

환경 및 응용기상 분과 [P-189]

제트류 합류에 의한 청천난류 발생 장기 변동 및 사례 분석

박정훈, 이주현, 이단비, 김정훈

서울대학교 지구환경과학부

아열대 제트와 한대 제트가 겹쳐지는 제트 합류(Jet Superposition)에 따른 중위도 상층 제트 강화는 상부 대류권과 하부 성층권(Upper Troposphere and Lower Stratosphere; UTLS) 배경장의 비지균 흐름 및 연직 바람 시어를 증가시켜 대류권계면 근처의 청천난류(Clear-Air Turbulence; CAT) 발생에 호조건을 형성한다. 기후변화로 인한 북반구 중위도 제트의 강도 및 위치 변화는 제트 합류 빈도에 영향을 미칠 수 있으며, 이는 UTLS 내 CAT 발생 가능성을 높일 수 있다. 본 연구에서는 6시간 간격의 ECMWF Reanalysis version 5(ERA5) 재분석 자료를 이용하여 43년(1980 - 2022년)간의 아열대 제트, 한대 제트 및 두 제트의 합류 현상을 구분하였고, 400-100 hPa 구간의 CAT 발생 분포를 지역별, 계절별로 분석하였다. 제트 분류는 (i) 400-100 hPa 구간 연직 적분 평균 풍속 $\geq 30 \text{ m s}^{-1}$, (ii) 한대와아열대 제트는 1-3PVU 등위선이 각각 315-330 K, 340-355 K에 위치, (iii) 제트 코어 부근의 수평 PV 기울기가 43년 기후 값의 상위 50% 이상인 경우로 정의하였다. 한 격자가 아열대·한대 조건을 동시에 만족하면 제트 합류로 분류하였다. CAT의 발생 진단을 위해 난류 지수 중 현업에서 가장 많이 이용되고 있는 Turbulence Index3 (TI3 = VWS × DEF + DVT)을 계산하였다. Vertical Wind Shear (VWS)는 시어 불안정, Deformation (DEF)는 흐름 변형에 따른 상층 전선형성, Divergence Trend (DVT)는 지균 조절 과정 동안 제트 출구에서 방출되는 관성 중력파에 의한 난류 발생을 진단한다. 중강도 이상의 난류를 진단하기 위해 각 난류 지수의 43년치 95%를 임계값으로 설정하였다. 합류 현상은 주로 동북아시아와 북서대서양 지역에서 나타났고, 특히 동북아시아는 합류 빈도가 약 1.5%로 제일 큰 값을 보였다. 동북아시아 지역에는 겨울철, 북서대서양 지역에는 가을철에 합류 현상이 집중되었다. 합류 시, TI3 발생 빈도는 약 46% 크게 나타났고, VWS는 제트 코어 상단(200hPa)에서 기후 값 상위 2%에 해당하는 매우 큰 값을 보였다. DVT는 전 층에서 약 30% 증가하며, 제트 합류 시 제트 출구 지역에 비지균 흐름으로 유도되는 관성 중력파의 방출로 UTLS 내에서는 국지적으로 안정도와 연직 바람시어가 변화하면서 CAT 발생 가능성이 크게 증가하는 것으로 해석된다. 제트 합류에 따른 난류 발생 진단을 실질적으로 확인하기 위해 본 연구에서는 항공기 관측 자료를 이용하여 사례 분석을 수행하였다. 그 결과 임계값이 제트 중첩에 따른 CAT 발생 가능성을 효과적으로 진단하는 것으로 나타났다.

Keywords: 제트기류, 청천난류, 제트 합류, 비지균 흐름, ERA5

※ 이 연구는 기상청 「차세대 항공교통 지원 항공기상 기술개발(NARAE-Weather)」(RS-2022-KM220310)의 지원과 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원(RS-2025-24683550)으로 수행되었습니다.