

태풍 진로의 기후학적 유형 분류와 유형에 따른 특성 분석

허 창 회

서울대학교 지구환경과학부

1. 서론

열대 서태평양에서는 연평균 27개 정도의 태풍이 발생하고, 그 중 75% 이상이 6월부터 10월 사이에 발생한다(Ho et al. 2002). 태풍 활동은 해수면 온도가 26.5°C 이상, 약한 연직 바람 시어, 평균 이상의 대류권 중층의 습기, 조건 불안정한 대기, 하층 소용돌이도가 강한 환경 조건에서 활발해진다(Gray 1979; Frank 1987). 이러한 환경에서 발생한 태풍은 주변 대규모 순환과 해수면 온도, 그리고 그 내부적 요인이 복합적으로 작용하여 매우 다양한 진로 유형을 보이는데, 태풍의 진로를 유형 별로 분류하기 위한 많은 노력이 기울여져 왔다. 이동규 등(1992)은 1960년에서 1989년 사이 한반도에 영향을 끼친 태풍 중 76개를 선정하여 진로를 8유형으로 분류하였고, 이 분류 유형에 기준하여 손건태 등(1998)은 다변량 통계자료분석 기법을 이용하여 이 유형을 재분석하였다. Harr와 Elsberry는 태풍 진로의 특성을 크게 직진, 남쪽 전향, 북쪽 전향으로 구분하고 각각의 대규모 순환 유형을 분석하였으며(Harr and Elsberry 1991), 대규모 순환 유형을 벡터 경험적 직교함수 분석(이후 벡터 EOF)과 Fuzzy 군집 방법을 이용하여 분류하고 이의 지속성, 전이 과정, 그리고 군집에 따른 태풍 진로의 특성을 분석하였다(Harr and Elsberry 1995a, b). 이외에도 많은 진로 유형을 분석한 결과들이 있으나 태풍 진로의 복잡하고 다양한 특성으로 인해 그 유형이 연구 목적에 따라 매우 차이가 있다. 본 연구에서는 1951-2002년 동안의 6월부터 10월까지 북서태평양에서 발생한 모든 태풍을 고려한 기후적인 관점에서의 태풍 진로가 어떤 유형을 보이는가를 수치적 방법인 Fuzzy 군집 방법을 도입하여 객관적인 방법으로 분류해보고, 각 진로 유형에 따른 특징에 대해 살펴볼 것이다.

2. 자료 및 분석 방법

1) 자료

본 연구에서 사용된 태풍 자료는 일본 기상청의 도쿄 태풍센터(Regional Specialized

Meteorological Center(RSMC) Tokyo - Typhoon Center)에서 1951년부터 2002년까지 수집된 것으로, 이 자료는 통상 6시간 간격으로 최적 진로와 중심 부근 기압, 풍속 등의 정보를 담고 있다 (http://www.jma.go.jp/JMA_HP/jma/jma-eng/jma-center/rsmc-hp-pub-eg/RSMC_HP.htm).

태풍 진로와 관련된 대기 순환장 분석에 사용된 대기 자료는 미국의 National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research(NCEP/NCAR)에 의해 재분석된 일평균 고도와 바람 자료를 사용하였다(Kistler et al. 2002).

2) 분석 방법

1951-2002년 동안 6월부터 10월까지 발생한 총 열대 저기압(Tropical Depression) 중 순간 최대 풍속 17 ms^{-1} 이상의 태풍의 세기로 발달한 총 개수는 1055개이다. 이 중 태풍 진로의 유형을 판정하기에 부적절하다고 판단되는 지속 시간과 이동 거리가 평균 보다 적은 태풍과 깊은 몬순 저압대에 위치해 있는 남중국해에서 발생하여 그곳에 머무는 태풍은 그 진로가 매우 불규칙하여 분석에서 제외하였다. 따라서 분석에는 태풍의 세기가 된 후 5일 이상 지속된 태풍 573개 중 남중국해에 머무는 태풍을 제외한 562개의 태풍 자료를 사용하였다. 선정된 자료의 태풍들은 지속 시간이 각기 다르므로 관측된 위치벡터의 길이가 다르다. 본 연구에서는 주성분 분석을 기본으로 이용하기 때문에 행렬을 구성해야 하므로 데이터의 길이가 일정해야 한다. 이를 위해 TS 세기 동안의 진로를 임의의 등간격 위치벡터의 집합으로 변환하였다. 이제 초기 자료로 위치벡터(x, y)=(경도, 위도)를 성분으로 하는 이루어진 $N \times T$ 행렬(N 은 각 태풍의 위치벡터의 집합, T 는 분석에 사용된 총 태풍의 개수)이 구성되었다. 위치 벡터를 성분으로 하는 행렬을 이용하기 위해 스칼라 EOF를 2차원 변수로 확장한 벡터 EOF 분석 방법을 이용하였다(Legler 1983, Harr and Elsberry 1995). 벡터 EOF 방법을 이용하여 주성분 각 모드에 해당하는 고유값 계수를 구할 수 있다. 처음 몇 개의 모드의 고유벡터를 태풍 진로에 영향을 주는 주요 물리적 요인으로 생각하여 이 모드들의 고유값을 이용하여 태풍 진로 분류를 위해 상사 지수(similarity indexes)를 구한다. 이 상사 지수는 Fuzzy 관계(fuzzy relationship)로 군집 분석 방법을 이용하여 분류할 수 있다. 본 연구에서는 많은 자료를 이용하므로 비계층적 군집 방법을 이용하였다. 단, 태풍 진로 유형의 다양한 특성으로 인해 Hard 군집 방법은 군집의 특성을 잘 나타내지 못하는 단점이 있어, 불확실성을 내포하는 Fuzzy 군집 방법을 적용하기로 한다(Kaufman and Rousseeuw 1990).

3. 태풍 진로의 유형

Fuzzy 군집 방법을 수행하면 개개의 태풍 진로마다 각 군집에 해당하는 소속성 지수가 생성되고,

이 소속성 지수가 가장 큰 군집에 개체를 포함시키면 Hard 군집 방법과 같은 분할된 군집이 생성된다. 이 분할된 Hard 군집은 문제를 단순화시켜 각 객체의 많은 정보들이 없어지는 단점이 있으나 최적화된 Hard 군집을 만드는 것은 군집 유형을 확인하고 개개의 특성을 파악하는데 있어서 필요한 과정이다. Fuzzy 군집 방법은 11개의 군집까지 특징적인 진로의 군집 유형을 산출해 내었다. 11개의 유형 중 4가지는 직진하는 유형(그림 1)이며 7가지는 전향하는 유형(그림 2)이다.

그림 1은 분류된 네 가지 직진 유형이다. 그림 1a(S1)와 1b(S2), 그리고 1c(S3)는 저위도에서 직진하는 유형으로 이동 방향은 유사하지만 발생하는 위치가 다르다. 그림 1d(S4)는 중위도에서 직진하는 유형으로 특이한 경우이다. 먼저 S1은 가장 이동 거리가 짧은 직진 유형으로써 필리핀 근해 130°E 부근에서 발생 후 직진하여 중국 남부에 상륙하는 진로 유형이다. 이 유형은 가장 많은 태풍을 포함하고 있으며 6월-10월 동안 항상 많이 발생하여 계절 변동에 영향을 적게 받는다. 짧은 진로와 발달 시기에 필리핀 내륙을 통과하는 경우가 많아 전체적으로 충분히 발달하지 못하는 특성이 있다. S2는 S1과 이동 방향은 같고 발생하는 위치만 좀 더 동쪽인 140°E 부근이다. 이 유형은 7월-10월 동안 많으며 특히 10월 발생하는 태풍의 20% 정도가 여기에 속한다. S3는 가장 긴 직진 유형으로서 150°E 부근에서 발생한 후 북서진하여 중국 동남부에 상륙한다. 이 유형은 8월까지 증가하다가 9월에 감소하며 10월에 다시 약간 증가하는 경향을 보인다. S4는 30°N 위도에서 서진하는 유형으로 군집의 태풍 수가 가장 적은, 즉 자주 발생하지 않는 특이한 경우이다. 7월과 8월에 거의 대부분이 집중되어 있다.

전향하는 유형은 7가지로 나타났으나 크게 우리나라로 이동하는 유형, 일본으로 이동하는 유형, 일본 동쪽 해상으로 이동하는 유형으로 나눌 수도 있다. 그림 2a(R1)는 우리나라로 이동하는 유형으로 대체로 30°N 정도에서 전향하여 전향 후에 우리나라에 도달한다. 이 태풍의 반은 8월에 발생하고 7월을 포함하면 80%에 이르며 여름이 지나면 급격히 감소한다. 그림 2b와 2c(R2, R3)는 일본으로 이동하는 유형을 나타낸다. R2는 R1과 비슷한 위치에서 발생하고 25°N 정도에서 전향하여 일본으로 진행하는 형태이고, R3는 S1과 비슷한 위치에서 발생하고 20°N 정도에서 전향하는 형태이다. R2는 8월과 9월에 많이 나타나지만 R3는 6월과 10월에 많이 나타난다. 일본으로 진행하는 유형은 R6(그림 2f)도 존재한다. 이는 서태평양상 150-170°E 부근의 열대 해역에서 발생하여 길게 북서진한 후 20-30°N 사이에서 전향하는 유형이다. R6 유형은 엘니뇨 해에는 많이 발생하나 라니냐 해에는 발생이 거의 없어 엘니뇨/남방진동(El Niño/Southern Oscillation, ENSO)에 영향을 받는 ENSO 유형으로 생각할 수 있다. 일본 동쪽 해상에서 이동하는 유형은 그림 2d(R4), 2e(R5), 그리고 2g(R7)이다. R4와 R5는 이동 형태는 비슷하나 지리적으로 R5가 R4보다 좀더 동쪽에 몰려있는 차이가 있다. 이들은 8월부터 10월까지 발생이 많으나 주요 발생이 R4는 8-9월, R5는 9-10월인 차이가 있다. 마지막으로 R7은 열대 서태평양에 진로가 산포되어 있는 형태로 R6보다 좀더 북쪽에서 발생하여 북진이 우세한 형태의 진로를 가지는 태풍을 주로 포함하고 있다. 이 역시 R6와 마찬가지로 엘니뇨 해와 라니냐 해의 차이가 큰 ENSO 유형이다.

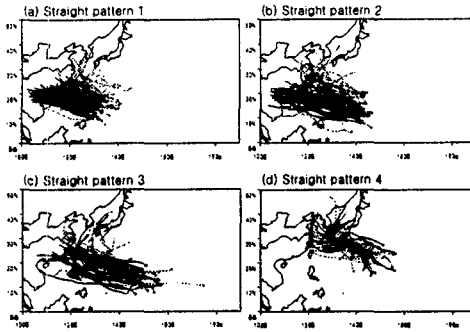


그림 1. 직진하는 형태의 태풍 진로

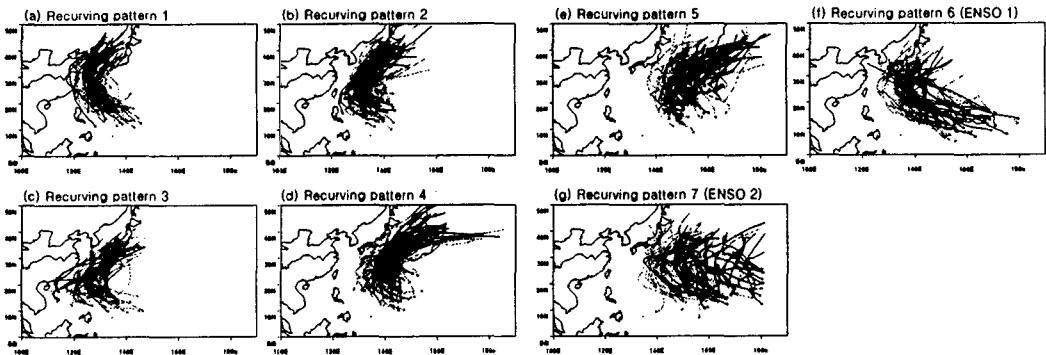


그림 2. 전향하는 형태의 태풍 진로

4. 대기 순환 패턴

진로 유형을 결정하는 대기 순환의 특성을 살펴보기 위해 태풍 발생 이틀 전부터 발생일까지 대류권 평균 순환의 한 달 평균으로부터의 편차를 유형별로 조합하여 살펴보았다(그림 생략).

직진하는 유형에는 공통적으로 태풍 순환의 북쪽과 북서쪽에 강한 고기압성 회전이 존재하였다. 즉, 북태평양 고기압의 세력이 동중국해까지 확장되어 있을 때 그 남쪽에서 진행하는 태풍은 전향을 하지 못하고 중국 남부와 남동부로 직진하여 상륙한다. 우리나라와 일본에 영향을 미치는 태풍 유형에서 R1과 R2의 주요한 차이는 일본 동쪽 해상에 위치한 중위도의 고기압성 편차의 존재 유무이다. 이 지역의 고기압성 편차가 강할 때는 태풍의 전향이 좀 더 북쪽에서 늦게 이루어져 우리나라로 태풍이 이동하며, 거의 없을 때는 전향이 빨리 이루어져 일본으로 이동한다. 일본 동쪽으로 빠져 나가는 R4 유형에서는 160°E, 40°N을 중심으로 강한 고기압성 편차가 나타난다. 이는 북태평양 고기압의 북단이 대양에서 많이 북상한 것을 의미한다. ENSO 유형인 R6와 R7은 고기압성 편차의 위치가 다른데, 먼저 R6는 북태평양 고기압의 세력이 강하여 태풍이 그 주변을 따라 움직이는 것이

고, R7은 북태평양 고기압의 세력이 약화되고 북쪽으로 이동해 있어 태풍이 그것을 가로지르는 것이다.

5. 결론

태풍 진로의 유형을 Fuzzy 군집 방법으로 분류한 결과 11가지 유형이 산출되었다. 산출된 유형은 직진 형태의 4가지 유형과 전향 형태의 7가지 유형이며, 각각의 유형은 고유한 진로의 모양과 주요 이동 경로를 가지고 있다. 본 연구는 기존의 주관적인 태풍 진로 유형 분류 방식의 결점을 보완하는 객관적인 수치적 분류 방식을 채택하여 진로 유형을 성공적으로 분류해 내었다. 즉, 본 연구에서 산출한 진로 유형은 일반적으로 통용될 수 있는 기후학적 진로 유형으로 볼 수 있을 것이다. 한편, 각각의 태풍 진로 유형을 결정하는 대기 순환장의 차이점도 명확히 다름을 확인하였다. 따라서 유형별 대기 순환 패턴을 이용하여 예측된 대기 순환장과의 패턴 상관 분석을 통해 태풍 진로의 장기 예측 기법을 개발할 수 있을 것이다.

■ 참고문헌

- 이동규 · 장동언 · 위태권, 1992, 한반도에 접근하는 태풍, 1960-1989 제1부: 통계와 종관개요, 한국기상학회지, 28(2), 133-147
- 손건태 · 백지선 · 김현애 · 오재호, 1998, 다변량 통계자료분석 기법에 의한 태풍진로 유형분석, 한국기상학회지, 34(2), 346-354
- Harr, P. A., and R. L. Elsberry, 1991, Tropical Cyclone Track Characteristics as a Function of Large-Scale Circulation Anomalies. *Mon. Wea. Rev.*, 119, 1448-1468
- _____, and _____, 1995a, Large-Scale Circulation Variability over the Tropical Western Pacific. Part I: Spatial Patterns and Tropical Cyclone Characteristics. *Mon. Wea. Rev.*, 123, 1225-1246
- _____, and _____, 1995b, Large-Scale Circulation Variability over the Tropical Western Pacific. Part II: Persistence and Transition Characteristics. *Mon. Wea. Rev.*, 123, 1247-1268
- Ho, C. -H., J. -J. Baik, J. -H. Kim, and D. -Y. Gong, 2003, Interdecadal Changes in Summertime Typhoon Tracks. *J. Climate*, accepted
- Kaufman, L., and P. J. Rousseeuw, 1990, *Finding Groups in Data: An Introduction to Cluster Analysis*. John Wiley and Sons, Inc., 342 pp
- Kistler, R., and Coauthors, 2002, The NCEP-NCAR 50-Year Reanalysis: Monthly Means CD-ROM and Documentation. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 82, 247-267
- Legler, D. M., 1983, Empirical Orthogonal Function Analysis of Wind Vectors over the Tropical Pacific Region. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 64, 234-241