 낮은 위도로 내려가지 않아야 한다. 이외에도 태풍 진로의 분류에 대한 많은 결과들이 있고 많은 결과들이 전향한 태풍을 정의하였다. 하지만 태풍의 다양하고 복잡한 특성으로 인하여 어떠한 분류가 정확하고 객관적인 분류라고 단언할 수 없고 각각의 연구 목적에 따라 적절한 정의가 필요하다.

한반도에 접근하는 태풍에 대한 분석은 이동규 등(1992)이 1960년부터 1989년까지 30년 동안 동부 아시아 중위도에 접근하면서 한반도에 영향을 미친 모든 태풍들에 대하여, 중심 기압과 최대 지상 풍속의 통계적 분석을 제시하였다. 여기서 한반도에 영향을 미친 태풍은 북위 25도를 지나면서 동경 110도와 140도 사이를 통과하는 태풍 중에서 7, 8, 9월 중에 한반도에 상륙하거나 동해, 서해, 남해지역을 지난 태풍으로 정의하였다. 그리고 윤순창과 박경선(1990)은 북태평양에서 발생한 태풍 자료를 이용하여 태풍 전향점의 월간 변화, 전향 전후의 이동 속도의 변화 및 한국에 접근하는 태풍의 통계적 특성 등을 분석하였다. 한국에 접근하는 태풍은 북위 32도부터 44도 사이, 동경 120도와 132도 사이 지역으로 진입한 경우로 분류하였다. 또한, 박종길 등(2006)은 한반도에 영향을 준 태풍의 발생수와 발생지역이 최근의 기후변화에 따라 어떻게 다르고, 변화하는지 살펴보고 태풍의 강도와 한반도에 영향을 미치는 정도를 파악하여 태풍의 진로와 강도에 따른 태풍 특성을 분석하였다. 이 연구에서는 북태평양 서부해상에서 발생하여 북위 25도를 지나면서 동경 110도와 140도 사이를 통과하는 태풍 중에서 한반도에 직접 상륙하거나 중국, 일본 등을 거치면서 영향을 준 태풍과 태풍의 발생위치가 북위 25도 이상으로 발생 이후 진로가 경도상 동경 120도에서 135도 사이에 있는 경우를 한반도에 영향을 미친 태풍으로 하였다. 그리고 중국

과 일본으로 거치면서 한반도에 영향을 주는지에 대한 판단이 모호한 경우에는 그날의 기상자료를 비교하여 태풍의 진로와 근접한 지역의 평균 강수량이 100mm이거나 특정지역의 최고 강수량이 250mm 이상의 강수가 있었을 경우에 한반도에 영향을 미친 태풍으로 정의하였다.

태풍이 전향하는 시기에는 태풍의 이동 속도가 매우 느린 것으로 알려져 있다. 태풍의 이동 속도가 느리다는 것은 태풍의 강도에 큰 영향을 미칠 수 있다. 태풍은 이동하면서 수직적으로 온도 구배가 큰 해역을 지날 때 강한 바람에 의해 해수를 수직적으로 혼합(vertical mixing)시키고 용승 현상을 발생시켜 표층 수온을 하강시킨다(Price et al., 1994). 태풍의 이동 속도가 느리면 그만큼 해수의 수직 혼합과 용승이 더 활발히 진행되어 표층 냉각(surface cooling)이 더욱 강해진다(Schade and Emanuel, 1999). 느리게 움직이는 태풍은 표층이 냉각된 해수의 영향이 더 오랫동안 지속되어 강도에 더 큰 영향을 받을 수 있다. 단 2°C의 표층 냉각만으로도 태풍을 완전히 약화시킬 수 있음을 고려하면(Schade and Emanuel, 1999), 이러한 태풍의 자가 발생(self-induced) 표층 냉각은 태풍의 강도에 큰 영향을 미친다.

한편, 태풍이 매우 두꺼운 고온의 혼합층 위를 지날 때에는 태풍의 이동 속도가 느린 것이 태풍에게 더 많은 해양의 에너지를 공급함으로써 오히려 태풍을 강화시키는 요인으로 작용할 수 있다. 실제로 2005년 미국에 큰 피해를 입힌 허리케인 카트리나(Katrina)는 따뜻한 난류를 천천히 지나면서 매우 빠르게 강한 태풍으로 발달하였다(Jaimes and Shay, 2009). 따라서 태풍이 느리게 움직이는 전향 시기에 해양의 상층 열적 구조에 따라 태풍의 강도 변화는 매우 민감하게 반응할 수 있다.

태풍이 전향하는 부근에서 태풍 강도가 가장 강하다고 알려져 있다(Riehl, 1972; Evans and McKinley, 1998). 그러나 최근 연구에서는 태풍의 최대 강도가 전향 시점에 나타나는 비율이 기존 연구보다는 낮고 그나마 강도가 약한 태풍은 전향 시점에 최대 강도가 나타나는 비율이 높다고 주장하였다(Knaff, 2009). 그리고 태풍의 전향과 최대 강도 사이에는 아무런 상관관계가 없다고 하였다.

그동안 전향 태풍의 특징에 대한 연구는 거의 없었다. 또한 태풍의 전향에 관련된 기존의 연구들에서도 대부분 태풍의 이동 경로 및 전향 위치에만 초점이

맞추어져 있었다(Choi and Kim, 2007). 전향하는 태풍이 해역의 특성에 어떻게 해양과 상호 작용을 하는가에 대한 연구는 아직까지 없었다. 전향 태풍을 분류하는 기준조차 명확하게 정립되지 못한 상태이다.

본 연구에서는 태풍의 경로가 북서쪽으로 진행하다가 북동쪽으로 방향을 바꾸는 것을 기본으로 하여 태풍의 전향에 대한 새로운 정의를 제시하고 그 정의에 따라서 태풍을 분류하고 통계 분석할 것이다. 그리고 태풍이 방향을 바꾸기 전에 이동 속도가 상당히 느려지는 특징 때문에 대기와 해양과의 상호작용 시간이 늘어나게 됨을 이용하여 해양 수온 구조에 따른 태풍의 강도 변화에 대한 것도 연구하고자 한다. 또한, 한반도를 지나간 태풍 중에서 전향한 태풍을 분류하여 그 특징을 조사할 것이다.



2. 연구 방법 및 자료

열대 저기압의 강도 변화와 해양 열용량과의 관계를 연구하기 위해 이용된 자료는 WOA 2005 (World Ocean Atlas 2005)의 3차원 해양 온도 자료이다. 이 자료는 수평적으로 해상도 0.25°의 전 지구 자료이고 수직적으로는 24층(0, 10, 20, 30, 50, 75, 100, 125, 150, 200, 250, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000, 1100, 1200, 1300, 1400, 1500m)으로 이루어져있다. WOA 2005를 이용하여 구한 OHC(Ocean Heat Content)를 정의한 식은 $Q = \rho c_p \Delta T \Delta z$ 이다(Leipper and Volgenau, 1972). 수온이 26°C인 깊이에서 해수면까지의 깊이와 그 온도 차이를 곱하여 나타낸다. 여기서 ρ 는 평균 해양 밀도이고 그 값은 1.026g/cm^3 이다. 그리고 c_p 는 정압비열이며 그 값은 $1\text{cal}\cdot\text{g/m}^\circ\text{C}$ 이다. 여기서 구한 OHC 값을 이용하여 연구 지역을 나누었다. 위도 15-20도와 경도 125-135도를 강한 OHC 지역, 위도 20-25도와 경도 125-135도를 약한 지역으로 분류하고 그 지역에서 전향하는 태풍과 직진하는 태풍을 분류하여 분석하였다(Fig. 1).

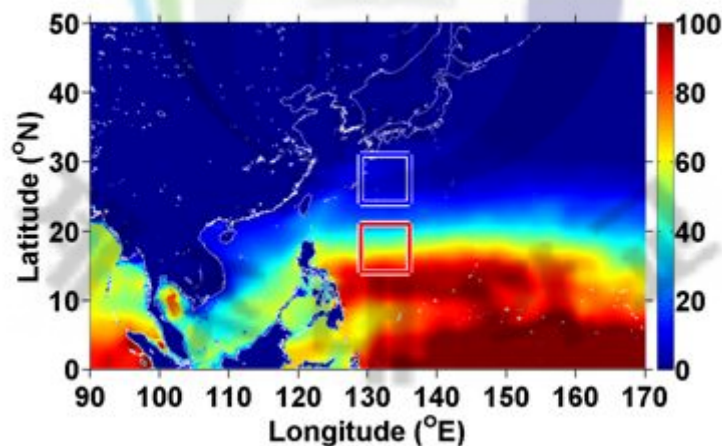


Fig. 1. Climatological distribution of the OHC based on WOA 2005 data set. Red (Blue) box indicates a high (low) OHC region.

전향한 태풍을 분류하기 위해 이용된 자료는 JTWC (Joint Typhoon Warming Center)의 북서 태평양 최적경로 자료이다. 6시간 간격으로 되어 있는 이 자료에서 본 연구에서는 태풍의 중심 위치와 최대 풍속 자료를 이용하였다. 그리고 자료는 1951년에서 2009년까지 59년간의 기간이 이용되었다.

본 연구에서는 태풍이 북서쪽으로 진행하다가 북동쪽으로 방향을 바꾸는 경우와 북서쪽으로 진행하다가 북쪽으로 방향을 바뀌어 일정 시간동안 진행하다가 다시 방향을 북동쪽으로 바꾸어 진행하는 경우를 전향하는 태풍으로 정의하였다. 그리고 전향점과 전향 전과 후의 지점은 최대 풍속이 17m/s 이상일 경우만 전향한 태풍으로 정의하였다. 또한, 전향한 후의 경로는 전향점의 위도와 경도보다 크게 진행한 경우만을 전향한 태풍에 포함하였다. 한 태풍에서 두 개 이상의 전향점을 갖는 경우는 전향점들 중에서 낮은 위도와 높은 경도를 갖는 지점을 선택하였다.

최적 경로 자료는 3가지로 나누어 분석하였다. 그 3가지는 원본 자료, 12시간 이동 평균 자료, 24시간 이동 평균 자료이다. 앞에서 정의한 전향한 태풍의 정의를 사용하여 각 3가지의 경우를 분석하였다. 그 결과, 최종적으로 선택된 전향한 태풍의 정의는 원본 자료, 12시간 이동 평균 자료, 그리고 24시간 이동 평균 자료가 모두 정의를 만족할 경우이다. 최종 정의에 의해 전향한 태풍을 분류하고 통계적인 분석을 실시하였다.

수치실험은 3차원 해양 모델인 Princeton Ocean Model (Blumberg and Mellor, 1987; Mellor, 2004)을 사용하여 실시하였다. 이상적인 해양과 대기 환경을 가정하여 모든 실험을 진행하였다. 모델 도메인은 북위 10°에서 40°, 동경 120°에서 155°이며 모델 수평 격자 간격은 1/12°이다. 수직 격자는 34층(0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 110, 120, 130, 140, 150, 160, 170, 180, 190, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000, 1100, 1200, 1300, 1400, 1500m)으로 이루어져 있고 각 층은 균질하게 분포되어 있다.

3. 연구 결과

3.1. 전향 태풍의 정의 연구

Chan et al. (1980)의 분류 기준, Li and Chan (1999)의 분류 기준, 그리고 Knaff (2009)의 분류 기준에 의해 전향한 태풍을 분석한 결과, 1951년에서 2009년 사이에 북서태평양에서 발생한 태풍 중에서 전향 태풍은 각각 566, 424, 488개로 나타났다(Table 1). 제2절에서 정의된 정향 태풍의 기준에 의해서는 593개가 분류되었다. 4가지의 분류 기준을 모두 만족하는 경우는 286개이며 그 모든 경로는 Fig. 2와 같다. Chan et al.의 분류 기준의 경우, 566개 중에서 65개가 다른 기준에서 분류하지 못한 태풍을 분류하였다(Fig. 3). Li and Chan의 분류 기준의 경우, 424개 중에서 4개가 다른 기준에서 분류하지 못한 태풍을 분류하였다(Fig. 4). 그리고 Knaff의 분류 기준의 경우, 488개 중에서 6개가 다른 기준에서 분류하지 못한 태풍을 분류하였다(Fig. 5). 한편, 본 연구에서 정의한 분류 기준의 경우, 560개 중에서 177개가 다른 기준에서 분류하지 못한 태풍을 분류하였다(Fig. 6). 이것은 앞선 결과들과는 상당한 차이이고 Fig. 6에서 보듯이 다른 기준에서 분류하지 못한 전향 태풍 경로를 분류하였다.

Table 1. A statistics for recurving typhoons classified by different criteria.

	Number of Recurving Typhoon	Number of unique selected Typhoon
New method	593	177
Chan et al. (1980)	566	65
Li and Chan (1999)	424	4
Knaff (2009)	488	6

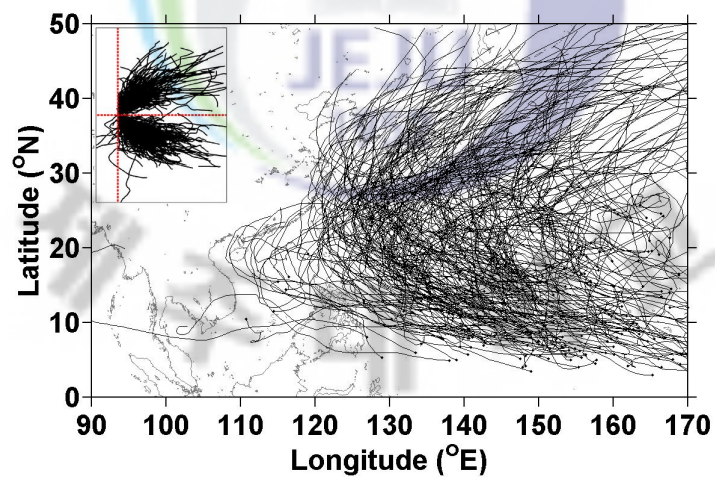


Fig. 2. Typhoon's tracks satisfying 4 criteria.

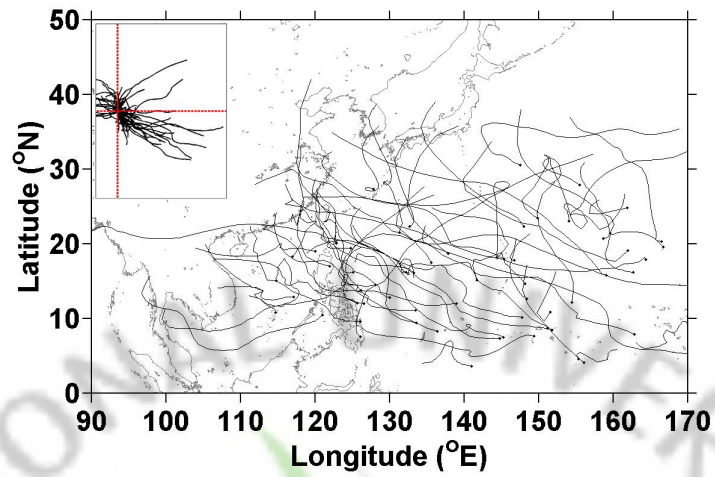


Fig. 3. Typhoon's tracks satisfying only Chan et al. (1980)'s criterion.

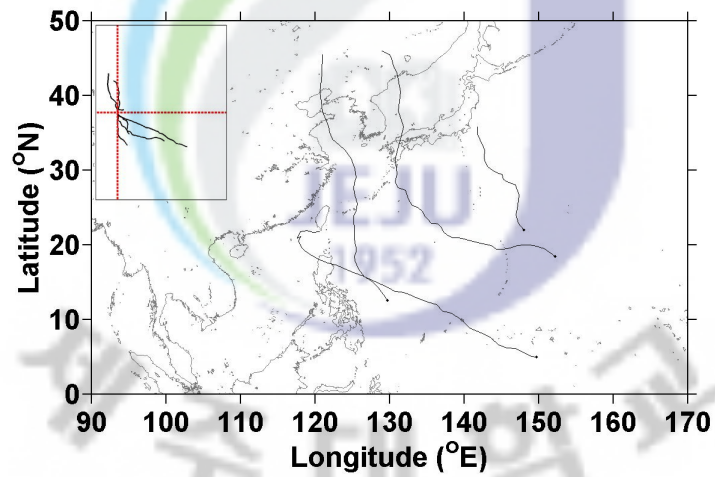


Fig. 4. Typhoon's tracks satisfying only Li and Chan (1999)'s criterion.

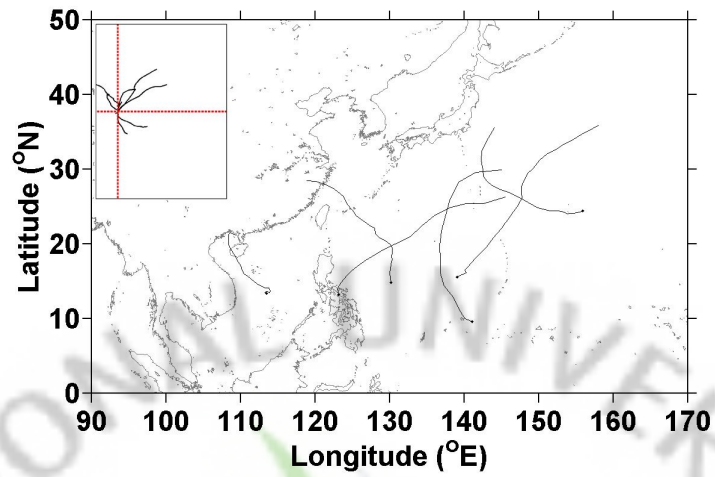


Fig. 5. Typhoon's tracks satisfying only Knaff (2009)'s criterion.

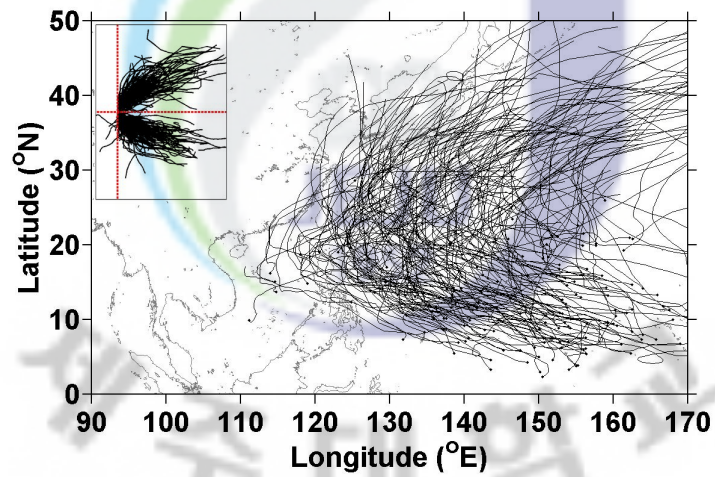


Fig. 6. Typhoon's tracks satisfying only a new criterion.

3.2. 전향 태풍 통계 분석

분석 결과, 북서태평양에서 발생한 태풍 중에 전향한 태풍은 약 36%를 차지하였으며, 전향한 태풍의 평균 전향점은 북위 24도, 동경 134도이다(Fig. 7). 각 연도별 전향 태풍의 개수는 Fig. 8에 나타냈다. 전향한 태풍은 1973년에 3개로 가장 적게 발생하였고, 1992년에 18개로 가장 많이 발생하였다. 평균적으로는 약 10.1개 발생하였다. 1951년부터 1980년까지 발생한 전향 태풍의 개수를 평균해보면 약 9.6개, 1981년부터 2009년까지를 평균해보면 약 10.5개가 발생하였다. 처음 30년간이 그 다음 30년간보다 전향 태풍이 약간 적게 발생했음을 알 수 있다. 월별 전향 태풍의 개수는 Fig. 9에 나타냈다. 전향한 태풍은 일반적으로 태풍이 많이 발생하는 8, 9, 10월에 집중되어 발생한다. 전향하는 태풍의 전향하는 각도는 140-180도 사이에 가장 많이 분포한다(Fig. 10). 전향 각도가 커질수록 태풍이 전향하는 위도는 점점 높아지는 경향을 보였다. 그 이유는 태풍이 발생하여 진행되는 방향이 다르기 때문이라 판단된다.

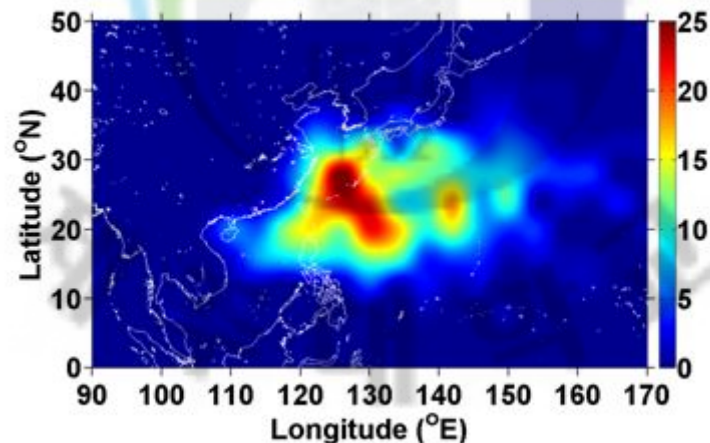


Fig. 7. Frequency of recurvature point within $4^{\circ} \times 4^{\circ}$ grid box during 1951-2009 tropical cyclone season in the north western Pacific.

전향하는 태풍의 경도 방향 속도는 전향 전에 점점 느려지다가 전향 후에 급격히 증가함을 알 수 있다. 그러나 태풍의 위도 방향 속도는 거의 일정하게 계속 증가함을 알 수 있다(Fig. 11). 태풍의 경도 방향 속도와 위도 방향 속도를 합한 태풍의 이동 속도를 분석해보면, 평균적으로 전향점에서의 속도보다 전향 전에 가장 느린 이동 속도가 나타남을 알 수 있다. 전향점에서의 최대 풍속은 20-30m/s 사이에 가장 많이 분포하고 80m/s까지 점점 줄어들면서 분포한다(Fig. 12).

전향 6시간 후 최대 풍속과 전향 6시간 전 최대 풍속의 차이는 약간 약해진 경우가 많은 분포를 차지하고 약간 강해진 경우도 상당히 많이 분포하였다(Fig. 13). 그 값은 거의 모두 -10 m/s에서 10 m/s 사이에 분포하였다. 최대 풍속이 증가한 경우의 평균 전향 위, 경도 위치를 구하면 북위 20.9°, 동경 134.4°이다. 이것은 최대 풍속이 감소한 경우의 평균 위, 경도 값인 북위 25.7°, 동경 132.6°보다 좀 더 낮은 위도에서 전향함을 나타냈다. 최대 풍속이 10m/s 이상 증가한 경우와 10m/s 이하 감소한 경우를 비교해보면 그 차이는 더 커졌다. 전향하는 태풍의 일생 중에서 가장 큰 최대 풍속을 나타내는 시기는 전향 시점이고 그 비율은 7.6%이다(Fig. 14). 전향 ±12시간 내에 최대 강도가 나타난 비율은 33.2%이고 전향 ±24시간 내에는 53.5%가 최대 강도를 나타냈다. 그러나 전체 태풍 일생에서 최대 강도가 나타난 지역과 전향 태풍의 전향 위치를 비교해 본 결과, 그 위치 사이에 연관성이 없는 것으로 판단된다.

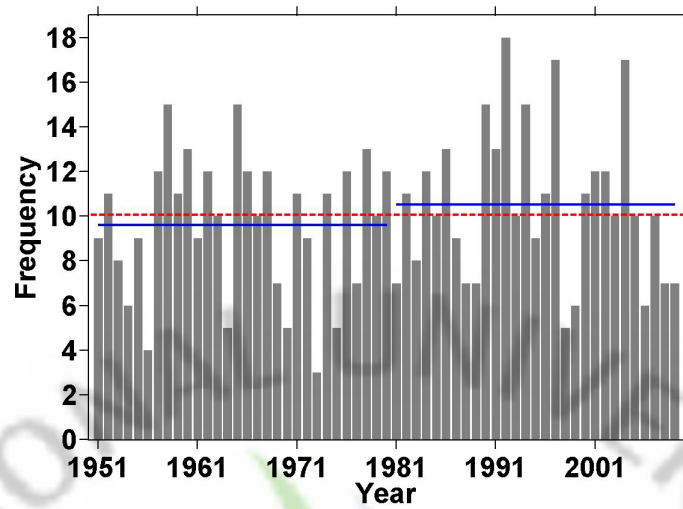


Fig. 8. Yearly-mean distribution of recurring typhoons in the north western Pacific region.

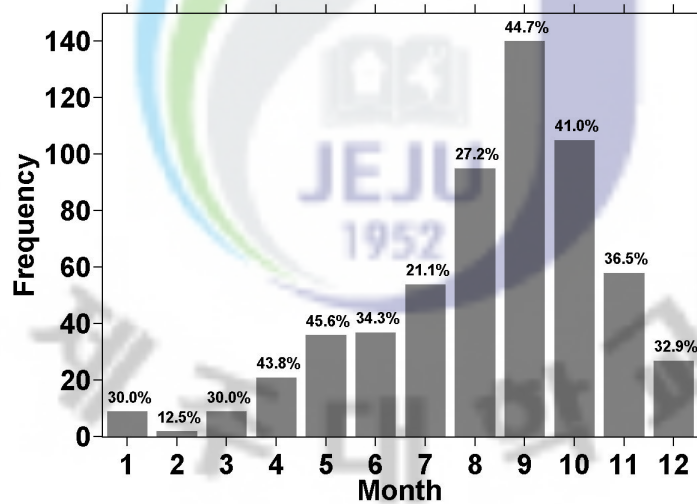


Fig. 9. Monthly-mean distribution of recurring typhoons in the north western Pacific region.

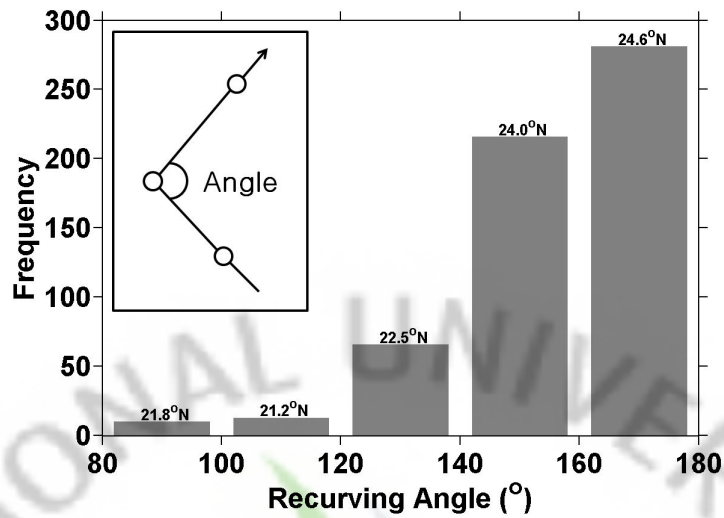


Fig. 10. Distribution of recurving angle for recurving typhoons in the north western Pacific region.

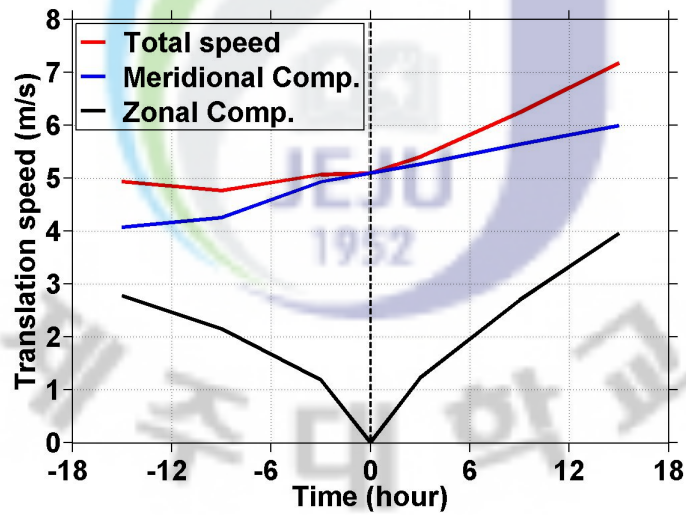


Fig. 11. Averaged translation speed of recurving typhoons in the north western Pacific region. Time 0 at the x axis indicates the recurving point.

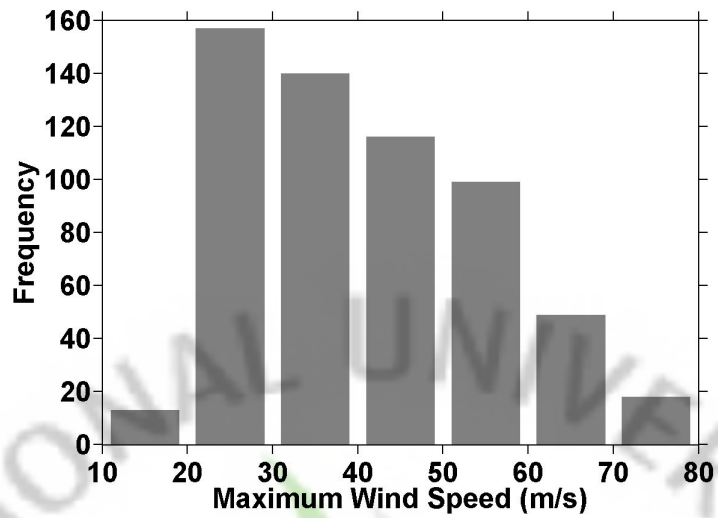


Fig. 12. Distribution of maximum wind speed at the recurving point in the north western Pacific region.

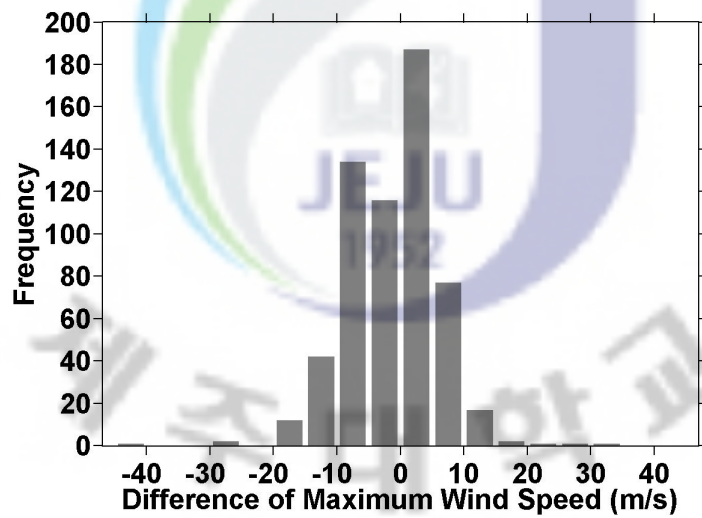


Fig. 13. Distribution of maximum wind speed difference between before and after passing a recurving point in the north western Pacific region.

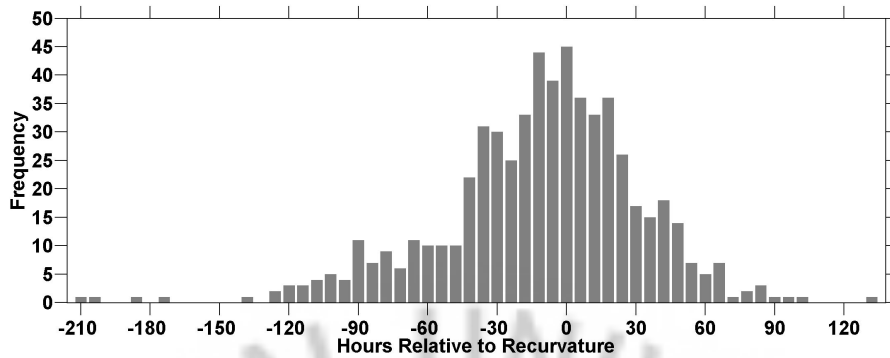


Fig. 14. Distribution of maximum intensity occurrence during the lifetime of recurving typhoon in the north western Pacific region.

위도 15-20°, 경도 125-135° 지역은 상대적으로 높은 OHC 지역으로 위도 20-25°, 경도 125-135° 지역은 상대적으로 낮은 OHC 지역으로 설정하였다(Fig. 1). WOA 2005를 통하여 구한 평균 OHC 값은 높은 지역에서 평균 54.7kJ/cm², 낮은 지역에서 평균 19.1kJ/cm²이다. OHC가 높은 지역을 지나가는 태풍 중에서 강도가 증가한 경우는 77.8%이다(Table 2). 이들 중에서 강도가 증가한 전향 태풍은 평균 4.2m/s로 움직이며, 20.9m/s의 최대 풍속의 변화를 보였다. OHC가 강한 지역을 직진하며 지나가는 태풍은 평균 6.6m/s로 움직이며, 14.4m/s의 최대 풍속의 변화를 보였다. OHC가 낮은 지역을 지나가는 태풍 중에서는 강도가 감소한 경우가 68.8%를 차지하였다(Table 3). 이곳은 지난 강도가 감소한 전향 태풍은 평균 4.9m/s로 움직이며, -11.0m/s의 최대 풍속 변화를 보였다. 강도가 감소한 직진 태풍은 6.6m/s로 움직이며, -7.1m/s의 최대 풍속 변화를 나타냈다. 이 결과에서 높은 OHC 지역을 지나가는 태풍은 대부분 강해진다는 것을 알 수 있다. 그리고 강해진 정도를 보았을 때, 전향하는 태풍이 직진하는 태풍보다 큰 강도 변화를 보였다. 낮은 OHC 지역을 태풍이 지나가는 경우에는 강도가 대부분 약해졌다. 여기서도 마찬가지로 전향하는 태풍이 직진하는 태풍보다 더 큰 강도 변화를 보였다.

Table 2. Characteristics of typhoons passed over a high OHC area.

Intensity increase rate (%)	Type	Average	Average
		TC moving speed (m/s)	TC moving speed (m/s)
77.8	Recurve	4.2	20.9
	Strait	6.6	14.4

Table 3. Characteristics of typhoons passed over a low OHC area.

Intensity decrease rate (%)	Type	Average	Average
		TC moving speed (m/s)	TC moving speed (m/s)
66.8	Recurve	4.9	-11.0
	Strait	6.6	-7.1

3.3. 한반도를 지난 전향 태풍의 특징

한반도의 지형 고도 자료를 이용하여 태풍의 중심이 한반도 지형을 한 번이라도 지나갈 경우를 계산한 결과, 1951년부터 2009년까지 발생한 북서태평양의 태풍 중에서 60개가 한반도 위를 지나갔다. 그 중에서 전향하여 한반도를 지나간 태풍의 빈도를 구하기 위하여 태풍 경로의 이동 평균값을 사용하였다. 6시간 간격의 태풍 경로가 북서쪽으로 진행하다가 북동쪽으로 방향을 바꾸는 지점이 그 경로의 12시간 이동 평균값과 24시간 이동 평균값에서도 북서쪽에서 북동쪽으로 방향을 바꿀 때, 이 지점을 전향점으로 정의하였다. 이러한 정의를 만족하는 태풍을 전향한 태풍으로 간주하여 한반도 위를 지나간 태풍 중에서 그 빈도를 계산하였다. 한반도 위를 지나간 60개의 태풍 중에서 44개의 태풍이 앞에서 제시한 전향한 태풍의 조건을 만족시켰고 그 비율은 약 73%이다.

북서태평양에서 발생한 태풍 중에서 전향한 태풍의 평균 전향점은 북위 24°, 동경 134°이다. 한반도를 지난 태풍 중에서 전향한 태풍의 평균 전향점은 북위 30°, 동경 123°이며, 북서태평양 전체 전향 태풍에 비해 더 고위도와 낮은 경도에서 전향함을 알 수 있다. 특히, 월별로 전향점을 살펴보면 8월에 북위 약 32°, 동경 약 124°로 가장 높은 위·경도에서 전향함을 알 수 있었다. 연도별로는 1962년에 3개의 전향한 태풍이 발생하여 가장 많이 발생한 연도이고, 1951년과 2009년 사이에 28개의 연도에서 전향한 태풍이 발생하지 않았다(Fig. 15). 전향한 태풍의 월별 분포를 살펴보면, 일반적으로 태풍이 많이 발생하는 시기인 7, 8, 9월에 전향한 태풍의 거의 대부분이 분포하였다(Fig. 16). 전향각은 상당수가 160°에서 180° 사이에 분포하였고, 120° 이하의 급격한 전향은 없었다(Fig. 17). 한반도를 지난 태풍 중에서 전향한 태풍과 북서태평양에서 발생한 전향 태풍의 전향 전 이동 속도는 비슷하였다. 그러나 전향 후 이동속도는 한반도를 지난 전향 태풍이 북서태평양 전체 전향 태풍보다 좀 더 빠른 이동 속도를 보였다(Fig. 18).

전향점에서의 최대 풍속은 20-30m/s 사이에 가장 많이 분포하고 70m/s까지 점점 줄어들면서 분포한다(Fig. 19). 20m/s 이하의 작은 최대 풍속이나 70m/s 이상의 큰 최대 풍속은 존재하지 않았다. 전향 6시간 후 최대 풍속과 전향 6시간

전 최대 풍속의 차이는 -10m/s 에서 0m/s 까지의 약해진 경우가 많은 분포를 차지한다(Fig. 20).

전향 전 24시간동안 평균 이동 속도는 7월에 약 6.1m/s 이고 이 값은 평균값인 약 5.0m/s 보다 약 1.1m/s 정도 빠르다. 전향 후 24시간동안 평균 이동 속도는 전향 전 평균보다는 빠른 약 7.4m/s 이며, 전향한 태풍이 많이 발생한 7, 8, 9월을 비교해보면 7월이 약 8.4m/s 로 가장 빠르고 9월이 약 7.5m/s 로 그 중에 가장 느리게 이동하였다.

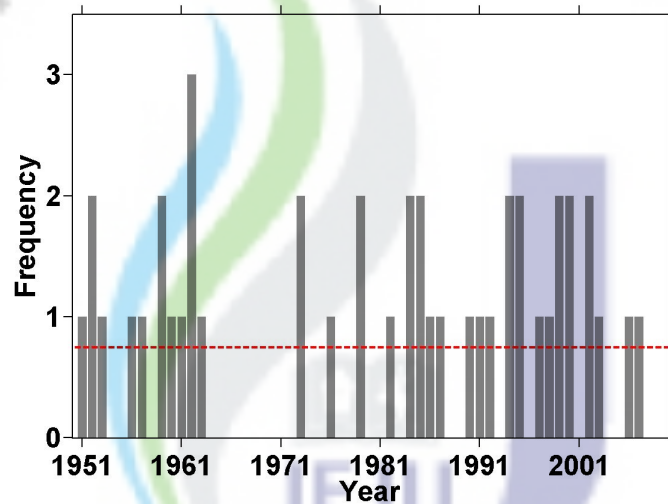


Fig. 15. Same as in Fig. 8, but for the Korean peninsula.

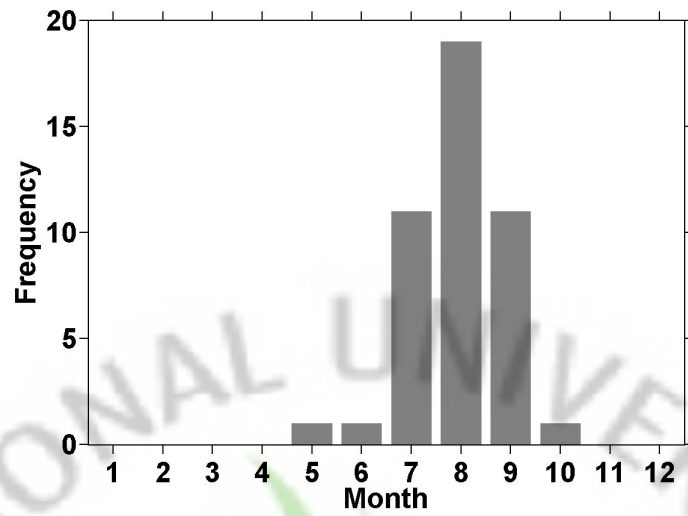


Fig. 16. Same as in Fig. 9, but for the Korean peninsula.

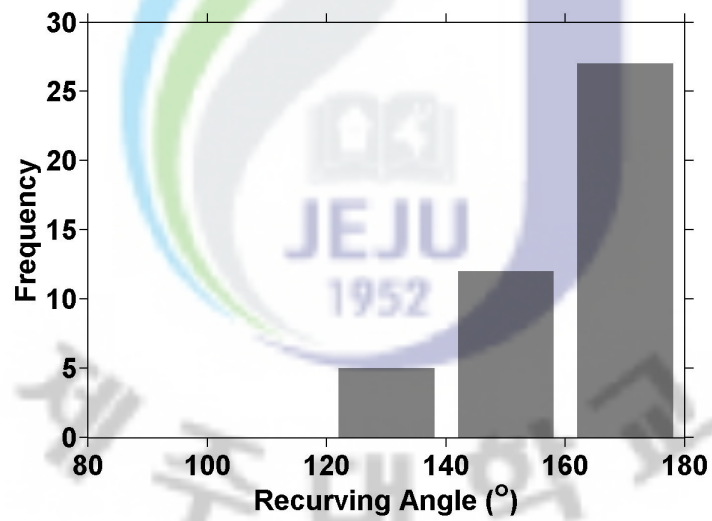


Fig. 17. Same as in Fig. 10, but for the Korean peninsula.

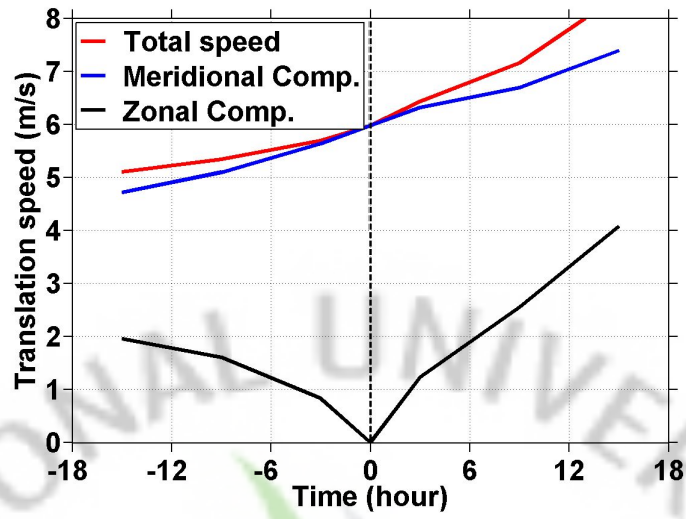


Fig. 18. Same as in Fig. 11, but for the Korean peninsula

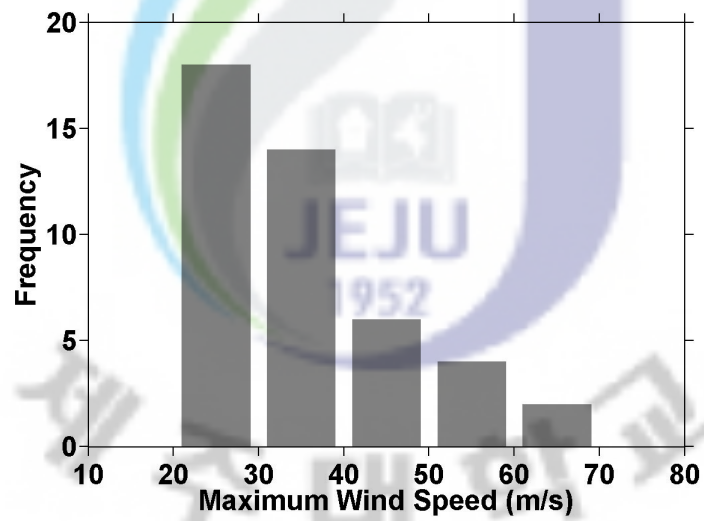


Fig. 19. Same as in Fig. 12, but for the Korean peninsula.

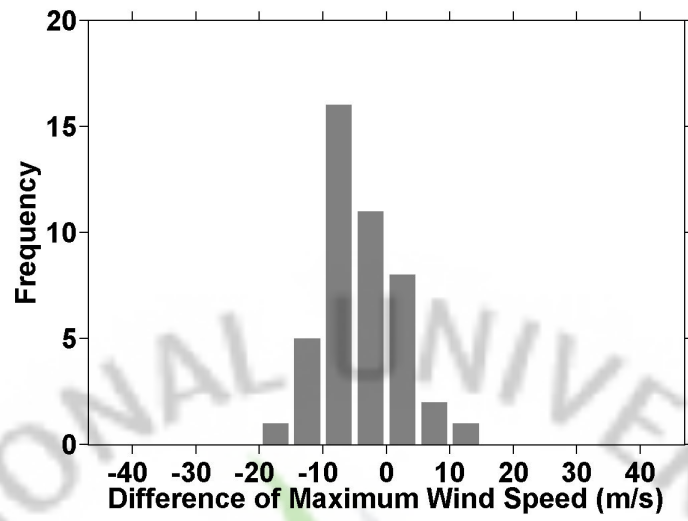
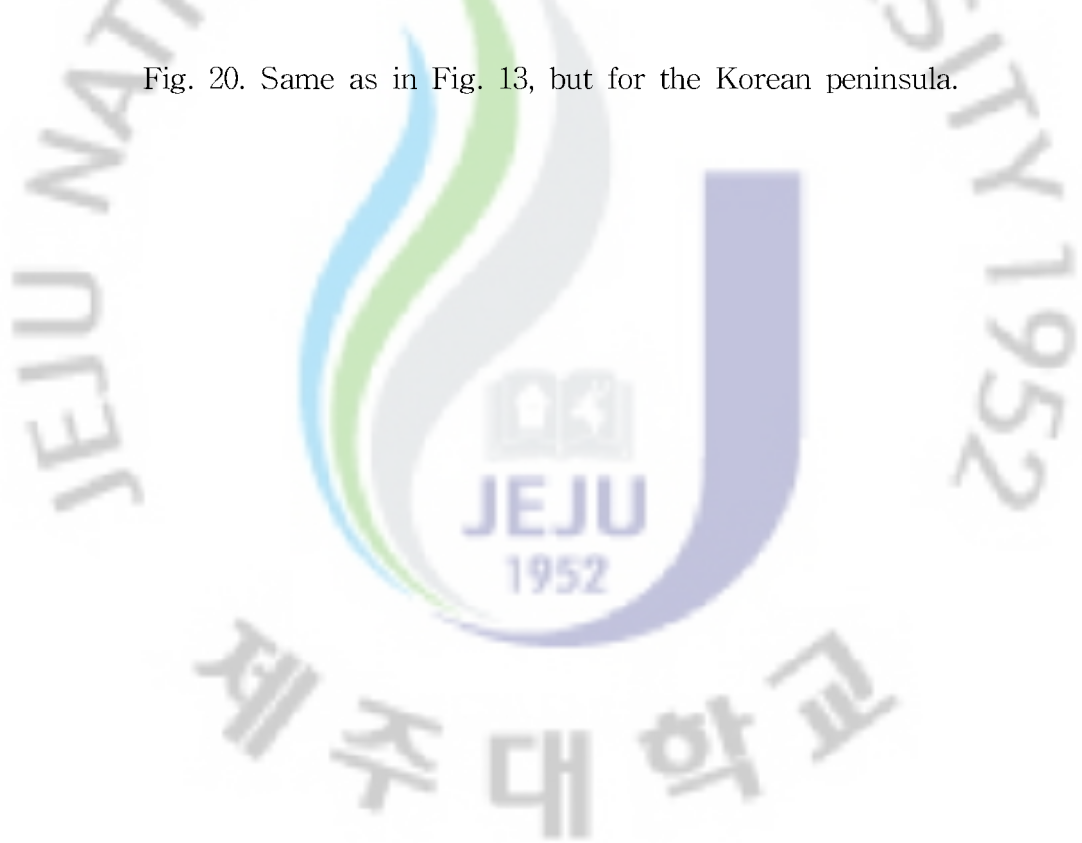


Fig. 20. Same as in Fig. 13, but for the Korean peninsula.



3.4. 전향 태풍의 해양반응 수치실험

태풍이 전향하는 것이 태풍 강도 변화에 어떠한 영향을 미치는지 알아보기 위하여 수치 실험을 실행하였다. 수치 실험은 전향 태풍의 이동 속도와 전향 각도를 변화시켜서 해양반응의 크기를 알아보았다. 전향 태풍의 이동 속도는 2, 4, 6, 8, 10m/s로 변화시켰고, 전향 각도는 90, 120, 150, 180도로 바꾸며 실험하였다.

해양 초기 조건은 기후 자료인 World Ocean Atlas 2005를 참고하여 해양 열용량이 높고 낮은 두 개의 수직 수온 구조를 사용하였다(Fig. 21). 수치 실험의 대기 조건은 대칭 형태의 태풍을 사용하였다(Holland, 1980). 최대 풍속, 최대 풍속 반경, 태풍 주변 기압, 태풍 중심 기압, 태풍의 크기는 각각 41m/s, 60km, 1004hPa, 950hPa, 250km로 실험을 수행하였다(Fig. 22). 수치 실험은 태풍 이동 속도 5가지, 전향 각도 4가지, 초기 해양 환경 2가지를 조합하여 총 40개의 실험을 실시하였다.

실험 결과, 전향 태풍(90, 120, 150°)의 경우는 태풍이 전향하는 시점에서 최대 표층 온도 하강이 발생하였다(Fig. 23). 즉, 초기에는 태풍이 움직이면 일정 시간동안 표층 온도 하강은 증가하다가 일정한 온도 하강 정도를 유지하게 된다. 그 이후, 태풍이 전향을 하게 되면 일정하게 유지되던 표층 온도 하강이 좀 더 크게 일어난다. 표층 온도 하강은 전향 이후에도 일정 시간동안 증가하다가 전향 시점을 어느 정도 벗어나게 되면 그 전에 유지하던 표층 온도 하강 정도로 회복한다. 반면, 직진으로 움직이는 태풍(180°) 실험은 태풍이 움직이면서 일정 시간 동안 표층 온도 하강이 증가하다가 최대 온도 하강 이후로 그 하강 정도를 계속 유지한다(Fig. 24).

높은 해양 열용량 환경에서 전향한 태풍의 전향 6시간 후에 태풍 중심 위치로부터 반경 250km 내의 해양 표층 온도를 평균하면, 태풍 이동 속도가 2m/s일 때 가장 큰 표층 온도 하강을 나타냈다. 태풍 이동 속도가 빨라질수록 표층 온도 하강의 크기는 작아진다. 표층 수온 하강의 크기를 각도별로 비교해보면 전향 각도가 90°일 때, 가장 표층 수온 하강이 크고, 각도가 커질수록 반응의 크기는 작

아졌다(Fig. 25). 전향 태풍의 최대 표층 온도 하강을 속도와 각도별로 비교해보면, 전향 6시간 후의 결과와 비슷하나 상대적으로 반응의 크기가 커진다(Fig. 26). 해양 열용량이 낮은 환경에서 전향한 태풍은 높은 해양 열용량 환경에서 전향한 태풍보다 표층 수온 하강 정도가 두 배 이상 커졌다(Fig. 27 and Fig. 28).

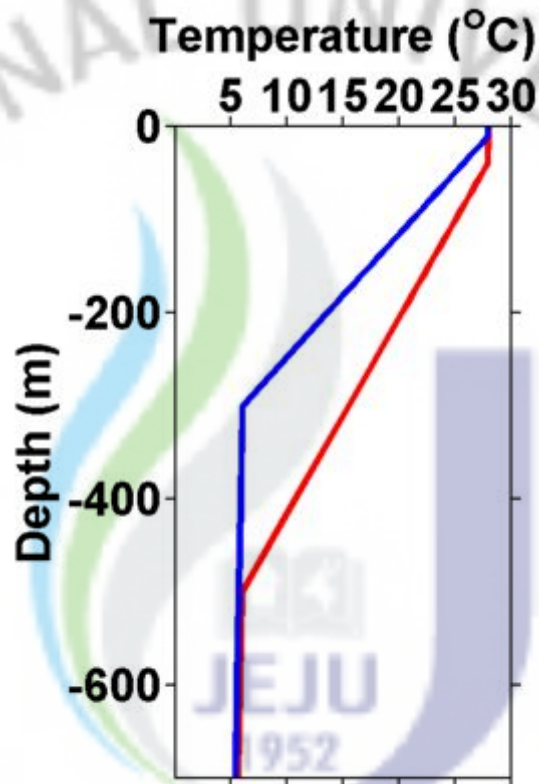


Fig. 21. Vertical temperature profiles for numerical experiments. Red (Blue) indicates high (low) OHC region.

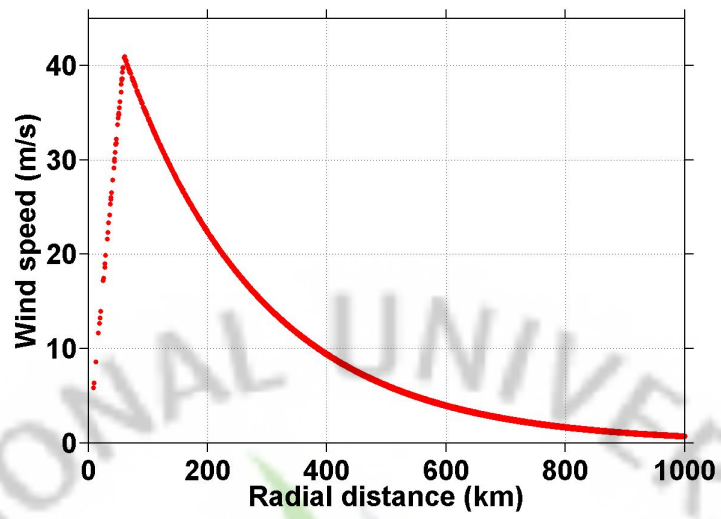
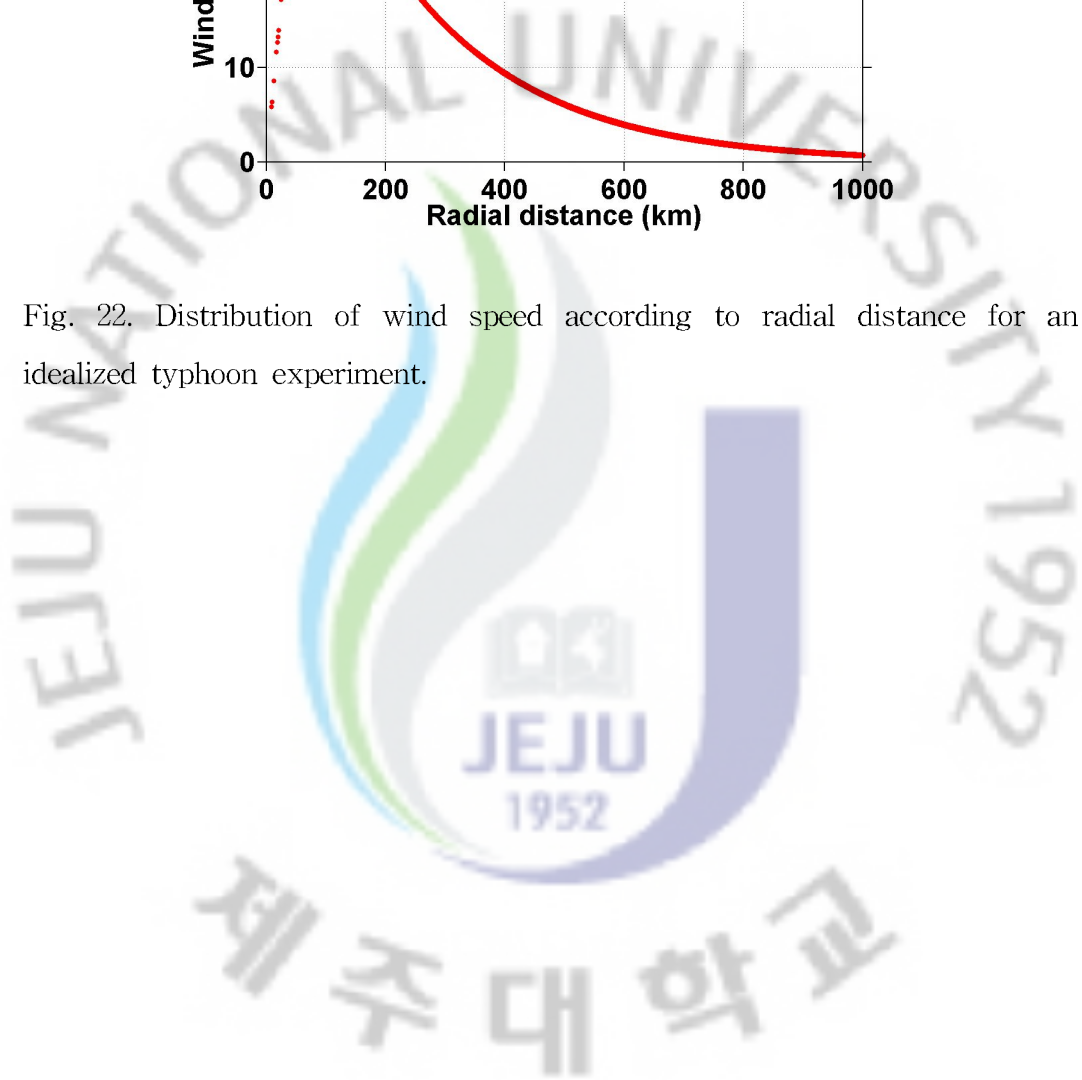


Fig. 22. Distribution of wind speed according to radial distance for an idealized typhoon experiment.



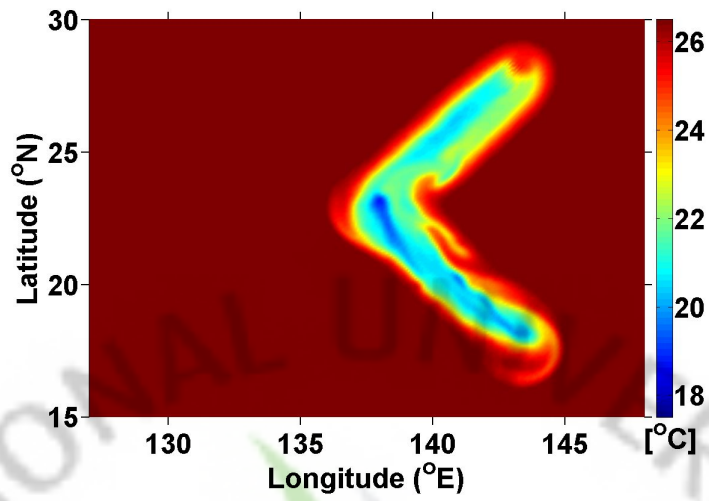


Fig. 23. Distribution of sea surface cooling produced by a recurving typhoon.

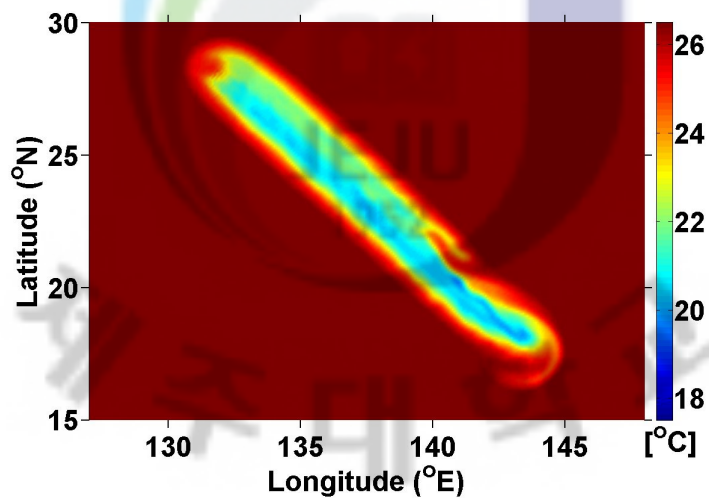


Fig. 24. Distribution of sea surface cooling produced by a straight-moving typhoon.

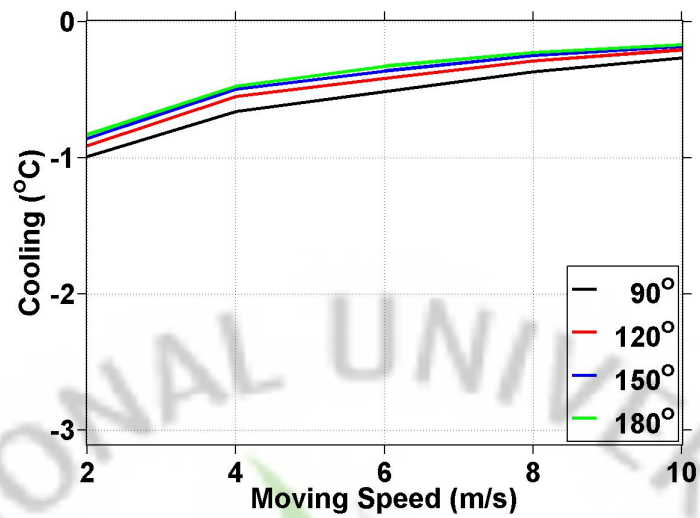


Fig. 25. Sea surface cooling averaged within 250 km radius from storm's center after recurvature (+6 hour) according to different translation speeds and recurving angles under the high OHC condition.

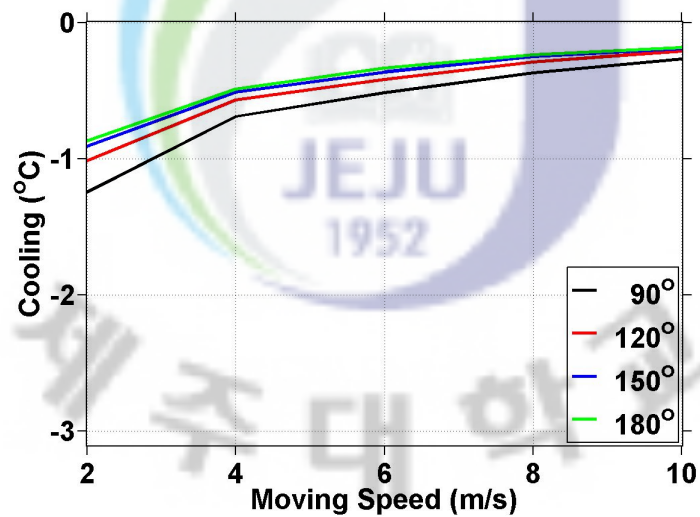


Fig. 26. Same as in Fig. 25, but the maximum sea surface cooling after the recurvature.

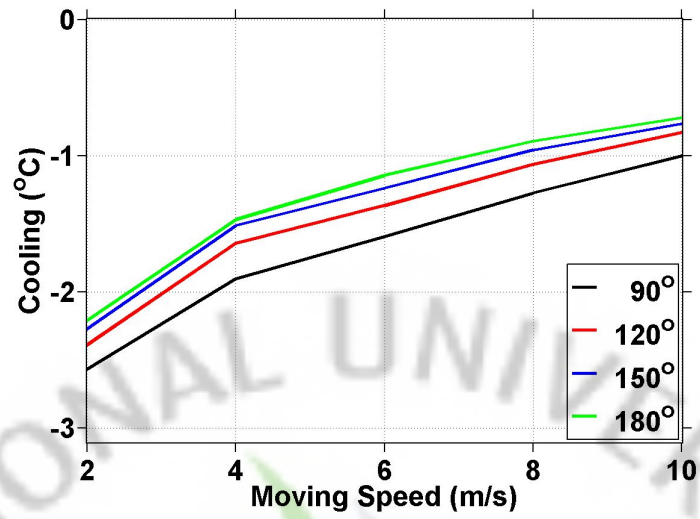


Fig. 27. Same as in Fig. 25, but under the low OHC condition.

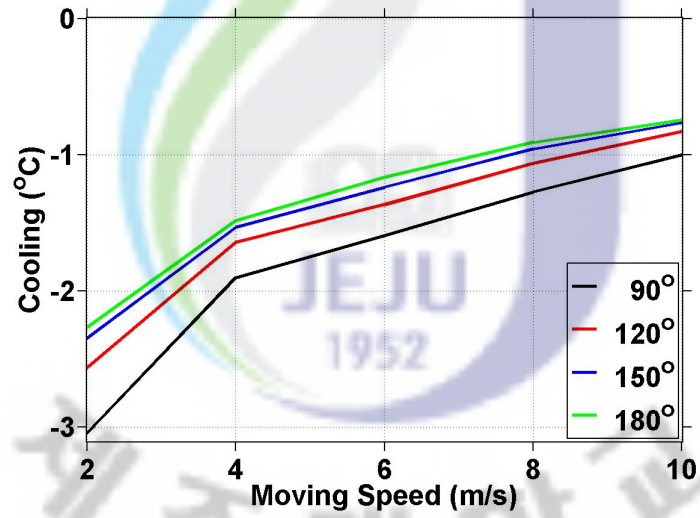


Fig. 28. Same as in Fig. 25, but the maximum sea surface cooling after the recurvature under the low OHC condition.

4. 요약 및 결론

이전 연구의 전향하는 태풍 분류 기준을 분석한 결과, 이상 경로의 태풍을 분류하거나 일부 전향 경로의 태풍을 분류하지 못하는 경우가 존재하였다. 본 연구에서 사용한 전향 태풍의 분류 기준은 이전 연구의 기준에 비해 전향 태풍을 많이 분류하고 그 중에 이상 경로는 적게 포함하는 상당히 좋은 결과를 보여주었다.

새로운 기준에 의해 1951년부터 2009년 사이에 북서태평양에서 발생한 태풍 중에서 전향한 태풍을 분류하고 통계적 분석을 실시하였다. 그 결과, 북서태평양에서 발생한 태풍 중에서 약 36%가 전향하였고, 그 평균 위치는 북위 약 24도, 동경 약 134도이다. 연도별로는 평균 약 10.1개가 전향하였고, 월별로는 8, 9, 10월에 전향하는 태풍이 가장 많이 발생하였다. 그리고 전향하는 태풍의 이동 속도를 경도 방향 속도와 위도 방향 속도로 나누어 분석하였다. 위도 방향 속도는 계속 증가하였고 경도 방향 속도는 전향을 기준으로 정지하였다가 다시 빠르게 움직이는 경향을 보였다. 전체 태풍 이동 속도는 전향점에서의 이동 속도가 가장 느릴 것이라는 예상과는 달리 전향 전에 최저 이동 속도를 보였다.

태풍의 일생에서 가장 큰 최대 풍속이 나타나는 시간을 전향 시간과 상대적으로 비교하여 분석하였다. 그 결과, 최대 강도를 나타내는 시기는 전향 시점이고 그 비율은 7.6%이다. 전향 ± 12 시간 내에 최대 강도가 나타난 비율은 33.2%이고 전향 ± 24 시간 내에는 53.5%가 최대 강도를 나타냈다. 그리고 전향 전, 후의 최대 풍속의 차이를 분석한 결과, 최대 풍속이 감소한 경우의 평균 위도보다 최대 풍속이 증가한 경우의 평균 위도가 상대적으로 낮았다.

강한 OHC 지역과 약한 OHC 지역을 지나는 태풍 중에서 전향하는 경우와 직진하는 경우를 분류하고 그 비율, 이동 속도와 최대 풍속의 변화를 알아보았다. 그 결과, 강한 OHC 지역에서는 전향하는 태풍이 직진하는 태풍보다 느리게 움직이고 강도가 더 크게 증가하였다. 약한 OHC 지역에서도 역시 전향하는 태풍이 직진하는 태풍보다 느리게 움직이고 강도가 더 크게 감소하였다. 이상의 결과는 태풍이 전향할 경우가 직진하는 경우보다 해양과의 반응이 더 크게 일어나

고 그 결과 태풍의 강도에 영향을 미칠 수 있음을 제시한다.

앞서 분석한 북서태평양에서 발생한 태풍 중에서 전향한 태풍의 통계 분석 결과를 한반도를 지나간 태풍으로 한정하여 재분석하였다. 한반도 위를 지나간 태풍 중에서 전향의 조건을 만족하는 태풍은 약 73%이다. 평균 전향 위치는 북위 약 30도, 동경 약 123도이고 연도별로 평균 0.7개가 발생하였다. 1962년에는 최대인 3개의 전향 태풍이 발생하였고, 1951년과 2009년에는 전향 태풍이 발생하지 않았다. 전향 전 태풍 이동 속도는 북서태평양 전체 전향 태풍이나 한반도를 지난 전향 태풍이나 비슷하였으나, 전향 후 이동 속도는 한반도를 지난 전향 태풍이 북서태평양 전체 전향 태풍보다 좀 더 빨랐다. 그리고 전향 전, 후 24시간 동안 평균 태풍 이동 속도를 비교해보았을 때, 전향 후 태풍 이동 속도가 전향 전 태풍 이동 속도보다 1m/s 이상 빠르고, 월별로 다른 분포를 보였다.

태풍은 이동하면서 수직적으로 온도 구배가 큰 해역을 지날 때 강한 바람에 의해 해수를 수직적으로 혼합(vertical mixing)시키고 용승 현상을 발생시켜 표층 수온을 하강시킨다(Price et al., 1994). 태풍의 이동 속도가 느리면 그만큼 해수의 수직 혼합과 용승이 더 활발히 진행되어 표층 냉각(surface cooling)이 더욱 강해진다(Schade and Emanuel, 1999). 느리게 움직이는 태풍은 표층이 냉각된 해수의 영향이 더 오랫동안 지속되어 강도에 더 큰 영향을 받을 수 있다. 한편, 태풍이 매우 두꺼운 고온의 혼합층 위를 지날 때에는 태풍의 이동 속도가 느린 것이 태풍에게 더 많은 해양의 에너지를 공급함으로써 오히려 태풍을 강화시키는 요인으로 작용할 수 있다. 기존의 연구와 본 연구의 통계 분석을 확인하기 위해 수치 실험을 통하여 전향 태풍의 각도와 이동 속도 변화에 따른 해양의 반응 정도를 비교해보았다. 그 결과, 전향하는 태풍이 직진하는 태풍에 비해 해수면 온도 하강의 크기가 컸다. 전향하는 태풍은 태풍에 의한 해수면 온도의 하강이 전향점 근처에서 중복되어 더 강한 냉각이 발생하는 것으로 나타났다. 전체적인 실험 결과, 전향 각도가 작을수록 표층 수온 하강이 커졌고, 태풍 이동 속도가 느릴수록 해양의 반응이 커졌다. 이것은 태풍이 급하게 전향하고 전향 시점에서 이동 속도가 느릴 때, 태풍의 강도 변화에 크게 영향을 미칠 수 있음을 의미한다.

5. 참고 문헌

- 국가태풍센터, 2009: 태풍백서. 7pp.
- 박종길, 김병수, 정우식, 김은별, 이대근, 2006: 한반도에 영향을 주는 태풍의 통계적 특성변화. 한국기상학회지, 16(1), 1-17.
- 윤순창, 박경선, 1990: 한국에 접근하는 태풍의 특성과 통계지속모델의 신뢰도에 관한 연구. 한국기상학회지, 26(2), 104-110.
- 이동규, 장동연, 위태권, 1992: 한반도에 접근하는 태풍, 1960-1989 제1부: 통계와 종관개요. 한국기상학회지, 28(1), 133-147.
- Blumberg, A. F. and G. L. Mellor, 1987: A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model, *Three-Dimensional Coastal Ocean Models*, N. S. Heaps (Ed.), 1-16, American Geophysical Union, Washington, DC.
- Chan, J. C. L., W. M. Gray, and S. Q. Kidder, 1980: Forecasting tropical cyclone turning motion from surrounding wind and temperature fields. *Mon. Wea. Rev.*, 108, 778-792.
- Choi, K. S. and B. J. Kim, 2007: Climatological characteristics of tropical cyclones making landfall over the Korean peninsula. *Journal of the Korean Meteorological Society*. Vol. 43, No. 2, pp. 97-109.
- Evans J. L., K. McKinley, 1998: Relative timing of tropical storm lifetime maximum intensity and track recurvature. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 65, 241-245.
- Holland, G. J., 1980: An analytic model of the wind and pressure profiles in hurricanes. *Mon. Wea. Rev.*, 108, 1212-1218.
- Jaimes, B., L. K. Shay, 2009: Mixed layer cooling in mesoscale oceanic eddies during Hurricanes Katrina and Rita. *Mon. Wea. Rev.*, 137, 4188-4207.
- Knaff, J. A., 2009: Revisiting the maximum intensity of recurving tropical cyclones. *Int. J. Climatology*, 29, 827-837.
- Leipper, D. and D. Volgenau, 1972: Hurricane heat potential of the Gulf of Mexico. *J. Phys. Oceanogr.*, 2, 218-224.
- Li, Y. S., and J. C. L. Chan, 1999: Momentum transports associated with tropical cyclone recurvature. *Mon. Wea. Rev.*, 127, 1021-1037.

- Mellor, G. L., 2004: Users guide for a three-dimensional, primitive equation, numerical ocean model, Princeton University, Princeton, NJ, 56pp.
- Price, J.F., T.B. Sanford and G.Z. Forristall, 1994: Forced stage response to a moving hurricane. *J. Phys. Oceanog.*, 24(2), 233-260.
- Riehl H., 1972: Intensity of recurved typhoons. *Journal of Applied Meteorology*, 11, 613-615.
- Schade, L. R. and K. A. Emanuel, 1999: The ocean's effect on the intensity of tropical cyclones: results from a simple coupled atmosphere-ocean model. *J. Atmos. Sci.*, 56, 642-651.

