

한반도 및 동아시아 지역에서 조종사 보고 자료로 관측된 항공난류의 통계적 분석

이단비 · 전해영*
연세대학교 대기과학과

(접수일: 2014년 12월 8일, 수정일: 2015년 1월 8일, 게재확정일: 2015년 2월 3일)

A Statistical Analysis of Aviation Turbulence Observed in Pilot Report (PIREP) over East Asia Including South Korea

Dan-Bi Lee and Hye-Yeong Chun*

Department of Atmospheric Sciences, Yonsei University, Seoul, Korea

(Manuscript received 8 December 2014; revised 8 January 2015; accepted 3 February 2015)

Abstract The statistical analysis of aviation turbulence occurred over South Korea and East Asia regions is performed, using pilot reports (PIREPs) during December 2002~November 2012 that were provided by the Korea Aviation Meteorological Agency (KAMA) and the National Center for Atmospheric Research (NCAR). In South Korea, the light (LGT)- and moderate or greater (MOG)-level turbulence events occurred most frequently in spring and winter due to strong vertical wind shear below or above jet stream in these seasons. Spatially, the LGT- and MOG-level events occurred mainly along domestic flight routes. The higher occurrences of the LGT- and MOG-level convectively induced turbulence (CIT) events show in spring and summer when convective systems frequently affect the Korean peninsula. The results are generally similar to a previous study on the aviation turbulence over South Korea during 2003~2008, except that MOG-level CIT events occurred more in February, June, and October. Over East Asia region, the LGT- and MOG-level events appeared mostly in summer and spring, respectively, and the highest occurrence is over the southeast region of Japan and Kamchatka peninsula near Russia.

Key words: Aviation turbulence, PIREP, Convectively-Induced Turbulence (CIT), Clear-Air Turbulence (CAT), lightning data

1. 서 론

항공 난류는 자유대기에서 10~1,000 m의 작은 규모를 가지며, 항공기에 직접적으로 영향을 끼치는 난류로 정의된다(Lester, 1994). 특히, 청천난류(CAT: clear air turbulence)는 약 6.6 km (20,000 ft) 이상의 순항 고도에서 사전 징후들 없이 짧은 시간에 갑자기 발생하여, 승객 및 승무원의 부상 등을 야기시킬 수 있

다. 2009년도 미국의 국가 운수 안전위원회(National Transportation Safety Board, 2009) 보고서에 따르면, 미국 내에서 발생한 날씨 관련 항공 사고 원인 중에 가장 높은 확률을 보이는 원인은 항공 난류이다. 또한 항공 철도 사고 조사 위원회에 의하면, 1957년부터 2010년까지 한국에서 발생한 날씨 관련 항공 사고 원인 중 항공 난류가 21%로, 가장 높은 비중을 차지하는 것으로 확인되었다(http://www.araib.go.kr).

한국과 동아시아 지역은 세계에서 가장 강한 제트류를 가지는 지역이며, 이는 난류 발생에 있어 큰 잠재력을 가진 지역이다(Koch et al., 2006; Jaeger and Sprenger, 2007). 특히 우리나라는 70% 이상이 복잡한

*Corresponding Author: Hye-Yeong Chun, Department of Atmospheric Sciences, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea.
Phone : +82-2-2123-2692, Fax : +82-2-365-5163
E-mail : chunhy@yonsei.ac.kr

지형으로 덮여 있어 난류 발생 원인 중 하나인 산악과 발생에 좋은 요건을 갖추고 있다(Kim and Chun, 2011a). 또한 난류를 발생시키는 주요 원인들 중 하나로 대류 시스템을 들 수 있는데(Pantley and Lester, 1990; Lane et al., 2003), 바다로 둘러싸인 우리나라 및 일본의 경우 대류 시스템으로 인한 난류의 위험성 역시 큰 지역으로 볼 수 있다. 한국 및 동아시아의 항공 운행량이 최근 급격히 증가함에 따라, 항공 난류의 정확한 예측이 이 지역 국가들의 중요한 현안으로 떠오르고 있다(Kim and Chun, 2011b). 최근 연구들에서는(e.g., Lane et al., 2012), 대류와 관련된 항공 난류를 구름 안에서 일어나는 대류 난류(CIT: cloud-induced turbulence)와 구름 주변 난류(NCT: near-cloud turbulence)로 나누고, 레이더와 같은 항공기 내의 장치를 통하여 감지할 수 없는 NCT가 더 위험함을 제시하고 있다.

수십 년 동안 전세계적으로 많은 과학자들이 항공 난류의 피해를 줄이고자 많은 연구 및 노력을 진행해 오고 있다. 이전 항공 사고가 일어난 곳의 조종사 보고 자료(Pilot reports: PIREPs)에 기록된 자료의 통계적 조사 및 사례 분석을 통해 조종사들에게 정보를 제공하거나, 관측 자료 및 수치예보 모델을 이용하여 여러 가지 난류 발생 메커니즘을 나타내는 다양한 난류 지수들의 계산을 통하여 난류 예측에 도움을 주었다. Dutton (1980)은 수치모델에서 생산되던 다양한 종관 규모의 난류 지수들과 1976년에 북대서양과 북서유럽에서 관측된 난류들과의 선형 회귀 분석을 기반으로 한 경험식을 개발하였다. Ellrod and Knapp (1992)는 제트류와 상층 기압골 발달로 인해 발생한 난류 지역을 예측할 수 있는 TI (Turbulence Index)를 개발하였다. 또한 Kaplan et al. (2005, 2006)은 종관 운동에서의 비지균 흐름을 통해 유도된 고기압성 회전이 강하게 나타나는 제트 입구 지역에서 강한 난류 사례들이 발생했다는 것을 밝혔고, 이를 고려하여 NCSU 2 (North Carolina State University) 지수를 개발하였다.

미국의 Sharman et al. (2006)은 처음으로 관측된 PIREP 자료와 수치예보 모델을 사용하여 총 64개의 난류 지수들을 결합한 통합 난류 예측 시스템인 Graphical Turbulence Guidance (GTG) system을 개발하였고, 이 시스템의 난류 예측의 우수성을 증명하였다. 이에 따라 최근, Kim and Chun (2012)은 GTG 시스템의 방법론을 기반으로 2011년 6월부터 2012년 5월까지의 PIREP과 Unified Model (UM) 기반의 기상청 지역 현업 수치예보모델을 사용하여 한국형 항공 난류 예측(KTG: Korean aviation Turbulence Guidance) 시스템을 개발하였고, 현재 항공기상청에서 KTG 시스템을 통해 한반도를 포함한 동아시아 지역에 대해

하루에 네 번 난류 예측을 현업적으로 수행하고 있다. 이와 같은 항공 난류 예측 시스템을 구축하고 이를 검증하는 데 있어서 관측자료는 필수적인 역할을 한다. 비행기에 탑재된 관측기기를 통한 난류 자료의 생산은 미국, 영국의 몇몇 민항기를 통하여 이루어지고 있으나(Gill, 2014; Sharman et al., 2014), 매우 제한적 이므로, 현재로서는 PIREP 자료가 가장 좋은 관측자료라고 할 수 있다. PIREP은 조종사의 기록으로 필연적으로 주관적 판단이 포함될 수 있는 제약이 있으나, 향후 비행기를 통한 관측자료를 확보하기 전까지는 여전히 가장 좋은 관측자료로 평가될 것이다.

본 연구에서는 2002년 12월부터 2012년 11월까지 한반도 영역에서 발생한 항공 난류의 시공간적 분포도를 분석하고자 한다. 또한 대류 시스템으로 인해 발생한 난류를 분류하고, 통계적 분석을 통하여 그 특징을 알아보하고자 한다. 마지막으로 한반도를 포함한 북서태평양을 중심으로 하는 동아시아 지역에서의 항공 난류의 시·공간적 분포도를 조사하여 동아시아 지역에서의 항공 난류의 특징을 살펴보고, 앞서 조사한 한반도 영역 내에서의 항공 난류 특징과 어떠한 차이점이 있는지 비교할 것이다.

2. 조종사 보고 자료

본 연구에서는 한반도 및 동아시아 지역에서 발생한 항공 난류의 시공간적 분석을 위하여 2002년 12월부터 2012년 11월까지 기간 동안의 PIREP을 수집하여 사용하였다. 한반도 영역의 경우 항공기상청에서 수집된 PIREP을 사용하였으며, 이 PIREP은 남한의 공역만을 포함하기 때문에, 동아시아 지역의 경우 미국 국립대기과학연구소(The National Center for Atmospheric Research: NCAR)에서 수집된 PIREP을 사용하였다. PIREP은 운항 중에 관제사와 항공기 내 조종사간의 음성으로 기록되는 유일한 항공 난류 관측 자료로써, 비행시간, 기종, 위도, 경도, 비행고도, 기온, 풍향, 풍속, 난류 강도 및 착빙 강도 등의 기상 정보들을 포함한다. 난류 강도의 경우 조종사의 판단으로 결정되며, 강도 세기에 따라 난류가 없음을 의미하는 무 강도(null: NIL)부터 약 강도(light: LGT), 중 강도(moderate: MOD), 강 강도(severe: SEV) 까지 4가지로 나뉘어 기록된다.

Table 1은 10년(2002. 12.~2012. 11.) 동안 한반도 영역에서 PIREP에 기록된 항공 난류의 강도에 따른 개수와 PIREP 전체 개수에 대한 상대적인 발생 비율을 보여준다. 기록된 PIREP의 총 개수는 12455개이며, 각 강도 별로는 NIL 8795건, LGT 3164건, MOD 483건, SEV 13건이 기록되었다. 강도별 발생 비율의 경우, LGT 25.4%, MOD 3.9%, SEV 0.1%로, 이전 연

Table 1. Numbers and percentages corresponding to the NIL, LGT, MOD, and SEV categories of aviation turbulence obtained from PIREPs over South Korea from 2003 to 2012.

Turbulence intensity	Number	Percentage (%)
Null (NIL)	8795	70.6
Light (LGT)	3164	25.4
Moderate (MOD)	483	3.9
Severe (SEV)	13	0.1
Total	12455	100

Table 2. Numbers and percentages corresponding to NIL, LGT, MOD, and SEV categories of aviation turbulence obtained from PIREPs over East Asia from 2003 to 2012.

Turbulence intensity	Number	Percentage (%)
Null (NIL)	122058	66.2
Light (LGT)	54527	29.6
Moderate (MOD)	7152	3.9
Severe (SEV)	496	0.3
Total	184233	100

구(Kim and Chun, 2011a)에서 조사된 2003년부터 2008년까지의 난류 강도별 발생 비율(LGT 19.48%, MOD 2.94%, SEV 0.08%)과 비교해 보았을 때, 모든 강도에서 발생 비율이 증가한 것을 알 수 있다.

Table 2는 Table 1과 같은 기간 동안의 한반도 영역을 포함한 동아시아 지역에서 발생한 항공 난류의 강도별 개수와 전체 개수에 대한 강도별 상대적인 발생 비율을 보여준다. 총 184233개의 PIREP 기록 중, NIL은 122058건, LGT는 54527건, MOD는 7152건, SEV는 496건에 해당되며, 강도별 발생 비율을 살펴보면, LGT는 29.6%, MOD는 3.9%, SEV는 0.3%로 각각 나타났다. 한반도 영역 내에서 발생한 난류에 대한 결과와 비교했을 때, 동아시아 지역은 NIL을 제외한 모든 강도의 난류 발생 비율이 한반도 영역보다 더 높은 비율을 보이고 있음을 알 수 있다.

3. 한반도 지역에서 발생한 항공 난류의 통계적 분석

3.1 항공 난류의 시공간적 분석

Table 1에서 보여준 2002년 12월~2012년 11월 기간 동안의 항공기상청의 PIREP을 이용하여 한반도 영역에서 발생한 항공 난류의 시공간적 분포도를 분석하였다. Figure 1은 모든 강도에 대한 연도별 난류 발생 분포도이다. 막대그래프는 강도별로 발생한 난류의 빈도수를 나타내며, 실선과 점선은 각각 LGT와 중강도

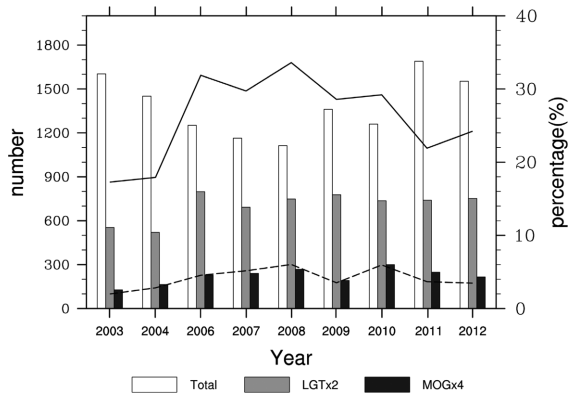


Fig. 1. Annual frequencies of total PIREPs (white bars) and the LGT- (gray bars), and MOG-level (black bars) turbulence events over South Korea from 2003 to 2012, excluding 2005. The relative percentages of the LGT- and MOG-level turbulence events normalized by the total number of PIREPs within a given year are depicted as solid and dashed lines, respectively. For showing better distribution, the numbers of the LGT- and MOG-level turbulence events are multiplied by 2 and 4, respectively.

이상(MOG: moderate or greater) 강도들의 발생 빈도수를 각 해의 전체 PIREP 수로 나눈 상대적인 발생 비율을 나타낸다. 여기서 말하는 전체 PIREP 수는 NIL 난류 자료까지 포함한 수를 의미한다. 자료의 신뢰성을 높이기 위해 위도 · 경도 · 고도의 결측값이 존재하는 PIREP을 제거하였고, 그 결과, 2005년(2004.12.~ 2005.11.)의 경우 PIREP의 총 개수(9개)가 극미하여 이 기간의 PIREP 자료는 분석에서 제외하였다. PIREP의 총 개수는 2003년부터 2008년까지는 지속적인 감소 경향을 보이다가 2008년 이후로는 해마다 증가, 감소가 반복되는 경향을 보였다. LGT의 개수는 2006년을 제외한 2003년부터 2009년까지 점차 증가하는 경향성이 보이지만, 최근 3년간은(2010~2012년) 그 개수가 비슷하였다. 상대적인 발생 비율은 각 해의 전체 PIREP 개수로 나누어 계산되었기 때문에, 시간에 따른 변동성이 발생 빈도수와 다르게 나타났다. LGT의 상대적인 발생 비율은 증감 변화가 계속적으로 존재하지만, 전반적으로는 2003년부터 2008년까지 증가하는 경향성을 보이다가 그 이후 2011년까지 감소하는 경향성을 보이는 것을 알 수 있었다. MOG는 빈도수와 상대적인 발생 비율 모두 2009년을 제외하고 2003년부터 2010년까지 점차 증가하다가 최근 2년에는 다소 감소하는 경향성을 보였다. MOD와 SEV 각각의 연도별 발생 빈도수는 다른 난류 강도들에 비해 발생 빈도수가 매우 적기 때문에 Table 3에 따로 정리하였다. SEV는 한 해에 발생한

Table 3. Annual frequencies of MOD, and SEV categories of aviation turbulence obtained from PIREPs over South Korea from 2003 to 2012, excluding 2005.

Year	Turbulence Intensity	
	Moderate (MOD)	Severe (SEV)
2003	32	0
2004	38	3
2006	57	0
2007	57	3
2008	65	2
2009	47	1
2010	74	1
2011	62	0
2012	51	3

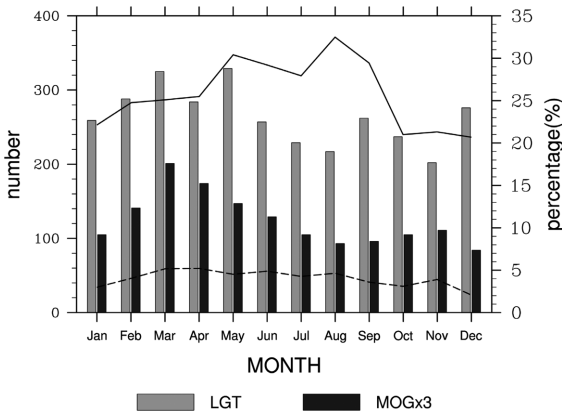


Fig. 2. Numbers of the LGT- (gray bar) and MOG- (black bar) level turbulence events over South Korea by each month from 2003 to 2012, excluding 2005. The relative percentages of the LGT- and MOG-level turbulence events normalized by the total number of PIREPs within a given month are depicted as solid and dashed lines, respectively. For showing better distribution, the numbers of the MOG-level turbulence events are multiplied by 3.

최대 빈도수가 3개로, 각 해마다의 발생 빈도수가 현저히 낮기 때문에, MOG의 시간에 따른 변동성은 MOD와 같은 것을 알 수 있다.

Figure 2는 9년 동안의 LGT와 MOG의 월별 난류 발생 분포도를 보여준다. LGT가 가장 빈번하게 발생한 계절은 봄철(MAM: March-April-May)이며(938개), 그 다음으로 겨울철(DJF: December-January-February)에 빈번하게 발생하였다(822개). 여름철(JJA: June-July-August)은 LGT 발생 빈도수가 적은 계절이지만(703개), 전체 PIREP 개수 역시 작기 때문에 상대적인 발생 비율은 계절 중 가장 높게 나타났다(29.7%). MOG

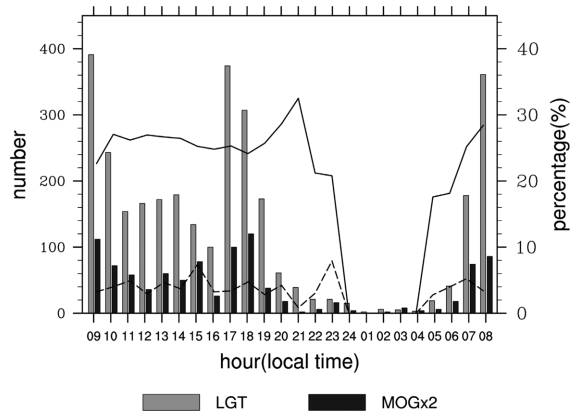


Fig. 3. Hourly distributions for the LGT- (gray bar) and MOG- (black bar) level turbulence events over South Korea from 2003 to 2012, excluding 2005. The relative percentages of the LGT- and MOG-level turbulence events normalized by the total number of PIREPs within a given hour are depicted as solid and dashed lines, respectively, except from 24 local time to 04 local time at which the turbulence events are rare. For showing better distribution, the numbers of the MOG-level turbulence events are multiplied by 2.

의 경우, 빈도수와 상대적인 발생 비율이 봄철에 가장 컸으며(174개; 4.99%), 그 다음으로 여름철에 크게 나타났다(109개, 4.6%). 빈도수만을 보았을 때, 겨울철에도 MOG가 빈번하게 발생한 것을 알 수 있었다(109개). 이러한 항공 난류의 계절성이 나타나는 이유는 우선, 겨울철과 봄철에는 연직바람시어(Vertikal Wind Shear: VWS)가 제트류의 위, 또는 아래에서 강해지며 이것이 항공난류를 야기하는 주요 원인이 될 수 있기 때문이다(Dutton and Panofsky, 1970; Ellrod and Knapp, 1992). 또한 여름철에는 장마와 태풍 같은 대류 시스템이 한반도에 영향을 끼치며, 이것이 이 시기에 MOG를 발생시키는 주요 원인이 된다(Kim et al., 2009; Kim and Chun, 2011a). 좀 더 구체적으로 살펴본 결과, LGT는 5월에 가장 많이 발생했으며(329개), 그 다음으로 3월에 많이 발생하였다(325개). LGT의 상대적인 발생 비율의 경우는 8월에 최대값을 보였으며(32.5%), 그 다음으로 5월에 최대값을 보였다(30.4%). MOG의 경우, 발생 빈도수와 상대적인 발생 비율이 3월(67개, 5.2%)과 4월(58개, 5.2%)에 최대값을 보였다.

Figure 3는 9년 동안 LGT와 MOG의 하루 동안의 시간별 난류 발생 분포도를 나타낸다. LGT와 MOG 모두 한국 시각으로 08시, 09시, 17시, 18시에 우세하게 높은 빈도수를 보였다. 반대로, 한반도 영역 내에서 운행하는 상업용 비행기의 수가 적은 시간대인 00

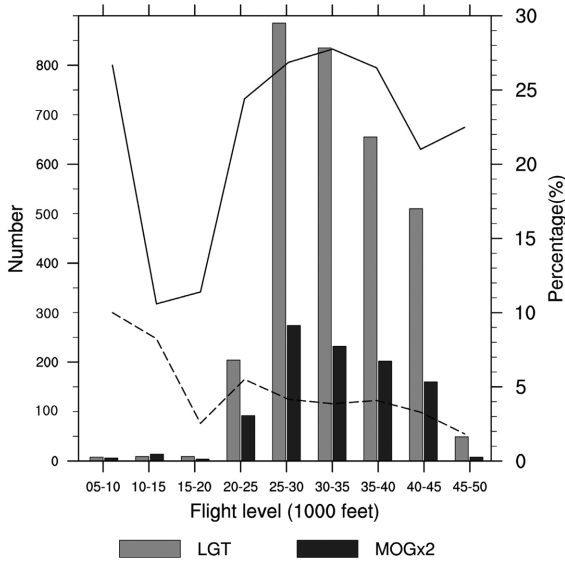


Fig. 4. The same as in Fig. 3, except for vertical distributions. For showing better distribution, the numbers of the MOG-level turbulence events are multiplied by 2.

시부터 04시까지는 LGT와 MOG의 발생 빈도수가 상당히 낮은 값을 보였다. 이 시간대에는 PIREP의 총 개수 역시 미미하기 때문에, 분별력 있는 결과 비교를 위해 상대적인 발생 비율에 대해서는 그 시간대의 값들은 제외하였다. 그 결과, 상업용 비행기가 주로 운행되는 시간대인 07시부터 20시까지 LGT와 MOG의 상대적인 발생 비율들이 각기 서로 비슷한 값들을 보이고 있음을 알 수 있었다.

Figure 4는 9년 동안의 LGT와 MOG의 고도별 난류 발생 분포도를 보여준다.

Figure 4에서 x축은 난류가 발생한 운항 고도(feet)이며, y축은 각 고도에 해당하는 난류의 발생 빈도수를 나타낸다. LGT와 MOG 모두 25000 ft와 35000 ft 사이에서 가장 많이 발생했으며, 두 난류 강도들에 대한 상대적인 발생 비율 역시 한반도 내 주요 운항고도인 20000 ft부터 35000 ft에 걸쳐 높은 값을 보이고 있다(이·착륙 고도에 해당하는 최저고도(0~5000 ft)와 한국 내에서 드물게 올라가는 최고고도인 45000 ft 이상의 경우, 그 고도에서 기록되는 전체 PIREP의 개수가 적기 때문에 비교 대상에서 제외하였다).

9년 동안 한반도 영역 내에서 발생한 항공 난류의 수평적 분포도를 살펴보기 위해, 약강도 이상(LOG: light or greater)과 MOG 난류로 나누어 한반도 영역에 위·경도 좌표를 따라 그 위치를 표시하였다(Fig. 5). 본 연구에서 고려한 한반도 영역은 구체적으로 북위 29.108°~41.075°, 동경 119.224°~134.887°에 해당한다. LOG(3660개)와 MOG(496개) 모두 한국 내 주요 국내선·국외선에 해당하는 서울-부산 구간, 서울-제주 구간, 부산-제주 구간, 서울-강릉 구간을 따라서 발생하였다. 특히, 난류 발생의 주요 원인 중 하나인 산악파와 관련한 태백산맥과 소백산맥, 그리고 대류시스템과 관련한 서해안과 남해안 지역에서 난류가 많이 발생한 것을 확인하였다.

3.2 대류 시스템으로 인한 난류(CIT: convectively induced turbulence)의 시공간적 분석

미국에서 발생한 난류들 중 항공 사고를 일으킬 정도로 심각한 항공 난류의 약 86%는 잘 발달된 대류 시스템의 100 km 이내에서 발생한 난류들인 것으로 조사되었다(Kaplan et al., 2005). 대류 시스템은 정확

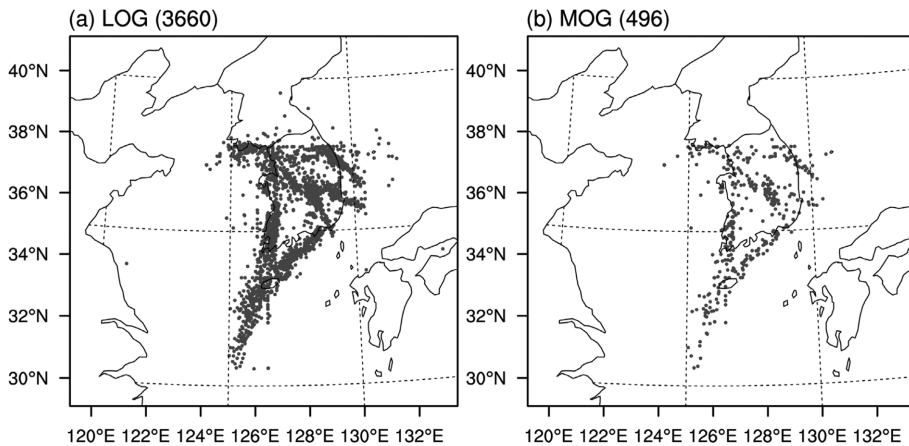


Fig. 5. Horizontal distributions of the (a) LOG-, and (b) MOG-level turbulence events that occurred over South Korea from 2003 to 2012.

Table 4. Numbers and percentages corresponding to NIL, LGT, MOD, and SEV categories of CAT events and CIT events obtained from PIREPs over South Korea from 2003 to 2012 excluding 2005.

Turbulence intensity	CAT		CIT	
	Number	Percentage (%)	Number	Percentage (%)
Null (NIL)	8015	71.2	776	65.4
Light (LGT)	2805	24.9	354	29.8
Moderate (MOD)	426	3.8	57	4.8
Severe (SEV)	13	0.1	0	0
Total	11259	100	1187	100

하게 예측하기 어려우며, 이러한 대류 시스템으로 인해 발생한 난류(CIT)의 발생 메커니즘 또한 아직까지 밝혀지지 않았기 때문에 CIT를 미리 예측하는 것은 쉬운 일이 아니다. 한국은 삼면이 바다로 둘러싸여 있는 반도로, 특히 여름철에 태풍과 장마 같은 대류 시스템의 영향을 많이 받기 때문에, CIT가 발생할 수 있는 최적의 위치에 속해있다. 따라서 한반도 내에서 발생한 CIT의 통계적 분석을 통해 CIT의 특성을 조사하고자 한다.

이번 연구에서는 CIT를 분류하기 위해, PIREP 수집 기간과 동일한 2003년부터 2012년까지의(2005년 제외) 한반도 주변의 낙뢰자료를 기상청으로부터 수집하여 이용하였다. Kim and Chun (2011a)에서 사용한 방법을 따라서, 낙뢰가 발생한 지점으로부터 반경 100 km 이내, 발생 시각으로부터 ±40분 이내에 발생한 난류를 CIT로 분류하고, 그 외 나머지 난류들은 대류 시스템과 연관이 없다고 간주하여 CAT로 분류하였다. 기상청에서 수집한 낙뢰 자료의 경우, 구름과 구름을 이동하는 낙뢰(CC: cloud-to-cloud)와 구름과 지면 사이를 이동하는 낙뢰(CG: cloud-to-ground)로 나뉘며, 본 연구에서는 이러한 CC와 CG 구분 없이 모든 낙뢰 자료를 사용하여 CIT를 분류하였다. 분석 기간 동안의 낙뢰의 수평적 구조는 Fig. 9에 보였다.

Table 4는 9년간 한반도 지역에서 발생한 강도에 따른 CAT와 CIT의 개수와 각각에 해당하는 전체 PIREP 개수에 대한 상대적인 발생 비율을 보여준다. CAT와 CIT의 개수를 살펴보면, CAT는 CIT보다 각 강도별로 10배 정도 차이 나게 발생한 것을 알 수 있다. CIT는 SEV 강도의 난류가 발생한 적은 없지만, 상대적인 발생 비율을 살펴보았을 때, MOG 강도의 난류가 발생한 비율이 CAT보다 높게 나타났다(CIT 4.8%; CAT 3.9%). Kim and Chun (2011a)에서 조사된 2003년부터 2008년까지의 CIT와 CAT의 상대적인 발생 비율과 비교해 보았을 때, CAT의 LGT 이상 난류 발생 비율이 초기 5년간의 CAT (28.9%)보다 0.1% 정도 약간 낮아졌으나, CIT의 LGT 이상 난류 발생 비율은 초기 5년간의 CIT (33%)보다 1.6% 정도 증가한 것을

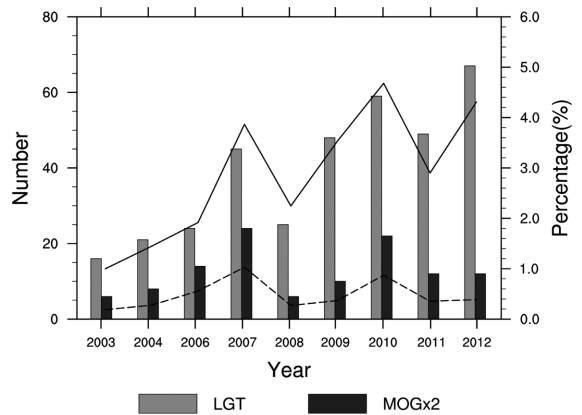


Fig. 6. The same as in Fig. 1, except for the CIT turbulence events. For showing better distribution, the numbers of the MOG-level turbulence events are multiplied by 2.

확인하였다.

Figure 6은 2005년을 제외한 2003년부터 2012년까지 CIT의 연도별 발생 빈도수와 상대적인 발생 비율을 나타낸 것이다. LGT의 경우, 2003년부터 2012년까지 2008년과 2011년을 제외하고 전반적으로 발생수가 증가하는 경향을 보였다. MOG의 경우, 2003년부터 2007년까지 그 빈도수가 계속적으로 증가하는 경향성을 보이다가 2008년에 급격히 줄었고, 그 이후 다시 2010년까지 증가하였다. 각 연도별 NIL을 포함한 전체 PIREP 개수에 대한 상대적인 비율을 살펴보면, LGT와 MOG 모두 9년 동안 감소, 증가하는 경향이 반복적으로 나타났다.

CIT의 계절별 특성을 알아 보기 위해, 같은 기간 동안의 LGT, MOG 강도의 CIT에 대한 월별 분포도를 살펴 보았다(Fig. 7). LGT와 MOG의 전체 PIREP 개수에 대한 상대적인 비율은 Fig. 6에 보인 것과 같이 점선과 실선으로 보였다. 앞에서 언급한 바와 같이 LGT와 MOG 모두 다른 계절들보다 CIT의 발생 원인이 되는 대류 활동이 활발한 여름철(JJA)에 많이 발생하였으며, 그 중에서도 장마 기간인 7월과 태풍이

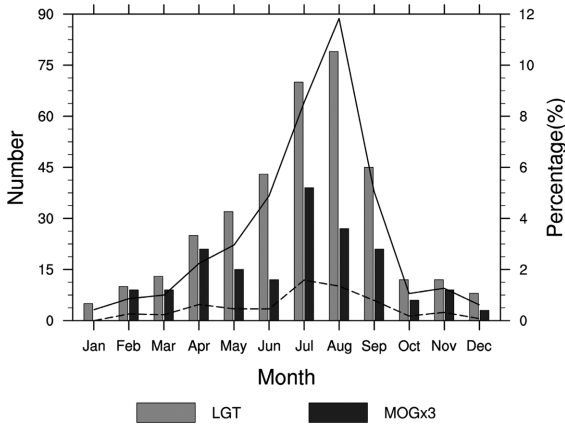


Fig. 7. The same as in Fig. 2, except for the CIT turbulence events. For showing better distribution, the numbers of the MOG-level turbulence events are multiplied by 3.

한반도에 자주 영향을 끼치는 8월에 LGT와 MOG의 발생 빈도수 및 상대적인 발생 비율이 월등히 높았다. 봄철(MAM)에도 여름철에 비해서는 높지 않지만 다른 계절들과 비교해 CIT의 발생이 잦았다. 가을철(SON: September-October-November)에는 9월에 CIT가 가장 많이 발생했으며, 7월과 8월 다음으로 가장 높게 나타난 달이기도 하다. 겨울철(DJF)에는 다른 계절들과 비교해 CIT의 발생이 현저히 떨어졌으며, 특히 1월에는 MOG 강도의 CIT가 전혀 발생한 적이 없었음을 알 수 있다. 2003년부터 2008년까지의 CIT에 대한 월별 분포도와 비교해 보면(Kim and Chun,

2011a), LGT 강도의 CIT가 특히 7월과 8월에 상대적인 발생 비율이 높아진 것을 알 수 있다. MOG의 경우, 이전 연구 기간 동안에는 8월에 약 2% 정도로 가장 높은 발생 비율을 보였으나, 9년간의 통계 수치에서는 7월에 가장 높은 발생 비율을 보였으며, 그 값은 1.59%로 이전 연구보다 낮은 비율을 보였다. Figure 6에서 보인 것처럼 MOG는 상대적으로 발생 빈도수 증가의 폭이 작은 반면에, LGT 강도의 CIT 경우 2008년 이전과 비교해 2009년 이후로 급격히 증가한 경향을 보여 이러한 결과가 나온 것으로 생각된다. 1월, 2월, 6월, 10월에는 MOG 강도의 CIT가 발생하지 않았던 초기 기간과 달리, 시간이 흐르면서 1월을 제외한 나머지 달들에서도 CIT의 발생이 눈에 띄게 증가한 것을 확인할 수 있다.

Figures 8a와 b는 각각 LOG, MOG 강도를 가지는 CIT의 한반도 내 수평 분포도를 나타낸 그림이다. Figure 5와 마찬가지로 강도를 LOG와 MOG로 나누어 한반도 영역 위에 CIT가 발생한 위치들을 표시하였다. Figure 8a에서 LOG 강도의 CIT (411개)는 소백산맥 지역과 서해안, 남해안 지역에서 주로 발생한 것을 알 수 있다. MOG의 경우 발생 빈도수가 극히 적기 때문에(57개), 집중적으로 MOG가 발생한 지역들을 구분하기 어렵지만, 내륙 지역보다 해안 주변에서 많이 발생한 것을 알 수 있었다(Fig. 8b).

Figure 9는 12 km × 12 km 수평해상도를 갖는 기상청의 지역 예보 및 분석시스템인 Regional Data Assimilation and Prediction System (RDAPS)의 수평 격자 안에 포함되는 낙뢰 자료들의 전체 분석 기간 누적 개수를 계절별로 나타낸 것이다. 예상한 대로 대

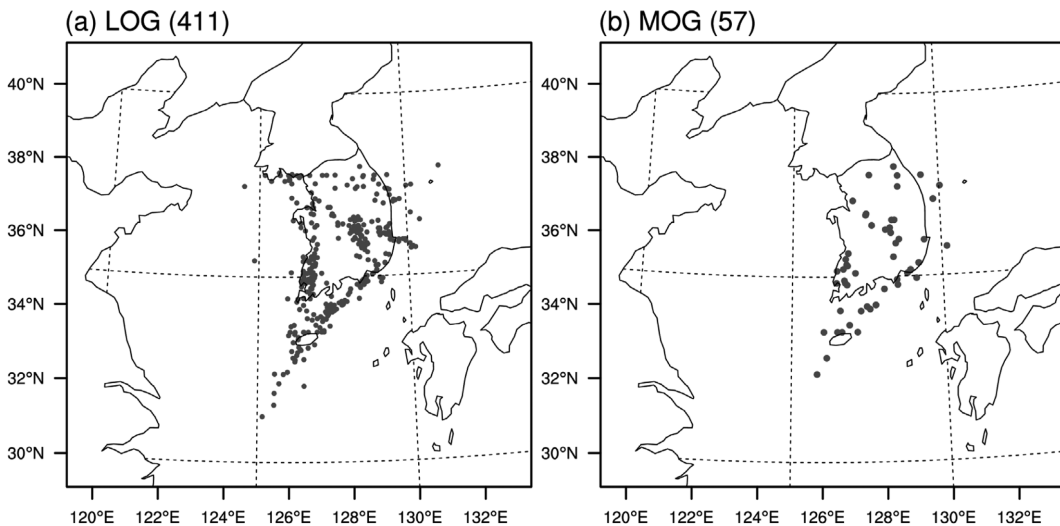


Fig. 8. The same as in Fig. 5, except for the CIT turbulence events.

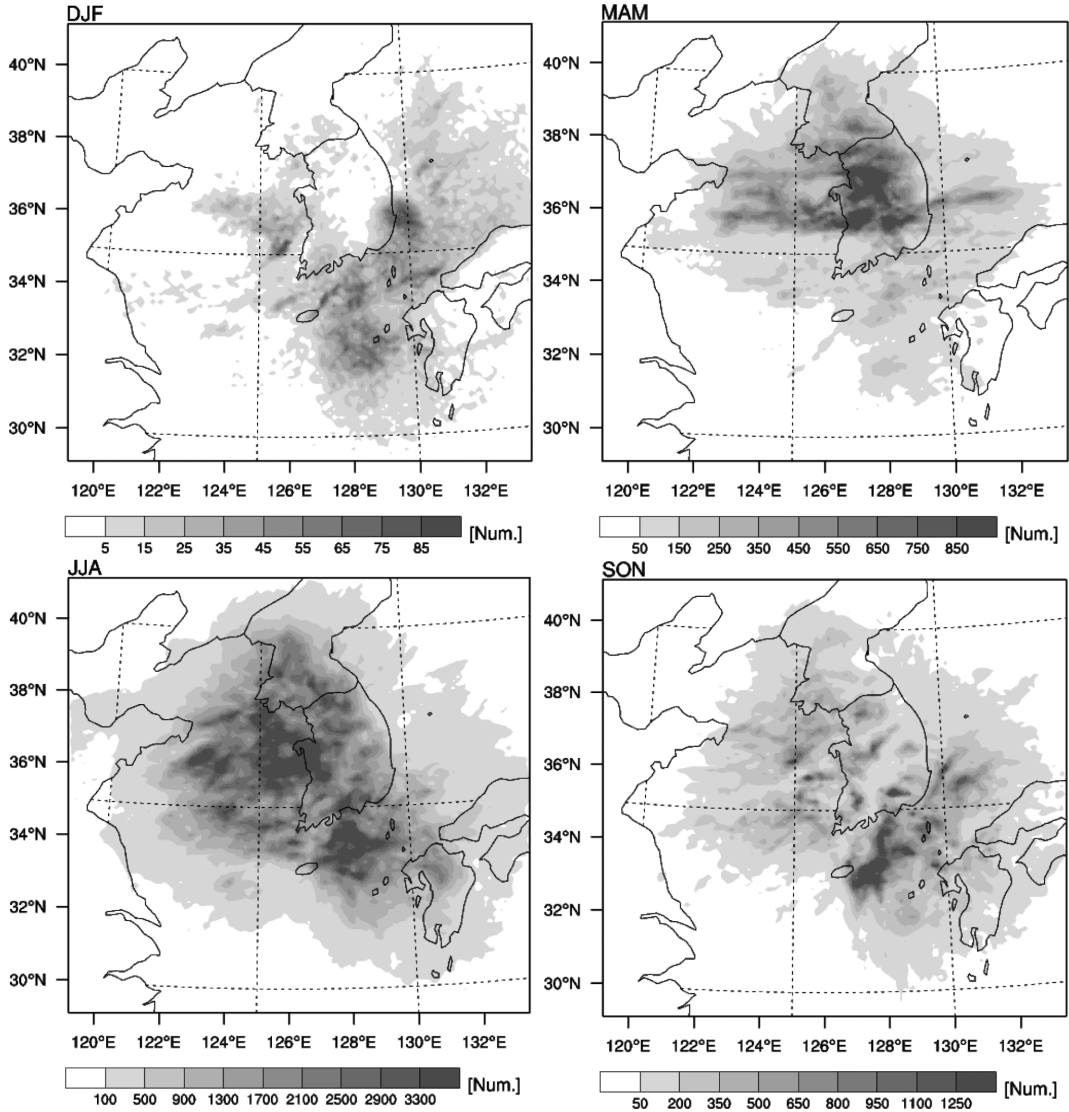


Fig. 9. Horizontal distributions of lightning over South Korea by each season from 2003 to 2012.

류 시스템이 한반도에 가장 영향을 많이 끼치는 여름철(JJA)에 월등히 높은 발생 빈도수를 보였고, 발생된 영역 역시 가장 광범위하였다. Figure 8에서 살펴본 CIT의 수평 분포도와 같이 서해안과 남해안 근처에서 특히나 낙뢰가 많이 발생하였고, 이 값은 그 다음 낙뢰 최대 발생 계절인 가을철(SON)의 최대 발생 지역보다 3배 가까이 차이가 나는 값이다. 봄철(MAM)에 발생한 낙뢰의 경우 최대 발생 지역들이 다른 계절과 달리 내륙지역들에서 보여졌으며, CIT가 해양 지역뿐 아니라 내륙 지역에서도 발생이 잦을 수 있다는 것을 보여준다. 한반도에 대류시스템 영향이 가장 적은 겨

울철(DJF)의 경우, 낙뢰가 역시 가장 적게 발생하였고, 특히 내륙 지역에서는 거의 발생하지 않았다.

4. 동아시아 지역에서 발생한 항공난류의 시공간적 분석

현재 항공 기상청에서 현업 중인 KTG 시스템은 한반도 지역뿐만 아니라 일본, 북서 태평양 지역을 포함하는 동아시아 지역까지 난류를 예보하고 있기 때문에, 동아시아 지역에서 발생한 항공 난류의 특성을 조사하고자 한다. 사용한 자료는 한반도 내 PIREP 자

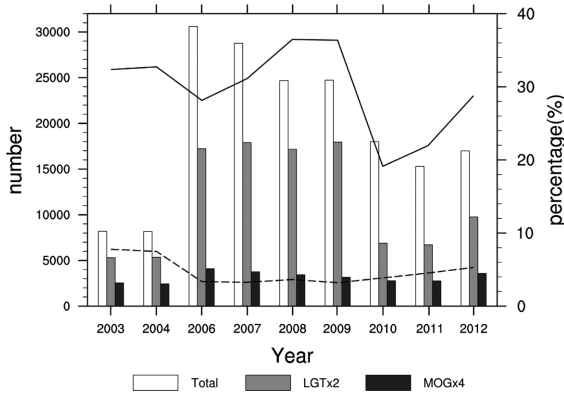


Fig. 10. The same as in Fig. 1, except over East Asia.

료의 기간과 같은 2003~2012년 동안의 한국 항공기 상청과 미국 NCAR로부터 입수한 PIREP 자료이다.

Figure 10은 동아시아 지역에서 관측된 전체 PIREP과 LGT, MOG의 시간에 따른 경향성을 보여준다. 전체 PIREP의 개수는 2003년, 2004년에는 극히 작았지만, 2006년도에 4배 가까이 증가하였고, 그 이후로 점차 감소하는 경향을 보였다. LGT와 MOG의 개수 역시 2006년부터 2009년까지는 이전 연도들보다 증가한 경향을 보였으나, 2010년에 다시 감소하였다. 각 연도별 전체 PIREP 개수에 대한 상대적인 발생 비율에 대해서는 LGT(실선)의 경우, 증감하는 추세가 계속적으로 보였으며, MOG(점선)의 경우, 2003년부터 2006년까지는 감소하다가 그 이후로는 점차 증가하는 추세를 보였다. LGT의 상대적 비율이 2008년에 최대가 되는 것은 한반도의 경우(Fig. 1)와 같았으나, 전반적인 변화추세는 한반도의 그것과는 다소 차이가 있었다. Table 3과 마찬가지로, 동아시아 영역에서 발생한 MOD와 SEV의 연도별 발생 빈도수를 Table 5에 따로 정리하였다. MOD는 전체 PIREP의 개수가 급격히 증가한 2006년부터 2010년까지 지속적으로 감소하는 경향을 보였다가 그 이후 증가하였으며, SEV는 2003년부터 2008까지 발생 빈도수가 증가하는 경향을 보이다가 그 이후 다시 감소하였다.

Figure 11은 9년 동안 동아시아 지역에서 발생한 LGT, MOG의 월별 발생 분포도를 나타낸다. Figure 2에서 한반도 영역에서 발생한 LGT, MOG의 경우, 봄철(MAM)과 겨울철(DJF)에 많이 발생하고, 여름철(JJA)에 가장 적게 발생한 것을 확인하였다. 이러한 결과와는 다르게 동아시아 지역에서 발생한 항공 난류의 경우, LGT는 여름철(JJA)과 가을철(SON)에, MOG는 봄철(MAM)과 가을철(SON)에 많이 발생하였고, 겨울철(DJF)에는 오히려 두 강도의 난류 모두 가장 적게 발생한 것을 알 수 있다. 이 연구에서 조사한 동

Table 5. Annual frequencies of MOD, and SEV categories of aviation turbulence obtained from PIREPs over East Asia from 2003 to 2012.

Year	Turbulence intensity	
	Moderate (MOD)	Severe (SEV)
2003	596	9
2004	561	9
2005	485	16
2006	884	84
2007	795	84
2008	672	118
2009	661	82
2010	600	21
2011	615	15
2012	800	44

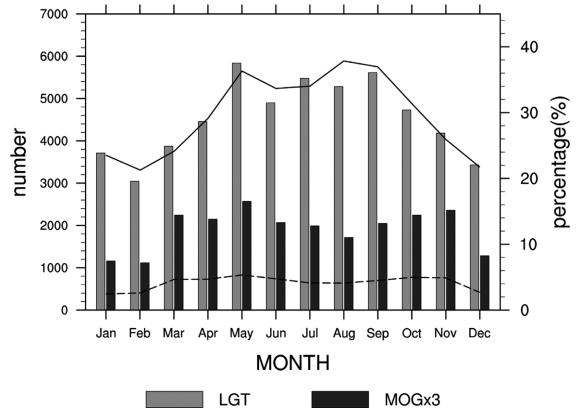


Fig. 11. The same as in Fig. 2, except over East Asia.

아시아 지역(Fig. 12 참고)의 경우, 북서 태평양 영역을 포함하기 때문에 겨울철(DJF)보다 대류 시스템으로 인한 난류의 발생이 높은 여름철(JJA)에 그 빈도수가 높은 것으로 보여진다. LGT와 MOG는 특히 5월달에 가장 많이 발생했으며, 그 다음으로 9월달과 11월달에 LGT와 MOG가 각각 최대의 빈도수를 보였다. 상대적인 비율의 경우, LGT는 8월에(37.84%), MOG는 5월에(5.33%) 가장 높게 나타났다.

Figures 12a와 b는 각각 한반도 영역을 포함한 동아시아 지역에서 발생한 LOG와 MOG의 수평적 분포도를 보여준다. 앞에서 언급했듯이, 한반도 영역을 제외한 동아시아 지역에서의 PIREP의 경우, NCAR에서 수집한 자료를 사용하였기 때문에, 미국과 동아시아 국가들 사이를 오고 가는 운항 경로를 따라서 난류 발생이 기록되었다. 본 연구에서 고려한 동아시아 영역은 구체적으로 북위 12.227°~52.892°, 동경 101.584°~173.805°로, 기상청 현업 RDAPS 영역과 일치한다. 한

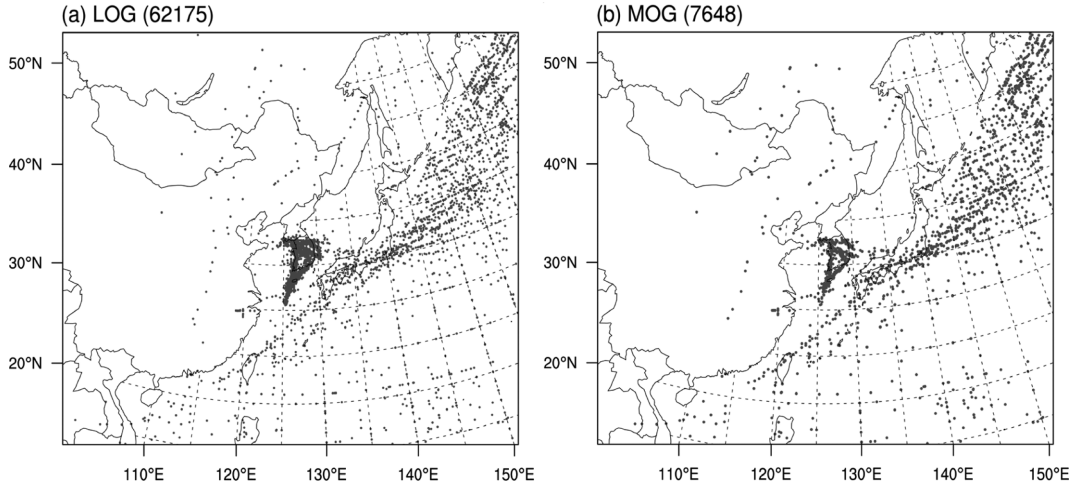


Fig. 12. The same as in Fig. 5, except over East Asia.

반도 영역을 제외하고, LOG와 MOG가 러시아와 일본 근처 북서 태평양 지역에서 주로 발생한 것을 알 수 있으며, 특히 일본의 남동 해안 지역과 캄차카 반도 지역 근처에서 그 난류 발생 빈도가 다른 지역들에 비해 밀집되어 나타나는 것을 알 수 있다.

5. 요약 및 결론

항공 산업이 발전함에 따라 항공사에 막대한 손실과 피해를 가져다 주는 항공 난류 예보의 필요성도 증가하고 있다. 특히 한국과 중국, 일본 등 동아시아의 위상이 전세계적으로 나날이 높아지면서 동아시아 지역을 오고 가는 상업 비행기의 수는 증가하고, 아시아 국가들의 항공 산업은 계속해서 커지고 있다. 따라서 한반도 및 동아시아 지역에서 발생한 항공 난류의 특성에 관한 조사는 항공 산업 관련 전문가에게 유용한 정보로 사용될 것이다. 본 연구에서는 항공 난류의 특성을 조사하기 위해, 2002년 12월부터 2012년 11월까지의 PIREP 자료를 한국 항공기상청과 미국 기상연구소(NCAR)로부터 수집하여 우리나라 및 동아시아 상공에서 발생한 항공난류의 시·공간적 분포를 분석하였다.

한국에서 발생한 항공 난류의 경우, 약 강도(LGT)의 난류는 2006년을 제외한 2003년부터 2009년까지 증가하다가 2010년에 감소하였고, 그 이후 다시 조금씩 증가하는 경향을 보였다. 중 강도 이상(MOG)의 난류는 2009년을 제외한 2003년부터 2010년까지 계속적으로 증가하다가 그 이후 조금씩 감소하는 경향을 보였다. 각 월별 PIREP에서 LGT 강도의 난류 발생은 5월, 3월, 2월에 가장 빈번하게 나타났으며, 이

러한 결과는 겨울철과 봄철에 한반도 상공의 강한 제트류와 그에 따른 연직바람시어가 한반도 영역 내 항공 난류 발생에 영향을 크게 미치기 때문으로 보여진다. MOG 강도의 난류는 봄철, 겨울철뿐만 아니라 여름철에도 빈번히 발생하였으며, 이는 또 다른 난류 발생의 주요 원인인 태풍, 장마와 같은 대류 시스템이 여름철에 한반도에 영향을 끼치기 때문으로 분석된다. 수평적 분포도 조사를 통해서도 한반도 영역 내의 난류 발생은 국내 주요 운항로를 따라서 보여지며, 특히 서해안, 남해안, 태백산맥, 소백산맥 지역에서 주로 발생한 것을 확인하였다.

PIREP과 같은 기간에 대해 항공 기상청의 낙뢰자료를 이용하여, 대류 시스템과 관련하여 발생한 난류(CIT)를 PIREP으로부터 분류하였고, 이러한 CIT에 대한 시·공간적 분포에 대해 조사하였다. CIT의 연도별 발생 분포를 조사한 결과, LGT 강도의 CIT는 2003년부터 2012년까지 2008년과 2011년을 제외하고 증가하는 추세를 보였으며, MOG 강도의 CIT는 2003년부터 2007년까지 계속적으로 증가하다가 2008년도에 감소하고, 다시 2010년까지 증가하다가 2011년도에 감소하는 증감의 추세를 반복적으로 보였다. CIT의 계절성을 알아보기 위한 월별 분포에서는 LGT, MOG 강도의 CIT들 모두 대류 시스템과 관련 있는 여름철에 가장 많이 발생하였으며, 특히 몬순 시스템과 태풍이 한반도 영역에 영향을 끼치는 7월과 8월에 CIT 발생 빈도수가 다른 달들에 비해 월등히 높게 나타났다.

한국 항공 기상청에서 현업 중인 한국형 항공 난류 예측(KTG) 시스템의 경우, 한반도뿐만 아니라 동아시아 지역까지 예보 구역으로 포함하고 있기 때문에, 한국 항공 기상청의 PIREP과 미국 NCAR에서 입수한

자료를 합쳐서 2002년 12월부터 2012년 11월까지의 동아시아 지역에서 발생한 항공 난류의 시·공간적 분포를 살펴보았다. 연도별 발생 분포에서는 동아시아 지역에서 발생한 LGT, MOG 모두 2006년부터 2009년까지 2003년과 2004년에 비해 증가한 경향을 보이다가 2010년도에 다시 감소하였고, 그 이후로는 계속적인 증가 추세를 보였다. 동아시아 지역에서 발생한 LGT와 MOG는 각각 여름철과 봄철에 가장 높은 빈도수를 보였고, 겨울철에는 두 강도의 난류 모두 최소의 빈도수를 보였다. 이러한 결과는 겨울철에 많이 발생하고, 여름철에 가장 적게 발생한 한반도 영역에서의 항공 난류와 상반된 결과로, 이 연구에서 다루는 동아시아 지역이 북서태평양을 포함하기 때문에 대류 시스템과 관련한 난류 발생이 여름철의 높은 난류 발생 빈도수에 영향을 끼친 것으로 보여진다. 수평적 분포에서는 한반도 지역을 제외하고 일본과 러시아 해안을 따라 북서 태평양 지역에서 난류가 많이 발생한 것을 확인하였으며, 특히 일본의 남동쪽 해안과 캄차카 반도 지역에서 밀집되어 나타난 것을 알 수 있었다.

한국 항공 기상청의 PIREP과 미국 NCAR의 PIREP은 Fig. 12에서 볼 수 있듯이 중국에서 발생한 항공 난류의 자료가 결여되어 있는 상태이다. 경제 강국으로 떠오르고 있는 중국인만큼, 항공 산업에 있어서도 중국의 위상은 나날이 높아지고 있다. 중국 영역 내에서의 PIREP 자료를 추가적으로 사용하게 된다면, 동아시아 지역에서의 항공 난류 특징 분석뿐만 아니라 한국형 항공 난류 예측(KTG) 시스템의 개선 및 검증에 크게 기여할 것이다. 중국의 PIREP 자료 확보를 위해 국제 협력이 절실히 요구된다.

감사의 글

이 연구는 기상청 기상기술개발사업(CATER 2012-2011)의 지원으로 수행되었습니다. 한반도를 제외한 지역의 PIREP 자료를 제공해 주신 미국 NCAR의 Robert Sharman 박사님께 감사드립니다.

REFERENCES

- Dutton, J. A., and H. A. Panofsky, 1970: Clear air turbulence: A mystery may be unfolding. *Science*, **167**, 937-944.
- Dutton, M. J. O., 1980: Probability forecasts of clear-air turbulence based on numerical output. *Meteor. Mag.*, **109**, 293-310.
- Ellrod, G., and D. Knapp, 1992: An objective clear-air turbulence forecasting technique: Verification and operational use. *Wea. Forecasting*, **7**, 150-165.
- Gill, P. G., 2014: Objective verification of world area forecast centre clear air turbulence forecasts. *Meteor. Appl.*, **21**, 3-11.
- Jaeger, E. B., and M. Sprenger, 2007: A Northern Hemispheric climatology of indices for clear air turbulence in the tropopause region derived from ERA40 reanalysis data. *J. Geophys. Res.*, **112**, D20106, doi:10.1029/2006JD008189.
- Kaplan, M. L., A. W. Huffman, K. M. Lux, J. J. Charney, A. J. Riordan, and Y.-L. Lin, 2005: Characterizing the severe turbulence environments associated with commercial aviation accidents. Part 1: A 44-case study synoptic observational analyses. *Meteor. Atmos. Phys.*, **88**, 129-152.
- _____, and Coauthors, 2006: Characterizing the severe turbulence environments associated with commercial aviation accidents. A real-time turbulence model (RTTM) designed for the operational prediction of hazardous aviation turbulence environments. *Meteor. Atmos. Phys.*, **94**, 235-270.
- Kim, J.-H., and H.-Y. Chun, 2011a: Statistics and possible sources of aviation turbulence over South Korea. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **50**, 311-324.
- _____, and _____, 2011b: Development of the Korean mid- and upper-level aviation Turbulence Guidance (KTG) system using the regional unified model. *Atmosphere*, **21**, 497-506 (in Korean with English abstract).
- _____, and _____, 2012: Development of the Korean Aviation Turbulence Guidance (KTG) system using the operational Unified Model (UM) of the Korea Meteorological Administration (KMA) and Pilot Reports (PIREPs). *J. Korean Soc. Aviat. Aeron.*, **20**, 76-83.
- _____, _____, W. Jang, and R. D. Sharman, 2009: A study of forecast system for clear-air turbulence in Korea, Part II: Graphical Turbulence Guidance (GTG) system. *Atmosphere*, **19**, 269-287 (in Korean with English abstract).
- Koch, P., H. Wernli, and H. W. Davies, 2006: An event-based jet-stream climatology and typology. *Int. J. Climatol.*, **26**, 283-301.
- Lester, P. F., 1994: *Turbulence: A New Perspective for Pilots*. Jeppesen Sanderson, 212 pp.
- Lane, T. P., T. L. Clark, and H.-M. Hsu, 2003: An investigation of turbulence generation mechanisms above deep convection. *J. Atmos. Sci.*, **60**, 1297-1321.
- _____, R. D. Sharman, S. B. Trier, R. G. Fovell, and J. K.

- Williams, 2012: Recent advances in the understanding of near-cloud turbulence. *Amer. Meteor. Soc.*, **93**, 499-515.
- National Transportation Safety Board, 2009: U.S. Air Carrier Operations, Calendar Year 2005. Annual review of aircraft accident data. NTSB/ARC-09/01, Washington, DC, 66 pp.
- Pantley, K. C., and P. F. Lester, 1990: Observations of severe turbulence near thunderstorm tops. *J. Appl. Meteor.*, **29**, 1171-1179.
- Sharman, R., C. Tebaldi, G. Wiener, and J. Wolff, 2006: An integrated approach to mid- and upper-level turbulence forecasting. *Wea. Forecasting*, **21**, 268-287.
- _____, L. B. Cornman, G. Meymaris, J. Pearson, and T. Farrar, 2014: Description and derived climatologies of automated in situ eddy-dissipation-rate reports of atmospheric turbulence. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **53**, 1416-1432.