

Evaluation and Improvement of the ECMWF Aviation Turbulence Forecasts

Han-Chang Ko¹, Hye-Yeong Chun¹, and Peter Bechtold²

¹Department of Atmospheric Sciences, Yonsei University

²European Centre for Medium-Range Weather Forecasts

Aviation turbulence is a common concern for both passengers and pilots. This study evaluates the performance of the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) Integrated Forecasting System-Clear Air Turbulence (IFS-CAT) over a one-year period (October 2022-September 2023) using in-situ flight eddy dissipation rate (EDR) data. IFS-CAT ensemble forecasts exhibit the highest skill at $z = 6-15$ km during the Northern Hemisphere winter, as measured by an area under the relative operating characteristics (ROC) curve exceeding 0.87. However, the probability of detection for moderate-or-greater intensity turbulence is lower than 0.1, mainly due to the discrepancy between the employed log-normal EDR climatology as based on previous research and that observed in this study. Therefore, the IFS-CAT is recalibrated with an updated observation-based EDR climatology. Furthermore, the implied log-normal distribution parameters of the IFS-CAT are optimized to increase the detection rate of moderate-or-greater intensity turbulence. Both improvements result in higher skill scores, which are also independently validated against research aircraft data from the SouthTRAC campaign in 2019. These updates could help make air travel safer by providing pilots with more reliable turbulence forecasts.

Keywords: aviation turbulence, aviation turbulence forecasts, European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF), Integrated Forecasting System (IFS), numerical weather prediction (NWP)

※ This research was supported by the Korea Meteorological Administration (KMA) Research and Development Program under Grant RS-2022-KM220410.

대기역학 및 수치모델링 분과 / 대기역학 3-2

연직 운동량 방정식을 활용한 2022년 8월 8일 수도권 집중호우 사례의 대류 발달 과정 분석

박이준, 김정훈

서울대학교 지구환경과학부

2022년 8월 8일, 서울 수도권 지역에서는 시간당 141.5 mm에 달하는 기록적인 집중호우가 발생하였다. 이는 80년 만에 갱신된 극한 강수로, 도심 홍수로 인해 막대한 경제적 피해와 8명의 인명 피해를 초래하였다. 호우 발생 당시 지상 레이더 영상에서는 서해상에서 발생한 대류 셀이 동진하며 내륙에서 급격하게 강화되어 준-선형 대류 시스템으로 발달하는 양상을 보였다. 위성 영상에서는 운정 고도가 13 km 이상까지 깊게 발달하는 매우 강한 대류 구조를 보였다.

본 연구에서는 고해상도 수치실험을 기반으로, 대류가 급격하게 강화된 원인을 연직 운동량 방정식을 통해 정량적으로 분석하였다. 다종의 관측 자료를 통해 검증된 실험 결과에서는 중규모 배경 흐름과 강수의 시공간 구조를 잘 모의하였다. 연직 운동량 방정식 분석 결과, (1) 서해상에서는 지면 수렴과 하층제트에 의한 강한 바람 시어가 양의 역학적 PGF를 형성하였고, 기존 강수의 증발 냉각 효과가 음의 부력을 유발하였으나 더 강한 양의 열역학적 PGF를 발생시킴으로써, 두 역학·열역학적 PGF가 대류 셀을 발생시키는 데 중요한 역할을 하였다. (2) 이후 대기 중·하층의 강한 서풍을 따라 대류 셀이 내륙으로 이동하면서 양의 이류항에 의한 강한 연직 가속이 내륙에 발생하였다. (3) 수도권 내륙에서는 다량의 수증기 공급에 따른 강한 양의 부력 성분이 지배적으로 작용하며 대류를 급격하게 강화시켰다.

본 연구는 연직 운동량 방정식을 통해 전반적인 대류 발달 과정 (1)-(3)에서 중규모 강제력들의 역할을 정량적으로 분석하였으며, 이를 토대로 8월 8일 사례의 대류 발달 및 강화에 대한 개념 모델을 제시하였다. 이는 수도권 내륙에서 발생하는 국지적인 집중호우 발생 기작에 대한 이해를 심화시키고, 단기 예측 정확도 향상에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

Keywords: 8월 8일 집중호우, 연직 운동량 방정식, 대류 강화

※ 이 연구는 기상청 국립기상과학원 「위험기상 분석 및 예보기술 고도화」 (KMA2018-00121)와 기상청 「위험기상 선제 대응 기술개발사업」 (RS-2023-00233640) 지원으로 수행되었습니다.

대기역학 및 수치모델링 분과 / 대기역학 3-3

전지구 재분석자료의 열대저기압 요란 및 지향 성분 비교

이충희¹, 정형빈¹, 강현규², 김재진¹¹국립부경대학교 지구환경시스템과학부 환경대기과학전공²Computational Earth Sciences Group, Oak Ridge National Laboratory

본 연구는 대표적인 전지구 재분석자료들의 열대저기압 요란(perturbation) 및 지향 성분(steering component)을 비교하고 분석하였다. 전지구 재분석자료는 수치 모델을 이용한 열대저기압 예측에 있어 초기 및 경계자료로 사용된다. 따라서 전지구 재분석자료의 열대저기압의 특성은 열대저기압의 예측 성능 및 특성을 결정하는 중요한 요인이다. 특히, 열대저기압의 요란장과 지향 성분은 열대저기압의 발달과 이동에 상당한 영향을 미친다. 그러므로 본 연구에서는 대표적인 전지구 재분석자료인 ERA5, JRA55, MERRA2, FNL의 열대저기압 요란 및 지향 성분을 추출하고 비교/분석하였다. 전지구 재분석자료에서 열대저기압 요란장과 대규모 주변류(large-scale environmental flow)를 분리하기 위해, FFEM (Fourier-Finite Element Method) 구면 고차 필터를 사용하였다. 대규모 주변류로부터 열대저기압의 지향 성분을 추출하기 위해, 열대저기압 중심을 원점으로 한 극좌표계를 정의하여 방위각 방향에 대한 푸리에 변환/역변환을 수행하고 열대저기압의 파수 1 성분을 추출하였다. 2015 ~ 2022년의 북서태평양의 170개 열대저기압에 대해 분석을 수행하였다. 그 결과, ERA5와 FNL 자료의 열대저기압이 중심부 해면기압 및 3차원 바람 구조를 비교적 잘 모사하고 있었으며, 특히, 열대저기압의 재분석자료별 온난핵의 강도가 FNL과 ERA5에서 상대적으로 더 높게 나타났다. 열대저기압의 지향 벡터(steering vector)는 모든 재분석자료에서 실제 이동 벡터에 비해 남서 방향으로 편향되어 나타났으며, 특히, MERRA2 자료의 열대저기압 지향 벡터가 다른 재분석자료들에 비해 더 서쪽으로 편향되어 나타남을 확인하였다. 실제 이동 벡터 대비 지향 벡터의 편차는 JRA55와 MERRA2 자료에서 비교적 크게 나타났으며, 이러한 차이는 재분석자료별 베타자이어(beta-gyre)의 강도 차이에 기인한 것으로 확인되었다. 본 연구는 전지구 재분석자료의 종류에 따른 열대저기압의 강도 및 경로 예측 특성을 파악하는데 기여할 것으로 기대된다.

Keywords: 열대저기압, 재분석자료, 지향류, 베타자이어, 수치모델링

대기역학 및 수치모델링 분과 / 대기역학 3-4

실크로드 패턴의 지역적 증폭: 이란 고원 가열과 인도 여름 몬순의 역할

정다현¹, 김주완¹, 노엘¹, 김정훈²

¹국립공주대학교 대기과학과

²일본 도쿄대학교 첨단과학기술연구센터

실크로드 패턴(Silk Road Pattern, SRP)은 북반구 여름철 유라시아 대륙에서 자주 관측되는 대기 모드로, 유럽에서 동아시아까지 유라시아 제트를 따라 이동하는 로스비파로 나타난다. 유라시아 제트는 인도 여름 몬순의 영향으로 형성되는 티벳 고기압의 북쪽 부분으로 실크로드 패턴의 wave guide 역할을 한다. 실크로드 패턴은 북반구 여름철 대표적인 원격 상관 패턴으로, 유라시아 지역의 강수와 폭염 등 극한 기상 현상에 영향을 미친다. 하지만 실크로드 패턴은 주로 경년 및 수십년 변동성 연구로 진행되어 패턴의 발달과 강화에 대한 역학적 분석은 아직 충분히 이해되지 않고 있다. 극한 기상 현상은 일 단위 시간 척도에서 종관 규모의 변동이 특징이기 때문에 실크로드 패턴의 일기 규모의 구조적 발달과 증폭을 이해하는 것이 중요하다. 따라서 본 연구는 1979년부터 2022년까지의 일 단위 재분석 자료를 활용하여 위상 기반 합성장 분석을 통해 실크로드 패턴의 증폭 메커니즘을 분석하고자 한다. 합성장 분석 결과, 실크로드 패턴의 증폭은 이란 고원 북쪽에 위치한 카스피 해 근처를 지날 때 강화됨이 보이며 이는 이란 고원의 하층 가열과 연관이 있음을 확인 하였다. 이란 고원은 인도 여름 몬순의 하강역으로 대류가 억제 되어 맑은 하늘에서 태양 단파 복사 증가함에 따라 하층 가열이 유도된다. 해당 가열은 남북 온도 경도 구배를 강화하며 서쪽으로 기울어진 경압 불안정 구조 발달로 인한 불안정을 야기한다. 이러한 구조는 하층 경압 에디의 성장과 발달을 촉진하며 상층 로스비파를 강화하고 궁극적으로 실크로드 패턴의 증폭을 유도할 수 있다. 일 단위 분석을 통한 실크로드 패턴 증폭 메커니즘에 관한 이해는 유라시아 지역의 계절 내 극한 기상 현상 예측 및 예보 기술 능력 향상에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

Keywords: 실크로드 패턴, 유라시아 제트, 이란 고원, 인도 몬순, 로스비파

※ 이 연구는 기상청 국립기상과학원 「위험기상 분석 및 예보기술 고도화」 (KMA2018-00121)의 지원으로 수행되었습니다.

※ 이 논문은 기상청의 재원으로 한국기상산업기술원의 기상기후데이터 융합분석 특성화대학원 사업의 지원을 받아 수행되었습니다.

대기역학 및 수치모델링 분과 / 대기역학 3-5

상층 절리 저기압이 초겨울 한반도 대설에 미치는 영향: 2024년 11월 수도권 대설 사례 연구

오유주¹, 백은혁², 김주완¹

¹국립공주대학교 대기과학과
²국립공주대학교 지구환경연구소

대설이란 많은 양의 눈이 시·공간적으로 집중되어 내리는 현상을 말한다. 대설은 교통, 산업, 생활 전반에 심각한 영향을 미치는 겨울철 주요 기상재해로서, 인명·재산 피해 규모가 매우 크다. 이번 대설은 117년 만에 수도권 11월 최대 적설량을 경신했으며, 일부 수도권 지역에서는 약 3일간 40cm가 넘는 적설을 기록했다. 뿐만 아니라 긴 강설기간과 습설로 인한 피해규모는 사망 6명 이상, 부상 24명 이상으로 집계되었으며, 교통사고, 시설물 붕괴, 전기설비 피해가 광범위하게 발생하였다. 항공기 400여 편 결항, 대중교통 지연 등 산업 전반에도 큰 피해를 입혔다. 본 연구에서는 다양한 관측자료 및 Weather Research and Forecasting (WRF) 모델을 활용하여 해당 사례를 분석하였으며 이를 통해 한반도 대설 강도 및 지속 기간 예측에 있어서 선행 연구에서 주목하지 않았던 상층 절리 저기압의 중요성을 확인하였다. 강설 발생 하루 전, 시베리아 지역에서 발달한 상층 절리 저기압이 한반도 북쪽으로 남하하였으며, 그 경계에서 상층 전선 및 대류권계면 접힘(Tropopause folding)이 나타나 차갑고 건조한 공기가 유입되면서 북동아시아 상공에 콜드돔(cold dome)을 형성하였다. 이 콜드돔은 초겨울 서해 해수면의 이상 고온 현상과 결합하여 강한 해기차를 발생시켰으며, 이로 인해 현열 및 잠열의 증가로 대설에 필요한 수분 공급과 대류 불안정이 강화되었다. 또한 상층 절리 저기압은 캄차카 지역의 블로킹에 의해 정체하면서 약 3일간 한반도 북쪽에 머무르면서 지속적인 강설이 발생하였다. 본 연구는 상층 절리 저기압과 해기차의 상호작용이 한반도 대설의 발생 및 지속에 핵심적인 역할을 했음을 시사한다.

Keywords: 한반도 대설, 절리저기압, 상층 전선, 해기차, Local Wave Activity

※ 이 연구는 기상청의 재원으로 한국기상산업기술원의 기상기후데이터 융합분석 특성화대학원 사업의 지원을 받아 수행되었습니다.

대기역학 및 수치모델링 분과 / 대기역학 3-6

최근 여름철 북극 온난화에 의한 유럽 폭염 강화

노엘¹, 김주환^{1,2}, 손석우³, 예상욱⁴, 전상윤⁵, 문우석⁶

- ¹공주대학교 대기과학과
- ²공주대학교 지구환경연구소
- ³서울대학교 지구환경과학부
- ⁴한양대학교 해양융합과학과
- ⁵극지연구소 대기연구본부
- ⁶부경대학교 환경대기과학전공

최근 유럽 지역의 폭염은 빈도와 강도뿐만 아니라 지속기간 측면에서 급격한 증가를 보이고 있다. 특히, 일부 지역에서는 폭염일수가 10년당 50% 이상의 증가 추세를 보였으며, 이러한 변화는 2010년 이후 더욱 급격하게 증가하고 있다. 이는 단순한 기후변화에 따른 극한 기상현상의 증가 추세를 넘어 해당 지역의 폭염을 증가시키는 역학적 요인이 존재함을 시사한다. 여러 선행연구에서는 북극지역의 온난화가 중위도 지역의 대기 순환을 약화시켜 중위도 극한 기상현상을 강화시킨다고 보고하였으나, 대부분의 연구가 겨울철에 집중되어 있었고 여름철 유럽 극한기상현상에 미치는 영향에 대한 역학적 연결성이 불분명하였다. 따라서, 본 연구에서는 2010년 이후 급격히 변화하고 있는 여름철 북극 온난화와 유럽 폭염 지속성 증가 간의 물리적 연관성을 제시하고자 한다. 최근 여름철 북극지역의 온도 변화는 지역적으로 뚜렷하게 다른 특성을 보인다. 바렌츠-카라해는 2010년 이후 10년당 2.3°C의 급격한 온난화를, 그린란드는 10년당 0.6°C의 냉각 경향을 보였다. 이러한 대조적인 온도 변화는 각각 다른 메커니즘을 통해 유럽 폭염에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 바렌츠-카라해의 온난화는 유라시아 지역의 종관 에디 활동을 약화시켜 해당 지역의 대기 변동성을 감소시키고, 지속적인 대기 패턴이 장기간 유지될 수 있는 유리한 조건을 제공한다. 한편, 그린란드의 냉각은 북대서양 제트의 북상을 유도하여 아열대 지역의 고기압(아조레스 고기압)이 유럽지역으로 확장하기 쉬운 대기 패턴을 유도하여 폭염 발달에 유리한 조건이 형성된다. 이러한 결과들은 최근 여름철 북극의 기후 변화가 중위도 극한 기상현상의 변화에 대한 주요한 요소가 되고 있음을 시사한다.

Keywords: 북극 온난화, 유럽 폭염

※ 이 연구는 기상청 국립기상과학원 「위험기상 분석 및 예보기술 고도화」(KMA2018-00121)의 지원으로 수행되었습니다.